



كتيب بشأن علم الفلك الراديوي



طبعة 2013
مكتب الاتصالات الراديوية

كٲب

علم الفلك الراديوي

الطبعة الثالثة

طبعة عام 2013

مكتب الاتصالات الراديوية

صورة الغلاف: ستة هوائيات متماثلة قطر كل منها 22 متراً تكوّن صفيّف تليسكوبات مترابطة في أستراليا، منظمة الكومنولث للبحوث العلمية والصناعية، وهي عبارة عن تليسكوب تجميعي مرتبط بدوران الأرض موجود في مرصد بول وايلد.

التصوير: دايفيد سميث.

© ITU 2015

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي وسيلة كانت إلاّ بإذن خطي مسبق من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

مقدمة الطبعة الثالثة

بقلم رئيس فرقة العمل 7D

التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية

(علم الفلك الراديوي)

إنه لمن دواعي الاعتزاز والامتنان أن أقدم الطبعة الثالثة من كتيب "علم الفلك الراديوي"، وتغميني سعادة بالغة وأنا أفعل ذلك.

ليس المقصود من هذا الكتيب أن يكون مرجعاً في علم الفلك الراديوي، بل يُقصد منه بصورة رئيسية أن يتناول جوانب الفلك الراديوي ذات الصلة بتنسيق الترددات، أي إدارة استخدام طيف الترددات بغية تخفيف التداخل بين خدمات الاتصالات الراديوية. ولا تنطوي أنشطة الفلك الراديوي على إرسال موجات راديوية في نطاقات الترددات المخصصة لتشغيلها، كما لا يمكن أن تتسبب في تداخل ضار بالخدمات الأخرى. ومن ناحية أخرى، فإن الإشارات الكونية الواردة بالغة الضعف عادةً، ويمكن أن تتداخل الإرسالات من الخدمات الأخرى مع هذه الإشارات.

ويقدم الكتيب للقارئ في فصوله الاثني عشر وتذييلاته الخمسة الفلك الراديوي بوصفه خدمة من خدمات الاتصالات الراديوية بغرض تنسيق الترددات. ويُستهل بتمهيد عن علم الفلك الراديوي والمجتمع، يُبيّن فيه دور الفلك الراديوي وفوائده للمجتمع، وهو ما يتجاوز عادةً نطاق الفلك. ثم يتناول الكتيب مجالات مثل خصائص الفلك الراديوي، ونطاقات الترددات التي يُفضل إجراء عمليات الرصد فيها، والتطبيقات الخاصة بالفلك الراديوي، وقابلية التعرّض لتداخل الترددات الراديوية من الخدمات الأخرى، والمسائل المرتبطة بتقاسم الطيف الراديوي مع خدمات أخرى. وقد أُضيفت فصول إضافية في هذه الطبعة الثالثة تتناول تقنيات تخفيف آثار تداخل الترددات الراديوية، وإنشاء مناطق الصمت الراديوي وخصائصها، وعمليات البحث عن معلومات من خارج الأرض، والفلك الراديوي إنطلاقاً من الأرض. كما أُضيفت تذييلات جديدة لشرح استخدام الوحدات وتدرجات الديسيبل في الفلك الراديوي، إلى جانب قائمة مستفيضة من المختصرات.

لقد مضى زهاء عشر سنوات منذ أن نُشرت الطبعة الثانية من كتيب "علم الفلك الراديوي". وفي تلك الأثناء، عقد الاتحاد الدولي للاتصالات ثلاثة مؤتمرات عالمية للاتصالات الراديوية (WRC-2003 و WRC-2007 و WRC-2012).

وفي هذه الفترة، حدثت طفرة حقيقية في تطور خدمات الاتصالات، وأصبحت الخدمات اللاسلكية متغلغلة في جميع أنشطة مجتمعنا المتعدد التوصيل. ومكنت التطورات التكنولوجية في علم الفلك الراديوي في ذات الوقت عمليات الرصد على نطاقات ترددات واسعة جداً، لا تشملها غالباً توزيعات الاتحاد الدولي للاتصالات. وتمثل هذه التطورات تحدياً أمام حماية الفلك الراديوي، مما استوجب استطلاع طرائق جديدة. وتخضع التقنيات الجديدة لتخفيف تداخلات الترددات الراديوية لتطوير مستمر، وحُدّدت مناطق الصمت الراديوي باعتبارها الأماكن الوحيدة على الكوكب التي تمارس فيها أنشطة الفلك الراديوي بأدنى قدر من التداخل. وقد تناول الاتحاد الدولي للاتصالات هذه التطورات في التقارير الجديدة المستفيضة الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية.

ويعمل الفلك الراديوي الآن أيضاً في النطاقات فوق 275 GHz، بفضل مرصد الصفييف الملليمتر/دون الملليمتر الكبير في أتاكاما (ALMA) في أمريكا الجنوبية، الذي بدأ نشاطه في عام 2013. وهذه النطاقات لم تكن مشمولة بتوزيعات الاتحاد التقليدية، بيد أن المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية لعام 2012 أوضح استخدام هذه النطاقات في الخدمات المنفصلة دون استبعاد تطوير خدمات نشيطة. وبيّنت الدراسات أن التقاسم بين الخدمات يكون سهلاً نسبياً في هذه الترددات العالية.

وبدأت فرقة العمل 7D التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية، قبيل انعقاد المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية لعام 2012، مراجعة الكتيب التي استغرقت عامين. وفرقة العمل 7D ضمن لجنة الدراسات 7 (خدمات العلوم) في قطاع الاتصالات الراديوية مسؤولة عن الفلك الراديوي وعمليات البحث عن المعلومات من خارج الأرض والفلك الراداري. وتعيّن على فرقة العمل 7D أن تقوم بمراجعة توصيات وتقارير قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة بحماية خدمات الفلك الراديوي، إلى جانب قيامها في نفس الوقت بما يلزم من مراجعة الكتيب والتوسع فيه. ويتجسّد في هذه الطبعة الثالثة نجاح الجهود التي بذلها أعضاء فرقة العمل هذه.

وأود أن أشيد بالجهود الكبيرة التي بذلها فريق صغير من بضعة أفراد ما كان لهذا الكتيب أن يرى النور لولا مشاركتهم. وإنني مدين على وجه الخصوص لأعضاء فرقة العمل 7D الواردة أسماؤهم أدناه (بالترتيب الأبجدي):

- الدكتور أوهيشي (اليابان)، الدكتور بان (هولندا)، الدكتور جيسنر (ألمانيا)،
- الدكتور جيرجلي (الولايات المتحدة الأمريكية)، الدكتور دافيس (الولايات المتحدة الأمريكية)، الدكتور فان دريل (فرنسا)،
- الدكتور كليغ (الولايات المتحدة الأمريكية)، الدكتور لانغستون (الولايات المتحدة الأمريكية)، الدكتور لويس (الولايات المتحدة الأمريكية)،
- الدكتور ليست (الولايات المتحدة الأمريكية)، الدكتور شونغ (كوريا)، الدكتور توماسون (المملكة المتحدة).

وساهم أيضاً في هذا الكتيب: الدكتور رومني (الولايات المتحدة الأمريكية)، الذي أعاد، بالتفصيل، كتابة الأجزاء عن القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI)، والدكتور لوفيل (أستراليا) الذي ساهم في الجزء عن التداخل الجيوديسي ذي خط الأساس الطويل جداً، والدكتور تابنغ (كندا) الذي راجع الجزء عن الفلك الشمسي. وقدمت أمانة قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد مساعدة كبيرة، ولا سيما مستشار لجنة الدراسات 7، السيد فاديم نوزدين، والأمانة بقيادة السيدة إليزابيث موستين-جونز. وأود أخيراً أن أعرب عن خالص تقديري إلى رئيس لجنة الدراسات 7، الدكتور فنسنت مينس ونائب الرئيس المسؤول عن الكتيب، الدكتور جون روزيك، على مواصلة التشجيع وتقديم الدعم خلال إنجاز هذا العمل.

وأشكر جميع من ساهم في العمل وأتمنى أن يلقي كتيب الفلك الراديوي كل النجاح.

أناستاسيوس تسيوميس
رئيس فرقة العمل 7D التابعة لقطاع
الاتصالات الراديوية في الاتحاد

تصدير

أعدّ كتيب علم الفلك الراديوي خيراً في فرقة العمل 7D التابعة للجنة الدراسات 7 (خدمات العلوم) في قطاع الاتصالات الراديوية، برئاسة الدكتور تسويميس (أستراليا)، رئيس فرقة العمل 7D.

يؤدي علم الفلك الراديوي دوراً أساسياً في دراسة المشكلات في علمي الفيزياء والكون الأساسيين. والكثير من الظواهر التي يتناولها لا يمكن دراستها في الأجزاء الأخرى من الطيف الكهرمغناطيسي. ومن بعض الأمثلة على ذلك: خط إرسال الهيدروجين الذري المحايد؛ وإشعاع الخلفية الكونية بالموجات الصغيرة وبنيتة الزاوية، وله أهمية هائلة في علم الكون؛ والمجالات الواسعة للإشعاع بواسطة السنكروترون المرتبط بالمجرات الراديوية؛ ومناطق تكون النجوم التي يحجبها الغبار في الترددات البصرية. ومن الممكن، باستخدام الترددات الراديوية، تحقيق أقصى استبانة زاوية ودقة في القياس فيما يخص الأوضاع الزاوية والخطوط الطيفية وزحزحات دوبلر. ولهذا السبب، فإن الفلك الراديوي ليس مجرد مكمل للنهج البصرية التقليدية بل يؤدي دوراً هاماً في البحوث في العديد من مجالات الفلك والفيزياء الفلكية.

وبالإضافة إلى ذلك، فإن علم الفلك الراديوي، مثله مثل أي علم من العلوم الأساسية الأخرى، يحفز التطور في الفروع الأخرى. ويرجع الفضل إلى الفلك الراديوي في التطور الذي شهدته المستقبلات المنخفضة الضوضاء والهوائيات التي تمكننا من استخدام هوائي واحد لالتقاط إشارات استقطابات مختلفة. وتُطبق حالياً بنجاح في أنظمة الاتصالات المتنقلة من نوع واي فاي النُهج التي وُضعت في علم الفلك الراديوي للحد من الصدى الراديوي. وقد طُوّرت واعتمدت أسس نظرية الملاحة الراديوية، المستخدمة اليوم في طائفة من النظم، في إطار علم الفلك الراديوي. وأسفرت الحاجة إلى تناول قدر ضخم من البيانات في الفلك الراديوي عن تحسّن كبير في أتمتة معالجة البيانات، بما في ذلك وضع نُهج خاصة بمعالجة البيانات بالتوازي ولغات البرمجة الجديدة. وفي المجال الطبي، أسفر علم الفلك الراديوي عن استحداث التشخيص بالأشعة السينية والتصوير المقطعي المحوسب.

ويبيّن كل ما ورد أعلاه أهمية الاعتراف بالطيف المستخدم في علم الفلك الراديوي وحمايته على الصعيد العالمي. ويمثّل هذا الكتيب للقارئ مصدر معلومات مفيدة جداً عن إدارة استخدام الطيف الراديوي بغية خفض التداخل الذي تتعرض له هذه الخدمة القيّمة.

فرانسوا رانسي

مدير مكتب الاتصالات الراديوية

جدول المحتويات

الصفحة

iii	.....	مقدمة الطبعة الثالثة بقلم رئيس فرقة العمل 7D التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية (علم الفلك الراديوي)	
v	.....	تصدير	
1	.....	تمهيد - علم الفلك الراديوي والمجتمع	
1	.....	1.0 مقدمة لعلم الفلك	
1	.....	2.0 دور علم الفلك الراديوي	
4	.....	3.0 القيمة الاقتصادية والاجتماعية	
4	.....	1.3.0 مقدمة	
4	.....	2.3.0 القيمة الاقتصادية والاجتماعية لبحوث الفلك الراديوي	
8	.....	4.0 الرصد الراديوي للشمس	
8	.....	1.4.0 مقدمة	
9	.....	2.4.0 لمحة عن الرصد الراديوي للشمس	
10	.....	3.4.0 الأثر والقيمة الاجتماعية	
10	.....	آثار الطاقة الشمسية على السوائل	
11	.....	آثار الأيونوسفير	
11	.....	الآثار المغناطيسية الأرضية على النظم الأرضية	
12	.....	5.0 الاتجاهات في خدمات الفلك الراديوي	
12	.....	6.0 الخلاصة	
13	.....	الفصل 1 - مقدمة	
13	.....	1.1 قطاع الاتصالات الراديوية والمؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية	
14	.....	2.1 لوائح الراديو وتوزيعات الترددات	
15	.....	3.1 الفلك الراديوي كخدمة اتصالات راديوية	
17	.....	4.1 مشاكل توزيع الترددات لخدمة الفلك الراديوي	
19	.....	الفصل 2 - خصائص خدمة الفلك الراديوي	
19	.....	1.2 خدمة الفلك الراديوي	
19	.....	2.2 أصل الإرسالات الراديوية الكونية وطبيعتها	
20	.....	3.2 الإشعاع المتواصل	
22	.....	1.3.2 التغيرات الزمنية للإشعاع المتواصل	
25	.....	2.3.2 قياس الإشعاع المتواصل	
29	.....	4.2 إشعاع الخطوط الطيفية	
29	.....	1.4.2 أنواع الخطوط الطيفية	
30	.....	2.4.2 قياس الخطوط الطيفية	

31	.....	الممارسة الحديثة	5.2
32	.....	الخلاصة	6.2
34	.....	الفصل 3 - نطاقات التردد المفضلة لعمليات الرصد الفلكية الراديوية	
34	.....	اعتبارات عامة	1.3
34	.....	1.1.3 عمليات الرصد الفلكية الراديوية القائمة على الأرض	
35	.....	2.1.3 عمليات الرصد الفلكية الراديوية القائمة في الفضاء	
36	.....	النطاقات المتواصلة المفضلة	2.3
37	.....	1.2.3 عمليات الرصد عند ترددات منخفضة	
38	.....	2.2.3 نطاقات التردد العالية من أجل عمليات الرصد المتواصلة	
38	.....	نطاقات لعمليات رصد الخطوط الطيفية	3.3
44	.....	الفصل 4 - قابلية تأثر رصدات الفلك الراديوي بالتداخل	
44	.....	مقدمة	1.4
44	.....	الاعتبارات الأساسية في حساب سويات التداخل	2.4
44	.....	1.2.4 معيار السوية الضارة من التداخل	
45	.....	2.2.4 مخطط استجابة الهوائي	
46	.....	3.2.4 زمن التوسيط (زمن التكامل)	
47	.....	4.2.4 النسبة المئوية من خسارة الزمن بسبب التداخل	
47	.....	3.4 حساسية نظم الفلك الراديوية والقيم العتبية للتداخل الضار	
47	.....	1.3.4 اعتبارات نظرية	
48	.....	2.3.4 تقديرات سويات الحساسية والتداخل الضار	
50	.....	4.4 استجابة مقاييس التداخل والصفائف للتداخل الراديوي	
54	.....	5.4 النجوم النابضة	
55	.....	6.4 درجات الحساسية المحققة	
56	.....	7.4 مناقشة التداخل	
56	.....	1.7.4 سويات التداخل	
56	.....	2.7.4 التداخل من مصادر فلكية	
56	.....	3.7.4 اعتبارات خاصة بشأن مرسلات السواتل في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض	
57	.....	4.7.4 الترشيح	
58	.....	5.7.4 سويات التداخل القادرة على إتلاف أو إشباع مستقبل فلك راديوي	
58	.....	8.4 تحليل مونتي كارلو	
60	.....	الملحق 1 بالفصل 4	
62	.....	الفصل 5 - تقاسم نطاقات خدمة الفلك الراديوي مع الخدمات الأخرى	
62	.....	1.5 ملاحظات عامة	
62	.....	1.1.5 معايير حماية خدمة الفلك الراديوي	

الصفحة

64	..... مسافات التباعد المطلوبة للتقاسم مع مرسل وحيد (انظر التوصية ITU-R RA.1031)	2.5
65	..... التقاسم ضمن خط البصر	3.5
66	..... التقاسم مع خدمات لها مرسلات للأرض	4.5
66	..... التقاسم مع الخدمات المتنقلة	5.5
67	..... التقاسم في نطاقات خدمة الفلك الراديوي دون 40 GHz	6.5
69	..... النطاق 1 427-1 330 MHz	1.6.5
69	..... النطاق 5 000-4 800 MHz	2.6.5
69	..... النطاقان 22,5-22,21 و 22,21-22,01 GHz	3.6.5
70	..... التقاسم في نطاقات الفلك الراديوي فوق التردد 40 GHz	7.5
70	..... التقاسم ما بين 60 و 275 GHz	1.7.5
70	..... التقاسم فوق التردد 275 GHz	2.7.5
74	..... التقاسم مع أبحاث الفضاء السحيق	8.5
74	..... التقاسم الزمني	9.5
74	..... تنسيق التقاسم الزمني والتقاسم الترددي	1.9.5
76	..... الفصل 6 - التداخل في خدمة الفلك الراديوي من مرسلات في نطاقات أخرى	
76	..... مقدمة	1.6
76	..... تعاريف مقتطفة من لوائح الراديو	1.1.6
76	..... تعاريف إضافية	2.1.6
78	..... آليات التداخل من المرسلات في نطاقات أخرى	3.1.6
78	..... حدود الإرسالات غير المطلوبة من خدمات نشطة	2.6
78	..... الحدود ضمن مجال البث الهامشي	1.2.6
80	..... الحدود ضمن البث خارج النطاق	2.2.6
80	..... الحدود على الإرسالات غير المطلوبة من الخدمات النشطة لحماية نطاقات الفلك الراديوي	3.2.6
81	..... أداء مستقبلات خدمة الفلك الراديوي	3.6
81	..... ترشيح التداخل في حواف النطاقات	1.3.6
83	..... الآثار غير الخطية والتشكيل البيئي	2.3.6
84	..... الخطية	3.3.6
85	..... الترشيح والرقمنة	4.3.6
85	..... التداخل من مرسلات لخدمات في نطاقات أخرى	4.6
85	..... الخدمات التي قد تسبب في تداخل في خدمة الفلك الراديوي عبر نطاقات مجاورة أو آليات توافقية	1.4.6
85	..... الانتقال إلى التلفزيون الرقمي وأثره على استخدام خدمة الفلك الراديوي، دون حماية، للنطاقات المستخدمة للبث التلفزيوني للأرض	2.4.6
86	..... التداخل من الإرسالات الساتلية	3.4.6
90	.....

95	الإرسالات غير المطلوبة من تشكيل النطاق العريض	5.6
95	استخدام التشكيل الرقمي عريض النطاق	1.5.6
96	تكوين شكل النبضات لتخفيض الإرسالات غير المطلوبة	2.5.6
96	مثال للتداخل من تشكيل عريض النطاق	3.5.6
	مثال: تداخل راديوي من نظام IRIDIUM (HIBLÉO-2) في الخدمة	4.5.6
97	المتنقلة الساتلية	
100	الاستنتاجات	6.6
102	الفصل 7 - التقنيات الخاصة والتطبيقات ومواقع الرصد	
102	مقدمة	1.7
103	تقنية القياس VLBI، بما في ذلك في الفضاء	2.7
103	تقنية VLBI في الفضاء	1.2.7
106	التطبيقات الجيوديسية باستخدام تقنية VLBI	2.2.7
107	خدمة الفلك الراديوي من نقطة Lagrange L ₂ شمس-أرض	3.7
108	رصدات الفلك الراديوي من المنطقة المحجوبة من القمر	4.7
109	المنطقة المحجوبة من القمر	1.4.7
109	الأمداء الطيفية المفضلة للرصدات من القمر	2.4.7
110	تنظيم استخدام المنطقة المحجوبة من القمر	3.4.7
111	المواقع على الأرض حيث امتصاص الغلاف الجوي منخفض	5.7
111	القارة القطبية الجنوبية	1.5.7
111	Cerro Chajnantor، شيلي	2.5.7
111	Mauna Kea، هاواي	3.5.7
112	Mt. Graham، أريزونا	4.5.7
112	رصدات النجوم النابضة وتطبيق معايير التوقيت	6.7
112	النجوم النابضة بمثابة مقياسات معيارية	1.6.7
112	النجوم النابضة بمثابة نقاط إحداثيات مرجعية	2.6.7
113	الرصد الشمسي	7.7
115	الفصل 8 - تخفيف التداخل	
115	مقدمة - الأهداف	1.8
115	توقع مصادر التداخل الراديوي وأثرها	2.8
116	منهجيات تخفيف التداخل الراديوي - طبقات التخفيف	3.8
117	الطرائق الاستباقية - تغيير بيئة التداخل الراديوي	4.8
117	الكشف السابق والكشف اللاحق	5.8

الصفحة

118	..... الترابط السابق	6.8
118	..... 1.6.8 المعالجة الرقمية القائمة على الهوائي	
118	..... 2.6.8 إلغاء الضوضاء التكيفي (الزميني)	
119	..... 3.6.8 الترشيح المكاني والتوجيه الصفري	
119	..... عند الارتباط	7.8
120	..... الارتباط اللاحق - قبل التصوير أو بعده	8.8
120	..... التنفيذ في التليسكوبات	9.8
121	..... الخلاصة	10.8
123	..... الفصل 9 - مناطق الصمت الراديوي	
123	..... مقدمة	1.9
123	..... 1.1.9 التعريف والمتطلبات العامة لمنطقة صمت راديوي	
123	..... 2.1.9 دور التنظيم	
124	..... الاعتبارات التي تراعى في تحديد منطقة صمت راديوي	2.9
124	..... 1.2.9 الاعتبارات الجغرافية	
124	..... 2.2.9 مدى الترددات	
124	..... 3.2.9 أثر التداخل على رصدات الفلك الراديوي	
124	..... البيئة الكهرومغناطيسية	3.9
125	..... 1.3.9 المشعّات المتعمّدة	
125	..... 2.3.9 المشعّات غير المتعمّدة	
126	..... 3.3.9 انتشار إشارات التداخل	
126	..... طرائق تحديد منطقة صمت راديوي	4.9
126	..... 1.4.9 طرائق جانب المستقبل	
127	..... 2.4.9 طرائق جانب المرسل - إدارة منطقة صمت راديوي	
129	..... الآثار المترتبة على إنشاء منطقة صمت راديوي	5.9
129	..... 1.5.9 الحفاظ على مناطق الصمت الراديوي	
129	..... 2.5.9 الاعتبارات على المدى الطويل	
131	..... الفصل 10 - عمليات الاستطلاع خارج الأرض باستخدام رصدات راديوية	
131	..... مقدمة	1.10
132	..... قابلية الكشف عن الاشارات في عمليات الاستطلاع خارج الأرض	2.10
133	..... شدة الاشارة	3.10
133	..... حساسية نظم الاستقبال	4.10
134	..... 1.4.10 قدرة الإشارة الدنيا القابلة للكشف	
136	..... اتجاه تسديد الهوائي	5.10
138	..... إستبانة الإشارة ورفض التداخل	6.10
138	..... النطاقات المرشحة التي يتعين استطلاعها	7.10

الصفحة

140	.....	الفصل 11 - الفلك الراداري على الأرض
140	.....	1.11 مقدمة
143	.....	2.11 مسائل الحساسية
143	.....	3.11 الأساليب التشغيلية والمتطلبات من عرض النطاق
144	.....	4.11 مرافق الفلك الراداري
146	.....	التذييل 1 - جدول نطاقات التردد الموزعة إلى الفلك الراديوي
149	.....	التذييل 2 - تسجيل محطات الفلك الراديوي
151	.....	التذييل 3 - الوحدات المستخدمة في علم الفلك الراديوي
154	.....	التذييل 4 - الاستعمالات العملية لمقياس dB
156	.....	التذييل 5 - قائمة المختصرات

تمهيد

علم الفلك الراديوي والمجتمع

1.0 مقدمة لعلم الفلك

يشير علم الفلك أسئلة عن تكوين الأجرام فيما أبعد من الغلاف الجوي للأرض، مثل الشمس والكواكب والمذنبات والنجوم والمجرات والمواد المتناثرة في الفضاء، وعن الكون نفسه، وعن تطور هذه الأجرام ودينامياتها وخصائصها الأخرى. ويلتمس هذا الفضول إجابات عن بعض التساؤلات الكبرى التي تتبادر إلى ذهن الانسان، مثل "كيف بدأ الكون (أو هل بدأ)؟"؛ "وما حجمه؟"؛ "وكم عمره؟" و"كيف سينتهي (أم هل سينتهي)؟". وعلى غرار العلوم التي تخبرنا عن مكاننا ومكان كوكبنا بالنسبة إلى الكون، يؤدي علم الفلك دوراً تثقيفياً حيويًا للبشرية جمعاء. إذ غدت الاكتشافات الحديثة، مثل الثقوب السوداء والأجرام السماوية النائية، جزءاً بالفعل من لغتنا اليومية.

ومن الناحية العملية مباشرة، أرسى علم الفلك معالم هامة في طريق تطور البشرية، من قبيل التقويم الذي تتبعه ونظام ضبط الوقت. والحق إن الكثير من الرياضيات المستخدمة يومياً، مثل المثلثات واللوغاريتمات وحساب التفاضل والتكامل، هي من ثمار البحث في مجال الفلك، وكذا أيضاً أمر العديد من أسس علم الإحصاء.

ويرقب علماء الفلك كامل الطيف الكهرومغناطيسي الذي يمكن النفاذ إليه، والذي يمتد بعيداً جداً إلى ما وراء المجال المنظور أو "البصري". وينطوي كل نطاق ترددي على ما لديه من أسرار، ويتطلب عادةً أنواعاً شتى من أجهزة التليسكوب والكاشفات الخاصة به. ويدرس علماء الفلك الراديوي الأجسام التي تُرسل الطاقة أو تمتصها في ترددات ضمن الطيف الراديوي؛ وفيما يخص الدراسات على الأرض فإنها تُجرى عندما يكون الغلاف الجوي شفافاً جداً في المدى من 13 MHz إلى 2 000 GHz.

وقدّمت خدمة الفلك الراديوي (RAS)، إلى جانب مساهمتها في علم الفلك نفسه، مساهمات ذات أثر كبير في مجالات العلوم والتكنولوجيا الأخرى من خلال النواتج الثانوية لنشاطها. فقد حدّدت مثلاً الامتصاص الجوي للموجات الراديوية، الأمر الذي له أهمية خاصة في الاتصالات. وما فتئت احتياجاتها السباقية تستلهم تطوير المستقبلات المنخفضة الضوضاء. وهي من ثم تواصل المساهمة في القاعدة التكنولوجية التي انطلقت منها الخدمات الأخرى، من قبيل صناعة الاتصالات الساتلية. وكان من شأن شراة خدمة الفلك الراديوي لاستهلاك القدرة الحاسوبية أن دفعت إلى تطوير العديد من أوائل الحواسيب الإلكترونية، كما أن الرغبة في تحقيق قدر أكبر من الحساسية حفزت على تقديم مساهمات كبيرة في كل من مجالي تصميم أنظمة التغذية والهوائيات الكبيرة القابلة للتوجيه. والحق إن الرغبة الدائمة في الحصول على أجهزة أفضل ما زالت تدفع عجلة التقدم في مجالات شتى، مثل الإلكترونيات والهندسة الميكانيكية وعلوم الحاسوب.

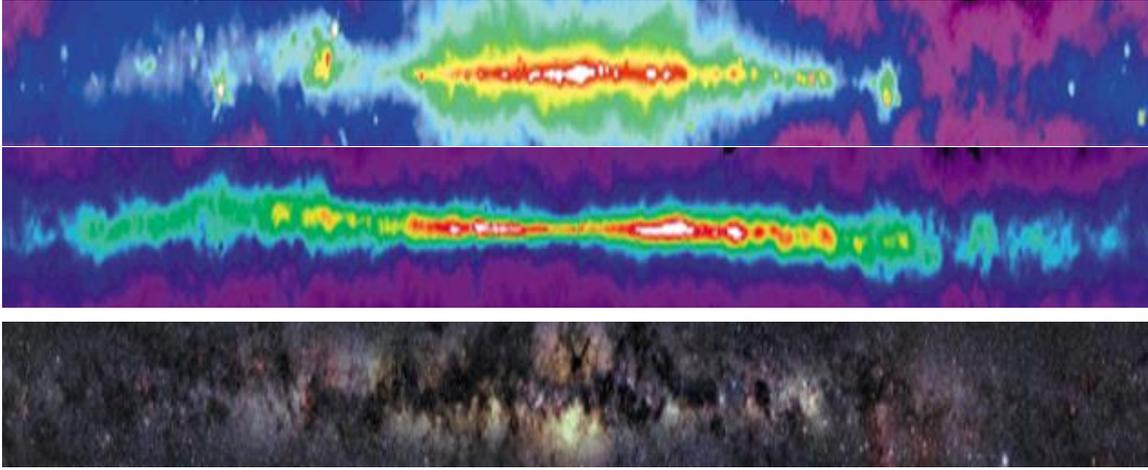
2.0 دور علم الفلك الراديوي

إن بعض مكونات هذا الكون لا يمكن دراستها إلا من خلال بصماتها من حيث الترددات الراديوية. وهذا هو بصفة خاصة حال أكثر المكونات المادية وفرة، وهو الهيدروجين المحايد (HI)، الذي لا يمكن الكشف عنه إلا بواسطة خطه الطيفي 1 420 MHz. وجددير بالإشارة إلى أنه حالما تحدّد توزّع الهيدروجين المحايد في مجرة درب التبانة لكوكب الأرض (انظر الشكل 1.0) أمكن نهائياً تحديد موقع مركز المجرة، ورُسمت أذرعها الحلزونية بشكل واضح لا لبس فيه، كما حدّد أن كوكبنا النائي يقع في ذراع حلزونية خارجية. وكل هذا جوانب أساسية في البيئة المباشرة للبشر في المجرة. وكانت الرصدات الراديوية ضرورية لتكملة العمل البصري الذي أُجري سابقاً، إذ إن الغبار ما بين النجوم يحجب مركز المجرة في أطوال الموجات البصرية، بينما تمكّن زحزحات دوبلر السهلة القياس الخاصة بانبعثات الهيدروجين المحايد من تحديد توزّع مركز المجرة على طول خط البصر. وبيّن تحديد الإشعاع المتواصل لمجرتنا، بمجرد أن يُعرف موقع مركز المجرة بدقة، أن مركز المجرة يتطابق مع مصدر راديوي قوي جداً، تبيّن من العمل الذي أُجري مؤخراً بشأن الأشعة القريبة من تحت الحمراء أنه ثقب أسود هائل الضخامة. وهذا مثال بليغ يبيّن أن علم الفلك الراديوي يشكل

في نفس الوقت جزءاً لا يتجزأ من البحوث في مجال الفلك عموماً ومصدر معلومات مكماً لعمليات الرصد التي أجريت في أطوال موجات أخرى في الطيف الكهرمغناطيسي.

الشكل 1.0

المستوي الأوسط لمجرتنا، ويظهر مركز المجرة في الوسط. ويبيّن الإطار العلوي البنية الراديوية المتواصلة في تردد 408 MHz. ويبيّن الإطار الأوسط انبعاثات الهيدروجين المحايد المتكامل في التردد 1 420 MHz. ويبيّن الإطار السفلي المنطقة الوسطى في الضوء البصري ويظهر فيه بنى الغبار الداكنة

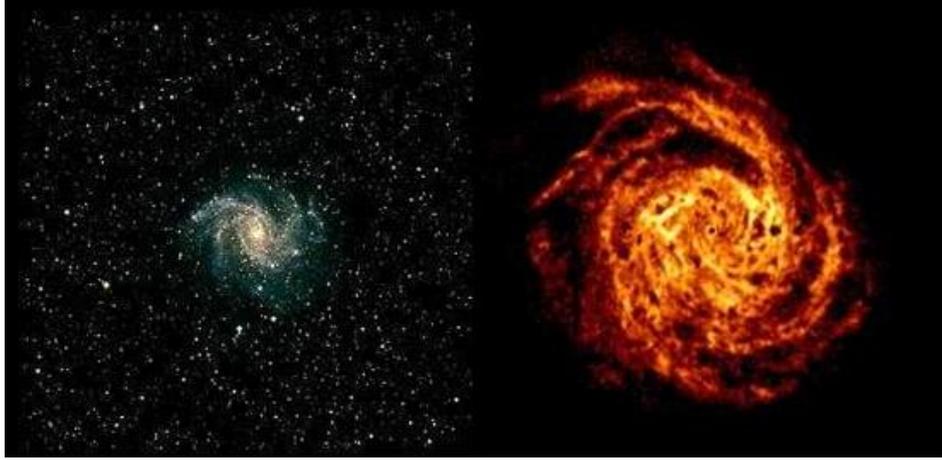


Radio-Astro_01

ويمكن من خلال الصور الفوتوغرافية البصرية تمييز عددٍ كبير من المجرات الأخرى في الفضاء ما وراء مجرتنا. وبما أن الهيدروجين المحايد هو أحد المكونات التي تزخر بها هذه المجرات، فيمكن بسهولة كشفه في المجرات القريبة، ونتيجة لذلك يمكن دراسة سرعة انحسار كل منها وحركتها الداخلية. وهذا يمكن من الحصول على توزعاتها ثلاثية الأبعاد في الفضاء وتقديرات دقيقة لكتلتها. وبينما تستخدم الأجهزة البصرية وأجهزة الأشعة القريبة من تحت الحمراء في دراسة العديد من خصائص المجرات، يتعيّن استخدام التقنيات الراديوية لدراسة توزع الغاز فيها. ويبيّن الشكل 2.0 هذا الجانب بمقارنة حجم المجرة القريبة الساطعة كما تبدو في صورة بصرية مع البنية الأكبر بكثير التي يكشف عنها الهيدروجين المحايد. بيد أن رصدات أول أكسيد الكربون في التردد 115,271 GHz تفضي تماماً إلى عكس ذلك، إذ يتركز أول أكسيد الكربون حوالي المركز. ويحدث هذا الفرق في توزع الهيدروجين المحايد وأول أكسيد الكربون نتيجة للاحتراق النووي للهيدروجين داخل النجوم لينتج عناصر أثقل مثل الكربون والأكسجين اللذين ينتشران بعد ذلك في الفضاء بين النجوم. وبما أن كثافة النجوم تكون على أشدها في المنطقة الوسطى من المجرة، فإن ذلك ينطبق أيضاً على نواتجها الثانوية.

الشكل 0.2

يظهر وجه المجرة NGC 6946 في ضوء مرئي (يسار) وفي خط انبعاث الهيدروجين المحايد¹ في التردد 1 420 MHz (يمين) في نفس المقياس. ويبيّن انبعاث الهيدروجين المحايد بني أزرع حلزونية كبيرة تمتد بعيداً جداً إلى ما وراء الصورة البصرية وتكشف ديناميات المجرة. وترتبط في العديد من المواضع (لا سيما "الثقوب" في التوزع) تدفقات الغاز عالية السرعة بالتكوّن الجاري للنجوم. بيانات راديوية من التليسكوب الراديوي التجميعي في ويستربورك، هولندا



Radio-Astro_02

وقد عُثِر على مصادر راديوية عديدة نتيجة لعمليات المسح المتواصلة التي أُجريت مبكراً للسماء في الترددات الراديوية. ثم بدأ بعد ذلك التنافس على تحديد المميّزات البصرية لها. وكان من بين أكثر الأشياء إثارةً للدهشة اكتشاف أزواج من المصادر الراديوية موزعة في مسافات متساوية في الغالب على جانبي نقيض بعض المجرات، الأمر الذي يشير إلى وجود مناطق ضخمة لإرسال راديوي مرتبطة بها لكنها منفصلة عنها تماماً كما يبدو في الصور البصرية. وبفضل تحسن تقنيات الأدوات وإجراء دراسات في ترددات أعلى، غدا من الواضح أن مناطق الإرسال هذه هي عبارة عن بقايا نفاثات نسبية إلى حد كبير منبعثة من النوى المجرية. وهي أيضاً سمة للأجرام السماوية النائية، التي تعتبر الآن ثقوباً سوداء بالغة الضخامة تلتحم في مراكز المجرات التي تستضيفها. وتعد النفاثات النسبية التي تتطلب دراستها عموماً تقنيات راديوية موضوعاً متكرراً في علم الفلك الحديث، إذ إن الفيزياء التي تنطوي عليها غير مفهومة تماماً، بالإضافة إلى حدوثها عند التهام كتلة ما التحاماً نشطاً مع جسم كثيف، سواء كان ذلك الجسم ثقباً أسود بالغ الضخامة أم كان ثقباً أسود بحجم النجم، نجم نيوتروني، أم حتى لباً منحللاً لنجم عادي.

وقد ساهم علماء الفلك الراديوي مساهمةً كبيرة في فهمنا للكون بصفته كياناً. وبدأ ذلك في عام 1964 باكتشاف الخلفية الكونية من الموجات الصغرية (CMB) شبه المتناحية، وبفضل هذا الاكتشاف مُنحت جائزة نوبل لعام 1978، وكانت الجائزة الثانية التي تُمنح لعالم في الفلك الراديوي. وتبين عمليات الرصد المتواصلة للسماء في الترددات ما بين 30 GHz و 300 GHz أن الخلفية الكونية من الموجات الصغرية لها درجة حرارة لمعان مقدارها 2,73 K. وتعزى الخلفية الكونية من الموجات الصغرية إلى الإشعاع الحراري المنبعث من الغاز المتأين الذي ملاً الكون مباشرة بعد نشأته جراء "الانفجار الكبير"، أي منذ أن أضحى الكون لأول مرة عاتماً بالنسبة إلى الإرسال الراديوي. وهي أول إشارة "متحجرة" أمكن رصدها. وباكتشافها، غدا نموذج "الانفجار الكبير" هو الوصف الإجمالي المقبول لتاريخ كوننا وأزال نموذج "الحالة الثابتة" من ساحة الجدال. وفي عام 1992 أفضت عملية مسح للخلفية الكونية من الموجات الصغرية في كل السماء أُجريت باستخدام أجهزة على متن سواتل إلى الكشف عن بصمة دوبلر لحركة الأرض/الشمس/المجرة بالنسبة إلى الخلفية الكونية من الموجات الصغرية وكذلك عن وجود فروقات ضئيلة بين نقطة وأخرى (بضعة

Boomsma, R., Oosterloo, T. A., Fraternali, F., Van Der Hulst, J. M., Sancisi, R., Astronomy and Astrophysics, 490, 1
555 (2008).

أجزاء من 10⁵). في درجة حرارة لمعناها. وأشادت جائزة نوبل لعام 2006 بأهمية هذه القياسات التاريخية. بيد أن القياسات الأكثر حساسية للبنية الحرجة في شدتها كانت فاتحة عهد جديد في علم الكون الدقيق، وذلك بصقل المعلمات الكونية التي تصف الكون وتوفير تأكيد مستقل بتزايد وتيرة تسارعه، الأمر الذي لم يكن متوقعاً في بادئ الأمر. ومن المتوقع أن تستفيد البعثات الساتلية في المستقبل من خصائص استقطاب الخلفية الكونية من الموجات الصغرية.

وانتقالاً من المقياس الكبير جداً إلى المقياس الصغير جداً، جرى في عام 1934 التنبؤ بوجود النجوم النيوترونية، وذلك في أعقاب اكتشاف النيوترون. وتم الاعتراف باكتشافها عن طريق الرصد في عام 1967 في شكل مصادر راديوية سريعة النبض (النجوم النابضة) عندما مُنحت جائزة نوبل في عام 1974 لعلماء الفلك الراديوي لأول مرة. ومن الفرص الكبيرة التي أتاحتها النجوم النابضة أنها أصبحت بمثابة مختبرات للفيزياء الأساسية. وثمة مجموعة معينة من النجوم النابضة، تدور سريعاً جداً في فترات مقدارها مئليثانية، يمكن أن تصبح بمثابة مقياسات في غاية الدقة. وبعضها يدور حول جسم مصاحب؛ ومن شأن توليفة من مقياسات دقيقة في مدار قريب حول جسم مصاحب، سواء أكان نجماً نيوترونياً أم نجماً قزماً أم نجماً اعتيادياً، أن تمكن من تحديد مدارات وكتل نابضة بالغة الدقة، وكذلك إجراء اختبار مكثف للعديد مما تنبأت به نظرية "النسبية العامة". وقد وفر الوصف الذي أتاحتته نظرية النسبية العامة لتطور مدار أول نجم نابض اكتشف في نظام نجمي ثنائي أول برهان على تخمين وجود إشعاع موجي جذبي، مُنحت اعترافاً به جائزة نوبل في عام 1993. وفي عام 1992 تم تمييز أول كوكب اكتشف خارج النظام الشمسي من خلال تأثيره على الحل الذي وفره نجم نابض فيما يخص التوقيت.

وتختلف تفاصيل الفيزياء التي تطبق داخل نجم نيوتروني باختلاف كتلته، ولذا تصبح المعادلات المستخدمة في وصف مادته النووية أكثر تعقيداً كلما ازدادت كتلته. وتقترب كتلة معظم النجوم النابضة من حد الكتلة الشمسية البالغ 1,4 الذي وضعه تشاندراسيخار. ولا غرابة في أن ينصب الاهتمام بصورة كبيرة على اكتشاف الأجسام التي تبلغ كتلتها الشمسية 2 أو تزيد عنها، إذ إن محض وجودها يضيّق المعادلات الممكن استخدامها فيها، بما أن من المتوقع تأثرها بأمزاج من مواد ذات أشكال غريبة في مراكزها. وليس هنالك من وسائل أخرى لاختبار الفيزياء التطبيقية. وعلى ذات المنوال، يمكن اختبار الفيزياء التي يتعدّد الوصول إليها خلاف ذلك من خلال عمليات رصد مجموعة نادرة من النجوم النابضة، وهي النجوم المغنطيسية. ولهذه النجوم مجالات مغنطيسية فائقة الشدة ليس بمقدورنا إنتاجها في المختبرات. وتجري حالياً، في مجال بحثي آخر، حملة علمية مكثفة لاستخدام رصدات التوقيت من مجموعة من نجميات نابضة بسرعة مئليثانية في كل السماء على أمل الكشف مباشرة عن موجات جاذبية في مدى ترددات نانوهرتز.

3.0 القيمة الاقتصادية والمجتمعية

1.3.0 مقدمة

يصعب تقييم القيمة الاقتصادية لاستخدام طيف الترددات الراديوية في البحوث العلمية وتطبيقاتها من خلال تحديد تكاليفها وفوائدها بشكل كميّ فحسب مقارنةً باستخدام بديل للطفيف. ويتعيّن أيضاً النظر في المنافع غير المباشرة التي تعود على الاقتصاد بفضل علم الفلك الراديوي. وقد دخلت الابتكارات التقنية لعلماء الفلك الراديوي حيز التنفيذ في الكثير من التطبيقات التي تعود بالفائدة على المجتمع ككلّ. فعلى سبيل المثال تظهر الآثار العرضية للبحوث في مجال مستقبلات الفلك الراديوي (انظر البند 1.2.3.0) في تجهيزات الاتصالات المتخصصة وكذلك في التطبيقات الاستهلاكية المنتجة على مقياس واسع. ويصعب أيضاً تقدير الفوائد الاقتصادية والمجتمعية لخوارزميات التصوير الطبي التي استخرجت أساساً من تقنيات التصوير الفلكي الراديوي (انظر البند 4.2.3.0).

2.3.0 القيمة الاقتصادية والمجتمعية لبحوث الفلك الراديوي

يعتمد تقدّم الفلك الراديوي على التقدّم الحرز في تكنولوجيا المستقبلات والتكنولوجيا الرقمية. وكقاعدة عامة، تُستخدم أجهزة الفلك الراديوي التكنولوجية الأكثر تقدماً ويؤدّي علماء الفلك دوراً فعالاً في الدفع بذلك نحو حدّه العملي الأقصى. وتقدم البنود الفرعية التالية أمثلة لأنشطة بحوث الفلك الراديوي التي دُجّحت ضمن تطبيقات تتمتع بقيمة مجتمعية أخرى.

1.2.3.0 تكنولوجيا الاتصالات

نظم الاستقبال

تشمل نظم الفلك الراديوي هوائيات عالية الكسب ومستقبلات منخفضة الضوضاء ومذبذبات متينة ومضاعفات للتردد. وقد ساهمت متطلبات الفلك الراديوي في تحفيز أو تشجيع تطوير مضخمات معلمية ومضخمات ترانزستور بتأثير المجال (FET) مبردة تبريداً شديداً بزرنيخيد الغاليوم (GaAs) ومضخمات ترانزستور تنقلية إلكترونية عالية (HEMT) ومخاليط نظام معلومات الفضاء (SIS). وأدت أعمال التطوير هذه إلى إنتاج مستقبلات تعمل في عروض نطاقات واسعة للغاية وفي درجات حرارة شديدة التديني تصل إلى 2 K. وتبلغ درجة حرارة الضوضاء في بعض الترددات حالياً ما يناهز الحدّ الكومومي لما هو ممكن من الناحية التقنية. وتستخدم هذه التكنولوجيات بعض نظم الاتصالات الأكثر تعقيداً في الفضاء السحيق، وتجري مزامنة مذبذباتها المحلية على مستوى دون البيكوثانية وفقاً لمعايير التردد الذري. وتستخدم هذه المعايير بمثابة العمود الفقري لنظام ضبط الوقت لنظامي الملاحاة الأرضي والفضائي.

مبدأ التماثل

من العوائق الكبرى التي تواجه تصميم هوائيات مكافئية كبيرة جداً قابلة للتوجيه ولها سطوح عاكسة دقيقة هو التشوه الناجم عن الجاذبية الأرضية الذي يغيّر شكل الهوائي عندما ينتقل من موقع إلى آخر. وقد حُلّت هذه المسألة في عام 1967 بالهجو إلى مبدأ التماثل². والهوائي المصمّم وفقاً لهذا المبدأ يتعرّض لتشوه بسيط تحت تأثير الجاذبية ضمن سلسلة أجسام شبه مكافئية مع تغيرات ناجمة عنها في الموقع البؤري. وبمجرد الحرص على تعقّب المستقبل ونظام تغذيته لهذا التغيّر في الموقع البؤري، تتراجع آثار التشوه الناجم عن الجاذبية وما ينجم عنها من خسارة للإشارة إلى مستواها الأدنى. وصارت كلّ الهوائيات المكافئية الكبيرة والعاكسة تستفيد من مبدأ التماثل. ويتسم ذلك بأهمية قصوى لدى العمل في أطوال موجات ملليمترية.

تكنولوجيا الهوائيات

كان علماء الفلك الراديوي أول من استخدم أبواق التغذية المستقطبة دائرياً. وبعد ذلك استخدمت المرسلات الساتلية هذا التطوّر التقني لإرسال الاستقطابين بشكل مستقلّ من خلال بوق التغذية نفسه، مما حقق وفورات في كلّ من كتلة الحزمة والحيز الذي تشغله.

2.2.3.0 تكنولوجيا قياس التداخل

طوّر علماء الفلك الراديوي قياس التداخل لزيادة الاستبانة الزاوية وكذلك لاستخدامه كتقنية تصوير. وبعد ذلك استخدموه لإجراء مسح مرقمنة للسماء الراديوية قائمة على بكسيل وحيد. ويصف الفصل 7 هذه التقنية التي اكتسبت أهمية في علم الفلك على امتداد الطيف الكهرمغناطيسي وكذلك في الألياف البصرية وعلم القياس الهندسي وعلم القياس البصري وعلم البحار والمحيطات وعلم الزلازل والميكانيكا الكومومية والفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات وفيزياء البلازما والاستشعار عن بُعد.

وكان علماء الفلك الراديوي أول من طوّر تقنيات إعادة بناء الصور وتنظيفها لإزالة (معظم) الآثار الناتجة من الأجهزة والبيئة عن الصور. وتستخدم هذه الوسائل في كل من المسوح الأرضية والساتلية للسموات وكذلك في خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EES) في مسح كوكب الأرض.

وفي الجزء الأخير من القرن العشرين، استخدمت أنظمة قياس التداخل الراديوي على نطاق واسع لتسهيل الهبوط الأوتوماتي للطائرات. وبالفعل، أعدّ النظام أولاً في مختبر لعلم الفلك الراديوي ثم بيع على نطاق واسع في شتى أنحاء العالم. وتستخدم التكنولوجيا نفسها حالياً لتحديد مواقع مستخدمي الهواتف المتنقلة لكي تستجيب خدمات الطوارئ بسرعة للحوادث، ولكي تُقدّم خدمات تسويق هادفة وغيرها من الخدمات المتعلقة بالمواقع. وتعدّ شبكة واي فاي اللاسلكية مثلاً بارزاً للغاية لنظام تشغيلي.

² .Von Hörner, S.: "Design of large steerable antennas", The Astronomical Journal, 72 (1967), 35

تطبيقات شبكة واي فاي

كانت الانعكاسات تشكل صعوبة كبيرة أمام تطوير توصيلات لاسلكية بين مطاريف الحواسيب، ذلك لأنّ سلسلة من الأصداء تتبع وصول الإرسال إلى المستقبل. وكان علماء الفلك الراديوي واعين جداً لهذه المشكلة ومن ثم استحدثوا تقنيات متطورة لمعالجة الإشارات من أجل تخطي قضايا مشاهدة ناجمة عن الانعكاسات في الغلاف الجوي. وترسل شبكات المنطقة المحلية الراديوية بياناتها بترددات مختلفة ويُعاد تجميع هذه الإشارات في المستقبل بالطريقة نفسها المعتمدة في الفلك الراديوي.

الملاحظة

ساهم الفلك الراديوي، على مدى العصور، بشكل كبير في تقدم الملاحظة أرضاً وجوّاً. وسمحت نظم الراديو السدسية للملاحظة البحرية بتحديد المواقع بطريقة دقيقة في الأيام الغائمة أو الممطرة. ويستند تطبيق حديث العهد لقياس التداخل الراديوي من أجل تحديد موقع الهوائيات المنقلة في حالة الطوارئ باستخدام تقنية تعددية الأضلاع إلى شدة إشارة صواري الهوائيات المجاورة. وتحدّد هذه التقنية موقع الأجسام من خلال حوسبة الفارق في وقت الوصول (TDOA) لإشارة صادرة من جسم ما إلى ثلاثة مستقبلات أو أكثر. ويمكن استخدامها أيضاً في تحديد موقع مستقبل من خلال قياس الفارق في وقت وصول إشارة مُرسلة من ثلاثة مرسلات متزامنة أو أكثر.

3.2.3.0 تكنولوجيا الحوسبة

وضع علماء الفلك الراديوي تقنيات رقمية متطورة لربط بيانات التليسكوبات وتسجيلها. وتُستخدَم صفائف الحواسيب عالية القدرة (معالجة متوازية) الحديثة لمعالجة كميات ضخمة جداً من البيانات المستقاة من شبكات قياس التداخل. ويشكّل كلٌّ من التوليف متعدد الحزم المتأون، وتخفيف تداخلات التردد الراديوي في الوقت الفعلي وإعادة بناء تشكيلات معقدة من مصادر الراديو أمثلة على قدرة المعالجة الحديثة. وبالفعل، فإنّ معالجة بيانات الفلك الراديوي لربط تدفق البيانات من الهوائيات في أربع قارات في الوقت الفعلي تُستخدَم كاختبار في تطوير مقدرّة شبكة بيانات النطاق العريض الواسعة.

لغة الحاسوب FORTH

من الفوائد غير المباشرة الواضحة جداً لعلم الفلك الراديوي هي لغة الحاسوب "فورث" (FORTH أو Forth) التي وضعها المرصد الوطني للفلك الراديوي (NRAO) في الولايات المتحدة في مطلع السبعينيات. وكان أول تطبيق لهذه اللغة هو التحكم ومعالجة البيانات من أجل أحد تليسكوبات المرصد. وتُستخدَم لغة "فورث" حالياً في تطبيقات كثيرة، مثل أوائل الحواسيب المحمولة باليد التي استخدمها موظفو التوزيع في شركة Federal Express ولا تزال تُستخدَم اليوم بأشكالها المتطورة. وتشمل التطبيقات الأخرى برمجية تتبّع ساتلي وبرمجية محاكاة للذراع التي بُنيت في كندا، وهي محمولة على متن 'مكوك الفضاء' ويبلغ طولها 50 قدماً وتتألف من ستّة مفاصل. واستُعملت هذه الذراع في عمليات إطلاق الساتل واستعادته وفي مساعدة رواد الفضاء في مهام الصيانة (مثل تصليح وتحديث التليسكوب الفضائي Hubble)³.

4.2.3.0 التكنولوجيا الطبية

بادر علماء الفلك الراديوي إلى تنفيذ تقنيات رياضية أدت إلى إعادة بناء صور ذات بُعدين من عمليات مسح أحادية البعد، وإعادة بناء صور ثلاثية الأبعاد من صور ذات بُعدين⁴. ودُججت تقنيات إعادة بناء الصور هذه في التصوير المقطعي الحوسبي الحديث، والتصوير المقطعي بالبتّ البوزيتروني (PET)، والتصوير بالرنين المغنطيسي. وعمليات الرصد الراديوي لمصادر كونية نائية هي في الأساس قياسات لحرارة هذه المصادر، وقد جرى تكييف هذه التقنية لإجراء عمليات قياس غير اقتحامية لحرارة الأنسجة البشرية.

³ لمزيد من المعلومات الكاملة عن استعمال لغة فورث، انظر مثلاً الموقع: <http://www.forth.com/index.html>

⁴ Bracewell, R.N. and Riddle, A.C.: "Inversion of fan beam scans in radio astronomy", *Astrophys. Journal*, **150**, 427

والتصوير المقطعي المحوسب هو طريقة تصوير طبي تُستخدَم فيها الحواسيب الرقمية لتوليد صور ثلاثية الأبعاد لداخل الأجسام من سلسلة كبيرة من صور أشعة سينية ذات بعدين التُقطت حول محور دوران واحد.

وتظهر الأورام الخبيثة في صور الموجات الصغرية للأنسجة العميقة كمناطق ذات حرارة غير عادية ويمكن كشفها مباشرةً. ويُستخدَم التصوير الحراري بالموجات الصغرية بمعدل حساسية تشخيص يبلغ 96% لكشف سرطان الثدي.

سرطان الجلد

من التحديات الكبرى التي تواجه علماء الفلك الذين يدرسون النجوم والمجرات هو استخراج معلومات مفيدة من خليط من الإشارات. ونظراً إلى أن علماء الفلك الراديوي كانوا علماء الفلك الأوائل الذين عالجوا البيانات الرقمية، فقد طوروا الخوارزميات المستخدمة في التقاط إشارات ضعيفة من خلفية من "الضوضاء" العشوائية. وقد ساعدت هذه الخوارزميات علماء فلك آخرين على تحديد آلاف مصادر الأشعة السينية الواهية وتحليل بنيتها بطريقة كمية.

وتُطبَّق هذه التقنيات على أوضاع أخرى كثيرة حيث تكون البيانات الأساسية مدفونة في الضوضاء الخلفية. وبالتعاون مع عدد من الأطباء، وبدعم من وكالة الفضاء الألمانية، أعدَّ علماء البث الراديوي نظاماً للكشف المكبر عن سرطان الجلد، حيث يمكن أن تؤدي تغيّرات طفيفة في اللون إلى اكتشاف وقياس الخلل في نمو الخلايا المرتبط بالورم الجلدي، وهو شكل خبيث من أشكال سرطان الجلد.

التصوير الشعاعي الرقمي

جرى أيضاً تكييف تكنولوجيا التصوير الرقمي للمساعدة على قياس انبعاثات الأشعة السينية من مجموعات المجرات، وهذه القياسات هامة لعلماء الفيزياء الفلكية في وضع النظريات المتعلقة بعلم الكونيات وتطوّر الكون المبكر.

واستُخدمت هذه التقنية لاحقاً في تصميم نظام التصوير الشعاعي الرقمي لتحسين فعالية الفحوصات الشعاعية في المستشفيات ومرونتها وكفاءتها من حيث التكلفة. ويؤدي ذلك إلى تقليص تكاليف تشغيل المستشفيات وغرف عمليات الطوارئ بالاستغناء عن استخدام أفلام الأشعة السينية وغيرها من إجراءات التصوير. وبفضل هذه التكنولوجيا، تجري فحوصات التصوير الشعاعي بالطريقة المعتادة سوى أن صور الجسم أصبحت تُخزَّن في ذاكرة الحاسوب بدلاً من الأفلام. ويمكن للطبيب (و/أو المريض) مشاهدة الصور فوراً، كما يمكن إرسالها مباشرةً إلى أخصائيين في أماكن نائية بكل أمانة عبر شبكة الإنترنت.

5.2.3.0 معايير التوقيت والتردد

دفعت الضرورة العاملين في مجال قياس التداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) إلى وضع معايير ثابتة ودقيقة جداً للتوقيت وأساليب نقل إشارات التوقيت بسويات من عدم اليقين لا تتجاوز بضعة أجزاء من 10^{-16} من الثانية. وتمّ تطوير هذه الأنظمة تجارياً وهي تُستخدَم حالياً في الملاحة الساتلية والاتصالات الفضائية وفي الأغراض الدفاعية. ولكل من أنظمة خدمة الملاحة الراديوية الساتلية (RNSS) العالمية (GPS و Galileo و Glonass) توقيتها الخاص وأنظمة الإحداثيات المرتبطة بالأرض وبالكون بفضل أنشطة الصيانة الخاصة بالخدمة الدولية لقياس التداخل VLBI للجيوديسياء والقياس الفلكي (IVS).

وكانت الميقاتيات الدقيقة من صنع الإنسان فاتحة العصر الحديث للملاحة الآمنة. ويواصل المكتب الدولي للتوقيت السعي لإنتاج ميقاتيات أكثر دقة من أي وقت مضى ولتحديد الوقت استناداً إلى مجموعة من الميقاتيات الذرية. ومع ذلك فإن أفضل عملية مراقبة مستقلة للاستقرار الطويل الأمد لمعايير التوقيت الذري الدولية تأتي من عمليات رصد توقيت النجوم النابضة بالمللي ثانية التي يجريها علماء الفلك الراديوي. وتتناول عمليات الرصد هذه مجموعة من النجوم النابضة الأكثر استقراراً، وذلك لتخفيف أي آثار ناجمة عن التغيرات الواقعية في المحتوى الإلكتروني للوسط ما بين النجوم على طول خطوط البصر الخاصة بها وكذلك لتخفيف السلوك الشاذ لفرادى النجوم النابضة إلى أدنى حدّ. كما يمكن ضبط التوقيت بصورة مستقلة من خلال توفيق عمليات رصد التوقيت للنجوم النابضة بالمللي ثانية في أنظمة النجوم الإثنيية مع المعلمات المدارية للنظام.

6.2.3.0 رصد الأرض

اعتمدت أساليب قياس التداخل في علم الفلك الراديوي لتطوير تقنيات استشعار عن بُعد منفصلة لقياس حرارة الغلاف الجوي للأرض وتحديد الخصائص الأخرى لسطح الأرض، مثل توزيع بخار الماء ومحتوى ماء السحب والهواطل ومستوى الشوائب الأخرى مثل أول أكسيد الكربون.

ويستند كشف حرائق الغابات من إشعاعات موجاتها الصغيرة الحرارية إلى المبدأ التكنولوجي نفسه.

7.2.3.0 الجيوديسيا

مع أن تقنية قياس التداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) طُوِّرت كأداة لجمع البيانات عن تفاصيل بنية ومواقع المصادر الفلكية، فلها أيضاً تطبيقات لأغراض أخرى متعددة. لذلك فإنّ مواقع الأجرام شبه النجمية (quasar) والمصادر الراديوية النائية التي تمّ قياسها بدقة بالغة بتقنية VLBI توفر الإطار المرجعي المكاني الأكثر دقةً في تاريخ البشرية. ويتيح استخدام المصادر السماوية كنقاط مرجعية لتقنية VLBI قياس التحركات الكامنة لأجهزة التليسكوب على الأرض، كتلك الناجمة عن الجرف القاري أو انزلاقات الصفائح التكتونية في أماكن التصدع. وتساعد عمليات القياس هذه على تقدير احتمال وقوع الزلازل. وقد أنشئت الخدمة الدولية لقياس التداخل VLBI للجيوديسيا والقياس الفلكي (IVS) لتقديم خدمات دعماً للبحوث في مجالات الجيوديسيا والجيوفيزياء والقياس الفلكي والأنشطة التشغيلية⁵. وتُستعمل تقنيات VLBI الأرضية وتتبع دوّبلر الدقيق أيضاً لتنفيذ بعثات للملاحة الفضائية عالية الدقة ضمن نظامنا الشمسي. وهكذا أمكن تتبع مسبار Huygens التابع لوكالة الفضاء الأوروبية عند دخوله الغلاف الجوي لكوكب تيتان، وهو أكبر قمر يدور حول زحل.

8.2.3.0 تكنولوجيا التعدين

يمكن أيضاً تطبيق تقنيات التصوير المبيّنة في البند 4.2.3.0 مباشرة على التنقيب تحت سطح الأرض عن مكامن النفط والمعادن. وتُعالج بالطريقة نفسها البيانات التي تجمع من صيف من أجهزة قياس الهزّات الأرضية تنقذ عمليات قياس بعد سلسلة من الانفجارات السطحية الصغيرة.

9.2.3.0 علم الفلك الراداري

ويختلف الفلك الراداري عن الفلك الراديوي من حيث أن الأول يتضمن إرسال الموجات الراديوية واستقبالها على حدّ سواء. ويترتب على ذلك أن الخسارة الممتدة في اتجاهين يجعله يقتصر على دراسة الأجسام في المحيط الشمسي. ولكن هذه هي الوسيلة الوحيدة التي يمكن استعمالها لرصد الحطام الفضائي الصغير النطاق. ومن التطبيقات النموذجية للفلك الراداري هو رصد وتتبع الأجسام القريبة من الأرض (النيازك والكويكبات) التي تقترب من الأرض أو التي قد تؤثر عليها، وهو يوفر أشمل الوسائل لدراساتها. وبهذه الصفة يقدم الفلك الراداري خدمة للتنبؤ بالكوارث وتجنبها على مستوى الكوكب. وعلاوةً على ذلك، يمكن الرادار من رصد الحطام الفضائي في المدار حول الأرض، مما يمكن مشغلي السواتل من تحريك مركباتهم الفضائية بعيداً عن الاصطدامات المحتملة. وهو أيضاً الطريقة الوحيدة لدراسة كثافة الحطام الفضائي الذي يبلغ حجمه أقلّ من سنتيمتر واحد تقريباً.

وتُستعمل تقنيات التصوير في الفلك الراداري (للمجال القريب) لأغراض مدنية وعسكرية لتصوير المركبات الفضائية في المدار.

4.0 الرصد الراديوي للشمس

1.4.0 مقدمة

الرصد الراديوي للشمس هو فرع متخصص من علم الفلك الراديوي يؤدي دوراً فعالاً في بحوث طقس الفضاء ويسهل التنبؤ بطقس الفضاء ويقدم الإنذارات في الوقت المناسب بأحداث الطفرات الشمسية التي يمكن أن تؤثر على أنشطة البشر. وقد أدى مدى تأثرنا بسلوك الشمس إلى دراسة "طقس الفضاء" بمثابة تخصص جديد يتم فيه دراسة الأحوال في الفضاء

⁵ انظر الموقع: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/html>

القريب من الأرض من خلال قياس الإشعاع الكهرومغناطيسي وسلوك البلازما الشمسية. وفي الأجلين الطويل والمتوسط، تُصنّف انعكاسات الانقلابية الشمسية على المناخ من حيث الأهمية بالمستوى نفسه لانعكاسات البراكين والأنشطة البشرية. وفي الأجل الأقصر، يؤدي طقس الفضاء دوراً مهماً أيضاً بسبب ما قد ينجم عن الأحداث الشمسية، وخصوصاً الانبعاثات الكتلية الإكليلية (CME)، من اضطرابات في البنية التحتية المقامة في الفضاء وفي الجو وعلى سطح الأرض. وتحدث الانبعاثات الكتلية الإكليلية مرة في اليوم أو أكثر في حالات النشاط الشمسي الأقصى.

وعندما تُدمج بيانات رسوم الطيف الراديوي المأخوذة من الأرض مع بيانات تكميلية من السواتل، يمكن الحصول على تقديرات للكتلة والقدرة وسرعة واتجاه انتشار الانبعاثات الكتلية الإكليلية قبل وقت طويل من بلوغها الأرض. وانطلاقاً من هذه القياسات، يمكن استنتاج شدة الاضطراب وتوقيت وصوله المحتمل إلى الأرض، مما يوفر إمكانية التخفيف من آثاره السلبية على مجموعة واسعة من التكنولوجيات البشرية، من قبيل الاتصالات ونظم الملاحة الساتلية والأنشطة الفضائية (السواتل والرحلات المأهولة) والطيران وشبكات الطاقة الكهربائية. ويتسبب النشاط الشمسي أيضاً بتدهور تدريجي في محولات الطاقة الكهربائية وتآكل الأنابيب الممتدة عبر مسافات طويلة، ويؤدي إلى الكثير من الآثار السلبية الأخرى. وقد يكون تأثير توهج شمسي ضخم حاداً أيضاً، وهو خطر طبيعي أقل حدوثاً ويقع بشكل عشوائي. ويمكن لحدث كهذا، إذا لم يُخفّف آثاره، أن يؤدي إلى خلل عالمي كبير في مجتمعنا المعتمد على التكنولوجيا. مثال ذلك الحدث الذي وقع في مارس 1989 عندما أذى توهج شمسي كبير جداً إلى تأثير بلغت تكلفته أكثر من 10⁹ دولار أمريكي. وفي أيامنا هذه، وما لم تُتخذ التدابير المناسبة قبل وصول توهج شمسي كبير إلى الأرض، فإنه قد يلحق ضرراً قد يكون أكثر تكلفة بكثير. وفي الواقع تشير بعض التقديرات إلى أن التكلفة المحتملة لحدث كهذا تتراوح بين 2 و 3x10¹² دولار أمريكي، إضافةً إلى ما بين سنتين وثلاث سنوات للتعافي من الحدث، لأن ثمن العديد من المعدات البديلة المطلوبة (مثل تصليح شبكة الطاقة الكهربائية) أكبر من أن يبرر الاحتفاظ بها كقطع غيار. ويبيّن هذا الخطر الذي يتعدّر التحكم فيه الدور الحاسم لنظم الإنذار المبكر التي تستند إلى مرافق رصد مستمر للشمس، ومن ضمنها أجهزة التليسكوب الراديوية الشمسية المقامة على الأرض.

وهناك وسائل كثيرة لرصد النشاط الشمسي، ومن بينها بكل بساطة عدّ البقع الشمسية. ومن مزايا القياسات الراديوية أنها تجرّي بشكل أوتوماتي من الأرض وتكاد لا تتطلب أي تدخل بشري فضلاً عن كونها غير مكلفة. وعلاوة على ذلك، يمكن الحفاظ على معايرة البيانات والجودة والاتساق لفترات طويلة من الزمن.

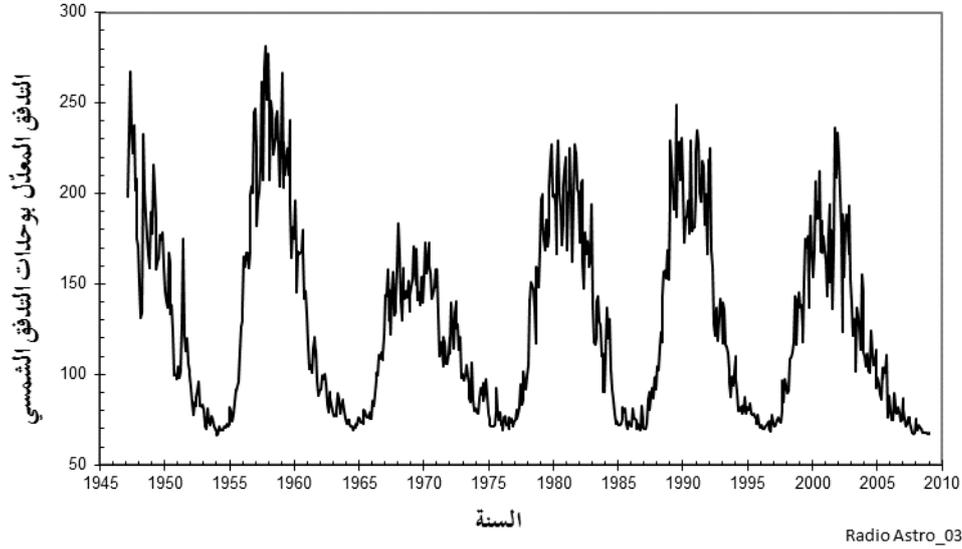
2.4.0 لمحة عن الرصد الراديوي للشمس

القياسات الراديوية للشمس هي مؤشرات مباشرة تدل على مستوى النشاط الشمسي وطبيعته. ويمكن استخدامها أيضاً كمؤشرات غير مباشرة لمعلومات أخرى يصعب أو يستحيل قياسها بالدقة المطلوبة والاستمرارية على المدى الطويل. وأجهزة رصد التدفق الشمسي هي أجهزة تليسكوب راديوية مصممة بشكل خاص لها هوائيات صغيرة بما يكفي لكي "ترى" كامل قرص الشمس بقدر متساو من الحساسية، ولها مستقبلات تتمتع بمدى دينامي خطّي عالٍ جداً لقياس التدفق الشمسي بدقة.

وقد أظهرت الدراسات أن التدفق الشمسي عند تردد 2,8 GHz (10,7 سنتيمترات) مرتبط بدرجة عالية بالبيانات المتاحة حديثاً والمتعلقة بالأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية التي توفرها المنصات الفضائية، وكذلك ببعض معلومات الرياح الشمسية. ويؤدي تدفق الطاقة هذا دوراً مباشراً في تسخين الطبقات العليا من الغلاف الجوي، ونظراً إلى أن القياسات من الفضاء لم تتوفر إلا في التسعينيات وهي لا توفر استمرارية مضمونة على المدى الطويل مستقبلاً، ونظراً لمحدودية عمر السواتل الفضائية، فإن مؤشر التدفق 2,8 GHz هو الذي يُستخدَم للتنبؤ بتأثير جر الغلاف الجوي على السواتل وللحفاظ عليها في مداراتها. وكان اختيار التردد 2,8 GHz في الأساس "محض صدفة" بالرغم من أن هناك ذروة واسعة في الجزء البطيء التغير أو المكونة S للبتّ الراديوي الشمسي في الموجات السنتيمترية عند طول الموجة ~ 10 سنتيمترات. ولكنه مجرد عيّنة واحدة من بتّ متواصل بين 0,5 و 10 GHz ناجم عن مختلف العمليات في الشمس. ولفهم مصادر هذا البتّ بشكل أفضل ولتحسين المؤشرات "المناخية" غير المباشرة الطويلة الأجل، من الضروري قياس التدفق في ترددات عديدة. ومن المزمع إنشاء محطات رصد جديدة للتدفق في أوروبا وأمريكا الشمالية واليابان لهذا الغرض، مع أنه لا يمكن تنفيذ القياسات المطلقة إلا في نطاقات خدمة الفلك الراديوي المتاحة.

الشكل 3.0

القيم المتوسطة سنوياً للتدفق الراديوي الشمسي في تردد 2.8 GHz
الذي رصده مجلس البحوث الوطني الكندي منذ عام 1947



3.4.0 الأثر والقيمة المجتمعية

تنقسم المجالات التي يمكن أن تسهم فيها بيانات التدفق الراديوي الشمسي إلى فئتين كبيرتين هما: المجال البيئي والمجال التقني/المتعلق بالبنية التحتية.

1.3.4.0 دراسات/رصد التطبيقات البيئية

يُستخدَم البث الراديوي الشمسي كمؤشر غير مباشر لكلّ التدفقات الشعاعية الهامة من الناحية البيئية والتي تؤثر على البنية الرأسية للحرارة والمعلمات الأخرى في الغلاف الجوي فوق ارتفاع ~ 80 كيلومتراً (الأيونوسفير). وتُقاس هذه المعلمات بواسطة مجموعة من المحاسيس البيئية، ولكن حرصاً على توفير سياق النمذجة لا بد من قياس كميات الدوافع الشمسية. مثال ذلك أن كثافة الغلاف الجوي فوق مائة كيلومتر تُنمذج باستخدام تدفق راديوي شمسي بمقدار 2.8 GHz كدخل (تجريبي).

2.3.4.0 الاستعمالات التقنية/البنوية التحتية

تكون الانبعاثات الشمسية في بعض الأحيان، ولا سيما في طيف الترددات المتريّة (VHF)، قوية بما يكفي للتسبب في انقطاع النظم الراديوية (مثل الاتصالات) من جراء رفع مستويات الضوضاء فيها.

آثار الطاقة الشمسية على السواتل

تعمل السواتل في بيئة مليئة بجسيمات عالية الطاقة منبعثة من الشمس. وقد تؤدي هذه الجسيمات إلى انقطاع الأجهزة الإلكترونية مؤقتاً أو تعريضها لتلف دائم، شأن ما ينجم عن تراكم الشحنات على مركبة فضائية، الأمر الذي قد يؤدي إلى أوامر وهمية تُحدث خللاً في تشغيلها. والسواتل في مدار أرضي منخفض معرضة أيضاً لزيادة في جر الغلاف الجوي قد تغير من موقعها وتزيد من معدلات تدهورها المداري. وتُستخدَم السوية العامة للنشاط الشمسي الذي تبينه المؤشرات، مثل التدفق الراديوي الشمسي بمقدار 2.8 GHz، للتنبؤ بدرجة التسخين والتمدد في الغلاف الجوي الأعلى وما يترتب من ذلك على المدارات الساتلية.

آثار الأيونوسفير

نظراً إلى أن الشمس هي التي تولد الأيونوسفير، فإن التغيرات في النشاط الشمسي تؤدي إلى تغيرات مصاحبة في الأيونوسفير قد تؤدي بدورها إلى تحسن في قدرة الاتصالات أو إلى انقطاع كامل فيها طوال ساعات عديدة إذا زفعت الأشعة السينية الشمسية درجة التأين بشكل كبير في المنطقة D. ونظراً إلى أن الأيونوسفير هو وسط مهم جداً بالنسبة إلى الاتصالات، فإن التنبؤ بأحوال الأيونوسفير مهم جداً أيضاً: يستعمل الاتحاد الدولي للاتصالات البيانات الراديوية للتشخيص الأيونوسفيري للأحوال الراهنة وكوسيلة مساعدة للتنبؤ بتطورها المحتمل على المدى القصير.

وتستعمل الطائرات التجارية الترددات الديكامترية (HF) في رحلاتها الطويلة فوق القطبين لأنه ما من بنية تحتية للترددات المترية (VHF) في خطوط العرض العالية (<82°)، والحزام الساتلي المتزامن مع الأرض قريب من الأفق. ونظراً إلى أن الاضطرابات الأيونوسفيرية شائعة ومزعجة بشكل خاص في خطوط العرض العالية، هناك حاجة إلى القياسات الراديوية للنشاط الشمسي من أجل التنبؤ بأحوال الأيونوسفير، وذلك لتوفير ما يكفي من الإشعارات لشركات الطيران لكي تعدل خطط رحلاتها بحسب الاقتضاء.

الآثار المغنطيسية الأرضية على النظم الأرضية

تتولد التقلبات السريعة والبطيئة على حدّ سواء في المجال المغنطيسي للأرض من جراء تغير سرعة وكثافة الرياح الشمسية، ولا سيما جراء أثر البلازمويد الذي ينطلق أثناء التوهجات الشمسية والانبعاثات الكتلية الإكليلية. وتستحث هذه التقلبات تيارات كهربائية في الهياكل المعدنية الطويلة مثل خطوط الطاقة الكهربائية وخطوط الأنابيب وكبلات الهاتف وخطوط السكك الحديدية. وهذه التيارات المستحثة في خطوط الكهرباء تخالف النقاط التشغيلية في المحولات التي إذا حُمّلت كثيراً يمكن أن تؤدي إلى تشبعها من الداخل وارتفاع حرارة الوشائع فيها. ومع ذلك فإن العواصف المغنطيسية الكبرى، كتلك التي حدثت في 13 مارس 1989، تؤدي إلى تيارات أكبر يمكن أن تتسبب في تعطل المحولات على الفور، كما حصل في كيبيك في كندا. وقد تسبب ذلك في انهيار شبكة توزيع الكهرباء على مدى أكثر من تسع ساعات. وكان الأثر الاقتصادي الناجم عن توقف الإنتاج الصناعي جراء تعطل هذه البنية التحتية في حدود 10⁹ دولار أمريكي.

الشكل 4.0

احتراق محوّل في شبكة توزيع للطاقة الكهربائية جراء النشاط الشمسي في 13 مارس 1989



Radio-Astro_04

يمكن أن تتداخل التيارات المستحثة في خطوط السكك الحديدية مع أنظمة التشوير واستشعار مواقع القطارات. كما أنها تولد بعض الاختلافات الطفيفة المحتملة في حالات عدم التجانس في معدن أحد الأنابيب ووصلاته الملحومة، ممّا يزيد من معدل التآكل المهبطي.

وقد تمتدّ خطوط الأنايب عبر آلاف الكيلومترات، وغالباً في أرض وعرة ومناخ عدائي، حيث قد تكون تكلفة التفتيش والصيانة مرتفعة. ولكن العطل قد يكون أعلى ثمناً مع ما يترتب عليه من عواقب خطيرة على البيئة. ومن ثمّ يتطلب الأمر اعتماد نماذج تفتيش وصيانة تقوم على أساس النشاط المغنطيسي الأرضي.

5.0 الاتجاهات في خدمات الفلك الراديوي

تميل الاتجاهات الحالية في خدمات الفلك الراديوي نحو المزيد من الحساسية في كلّ الترددات. ونظراً إلى أن المستقبلات الحالية تقترب من الحدّ الكومومي في ترددات كثيرة، فإن هناك توجّهاً نحو مساحات تغطية أكبر واستعمال أوسع لعروض النطاق التشغيلية. ويتمّ الارتقاء بأجهزة التليسكوب الحالية لكي تستوعب مستقبلات النطاق العريض (من 1 إلى 8 GHz تبعاً للتردد) لكلّ من عمليات الرصد المتواصل والخطوط الطيفية. وتُبدل حالياً جهود دولية لبناء أجهزة تليسكوب راديوية من الجيل الجديد لها سطوح تغطية أوسع بكثير.

وفيما يلي بعض الأمثلة:

- (1) مشروع صيف الكيلومتر المربع (SKA)، الذي يسعى إلى بناء شبكة عملاقة لقياس التداخل الراديوي تبلغ مساحة التغطية الإجمالية فيها كيلومتراً مربعاً واحداً وتصل خطوط الأساس إلى 3 000 كيلومتر تعمل في مدى ترددي يتراوح من 100 MHz إلى 25 GHz؛
- (2) الصيف منخفض التردد (LOFAR) في هولندا والبلدان المجاورة هو شبكة لقياس التداخل الراديوي تبلغ مساحة التغطية الإجمالية فيها 100 000 متر مربع وتصل خطوط الأساس إلى 1 000 كيلومتر في مدى ترددي يتراوح من 30 إلى 250 MHz؛
- (3) الصيف المليميتر/دون المليميتر الكبير في أتاكاما (ALMA) وفيه 64 هوائياً على هضبة بارتفاع 5 كيلومترات في الأنديز والذي يعمل في مدى ترددي يتراوح من 30 إلى 850 GHz.

6.0 الخلاصة

أدى علم الفلك الراديوي إلى اكتشاف ظواهر راديوية جديدة كلياً وغير متوقعة، مثل الخلفية الكونية من الموجات الصغرية والغاز المتأين والبلازما بين النجوم وكذلك النجوم النابضة والأجرام السماوية شبه النجمية والثقوب السوداء. وقدّم أيضاً الكثير من عمليات التحقق من النظريات الأساسية في الفيزياء، مثل نظرية النسبية العامة، ووفّر مختبراً للفيزياء الأساسية التي لا يمكن النفاذ إليها خلاف ذلك.

ويتمتع الطيف الذي تستعمله خدمة الفلك الراديوي بقيمة مجتمعية واقتصادية، رغم صعوبة قياس الفوائد لأن المجتمع ككلّ يستفيد منها، وهي غالباً ما تكون كامنّة في تطبيقات طوّرتها تكنولوجيات أخرى وغالباً ما تتحقق بعد مرور فترات طويلة من الزمن وقد يصعب التنبؤ بها. وطوّرت خدمة الفلك الراديوي تكنولوجيات لها تطبيقات واسعة الانتشار في مجالات شتى مثل التشخيص الطبي والاتصالات ومعايير التوقيت والتردد ورصد الأرض والحوسبة والملاحة والجيوفيزياء والتعدين.

والكثير من أنشطة خدمة الفلك الراديوي تُنظّم على مستوى عالمي ويجب من ثمّ أخذ المسائل المرتبطة بالطيف بالاعتبار عالمياً لأنه قد يترتب على القرارات الأحادية الجانب أثر على العالم بأسره فيما يتعلق باستعمال الترددات ذات الصلة والقياسات المحتملة.

ويمكن أن تولّد حالات عدم الاستقرار في المجال المغنطيسي للشمس توهجات من الطاقة الشمسية وأن تحفّز أحداث قذف كتلي إكليلي. وهذه الأحداث قادرة على إحداث انعطاف مباشر أو إلحاق ضرر بالكثير من التكنولوجيات الإلكترونية والبنى التحتية القائمة على الأرض، مع ما ينجم عنها من تكاليف باهظة. وقد وُفّر رصد البثّ الراديوي الشمسي من الأرض وسائل موثوقة ومتسقة وغير مكلفة لرصد النشاط الشمسي على مدى أكثر من 60 عاماً. وهذه تكنولوجيا ناضجة ومفهومة جيداً تقدّم إنذارات في الوقت المناسب بالأحداث العابرة.

الفصل 1

مقدمة

1.1 قطاع الاتصالات الراديوية والمؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية

يتناول هذا الكتيب أساساً الجوانب من علم الفلك الراديوي ذات الصلة بتنسيق الترددات، أي استعمال الطيف الراديوي بطريقة منظّمة لتجنب التداخل، وذلك بالاتفاق المتبادل بين الخدمات الراديوية. وعلى الصعيد الدولي، يُنظّم استعمال الطيف من جانب الاتحاد الدولي للاتصالات، وهو وكالة متخصصة تابعة لمنظمة الأمم المتحدة.

أنشئ قطاع الاتصالات الراديوية (ITU-R)، وهو جزء من الاتحاد الدولي للاتصالات، في 1 مارس 1993؛ وقد حلّ محلّ اللجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) وأمانتها، اللتين كانتا تؤديان مهام مماثلة إلى ذلك الحين. ويشمل قطاع الاتصالات الراديوية المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية ولجنة لوائح الراديو ولجان الدراسات للاتصالات الراديوية، والفريق الاستشاري للاتصالات الراديوية ومكتب الاتصالات الراديوية الذي يتأهه مدير منتخب.

ولوائح الراديو التي يضعها الاتحاد، وهي أساس الاستعمال المخطط للطيف، هي حصيلة المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية (WRC)، التي كانت تُعرف سابقاً بالمؤتمرات الإدارية العالمية للراديو (WARC)، وتُعقد كل بضع سنوات. وفي هذه المؤتمرات، يكون الهدف هو وضع شروط جديدة لاستعمال الطيف بشكل مقبول، إلى أقصى قدر ممكن، لدى كل ممثلي البلدان المشاركة. وتأخذ نتائج كل مؤتمر من المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية شكل معاهدة تكون فيها كلّ الإدارات المشاركة أطرافاً موقعة. وتضع هذه المؤتمرات العالمية أيضاً جدول أعمال المؤتمر العالمي التالي وتعتمد قرارات تتضمن عادةً دعوات لإجراء دراسات مرتبطة ببنود جدول الأعمال المقبلة تقوم بها لجان الدراسات. وكما هو الحال في غالبية مجالات القانون الدولي، ثمة صعوبة في إنفاذ اللوائح وهو يتوقف إلى حدّ بعيد على حسن إرادة المشاركين. ويسبق انعقاد المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية اجتماعات تحضيرية للمؤتمر (CPM) تتولى إعداد التقارير بشأن القضايا التقنية والتشغيلية والتنظيمية التي سينظر فيها المؤتمر.

وجمعية الاتصالات الراديوية هي التي تنشئ لجان الدراسات للاتصالات الراديوية. وتدرس هذه اللجان المسائل وتعدّ مشاريع توصيات متعلقة بالجوانب التقنية والتشغيلية والتنظيمية/الإجرائية للاتصالات الراديوية. وتعالج لجان الدراسات التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية مسائل من قبيل نطاقات الترددات المفضلة للخدمات المختلفة، وسويات العتبة للتداخل غير المقبول، والتشارك بين الخدمات، وحدود البثّ المرغوبة، وما إلى ذلك. وهي تسهم أيضاً في مشروع تقرير الاجتماع التحضيري للمؤتمر بشأن بنود جدول الأعمال المتعلقة باختصاصاتها. وتُقسّم لجان الدراسات إلى فرق عمل (WP) وأفرقة مهام (TG) تتناول جوانب محددة من العمل. وفي الوقت الراهن (2013) تتكون لجان الدراسات التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية كما يلي:

لجنة الدراسات 1 إدارة الطيف

لجنة الدراسات 3 انتشار الموجات الراديوية

لجنة الدراسات 4 الخدمات الساتلية

لجنة الدراسات 5 خدمات الأرض

لجنة الدراسات 6 الخدمات الإذاعية

لجنة الدراسات 7 خدمات العلوم

وإضافةً إلى هذه اللجان، تظطلع لجنة تنسيق المفردات (CCV) واللجنة الخاصة المعنية بالمسائل التنظيمية والإجرائية (SCRPM) بمسؤوليات قضايا مشتركة لكلّ اللجان.

لمزيد من المعلومات عن قطاع الاتصالات الراديوية والتفاصيل عن لجان الدراسات وفرق العمل وعن أعمالها ووثائقها، انظر موقع القطاع: <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=rhome&lang=en>

وفرقة العمل 7D، التي تتناول مسائل علم الفلك الراديوي، هي إحدى فرق العمل الأربع ضمن لجنة الدراسات 7 التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية، خدمات العلوم، التي تشمل أيضاً فرق عمل تعمل في مجالات العمليات الفضائية، والبحوث الفضائية، والاستشعار عن بُعد المنفعل والنشط، والأرصاد الجوية، وإشارات التوقيت، ومعايير الترددات. كما أن أعمال استطلاع المعلومات من خارج الأرض (SETI)، وعلم الفلك الراداري كما يُمارَس على سطح الأرض، وكذلك علم الفلك الراديوي الذي يُمارَس من الفضاء ضمن خدمة بحوث الفضاء، تندرج عادةً في إطار علم الفلك الراديوي ضمن أعمال فرقة العمل 7D.

وتُعقد اجتماعات دولية للجان الدراسات وفرق العمل في فترات منتظمة، مرتين في السنة عادةً، وتحضرها وفود من بلدان كثيرة. وتُشكّل أفرقة المهام لفترة محددة من الزمن للاضطلاع بمهام معينة، وتجتمع في فترات محددة وفقاً لحاجاتها. ويرد وصف أساليب عمل لجان الدراسات وفرق العمل التابعة لها بالتفصيل في القرار 1 الصادر عن قطاع الاتصالات الراديوية للاتحاد. وعموماً تستجيب لجان الدراسات وفرق العمل لمسائل ملائمة تسند إليها. وتُقدّم الإجابات عن هذه المسائل عموماً في شكل توصيات أو تقارير صادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية.

وتوفّر توصيات قطاع الاتصالات الراديوية معلومات تقنية وتشغيلية وتنظيمية/إجرائية وافقت عليها الإدارات المشاركة. وتُستخدَم هذه المعلومات أيضاً بمثابة مدخلات استجابة لبنود محددة في جداول أعمال المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية ويندرج الكثير من نتائج أعمال لجان الدراسات ضمن لوائح الراديو. وإلى جانب ذلك، تُعتبر عموماً توصيات قطاع الاتصالات الراديوية وتقاريره، في حدّ ذاتها، مبادئ توجيهية ذات حجية يسترشد بها مستعملو الطيف. ويصح ذلك بشكل خاصّ بالنسبة لتوصيات قطاع الاتصالات الراديوية التي لا تتسم بطابع إلزامي ومع ذلك فهي متبّعة على نطاق واسع وتُراجع وتُنشر بصورة منتظمة. وغالبية المواد المهمة المتعلقة بعلم الفلك الراديوي الواردة في توصيات لجنة الدراسات 7 وتقاريرها تشكّل أساس هذا الكتيب.

2.1 لوائح الراديو وتوزيعات الترددات

تُنقَد توزيعات الترددات الدولية، في إطار المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية، لنحو 40 خدمة راديوية معرّفة في لوائح الراديو. ويحضر هذه المؤتمرات العالمية ممثلون من أكثر من 190 إدارة عضواً في الاتحاد الدولي للاتصالات من كلّ أنحاء العالم، وكثير من شركات الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات ومنظمات علمية ودولية معترف بها. ولا يمكن إلا للإدارات الأعضاء تقديم اقتراحات وهي وحدها تتمتع بالحق في التصويت، ولكن قد تسعى منظمات أخرى إلى التأثير على نواتج مختلف بنود جدول الأعمال بوسائل أخرى. وثمة وصف أكمل لأساليب عمل المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية ومشاركة علماء الفلك الراديوي فيها، قدمه Gergely [2002] على سبيل المثال.

ولأغراض توزيع الطيف، يُقسّم العالم إلى ثلاثة أقاليم: الإقليم 1 الذي يشمل أوروبا وإفريقيا وشمال آسيا، والإقليم 2 الذي يشمل أمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية، والإقليم 3 الذي يشمل جنوب آسيا وأستراليا. وفي أي نطاق ترددي محدّد، قد تختلف التوزيعات من إقليم لآخر. وكثيراً ما يتم تقاسم بعض النطاقات بين خدمتين أو أكثر. وقد تكون التوزيعات، عموماً، أولية أو ثانوية. ويجوز لخدمة لها توزيع أولي أن تتسبّب في تداخل مع خدمة ثانوية، ولكن لا يُسمح لخدمة ثانوية أن تتسبّب في تداخل مع خدمة لها توزيع أولي في النطاق نفسه. وترد توزيعات الترددات في المادة 5 من لوائح الراديو. وتُبيّن معظمها في جدول التوزيعات؛ ولكن ثمة توزيعات إضافية ترد في الحواشي المرقّمة المرتبطة بالجدول.

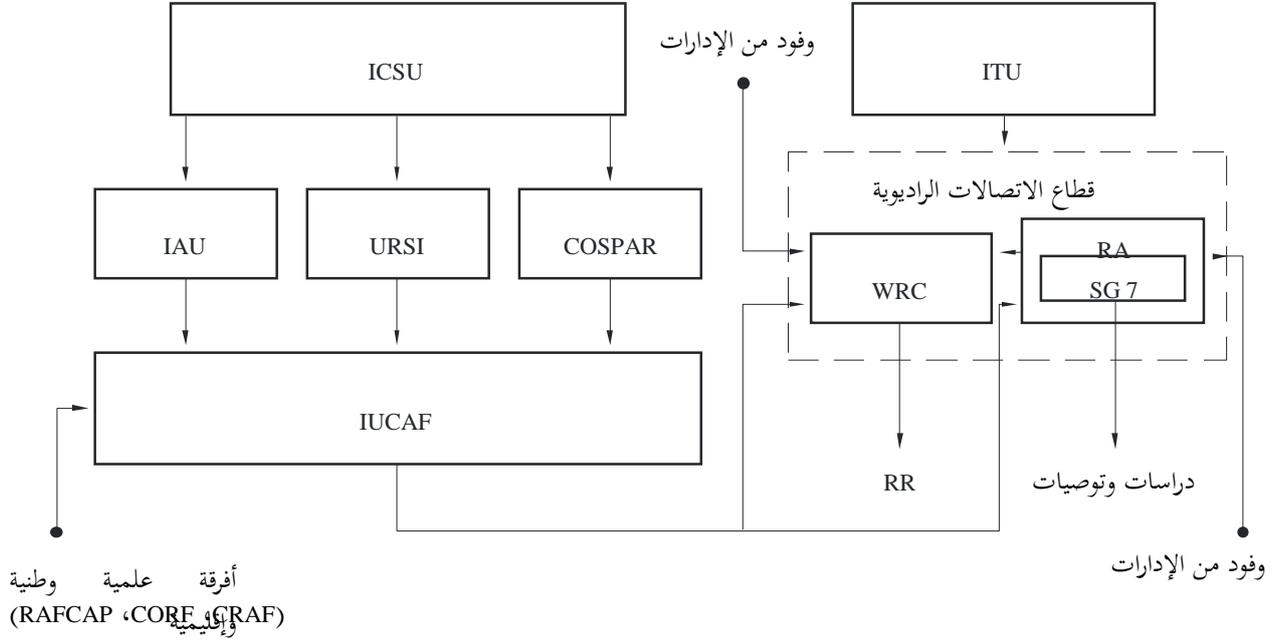
وفي كل بلد من البلدان، تتولّى الوكالات الحكومية، التي تختلف كثيراً من إدارة إلى أخرى، معالجة قضايا توزيع الطيف. ففي بلدان كثيرة، تشكّل إدارة الطيف الراديوي جزءاً من عمل وكالة أكبر يمكن أن تشمل أيضاً مجالات أخرى مثل الخدمات البريدية والهاتفية والنقل والتجارة، وغير ذلك. وتؤدي هذه الوكالات دوراً مهماً في إعداد المواقف الوطنية التي تدافع عنها في المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية. وتحتفظ الإدارات المشاركة في معاهدات هذه المؤتمرات بالحقوق السيادية المتعلقة بالطيف ضمن حدودها الوطنية، ويمكن لها أن تحيد عن اللوائح الدولية طالما أنها لا تتسبّب في تداخل ضار ضمن أراضي تابعة لإدارات أخرى. وعند إعداد لوائح الراديو، طالبت إدارات كثيرة بوضع استثناءات في بعض النطاقات من أجل تلبية متطلبات وطنية محددة.

3.1 الفلك الراديوي كخدمة اتصالات راديوية

اعترِفَ بخدمَة الفلك الراديوي رسمياً كخدمة من خدمات الاتصالات الراديوي لأول مرة في المؤتمر الإداري العالمي للراديو WARC-59. وفي ذلك الوقت، وتحت رعاية المجلس الدولي للاتحادات العلمية (ICSU)، أنشأت ثلاثة اتحادات علمية لجنة، وهي اللجنة المشتركة بين الاتحادات والمعنية بتخصيص الترددات لعلم الفلك الإشعاعي وعلوم الفضاء (IUCAF) لتمثيل الاستعمال العلمي للطيف الراديوي. والهيئات المؤسّسة الثلاث هي الاتحاد الفلكي الدولي (IAU) والاتحاد الدولي لعلم الراديو (URSI) واللجنة المعنية بالأبحاث الفضائية (COSPAR)؛ وكلّ منها يساهم في عضوية اللجنة المشتركة IUCAF. وتشارك هذه اللجنة المشتركة في المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية بصفتها منظمة دولية معترف بها، ولكن ليس لها الحقّ في التصويت. ويعمل علماء الفلك الراديوي من خلال وكالاتهم الوطنية أو اللجنة المشتركة IUCAF لكي ينظر قطاع الاتصالات الراديوية في شواغلهم أو يدرجها في جدول أعمال أحد المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية. وإضافةً إلى اللجنة المشتركة IUCAF، تعكف لجان وطنية وإقليمية، مثل اللجنة الأمريكية للأكاديمية الوطنية للعلوم المعنية بالترددات الراديوية (CORF) واللجنة الأوروبية المعنية بترددات الفلك الراديوي (ESF-CRAF) واللجنة المعنية بترددات الفلك الراديوي في منطقة آسيا والمحيط الهادئ (RAFCAP)، على تيسير مشاركة موحّدة من جانب علماء الفلك الراديوي. ويبيّن الشكل 1 بعض العلاقات بين الوكالات الضالعة في عمليات تنسيق الترددات لخدمات الفلك الراديوي.

الشكل 1.1

العلاقات المتبادلة بين الوكالات الدولية الضالعة في تنسيق الترددات لخدمات الفلك الراديوي



RA: جمعية الاتصالات الراديوية
SG 7: لجنة الدراسات 7

Radio-Astro_11

حيث (بالترتيب الأبجدي):

اللجنة المعنية بالترددات الراديوية	CORF
اللجنة المعنية بالأبحاث الفضائية	COSPAR
اللجنة المعنية بترددات الفلك الراديوي	CRAF
الاتحاد الفلكي الدولي	IAU
المجلس الدولي للاتحادات العلمية	ICSU
الاتحاد الدولي للاتصالات	ITU
اللجنة المشتركة بين الاتحادات والمعنية بتخصيص الترددات لخدمة الفلك الإشعاعي وعلوم الفضاء	IUCAF
جمعية الاتصالات الراديوية	RA
اللجنة المعنية بترددات الفلك الراديوي في منطقة آسيا والمحيط الهادئ	RAFCAP
لجنة الدراسات 7	SG 7
الاتحاد الدولي لعلم الراديو	URSI
المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية	WRC

وفي القسم 1 من المادة 1 من لوائح الراديو، يُعرّف علم الفلك الراديوي بأنه علم الفلك القائم على استقبال موجات راديوية كونية المصدر. ونطاقات التردد، في جدول توزيعات الترددات، التي توفر أعلى مستوى من الحماية لعلم الفلك الراديوي هي النطاقات التي تتقاسم فيها خدمة الفلك الراديوي توزيعاً أولاً فقط مع خدمات منفصلة (غير مرسلّة) أخرى. وتأتي في الدرجة الثانية للحماية النطاقات التي يكون فيها لخدمة الفلك الراديوي توزيع أولي ولكنها تتقاسم هذا الوضع مع خدمة نشطة (مرسلّة) واحدة أو أكثر. وتتوفر درجة أدنى من الحماية في النطاقات الموزعة لخدمة الفلك الراديوي على أساس ثانوي.

وبالنسبة للكثير من نطاقات التردد، تُبيّن درجة الحماية في الحواشي الواردة في لوائح الراديو بدلاً من إدراج بند مباشرة في جدول التوزيعات. وتأتي هذه الحواشي في عدة أشكال. وبالنسبة لنطاق موزّع حصرياً للخدمات المنفصلة، تشير الحاشية رقم 340.5 من لوائح الراديو إلى أنّ كل الإرسالات محظورة في هذا النطاق. وتُستخدَم حواشٍ أخرى عندما يكون لخدمة الفلك الراديوي توزيع في جزء فقط من النطاق الوارد في الجدول. وتُستخدَم شكل مختلف من الحواشي للنطاقات أو أجزاء النطاقات غير الموزعة لخدمة الفلك الراديوي ولكنها مع ذلك مستخدمة لعمليات رصد هامة في الفيزياء الفلكية. وهي تحت الإدارات على اتخاذ كل الخطوات العملية الرامية إلى حماية خدمة الفلك الراديوي عند إجراء تخصيصات للترددات لخدمات أخرى. ومع أن هذه الحواشي لا توفر أي حماية قانونية فقد أثبتت غالباً أنها قيمة بالنسبة إلى خدمة الفلك الراديوي عندما يكون التنسيق مع خدمات أخرى مطلوباً. وترد نطاقات التردد الموزعة لخدمة الفلك الراديوي في التذييل 1 في هذا الكتيب.

4.1 مشاكل توزيع الترددات لخدمة الفلك الراديوي

يختلف عدد من ملامح خدمة الفلك الراديوي عن غالبية ملامح الخدمات التي تستعمل الطيف الراديوي. وخدمة الفلك الراديوي هي خدمة منفصلة لا تُعنى إلا باستقبال البيانات. وهناك خدمات قليلة أخرى، مثل خدمة استكشاف الأرض الساتلية، تستعمل الاستشعار المنفعل أيضاً.

وإشارات الفلك الراديوي ضعيفة جداً، حيث كثافات تدفق القدرة أدنى بعدة مراتب (بعشرات الديسيبل) من الاشارات التي تستخدمها غالبية الخدمات الأخرى. والأنظمة المستقبلية عالية الحساسية المطلوبة في خدمة الفلك الراديوي شديدة التأثير بالتداخل. ويتفاهم موطن الضعف هذا بحكم طبيعة الإشارات الكونية. فأغلب هذه الإشارات تأتي في شكل ضوضاء عشوائية دون تشكيل خاص بها يسمح بتمييزها عن سائر الإشارات. ومن الصعب تقاسم نطاقات التردد مع خدمات نشطة أخرى، وهو غير ممكن عادةً إلا في حال عدم وجود خط بصر مباشر بين هوائي فلك راديوي ومرسل في النطاق نفسه. وثمة مشكلة أخرى ناجمة عن البث غير المطلوب في نطاق الفلك الراديوي الوارد من خدمات نشطة تعمل في نطاقات أخرى. وتزداد هذه المشكلة سوءاً بتزايد استعمال تقنيات التشكيل الرقمي للنطاق العريض والنطاق العريض جداً وتمديد الطيف. ويؤدي الاستعمال المفرط للأجهزة اللاسلكية غير المرخصة، مثل الهواتف الذكية أو الحواسيب اللوحية أو المحمولة التي يمكن تشغيلها على مقربة من تليسكوب راديوي، إلى تفاقم هذه المشكلة. وبسبب هذا الخطر المحتمل، فإنّ مجرّد الحفاظ على التوزيعات غير كافٍ لضمان تنفيذ عمليات رصد خالية من التداخل في خدمة الفلك الراديوي.

ولا يمكن لعلماء الفلك الراديوي دائماً اختيار تردداتهم اعتباطياً، إذ تتخذ الكثير من الإشارات الكونية التي يدرسونها شكل خطوط طيفية تغطي مدى ترددياً محدوداً. وتتولد هذه الخطوط عند ترددات مميزة متعلقة بالانتقال بين حالات القدرة الكمومية للذرات أو الجزيئات. ولذلك يجب توفير التوزيعات لرصد هذه الخطوط عند ترددات معينة. وقد تمّ في الماضي الحصول على توزيعات للكثير من الخطوط الأكثر أهمية عندما كان استعمال الخدمات الأخرى للطيف الراديوي أقلّ مما هو الآن. ويتواصل كشف خطوط جديدة هامة، وكثير منها لا يقع ضمن النطاقات الموزعة. وبالنسبة للخطوط الطيفية في المجرات النائية، قد يتعرّض تردد مرصود يندرج عادةً ضمن نطاقات خدمة الفلك الراديوي لإزاحة دوبلرية إلى خارج النطاق بسبب تحركات المجرات بشكل كبير بالنسبة إلى الأرض. لذا فإنّ كلّ أجزاء الطيف الترددي تقريباً تنطوي على فائدة علمية. ولكن بسبب التوزيعات إلى الخدمات النشطة، فإنّ عمليات الرصد في الكثير من الترددات تبقى محدودة للغاية، بل قد تكون غير ممكنة. وفي بعض الحالات، قد يكون من الممكن تخفيف التداخل باختيار المواقع المناسبة للتليسكوبات أو باختيار فترات الرصد. وقد يكون من المرغوب فيه توفير توزيعات إضافية لخدمة الفلك الراديوي، ولكن سيكون من الصعب الحصول عليها لأسباب مختلفة. وكلّ مؤتمر من المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية يضع مشروع جدول أعمال للمؤتمر التالي وجدول أعمال مؤقتاً للمؤتمر الذي يليه. وبناءً عليه، وحتى

في أفضل الحالات، يحتاج الأمر لفترة طويلة من الزمن وبذل جهد متواصل لإدراج أي بند في جدول أعمال المؤتمر. واقتراحات إدراج بنود في جدول الأعمال تقدمها الإدارات التي تميل، عموماً، إلى اختيار اقتراحات ترى أنها تصب في أكثر المصالح الوطنية إلحاحاً، ومن ثم قد تولى أولوية أعلى للخدمات أخرى. وحتى عندما تؤيد إدارات مهتمة بالعلوم أحد البنود المتعلقة بعلم الفلك الراديوي، يكون عددها قليلاً نسبياً في الاتحاد حيث تُتخذ معظم القرارات بتوافق الآراء.

ونظراً إلى أن علماء الفلك الراديوي يواجهون صعوبة كبيرة في تقاسم الترددات مع الخدمات النشطة ولا يستطيعون اختيار تردداتهم اعتباطياً، فليس من الميسور استيعاب خدمة الفلك الراديوي ضمن نظام التوزيعات واللوائح. ومع ذلك، تحظى الخدمات المنفصلة بقدر لا بأس به من المراعاة، لأسباب ليس أقلها أن سلسلة النطاقات الموزعة لخدمة الفلك الراديوي مكنت من إنجاز فيض من الاكتشافات العلمية الهامة، وما زالت لها أهمية حيوية في ضمان بقاء هذه الخدمة.

المراجع

Gergely, T. [2002] World Radiocommunication Conferences in "Spectrum Management for Radio Astronomy; proceedings of the IUCAF summer school held at Green Bank, W. VA, June 9-14, 2002, Eds. B.M. Lewis and D.T. Emerson, Charlottesville, VA.

الفصل 2

خصائص خدمة الفلك الراديوي

1.2 خدمة الفلك الراديوي

يعرّف الرقمان 13 و58 من المادة 1 من لوائح الراديو علم الفلك الراديوي وخدمة الفلك الراديوي بوصفهما علم الفلك القائم على استقبال موجات راديوية كونية المصدر. ويشكل مجموع هذه الإرسالات الكونية ضوضاء الخلفية الكونية لهندسة الاتصالات. ونظراً لأن خدمة الفلك الراديوي خدمة منفصلة، فإنها لا تُرسل موجات راديوية في النطاقات الموزعة لها، ولذلك فإن استخدام هذه النطاقات لا يتسبب في تداخلات لأي خدمة أخرى. ومن ناحية أخرى، فإن الضعف الشديد للإرسالات الراديوية الكونية مقارنةً بقوة الإرسالات الاصطناعية يجعل عمليات الرصد الفلكية الراديوية معرضةً بشكل كبير للتداخل من خدمات راديوية أخرى. وفي الوقت الحاضر، يستخدم الفلك الراديوي الطيف الكهرمغناطيسي عند ترددات تتراوح بين أقل من 1 MHz وحوالي 1 000 GHz، وهو مدى محدد أساساً بقيود التكنولوجيا المتاحة. ومن حيث المبدأ، يمثل الطيف الراديوي ككل أهمية علمية لخدمة الفلك الراديوي.

بدأ علم الفلك الراديوي في عام 1932 عندما اكتشف كارل غ. جانسكي وجود موجات راديوية مصدرها من خارج الأرض [Jansky, 1935]: وهو الآن فرع راسخ وهام من فروع الفلك الرصدي. وفي إطار النظام الشمسي، سمح الفلك الراديوي بتحسين معرفتنا بالشمس (مثل العمليات الفيزيائية المسؤولة عن الإرسالات الراديوية لمادة البلازما) وبالكواكب والفضاء بين الكواكب. وعلى نطاق أوسع، تقدم دراسات الترددات المتعددة للمصادر الكونية للإرسالات الراديوية معلومات عن سحب الغاز بين النجوم وتكوين النجوم داخلها وعن المجالات المغناطيسية بين النجوم وبنية وتطور المجرات والمعلومات الكونية ككل. ومن ناحية أخرى، فإن إرسالات الخطوط الطيفية الصادرة عن الذرات والجزيئات عند ترددات تحدث بشكل طبيعي تكشف لنا تكوين سحب الغاز بين النجوم وحركتها وخصائصها المادية. وقدر كبير من المعرفة المستنبطة من علم الفلك الراديوي فريد من نوعه ولا يمكن التوصل إليه إلا بواسطة أطوال الموجات الراديوية. وهكذا، وعلى سبيل المثال، لا يمكن كشف الهيدروجين الذري المحايد (HI) الذي يمثل العنصر البدائي للكون، إلا من خلال خطه الراديوي عند تردد 1 420 MHz، ولا يمكن دراسة توزيعه وحركته إلا من خلال قياس شدة هذا الإشعاع وزحزحة دوبلر الخاصة به.

ويقوم علماء الفلك الراديوي، في إطار دراسة المصادر الراديوية الكونية، بقياس جميع خصائص الإشعاع الكهرمغناطيسي. وهذه الخصائص هي الشدة والتردد والاستقطاب والاتجاه (الموقع في السماء) والتغيرات الزمنية لهذه المعلومات. وتكون كثافة تدفق القدرة للبت الراديوي الكوني منخفضة عادةً عند سطح الأرض. وتبين معظم الإرسالات خصائص الضوضاء العشوائية. وهناك حالات استثنائية لذلك وهي: (أ) الإرسالات النبضية بمعدلات منتظمة للغاية الصادرة عن النجوم النابضة؛ و(ب) التلألؤات بين الكواكب والتلألؤات الأيونوسفيرية للمصادر الراديوية صغيرة القطر؛ و(ج) الرشقات غير المنتظمة الصادرة عن بعض النجوم (بما في ذلك الشمس)؛ و(د) التغيرات على المقياس الشهري لبعض المصادر الراديوية، بما في ذلك الآثار المتصلة برشقات أشعة غاما؛ و(هـ) التغيرات المرتبطة بكوكب المشتري. وأفضل الأوقات لرصد المصادر الراديوية تملئها عادةً الظواهر الطبيعية مثل موقع المصدر في السماء أو دوران الأرض. وعلى عكس حالة الخدمات النشطة (الإرسال)، لا يمكن لعلماء الفلك الراديوي تغيير طابع الإشارة المستقبلية، ولا قدرتها المرسله كما لا يمكن تشفير الإشارة من أجل زيادة إمكانية كشفها. للاطلاع على استعراض لعلم الفلك الراديوي، بما في ذلك أجهزة القياس والنتائج الرئيسية والتفسير الفيزيائي الفلكي، انظر Burke and Graham-Smith, 2002.

2.2 أصل الإرسالات الراديوية الكونية وطبيعتها

تنتج الإرسالات الراديوية الكونية عن عدة آليات متميزة. وينبعث الإشعاع الحراري عن أي شيء تتجاوز درجة حرارته الصفر المطلق. وينبعث بوجه خاص عن مادة البلازما الساخنة والغاز المحايد (سحب الغاز بين النجوم والأغلفة الساخنة للنجوم وغيرها) والأجسام الصلبة. وعلاوة على ذلك، يُعتقد أن ضوضاء الخلفية من الموجات الصغيرة الكونية تمثل الإشعاع الحراري المتبقي من الغاز

الساخن في مرحلة مبكرة جداً من تطور الكون. ومن جهة أخرى، يمثل البث غير الحراري أساساً الإشعاع السنكروتروني الذي ينتج عن الإلكترونات النسبية التي تدور حلزونياً في مجال مغنطيسي. ويشمل ذلك إرسال "ميزر" في دوران-سنكروترون وإلكترون-سيكلوترون، فضلاً عن إرسال موجة البلازما. وأخيراً، ينشأ إشعاع الخطوط الطيفية عن عمليات الانتقال بين الحالات المختلفة لقدرة فرادى الذرات والجزيئات.

وفي المجال الترددي، تؤدي هذه العمليات إلى نوعين مميزين من الإشعاعات هما: الإشعاع المتواصل عريض النطاق وإشعاع الخط الطيفي ضيق النطاق.

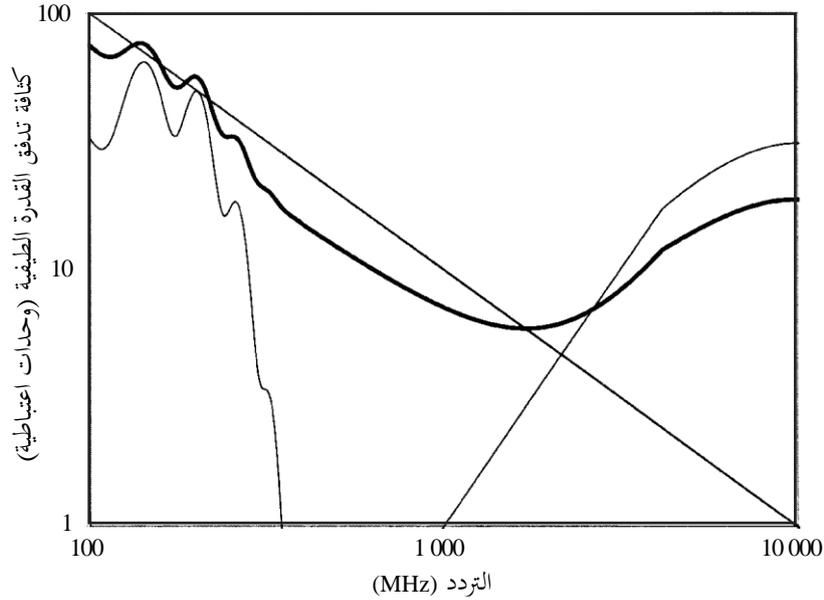
3.2 الإشعاع المتواصل

تبت مجموعة متنوعة من مصادر البث الراديوي إشعاعات متواصلة، وهذا الإشعاع يمتد بشكل سلس نسبياً عبر معظم الطيف الراديوي. وبصورة عامة، تكشف مصادر البث غير الحراري عن تبعية شدة مع التردد تختلف عن تبعية مصادر البث الحراري، ومع ذلك يمكن أن تتأثر هذه التبعية بتداخل سحب الغاز والغبار بين المصدر والراصد. وتكشف عمليات الرصد المتواصلة للسماء وجود عدة مصادر راديوية منفصلة متراكبة عبر خلفية واسعة. وتُعزى ضوضاء خلفية شبه متناحية ذات درجة حرارة لمعان قدرها $K 2,73$ إلى الإشعاع الحراري الذي يعود تاريخه إلى الحقبة التي أصبحت فيها غازات الكون كثيفة للإشعاعات الراديوية للمرة الأولى. وتوفر البنية الزاوية الضعيفة في هذا البث، المقيس عند ترددات تتراوح بين 30 و 300 GHz، معلومات عن الكثافة الكونية ومعلومات أخرى تتعلق بالكون. وقد أجريت هذه القياسات بواسطة مقاييس إشعاعية مقامة على مناطيد أو سواتل [Smoot et al., 1992؛ Bennet et al., 2003؛ Planck collaboration et al., 2011] وعلى مواقع أرضية جوها جاف [Pryke et al., 2002]، وذلك لتقليل الآثار بسبب الغلاف الجوي للأرض إلى أدنى حد. وتتضمن الخلفية الراديوية أيضاً ذروة بث مكثف مرتبط بمستوي مجرتنا (درب التبانة)، مع حدوث حد أقصى باتجاه مركز المجرة. وفي بعض الاتجاهات، تمتد رشقات البث من المستوي نحو الخارج. ويكون الإشعاع المجري عادةً غير حراري ولكن الذروة التي تحدد المستوي المجري تتضمن أيضاً مساهمة حرارية ناتجة عن الغاز المتأين.

وينتج البث المتواصل الذي يُرى من عدة اتجاهات في السماء عن مزيج من الآليات المادية المختلفة: ويتضح ذلك من الطيف المبين في الشكل 1.2. ويتعين القيام بعمليات رصد عند ترددات متعددة للحصول على هذا الطيف من أجل تقييم آليات البث المختلفة ومن ثم تحديد الظروف المادية داخل المصدر وحوله.

الشكل 1.2

طيف مصدر راديوي متواصل



كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) مرسومة كدالة للتردد. ويمثل الخط المتعرج إلى اليسار بث البلازما، ويمثل الخط القطري من الأعلى يساراً إلى الأسفل يميناً بث سينكروتون، ويمثل النتوء إلى اليمين البث الحراري. ويمثل الخط السميكة الطيف المرصود. وقد تختلف المقادير النسبية للمكونات المختلفة بشكل كبير من مصدر لآخر. والنطاقات (حتى 10 GHz) الموزعة لخدمة الفلك الراديوي تظهر في الطرف الأعلى من الرسم البياني.

Radio-Astro_2

ومعظم المصادر المنفردة الواقعة خارج المستوي المجري تعتبر خارج المجرة. وهي مصادر غير حرارية أساساً يتم تحديدها بصرياً مع مجرات نائية وأجرام شبه نجمية (quasars) موزعة عشوائياً إلى حد ما عبر السماء. وقد أدت عمليات الرصد الراديوي لهذه المصادر إلى وضع نموذج يتألف من نواة مجرية نشطة ذات جسم مركزي ضخم، قد يكون ثقباً أسود، يحيط به قرص ملتحم تتدفق إليه غازات وتخرج منه نفثات من جزيئات عالية القدرة تتفاعل مع مجالات مغناطيسية مما يؤدي إلى مناطق ممتدة من البث الراديوي. ومن جهة أخرى، فإن معظم الأجسام ضمن بضع درجات من المستوي المجري تنتمي إلى مجرتنا. وهي تشمل مصادر حرارية مرتبطة بمناطق هيدروجينية متأينة (المناطق HII) أو ببعض النجوم (بما فيها الشمس) أو الكواكب، فضلاً عن مصادر غير حرارية مرتبطة ببقايا نجوم ساطعة (البقايا الممتدة للنجوم المتفجرة). ويجري أيضاً رصد البث الراديوي الصادر عن مناطق الهيدروجين المتأين (HII) وبقايا النجوم الساطعة في المجرات القريبة.

وغالبا ما يتميز الإشعاع غير الحراري الذي يُرصد من مصادر خارج المجرة ومصادر في المستوي المجري (بما في ذلك الضوضاء الخلفية وبقايا النجوم المتفجرة) باستقطاب خطي جزئياً. وهذا الإشعاع هو عبارة عن إشعاع سينكروتوني ناتج عن دوران (ومن ثم تسارع) الإلكترونات في المجالات المغناطيسية المستقطبة خطياً واتجاه استقطاب أصيل متعامد مع اتجاه المجال المغناطيسي. وهكذا، فإن وجود الاستقطاب في الإشعاع الراديوي الكوني يعني وجود ترتيب معين في المجالات المغناطيسية المرتبطة به. وتقدم الدراسات المتعلقة بالإشعاع المستقطب الناتج عن بقايا النجوم المتفجرة نظرة معمقة في تفاعل هذه البقايا مع المجالات المغناطيسية المحيطة بين النجوم. بيد أن الاتجاه الأصيل للاستقطاب يختلف عادةً عن الاتجاه المرصود نظراً لخضوعه لدوران فاراداي بسبب إلكترونات واقعة في مجالات مغناطيسية بين مصدر الإشعاع والأرض. ونظراً لأن دوران فاراداي يختلف عكساً مع مربع التردد، فإنه يمكن قياسه باستعمال الاستقطابات المرصودة على مدى من الترددات. ولذلك توفر الدراسات المتعلقة بدوران فاراداي وسيلة قوية لدراسة كثافة الإلكترونات والمجالات المغناطيسية الموجودة في الوسط ما بين النجوم.

والعديد من الظواهر ذات الأهمية الفيزيائية الفلكية لا يمكن رصدها إلا عند ترددات 30 MHz أو أقل. وتشمل الأمثلة امتصاص البث المتواصل بواسطة الغازات المتأينة الأمامية في مجرتنا، والامتصاص الذاتي في المجرات الراديوية وأشباه النجوم والإشعاعات منخفضة التردد الصادرة من البلازما الواهية الموجودة في مجموعات من المجرات.

1.3.2 التغيرات الزمنية للإشعاع المتواصل

إن تغير البث المتواصل بتغير الزمن أمر شائع نسبياً. وقد يتخذ أشكالاً مختلفة: رشقات تستمر من بضع أجزاء من النانوثانية إلى ساعات، وبث نبضي في فترات تكرارية تتراوح من بضع ملليثوانٍ إلى ثوانٍ، وتغيرات غير دورية تمتد على مدى أسابيع أو شهور، أو تغيرات جيئية دورية.

والشمس مصدر من المصادر الاستثنائية للرشقات قصيرة الأمد للطاقة الراديوية ذات الأنواع المختلفة والتي تولد رشقاتها معلومات هامة عن العمليات الفيزيائية للبلازما [McLean and Labrum, 1985]. وتكون هذه الرشقات على أشدها عند ترددات تقل عن 300 MHz. وإضافةً إلى ذلك، قد تزداد الرشقات الناجمة عن الاضطرابات في الغلاف الجوي الشمسي بشكل تدريجي من حيث التردد طوال عمرها الافتراضي. وقد تم الكشف عن توهجات راديوية وبصرية مترابطة صادرة من نجوم أخرى، على الرغم من أن كوكب المشتري مصدر أيضاً لرشقات مكثفة تحدث بشكل متقطع عند ترددات تقل عن 30 MHz [Roberts, 1963].

ويتميز كوكب المشتري بشكل خاص من حيث التغير بالإضافة إلى البث الحراري المستمر المنبعث من قرصه والرشقات المذكورة أعلاه، وذلك نظراً لأن مجاله المغنطيسي يشمل أحزمة van Allen. وهذه الأحزمة تولد بث سنكروترونات مستقطبة غير حرارية بحزمة عالية تتمركز نحو أحزمتها الاستوائية. ونظراً لتخالف المحور المغنطيسي نسبةً إلى محور الدوران، تتغير الشدة واتجاه الاستقطاب للبث غير الحراري لكوكب المشتري المرصود عند سطح الأرض تغيراً جيئياً مع دوران الأرض.

وغالباً ما تُظهر النجوم الأقزام البيضاء ذات المجالات المغنطيسية القوية توهجات شديدة في النظام الراديوي في ترددات تصل إلى عدة وحدات GHz مما يتيح دراسة مادة البلازما في غلافها الجوي.

ويمكن للغلاف الأيوني للأرض والوسط فيما بين الكواكب للنظام الشمسي أن يتسبب في تآلف البث الراديوي المرصود الناجم عن مصادر صغيرة الحجم الزاوي بمعدل يمكن أن يصل إلى عدة وحدات هيرتز. ويمكن استنباط حجم المصدر والتفاصيل المتعلقة بعدم تجانس الوسط فيما بين الكواكب وتحركاته من خصائص هذا التآلف. ولئن لوحظ تآلف بعض النجوم النابضة، فهذا ناتج عن الوسط بين النجوم وليس عن الوسط بين الكواكب.

وتبين بعض المصادر الراديوية، وخاصةً أشباه النجوم، تغير البث الراديوي على فترة زمنية تمتد لعدة أسابيع. ويتغير البث الراديوي للمصادر المستبانة بصرياً مثل مصادر النجوم المتفجرة والمستعرة والأشعة السينية تبعاً للتغيرات في اللمعان البصري.

ولعل أكثر المصادر إثارة للاهتمام من ناحية الفيزياء الفلكية للإشعاع النبضي هي النجوم النابضة. وقد تم اكتشاف بثها النبضي المنتظم للغاية في عام 1967 [Hewish et al., 1968]. والنجوم النابضة هي نجوم تتكون في مجملها تقريباً من نيوترونات (أي من مادة في حالة مكثفة جداً) وتقع معظم النجوم المعروفة منها في مجرتنا بفترات نبض تتراوح بين مئليثانية واحدة و 8 ثوانٍ. ومع أن فترة النبض تحدد بواسطة دوران النجم فإن مدة النبضة، التي تتوقف على الزاوية بين خط البصر باتجاه الراصد ومحور دوران النجم، تبلغ عادةً نسبة مئوية قليلة من فترة النبضة. ويُرصد عادةً بث النجوم النابضة في مدى التردد من 30 MHz إلى 3 GHz باستعمال تقنيات حساب متوسط النبضة: غالباً ما يتطلب ذلك أزمنة تكامل تبلغ عدة ساعات لتحديد متوسط جانبيات النبضة. وتتسم بعض النجوم النابضة بنبضات متصلة مستقطبة خطياً. وتشتت جميع النبضات عند مرورها عبر الوسط بين النجوم باتجاه الأرض، ويتغير اتجاه استقطابها بحسب دوران فاراداي (انظر البند 2.3.2). وتسمح قياسات التشتت إلى جانب دوران فاراداي بتحديد كثافة الإلكترونات وشدة المجال المغنطيسي على طول خط البصر. وكذلك، تسمح قياسات وقت وصول النبضة الذي يمتد سنوات عديدة بتحديد مواقع وتحركات النجوم النابضة عبر السماء (تحركات صحيحة). والبيانات المتعلقة باستقرار النجوم النابضة على المدى الطويل، خاصةً تلك المتعلقة بفترات المئليثانية، تدعم استعمالها المحتمل كميقاتيات معيارية لخدمات التوقيت في المستقبل (انظر الفصل 7). ويقوم راصدون في إطار تعاون على الصعيد العالمي بتحديد توقيت مجموعة من النجوم النابضة في حدود المئليثانية آملين أن يمكنهم هذا المشروع المتطور في نهاية المطاف من الكشف مباشرة عن إشعاع الموجات بفعل الجاذبية.

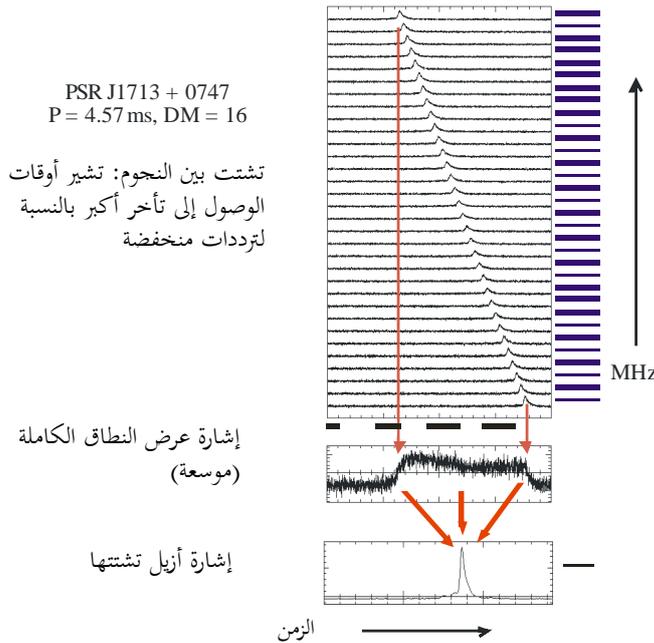
وتتسم النجوم النابضة بكثافات سطحية للمجال المغنطيسي من المقدّر أن تكون في المدى 10^{-4} إلى 10^9 Tesla، وقد تصل، في الحالات القصوى للنجوم المغنطيسية، إلى 10^{10} Tesla. ويؤدي المجال المغنطيسي الشديد المقترن بالدوران السريع إلى مجالات كهربائية قوية ويولّد بلازما نسبية كثيفة حول النجم النيوتروني ويحمل تياراً قوياً. ويُنظر إلى البث الراديوي المتناسك القوي كنتاج ثانوي لتبدد الطاقة في الغلاف المغنطيسي، ولكن على الرغم من إمكانية كشفه بوضوح فإنه لا يشمل سوى جزءاً ضئيلاً (10^{-4} إلى 10^{-6}) من خسارة الطاقة الكلية للبلازما. وتختلف هذه الظروف الاستثنائية للمجال المغنطيسي كل الاختلاف عن الظروف الموجودة في أي مكان آخر في الكون ولا يمكن تحقيقها في المختبرات على الأرض. وتعتبر النجوم النابضة مختبراً مثالياً للفيزياء في هذا المجال، ونظراً لأن عملية بثها الراديوي لم تُفهم بشكل جيد بعد أكثر من أربعين عاماً فهذا يدل على أنه ما زال الأمر يتطلب إجراء الكثير من البحوث في هذا الشأن. ويمكن رصد البث الراديوي بكل سهولة في مدى التردد $30 \text{ MHz} - 1.5 \text{ GHz}$ ، ولكن ما زال هناك العديد من المصادر ذات التدفقات المتوسطة التي تبلغ بضع مئات من وحدة μJy ($100 \mu\text{Jy} = -300 \text{ dB(Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1})$) عند تردد 40 GHz ويمكن كشفها بواسطة هوائيات كبيرة يصل ترددها إلى 90 GHz . وتُستعمل عموماً تقنيات حساب متوسط النبضة محكمة الطور مع أزمنا تكامل تتراوح بين دقائق وساعات لتعريف جانبية متوسط النبضة. وتُعطي حساسية الكشف لتليسكوب راديوي من أجل بث نبضي دوري بتدفق متوسط للإشارة S_{min} بالمعادلة التالية [Lorimer & Kramer, 2005]:

$$S_{min} = \frac{kT_{sys}}{G\sqrt{n_p\Delta t \cdot \Delta\nu}} \sqrt{\frac{W}{P-W}}$$

حيث G هو كسب الهوائي و n_p عدد الاستقطابات المحتسب متوسطها و Δt زمن التكامل و $\Delta\nu$ عرض النطاق المرصود و P فترة النبضة و W عرض النبضة. وهكذا، بالنسبة لأي سوية إشعاع متوسطة، تصبح عتبة الكشف للنبضات الضيقة ($W \ll P$) متناسبة مع الجذر التربيعي لدورة العمل $\eta = W/P$. وفي الوقت نفسه، يكون تدفق الذروة أقوى من متوسط التدفق بمعامل $\eta^{-1} = P/W$. ونتيجة لذلك، تتناسب عتبة الكشف للنبضات الضيقة مع القيمة $\eta^{-1/2}$ بحيث تصبح أكبر فيما يتعلق بالنبضات الأضيق التي لها متوسط الشدة ذاته.

الشكل 2.2

تشتت النبضات بحسب الوسط بين النجوم (النطاق-L)



Radio-Astro_22

ويؤدي التشتت بسبب البلازما الواهية جداً بين النجوم إلى تشوه النبضات الراديوية، إذ تصل النبضات عند ترددات عالية قبل أن تصل عند ترددات أدنى، ويتناسب التأخر عكساً مع مربع التردد. ونظراً لطول المسافات المعنية، يكون التأثير قوياً جداً في معظم نطاقات التردد ويؤدي إلى تشوه جانبيات النبضات حتى ضمن عروض نطاق من بضعة وحدات MHz. ولا بد من إزالة تشتت الإشارة للتمكن من كشف الجانبية.

وتكون النبضات الراديوية المتأتية من بعض المصادر مستقطبة خطياً. وعند مرورها عبر الوسط بين النجوم باتجاه الأرض تشتت النبضات ويتغير اتجاه استقطابها بحسب دوران فاراداي (انظر البند 2.3.2). ويتيح الجمع بين قياسات التشتت ودوران فاراداي معلومات عن كثافة الإلكترونات والمجالات المغنطيسية على طول خط البصر باتجاه النجم النابض.

وتعطي قياسات أوقات وصول النبضة، الممتدة بضع سنوات، معلومات عن مواقع وتحركات النجوم النابضة عبر السماء (تحركات صحيحة) والتحركات المدارية للنجم النيوتروني في حال وجود نجوم مرافقة. وكانت أوائل الكواكب المكتشفة خارج المجموعة الشمسية تسير في مدار حول نجم نابض. ومن شأن الاستقرار الاستثنائي وإمكانية التنبؤ بالبث الراديوي النبضي أن يجعل النجوم النابضة أدوات مثالية لاختبارات النسبية العامة. وانبعاث موجات الجاذبية من النجوم النابضة في مدارات قريبة حول نجوم نيوترونية أخرى ونجوم أقزام بيضاء هو واحد من تنبؤات النسبية العامة التي أكدتها قياسات توقيت النبضة. وتجري اختبارات أخرى للنسبية العامة ومقارنة تنبؤاتها مع تلك المستمدة من نظريات الجاذبية الأخرى باستعمال قياسات التوقيت وقياس التغيرات الصغيرة في أوقات وصول النبضات الصادرة من العديد من النجوم النابضة المنتشرة عبر القبة السماوية. ومن المحتمل أن تسمح هذه المنهجية بكشف موجات الجاذبية الطويلة.

وتقع حالياً دقة توقيت النجم النابض على المدى الطويل في حدود $0,1 \mu s$ بالنسبة لأفضل المصادر ويقتررب استقرار توقيتها من استقرار أفضل معايير التوقيت الذرية. وينطوي استقرار التوقيت المتأصل للنجوم النابضة على احتمال استعمال هذه المصادر في المستقبل كيميقاتيات معيارية من أجل خدمات التوقيت (انظر الفصل 7) والملاحة المستقلة لمسابير الفضاء السحيق.

ومعظم النجوم النابضة المكتشفة، زهاء 2 000 نجم، تقع في مجرتنا. وتبحث المراصد الراديوية عن النجوم النابضة لعدة أهداف منها اكتشاف النجوم النابضة التي تدور حول أجسام مدمجة أخرى كنجم نيوتروني آخر أو نجم نابض أو ربما ثقب أسود. وتجري عمليات البحث بتسجيل الضوضاء الراديوية القادمة من موقع محدد ثم البحث عن تغيرات دورية تتراوح بين بضعة ملليثوانٍ وعدة ثوانٍ.

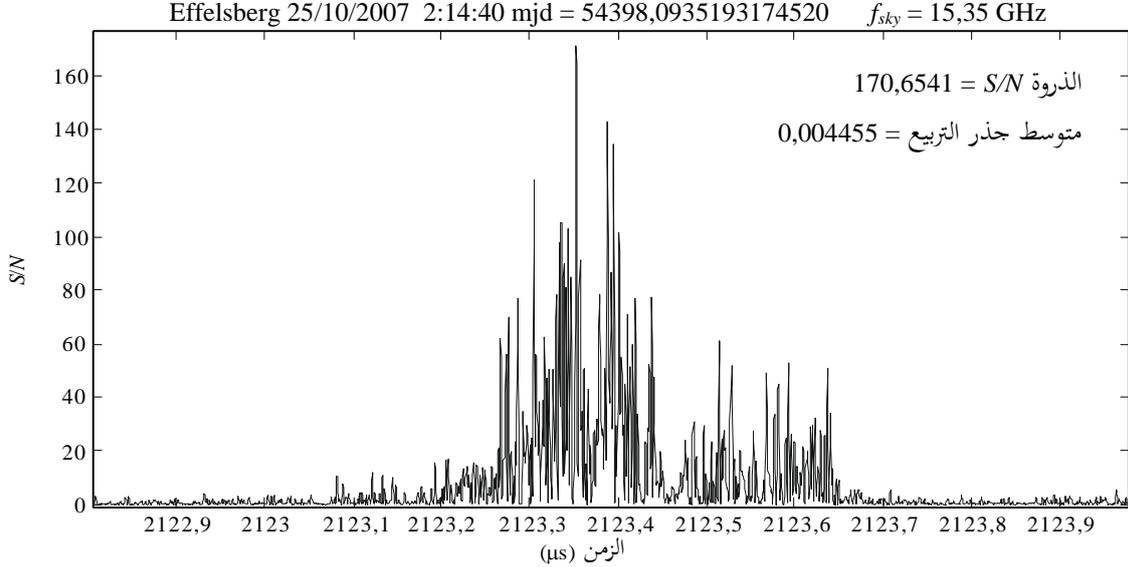
التغاير العابر والقصير الأجل للنجوم النابضة

تختلف جانبيات فرادى النبضات الصادرة عن نجم نابض من نبضة لأخرى بينما يبقى متوسط الجانبية كما هو لعدة سنوات بمثابة "البصمة" التي تميزه. ويمكن أن يكون تغاير النبضة المفردة هذا ضعيفاً أو قوياً ويختلف من جسم لآخر. وفي أقوى الحالات، يُلاحظ ما يسمى النبضات الراديوية العملاقة التي يمكن فيها لتدفق الذروة أن يتجاوز المتوسط بعامل 10^6-10^8 .

الشكل 3.2

نبضة راديوية عملاقة صادرة من نجم السرطان النابض عند 15,35 GHz [Jessner et al., 2010]

يبلغ تدفق الذروة Jy 6 800 (~9 000 K من أجل هوائي قطره 100 متر). مجموع مدة التسجيل المبينة هي 1,2 μ s.



Radio-Astro_23

وتتميز النبضات العملاقة باستقطاب شديد وتحدث ذروة البث فيها على فترات دون نانو ثانية. ويُعتقد أن آلية البث فيها شكل متطرف من أشكال البث الراديوي العادي للنجوم النابضة، ولكن هذه الظاهرة كذلك غير مفهومة جيداً. ويقوم علماء الفلك الراديوي بكشف النبضات وتحليلها باستعمال مسجلات عابرة بمعدلات اعتيان مرتفعة وآلية إطلاق تلتقط إشارات قوية قصيرة الأمد من الضوضاء.

ولا يمكن كشف جميع النبضات التي تبثها النجوم النابضة في جميع الأوقات. وتفاوت التلاؤلات بين النجوم (على غرار وميض النجوم في السماء ليلاً، ولكنها ناتجة عن تغاير الوسط بين النجوم) من حيث البث الراديوي، وبما أنها ناجمة عن تأثير البلازما فهي تتوقف بشدة على التردد. وتجري دراسة تالأؤلات النجوم النابضة لزيادة فهم بنية الإلكترونات وتوزيع كثافتها في الوسط بين النجوم على مجموعة من الأطوال المختلفة.

ومع ذلك، تبث بعض النجوم النابضة إشعاعها بشكل غير منتظم تماماً. وتفقد بعض هذه الأجسام بضع نبضات (انعدام) من وقت لآخر، ولكن يبقى النجم النابض في بعض الحالات هادئاً لأيام عديدة قبل أن يبدأ فجأة البث من جديد. وتلاحظ حالة قصوى لهذا السلوك من خلال التمورات الراديوية الدوارة (RRATS) وهي عبارة عن مرسلات قوية ولكنها ترسل رشقات عشوائية تستغرق بضع ثوانٍ فقط وتكون قابلة للكشف ربما مرة أو مرتين في اليوم فقط. ويتطلب كشفها وتحليلها هوائياً كبيراً في نطاق راديوي خالٍ من التداخل النبضي المتفرق.

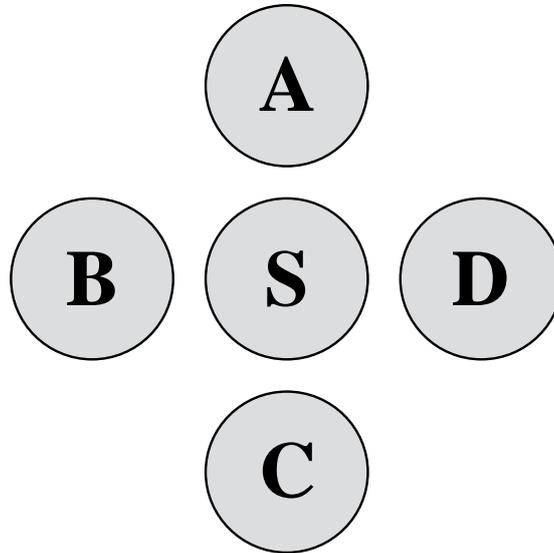
2.3.2 قياس الإشعاع المتواصل

يتعين إجراء قياسات عند عدد من الترددات لتحديد تبعية البث المتواصل للتردد. ويكفي إجراء هذه القياسات على فترات ثمانية نظراً لأن طيف البث المتواصل يكون عادةً سلساً، وإن كان تقارب الفترات مرغوباً فيه لقياس تشتت النجم النابض ودوران فارادي وكذلك أطراف الامتصاص الذاتي. وتزداد حساسية القياس باستعمال عروض نطاق كسرية واسعة عند كل تردد، حيث تكون نسبة 10% مرغوباً فيها وتعتبر نسبة 2% بمثابة الحد الأدنى. ويتناول الفصل 3 نطاقات خدمة الفلك الراديوي الموزعة لإجراء قياسات البث المتواصل.

وتتم معظم عمليات رصد المصادر الراديوية عند ترددات أكبر من حوالي 100 MHz باستعمال هوائيات مكافئية عاكسة، (شكل الصحن). ويمكن استخدامها بشكل منفرد أو في صفائف. ويتمثل العامل المقيد في استعمال التليسكوبات الراديوية بهوائي مكافئي وحيد في استبانها الزاوية التي تقابل فتحة حزمة بنصف القدرة. ولا يمكن استعمالها بشكل فعال إلا لرسم بنية في السماء تقابل زاوية عدة فتحات حزم هوائيات على الأقل: مثال ذلك البث الراديوي من درب التبانة والشمس والقمر ومن بعض المجرات القريبة. ويتمثل الإجراء المعتاد في تقسيم المنطقة التي ينبغي رسم خارتها إلى سلسلة من خطوط المسح الشبكي يفصل بينها نصف فتحة الحزمة لا أكثر، أو إلى شبكة من النقاط بمباعدة لا تزيد عن نصف فتحة الحزمة. وقد يستغرق وضع الخارطة وقتاً طويلاً، على أن يُفترض ضمناً عدم تغير المصدر والبيئة التي تجري فيها القياسات أثناء هذه الفترة. وبصورة عامة، يتم ترتيب إجراء القياس بحيث تكون نقطة الرصد أثناء المسح عند ارتفاع ثابت، بحيث يظل تأثير الإشعاع الأرضي في الفصوص الجانبية ثابتاً أثناء المسح ويمكن إزالته بسهولة. ومع ذلك، وفي العديد من الحالات، يكون للتليسكوبات بهوائي مكافئي وحيد فتحات حزمة أوسع من المصدر الذي يجري رصده. وفي هذه الحالات، تتمثل القياسات في تحديد خصائص الإشعاع (مثل الكثافة والاستقطاب) من اتجاه المصدر قيد النظر ومقارنتها بخصائص الإشعاع الصادر من مناطق قريبة في السماء. وفي الحالة المثلى، توضع خارطة المنطقة التي تضم المصدر وما حوله، بحيث يتسنى تقدير البث الزائد عبر الخلفية. ولكن عندما لا يسمح الوقت بذلك، تجري القياسات على عدد محدود من النقاط القريبة من المصدر على النحو المبين في الشكل 4.2. وفي معظم الحالات، لا تتغير الخصائص المقيسة كثيراً أثناء مدة الرصد ويمكن تحديد قيمتها المتوسطة على مر الزمن فيما يخص كل اتجاه في السماء. ويوضح الشكل 5.2 التغيرات في خرج المستقبل لفترة قصيرة من الزمن. وتُقدّر مساهمة المصدر في الإشعاع الكلي الوارد كالتالي: $S - (A + B + C + D)/4$ ، حيث تمثل الأحرف سويات متوسط القدرة الواردة عند اتجاهات التسديد المقابلة المبينة في الشكل 4.2.

الشكل 4.2

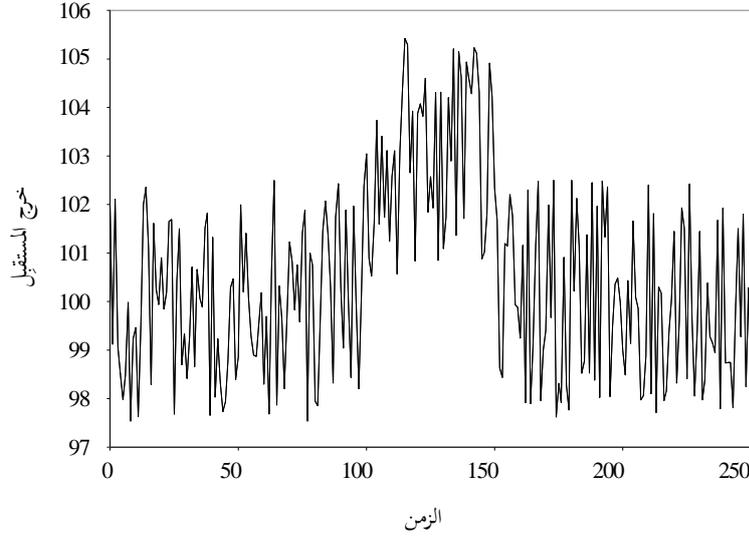
اتجاهات التسديد الشائعة لقياسات بهوائي مكافئي وحيد



أحد الإجراءات الشائعة المستعملة لقياس مصدر يقع في حزمة الهوائي عند تسديد الحزمة باتجاه S. وعند التسديد بهذا الاتجاه، "يرى" الهوائي، بالإضافة إلى المصدر، انبعاثات من خلفية السماء وانبعاثات أرضية ملتقطة من خلال الفصوص الجانبية للهوائي، وانبعاثات غير مرغوب فيها يمكن أن تتوقف خصائصها على الاتجاه والزمن. والنقاط المحيطة A و B و C و D هي نقاط قريبة في السماء. وتمثل الدوائر سويات القدرة البالغة -10 dB أو أقل في مخطط حزمة الهوائي.

الشكل 5.2

مثال لخرج المستقبل في رصد باستعمال هوائي مكافئ وحيد



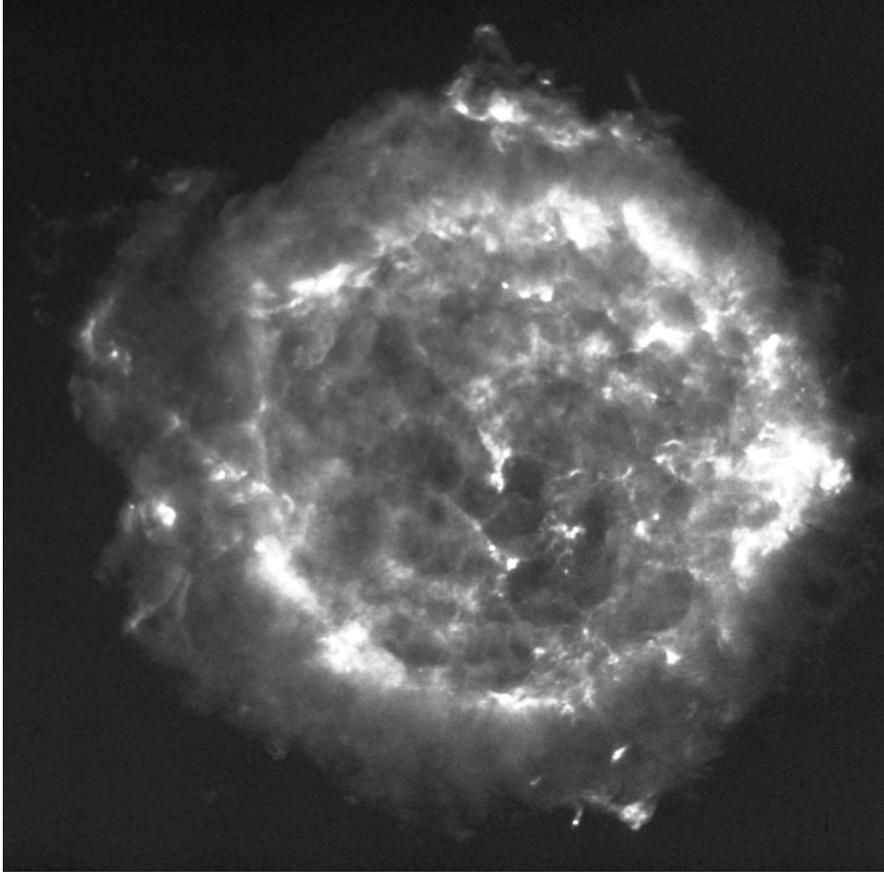
خرج المستقبل (إحداثي العينات) بدالة الزمن (إحداثي السينات) أثناء جزء من وقت الرصد كما في الشكل 4.2. ويقابل الجزء الأيسر من التسجيل الموقع B، والجزء المركزي الموقع S والجزء الأيمن الموقع D. وفي هذا التسجيل، لم يستغرق زمن التكامل سوى بضع ثوان. ويمكن فيما بعد تحديد القيمة المتوسطة للبيانات عبر الزمن المستغرق في كل موقع، كما يمكن تحديد القيمة المتوسطة للنتائج المستمدة من العديد من مجموعات اتجاهات التسديد لبلوغ النسبة S/N المتوخاة.

Radio-Astro_25

ويتميز صفييف من هوائيين أو أكثر يُستخدم كأداة لرسم الخرائط أو التصوير بمجال تقابل يساوي تقريباً فتحة الحزمة بنصف القدرة لفرادى الهوائيات التي تشكل الصفييف واستبانة تساوي فتحة الحزمة بنصف القدرة للصفييف. ويعمل كل زوج من الهوائيات في الصفييف كمرشاح مكاني لقياس اتساع أحد مكونات فورييه للصورة. وإذا كانت هناك هوائيات كافية في الصفييف وكانت مرتبة في تشكيل ثنائي الأبعاد، يمكن عندئذ تحديد عدد كافٍ من مكونات فورييه في فترة زمنية قصيرة لإنتاج صورة انطلاقاً من عملية رصد واحدة. وتكون بعض الصفائف، مثل التليسكوب الراديوي التركيبي في المرصد الراديوي الفيزيائي العمومي في كندا، خطية ومن ثم فهي تعتمد على دوران الأرض لكنس المصدر من عدة اتجاهات. وتجري عمليات الرصد لمدة 12 ساعة تقريباً باستعمال مبادعات ثابتة بين الهوائيات قد تزداد بعمليات رصد إضافية في وقت لاحق باستعمال مبادعات مختلفة بين الهوائيات لتجميع معلومات كافية لإعداد الصورة. ولا تنقل الهوائيات إلى مواقع جديدة إلا بين كل فترة من فترات الرصد البالغة 12 ساعة. ولا تتشكل حزمة الهوائي التركيبية للصفييف إلا بعد معالجة البيانات المستمدة من سلسلة عمليات الرصد الكاملة لمصدر معين، وعندئذ تقابل حجم البيكسل في الصورة الناتجة. ويعطي الشكل 6.2 مثلاً لصورة تركيبية. وقد أجريت عمليات الرصد لهذه الصورة الراديوية عند تردد 5 GHz بواسطة صفييف الهوائيات الكبير جداً (VLA)، وهو صفييف مؤلف من 27 هوائياً قائم في ولاية نيو مكسيكو.

الشكل 6.2

مثال لصورة راديوية



صورة راديوية أعدت في الطيف المتواصل عند 5 GHz من رصدات بواسطة صفييف كبير جداً من 27 هوائياً. والمصدر الراديوي المقصود هو الكوكبة Cassiopeia A، وهي بقايا نجم تفجر قبل حوالي 300 سنة. ويبلغ القطر الزاوي للبنية الرئيسية 4 دقائق قوسية (حوالي 1/7 قطر القمر)، وتبلغ الاستبانة الزاوية 0,6 ثانية قوسية تقريباً. وخلال تفجر النجم، قُذفت الطبقات الخارجية للنجم الضخم بسرعة عالية، ولكنها تباطأت بسبب الغاز بين النجوم، واخترقت الوسط مواد متوسعة ببطء أكبر تنبعث من طبقات أعمق داخل النجم، مما ولد بني شبيهة بالفقاعات. وعند أطوال الموجات البصرية، لا ترى سوى خيوط قليلة باهتة باستخدام أكبر التليسكوبات. الصورة مقتبسة مجاملةً من المرصد NRAO/AUI.

Radio-Astro 26

ويمكن التعمق في رؤية آليات توليد البث الراديوي بفضل البنية المفصلة والتوزيع المكاني للبث الراديوي في المصادر. وفيما عدا الظروف الخاصة، التي يحتجب فيها المصدر بسبب القمر أو أحد الكواكب، يتطلب رسم الخرائط المفصلة صفائف هوائيات واسعة. فعلى سبيل المثال، يجب أن يكون لنظام قادر على تحقيق استبانة زاوية خلال بضع ثوان قوسية أبعاداً تبلغ حوالي 10 000 من أطوال الموجة. ومن ثم، يمكن تحقيق أعلى قدر من التفصيل الزاوي، على مقياس $\sim 10^{-4}$ ثانية قوسية، باستعمال تقنية القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI)، باستخدام هوائيات متباعدة بمسافات تبلغ عدة آلاف الكيلومترات. وتتجاوز الاستبانة الناتجة أفضل استبانة زاوية يمكن تحقيقها حالياً في أي جزء آخر من الطيف الكهرمغناطيسي بعشر مرات على الأقل. وفي الواقع، يُعرّف النظام المرجعي السماوي الدولي، الذي اعتمده الاتحاد الفلكي الدولي، بالمواضع التي تشمل أكثر من 200 مصدر راديوي خارج المجرة جرى قياسها بدقة تبلغ 0,5 مللي ثانية قوسية من خلال عمليات الرصد بتقنية VLBI [Ma et al., 1998]. ونظراً لأن كل هوائيات الصفييف VLBI يجب أن تعمل على التردد ذاته وأن فرادى الهوائيات يمكن أن تكون في بلدان مختلفة أو في مدار الأرض، فمن الضروري تأمين حماية عالمية لنطاقات تردد الفلك الراديوي.

4.2 إشعاع الخطوط الطيفية

يتولد إشعاع الخطوط الطيفية الصادر من سحب الغاز بين النجوم بواسطة الذرات والجزيئات عندما تفقد الطاقة أو تكتسبها إثر التصادم فيما بينها أو عندما تستثيرها النجوم القريبة. وفيما يتعلق بسحابة تحتوي على ذرة معينة أو جزيء معين، يؤدي ذلك إلى تحولات في أحوال الطاقة وإلى نشوء سلسلة من الخطوط الطيفية المنفصلة. وتُحدد الكثافات النسبية والترددات والعروض الخاصة بهذه الخطوط من خلال الظروف المادية وتتوقف على أنواع الجزيئات وكثافتها ودرجة حرارتها وتوزيع سرعتها. وتزداد الكثافة الخطية في بعض الظروف إلى حد كبير بتأثير "ميزر"؛ ويحدث ذلك عادةً في المناطق التي تتكون فيها النجوم أو في الأغلفة النجمية الدوارة للنجوم المتطورة. وتلاحظ الخطوط الطيفية أيضاً عندما تمتص الذرات أو الجزيئات في سحابة ما الإشعاع بطريقة انتقائية من مصدر خلفية متواصل مرئي عبر السحابة.

وعلى الرغم من أن التردد الجوهري (في حالة سكون) لخط طيفي يُعرّف بكل من الذرة/الجزيء المحدد والتحول، يتعرض الخط الملاحظ أيضاً لإزاحة دوبلر وفقاً للسرعة القطرية للذرة/الجزيء، أي بواسطة حركته بالنسبة للراصد على طول خط البصر. وفيما يتعلق بالسرعات الكبيرة، ينزاح التردد الملاحظ انزياحاً كبيراً عن القيمة الجوهريّة، التي غالباً ما تكون دون حدود التردد الأدنى للنطاق الموزع لخدمة الفلك الراديوي. وقد سمحت زحزحة دوبلر في خط الهيدروجين المحايد (HI) عند تردد 1 420 MHz باستيضاح بنية الذراع الحلزونية والدوران لكل من مجرتنا وللعديد من المجرات الخارجية.

1.4.2 أنواع الخطوط الطيفية

يرصد علماء الفلك الراديوي عدة أنواع من الخطوط الطيفية. وأول كشف قاموا به هو التحول فائق الدقة للتحول المغزلي للهيدروجين الذري المحايد (HI) على مقربة من 1 420 MHz (طول الموجة 21 سنتيمتر) في عام 1951 [Ewen and Purcell, 1951]. وكان هذا الكشف معلماً بارزاً في علم الفلك، إذ قدمت جميع عمليات الرصد السماوية اللاحقة أول صورة شاملة للبنية الحلزونية الحقيقية لمجرتنا. ونعلم الآن أن الهيدروجين الذري المحايد متوافر في معظم المجرات، مما يعطي لهذا الخيط الطيفي أهمية أساسية للتمكن من دراسة الغاز بين النجوم في المجرات بصورة عامة. غير أن سرعات الابتعاد المرتفعة للمجرات البعيدة تضمن تعرض بث الهيدروجين المحايد (HI) المنبعث منها لإزاحة دوبلر باتجاه ترددات دون الحد الأدنى لنطاق خدمة الفلك الراديوي المحمي، 1 400-1 427 MHz. وفي الواقع، لوحظ الامتصاص في هذا الخط عند ترددات منخفضة تصل إلى 300 MHz.

وتم الكشف عن أول خط جزيئي (جذر الهيدروكسيل، OH، عند 1,6 GHz) في عام 1963. ومرت عدة سنوات قبل الكشف عن جزيئات أخرى، ولكن تم منذ ذلك الوقت رصد ما يزيد على 10 000 تحول من أكثر من 125 جزيئاً من الجزيئات المختلفة بين النجوم ونظائرها. ويمكن العثور على قائمة بالتحولات التي جرى كشفها في مدى التردد 0,7 إلى 350 GHz في [Lovas, 2004]. ومن الناحية الواقعية، لا يمكن للوائح الراديو أن توفر الحماية إلا لمجموعة مختارة من هذه الخطوط، ولكن من المرغوب فيه توفير الحماية لتلك الخطوط التي تعتبر ذات أهمية فلكية فيزيائية كبرى (انظر الفصل 3).

وتنبعث الخطوط الجزيئية من أنواع مختلفة من سحب الغاز بين النجوم: السحب المنتشرة ذات الكثافة المنخفضة؛ والسحب الداكنة الباردة المنعزلة التي غالباً ما تحتوي على جزيئات غير مستقرة على الأرض؛ والسحب الذرية العملاقة الكثيفة التي تتضمن مناطق الهيدروجين المتأين (HII)، والنجوم الشابة الساخنة والنجوم قيد التكوين. وتحتوي هذه السحب على جزء كبير من الكتلة الإجمالية لمجرتنا، مع أن الجزيئات لا تشكل سوى جزء ضئيل من هذه الكتلة، إذ إن معظمها ما زال يتكون من هيدروجين ذري. والخطوط المميزة هي نوع محدد من الخطوط الطيفية التي تدعمها جزيئات قليلة فقط. وهي تُستحدث من خلال تضخيم إشعاع خلفية متواصل، وتكون في مجرتنا كثيفة وضيقة النطاق جداً ومستقطبة غالباً. وهي موضع اهتمام خاص لأنها تسمح بتحديد المناطق الكثيفة داخل السحب حيث تتكون النجوم، بينما يمكن أن يرتبط بعضها أيضاً بالأغلفة الممددة للنجوم المتطورة. وفي بعض المجرات، يتمركز الإشعاع الميزري فائق اللمعان (ميغاميزر) عريض النطاق على مقربة من النواة. وتوفر الدراسات المتعلقة بالخطوط الطيفية في مجرتنا معلومات عن السحب الجزيئية وعمليات تطور النجوم وعن البنية الحلزونية للمجرة وتطورها الكيميائي. ويجري بحث هذه الخصائص أيضاً في مجرات أخرى، بفضل تحسين الحساسية والاستبانة الزاوية للصفائف الأحدث عهداً. وتشمل الدراسات المتعلقة بالمجرات الأبعد عموماً الخطوط الطيفية لأكثر الأنواع وفرة، وهما الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. وقد سمح رصد الخطوط الجزيئية من مصادر فلكية أيضاً بإجراء عمليات محاكاة مخبرية لبيئتها، وذلك من أجل تركيبها: ومن أمثلة ذلك جزيء سلسلة

الكربون HC_7N وجزئيء cyanohexatriyne، [Kroto et al., 1978]. وكانت إحدى النتائج الجانبية للأعمال المختبرية المثيرة للاهتمام هو اكتشاف جزئيء الكربون الكروي، C_{60} ، buckminsterfullerene، [Kroto et al., 1985].

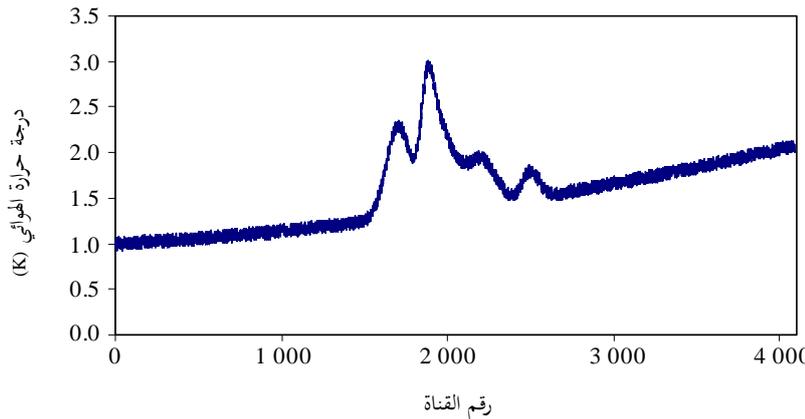
وتبعث خطوط إعادة الاندماج من ذرات الهيدروجين والهيليوم والكربون وغيرها عندما تنقل إلكتروناتها من سوية طاقة أعلى إلى سوية طاقة أدنى. وتتبع هذه العملية عموماً إعادة اندماج أيون وإلكترون. وقد اكتشف علماء الفلك الراديوي في الاتحاد السوفياتي [Sorotchenko et al., 1964] خطوط إعادة الاندماج الأولى في عام 1964. وتولد المناطق الغازية الساخنة المتأينة خطوط إعادة اندماج متعددة تنتشر عبر الطيف الراديوي [Lilley and Palmer, 1968]، ويقع بعضها في نطاقات خدمة الفلك الراديوي الموزعة لعمليات الرصد المتواصلة، بينما يقع عدد قليل منها في نطاقات خدمة الفلك الراديوي الموزعة أصلاً للرصد المحدد لخطوط أخرى من قبيل الهيدروجين المحايد HI أو الهيدروكسيل OH. ويمكننا رصد شدة وشكل خطوط إعادة الاندماج من تحديد الظروف المادية التي تؤدي إلى انبعاثها. وتنشأ ألمع هذه الخطوط عن تحولات بين سويات الطاقة المجاورة للهيدروجين حيث تمثل كثافتها عادةً نسبة مئوية قليلة من شدة التواصل الحراري.

2.4.2 قياس الخطوط الطيفية

يقوم راصدو الخطوط الطيفية بتقسيم نطاق تمرير المستقبل إلى عدد كبير من القنوات الترددية المتساوية في العرض، ويتم ذلك عادةً بمعالجة رقمية لإشارة التردد المتوسط (IF). ويبين الشكل 7.2 خرجاً نمطياً من خلال رصد باستعمال هوائي مكافئي وحيد. ونظراً لأن إرسال الخط الطيفي الضيق المتأصل الصادر عن ذرة أو جزئيء في سحابة غاز كونية يتوسع دائماً بتأثير دوبلر نتيجة التحركات داخل السحابة، يمكن استعمال شدته ومدى تردده لاستقراء التحركات وكتلة المواد داخل السحابة. غير أن البيانات الطيفية غير المصححة تتعرض للتشوه جراء أي انحراف عن استواء نطاق التمرير للمستقبل وأي موجات مستقرة في نظام الهوائي/التغذية وأي عدم اتساق في طيف إشعاع الخلفية. وتزول هذه التأثيرات عادةً من خلال تكرار الرصد عند تردد مركزي مختلف قليلاً لإزالة آثار الميل والتلوج في نطاق التمرير ومن خلال تكرار الرصد في مواقع قريبة في السماء لإزالة البث في الخلفية. وفي حالة بث الهيدروجين المحايد HI الذي ينتشر عبر السماء بأكملها، من الصعب إزالة آثار الإشعاع الوارد في الفصوص الجانبية إزالة كاملة، ويتطلب ذلك معرفة مفصلة بالمخطط الكامل للهوائي وبعض المعرفة بتوزيع الغاز الكوني الذي تتلقاه الفصوص الجانبية عن غير قصد.

الشكل 7.2

مثال لجانبية خرج مستقبل للخط الطيفي لهيدروجين محايد



يمثل إحدائي العينات خرج المستقبل المناسب مع درجة حرارة الهوائي ويمثل إحدائي السينات عدد القنوات الطيفية. ويتم اختيار عروض نطاق القنوات بحيث تناسب عرض الخط الطيفي. وقد تم توسيع الخط الطيفي وحيد التردد نحو الجانبية المبين بواسطة تحركات المواد المشعة في السحابة على طول خط البصر من الهوائي. ويُعزى الخط القاعدي المائل إلى اقتران آثار الأدوات، وربما إشعاع الخلفية، والتي تراعى في التصحيح في عملية خفض البيانات اللاحقة.

Radio-Astro_27

تتعرض جانبية الخط المرصود، أو تباين الشدة بدالة التردد، لإزاحة دوبلر عن تردد السكون الطبيعي بسبب السرعة القطرية للذرات/الجزيئات بالنسبة إلى الراصد. ومن شأن الحركة المضطربة داخل السحابة أن توسّع هذه الجانبية. وإذا كانت السرعة القطرية v_r صغيرة مقارنة W بسرعة الضوء، c ، فإنها تقترب بزحزحة التردد النسبية $\frac{\Delta f}{f}$ بالعلاقة التالية:

$$v_r = -c \frac{\Delta f}{f}$$

ويلاحظ هنا أن إشارة السرعة موجبة بالنسبة للابتعاد مما يؤدي إلى زحزحة تردد سالبة، أي إلى انخفاض في التردد يشار إليه عادةً "بالانزياح نحو الأحمر". ونظراً لأن الدوران التفاضلي داخل مجرتنا يفرض مدى ± 300 كم/ثانية على السرعات القطرية المرصودة للأجسام المجزّية، فإن بيانات السرعة توفر فعلياً بعداً ثالثاً على طول خط البصر لتكملة التوزيع المسقط للمواد في السماء. وإضافة W إلى ذلك، يمكن لاستقطاب بعض إرسالات الخطوط الطيفية، مثل إرسال ميزر، أن يزودنا بمعلومات عن المجالات المغنطيسية في هذه السحب.

وفي حالة سحابة جزئية، تتوقف شدة الجانبية عند تردد معين على درجة الحرارة وكثافة العمود والعمق البصري عند ذلك التردد. وغالباً ما يمكن فصل هذه العلامات إذا كان الخط يشتمل على بنية مرتبطة بتقسيم فائق الدقة لسويات القدرة المتعلقة بالانتقال؛ وإلا يمكن تحديد هذه العلامات من خلال مقارنة عمليات الانتقال المختلفة للجزء ذاته. وهذه التقنية الأخيرة مفيدة بشكل خاص لإزالة الغموض الناجم عن الإرسالات السميكة بصرياً عن طريق دراسة أحد تعديلات النظائر بين النجوم الأقل وفرة، مثل دراسة ^{13}CO بدلاً من ^{12}CO .

والخطوط الطيفية في المجال الراديوي مناسبة بشكل خاص لإجراء قياس دقيق لزحزحات دوبلر، علماً بأن الترددات الراديوية سهلة القياس بدقة عالية. وقد جُمعت قياسات دوبلر لمصادر ميزر مائية في المدار بتردد 22 GHz مع استبانة زاوية عالية وقياسات VLBI لمواقع الخطوط الطيفية مما يسمح مباشرة بتحديد مسافة المجرة NGC4258 البالغة 67.2 ± 0.3 Mpc. وقد أتاح ذلك إجراء القياس الأول المباشر للمسافة إلى جسم خارج المجرة بشكل مستقل تماماً عن أي تسلسل آخر للقياسات الفلكية [Herrnstein et al., 1999].

وتقابل كل قناة في جهاز قياس الطيف مدى محدداً لإزاحة دوبلر، ومن ثم عند استعمال صيف هوائيات لعمليات رصد الخطوط الطيفية، يتم إعداد صورة منفصلة لكل قناة. وفي الكثير من الحالات، يمكن تفسير إزاحة دوبلر على أنها مسافة، وبدلاً من خارطة بيانات نحصل على مكعب بيانات، وهو تمثيل لتوزيع مادة المصدر في مكعب من الفضاء.

وغالباً ما يتطلب الأمر ساعات عديدة من الرصد للحصول على الحساسيات الضرورية من أجل التوصل إلى استنتاجات ذات أهمية فلكية فيزيائية. وانعدام التداخل الضار ضروري عبر عروض نطاق واسعة بما يكفي لتشمل الخطوط المعرضة لتأثير دوبلر ونطاقات المقارنة المتاخمة لإرسالات الخطوط.

5.2 الممارسة الحديثة

يستفيد علماء الفلك الراديوي من العديد من التطورات التقنية. وتسمح هذه التطورات بزيادة الترددات المركزية للمستقبلات العملية تدريجياً فضلاً عن خفض درجة حرارة نظامها وزيادة عرض نطاقها. والواجهة الخلفية الرقمية متاحة الآن على الصعيد العالمي مع تحكم حاسوبي في حيازة البيانات. وهذا يسهل إجراء عمليات تكامل قصيرة يمكن فحص خرجها فيما يتعلق بتداخل الترددات الراديوية الشديد قبل حساب قيمته المتوسطة للحصول على الحساسيات المرغوبة. وتمكّن أوجه التقدم في سرعة نقل البيانات وتكاليف الذاكرة الميسورة أكثر من ذي قبل من حفظ مجموعات كبيرة من البيانات لمعالجتها فيما بعد بواسطة حوارزميات متطورة أكثر من أي وقت مضى. ومن أكبر المستفيدين من العديد من أوجه التقدم هذه هم علماء الفلك الذين يقومون بعمليات الرصد VLBI. ويمكنهم حالياً أن يستعملوا في آن واحد تليسكوبات تقع في كل من أمريكا الشمالية وأمريكا

⁶ ميغابارثانية (Mpc) $= 3.26 \times 10^6$ سنة ضوئية.

الجنوبية فضلاً عن أوروبا وجنوب إفريقيا للحصول على البيانات في الوقت الفعلي عبر شبكات الألياف البصرية وتخفيض البيانات والحصول على الصور المنتجة في الوقت الفعلي تقريباً. وقد تضاعف عرض نطاق هذه الفئة من الرصد عدة مرات في العقد الأخير، مع ما يترتب على ذلك من مكاسب في الحساسية. وعلى العكس من ذلك، تُخزنت سابقاً عمليات الرصد VLBI في أشرطة مغناطيسية لكي تُخفف في الشهور التالية: لم يكن لراصدي الخطوط الطيفية بهوائي مكافئي وحيد أن يتحملوا هذا الإيقاع البطيء منذ الستينات.

وقد غيّرت أوجه التقدم التقني الأسلوب المفضل لإجراء عمليات الرصد المتواصلة: ومن الأفضل الآن عموماً نشر مقياس طيف رقمي يسمح بتحديد تداخل الترددات الراديوية الشديد وإزالته من الأطياف قبل الحصول على قياس متواصل. وكذلك، فإن عروض النطاق الأكبر للمستقبلات الحالية شجعت أولئك الراصدين الذين ينعمون باستعمال أساليب الرصد مع بعض الحماية المتأصلة من تداخل الترددات الراديوية للرصد خارج النطاقات الموزعة لخدمة الفلك الراديوي. ويحصل راصدون آخرون على بيانات صالحة فلكياً باستعمال مراشيع ثلمية (من نوع فائق التوصيل عالي الحرارة أحياناً) لإلغاء الإشارات الشديدة غير المطلوبة المجاورة لتمرير نطاقها المختار، وكذلك باستعمال استبانة طيفية عالية لتمكين تطبيق تقنيات البتر على خصائص النطاق الضيق من منظور الانسان. ومع ذلك، لا تزال خدمة الفلك الراديوي بحاجة للنطاقات الموزعة لها لتمكين المعايرة الدقيقة للبيانات وتقليل الغموض المتصل بتداخل الترددات الراديوية في عمليات رصد الخطوط الطيفية.

6.2 الخلاصة

يؤدي علم الفلك الراديوي دوراً حيوياً في بحوث الفيزياء والفلك الأساسية لاستكشاف الكون. والعديد من الظواهر المدروسة لا يمكن ملاحظتها في أجزاء أخرى من الطيف الكهرمغناطيسي، كما يحدث على سبيل المثال لا الحصر في الإرسال الخطي للهيدروجين الذري المحايد وانبعاثات ضوضاء الخلفية بالموجات الصغيرة وبنيتها الزاوية التي تكتسي أهمية أساسية في علم الكونيات، والمناطق الشاسعة للإرسالات السنكروترونية المرتبطة بالمجرات الراديوية، ومناطق تكوين النجوم التي يحجبها الغبار في أطوال الموجات البصرية. وعلاوة على ذلك، يزودنا المجال الراديوي بأعلى استبانة زاوية يمكن تحقيقها والمواقع الزاوية الأكثر دقة فضلاً عن أدق إزاحة دوبلرية. وهكذا، فإن علم الفلك الراديوي لا يقتصر على كونه مجرد تكملة للتقنيات البصرية التقليدية وإنما يؤدي دوراً رائداً في اكتشاف العديد من مجالات علوم الفلك والفيزياء الفلكية .

المراجع

- BENNET, C. et al. [2003] "The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission", *Astrophysical Journal*, Vol 583 (1), p. 1–23.
- BURKE, B. F. and GRAHAM-SMITH, F. [2002] *An introduction to radio astronomy*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- EWEN, H. I. and PURCELL, E. M. [1951] Observations of a line in the galactic radio spectrum. *Nature*, Vol. 168, p. 356.
- HERRNSTEIN, J. R., MORAN, J. M., GREENHILL, L. J., DIAMOND, P. J., INOUE, M., NAKAI, N., MITOSHI, M., HENKEL, C. and RIESS, A. [1999] A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk. *Nature*, Vol. 158, p. 539.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- JANSKY, K. G. [1935] A note on the source of interstellar interference. *Proc. IRE*. Vol. 23, p. 1158-1163.
- JESSNER, A. et al. [2010] Giant pulses with nanosecond time resolution detected from the Crab pulsar at 8.5 and 15.1 GHz, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 524, id.A60
- KROTO, H. W., KIRBY, C., WALTON, D. R. M., AVERY, L. W., BROTON, N. W., MACLEOD, J. M. and OKA, T. [1978] The detection of cyanohexatriyne in Heiles's cloud 2. *Astrophys. J.*, Vol. 219, L133-L137.
- KROTO, H. W., HEATH, J. R., OBRIEN, S. C., CURL, R. F. and SMALLEY, R. E. [1985] C_{60} : Buckminsterfullerene. *Nature*, Vol. 318, p. 162-163.
- LILLEY, A. E. and PALMER, P. [1968] Tables of radio frequency recombination lines. *Astrophys. J., Suppl. Series*, Vol. 16, p. 143-174.
- D. LORIMER, D. and KRAMER, M [2005]: *Handbook of Pulsar Astronomy*, CUP, Cambridge (U.K.).
- LOVAS, F. J. [2004] Recommended rest frequencies for observed interstellar molecular microwave transitions – 2002 revision. *J. Phys. and Chem. Ref. Data*. Vol. 33, p. 117-335.
- MA, C, ARIAS, E. F., FEY, A. L., GONTIER, A.-M., JACOBS, C. S., SOVERS, O. J., ARCHINAL, B. A. and CHARLOT, P. [1998] The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 516-546.
- MCLEAN, D. J. and LABRUM, N. R. [1985] *Studies of the sun at metre wavelengths*. Cambridge University Press.
- Planck Collaboration et. al [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys.*, Vol. 536, 1
- PRYKE, C., HALVERSON, N. W., LEITCH, E. M., KOVAC, J., CARLSTROM, J. E., HOLZAPFEL, W. L. and DRAGOVAN, N. [2002] Cosmological parameter extraction from the first season of observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 46-51.
- ROBERTS, J. A. [1963] Radio emission from the planets. *Planet and Space Sci.*, Vol. 11, p. 221.
- SMOOT, G. F. and 27 co-authors [1992] Structure of the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J.*, Vol. 396, L1-L5.
- SOROTCHENKO, R. L., BORODZITCH, O. S., DRAVSKIKH, Z. V. and KOLBASSOV, V. A. [1964] Proc. of the XIIth General Assembly of the International Astronomical Union, Hamburg, Germany.

الفصل 3

نطاقات التردد المفضلة لعمليات الرصد الفلكية الراديوية

1.3 اعتبارات عامة

1.1.3 عمليات الرصد الفلكية الراديوية القائمة على الأرض

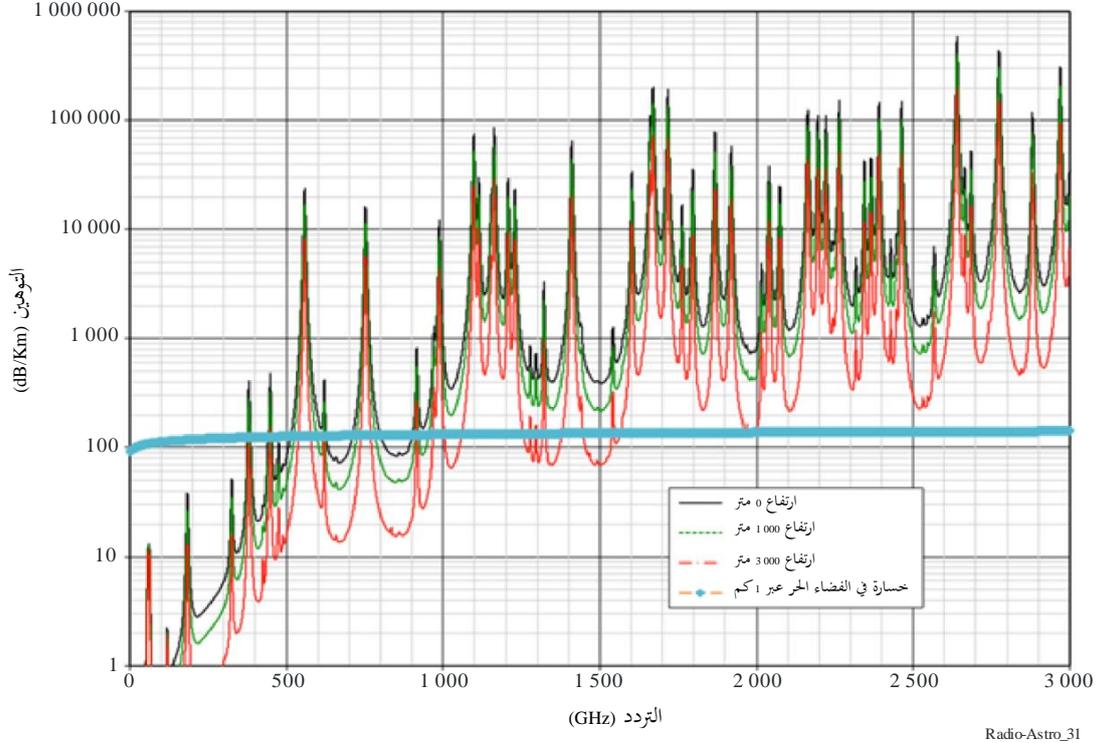
يتوقف اختيار التردد من أجل عمليات الرصد الفلكية الراديوية القائمة على الأرض على الظواهر التي يتعين رصدها والغلاف الجوي للأرض (التروبوسفير والأيونوسفير). ويؤثر الأيونوسفير بشدة على عمليات الرصد عند ترددات أقل من 30 MHz؛ وتشير القياسات إلى أن أدنى تردد عملي للرصد القائم على الأرض يبلغ حوالي 1,5 MHz (انظر البند 1.2.3)؛ وتجري معظم عمليات الرصد عند ترددات فوق 20 MHz تقريباً. ويؤثر التروبوسفير على عمليات الرصد من خلال الامتصاص ولا سيما بسبب الأكسجين (O_2) وبخار الماء (H_2O). ويوضح الشكل 1.3 بياناً التوهين بسبب رنين هذه الجزيئات. أما آثار المكونات الأخرى للغلاف الجوي مثل CO و NO و NO_2 فهي مهمة. وعلى الرغم من أن بعض الاكتشافات الأولى للإرسالات الراديوية المجزئة تمت عند بضع عشرات الميغاهرتز (أي عند أطوال الموجات الديكامترية)، كان هناك تقدم عام في علم الفلك الراديوي نحو قياسات عند ترددات أعلى.

وقد أسهمت في هذا الاتجاه الاستبانة الزاوية العالية التي يمكن تحقيقها بواسطة هوائيات مكافئية وتطور المضخمات الأولية منخفضة الضوضاء وتعاقب الاكتشافات عند الترددات الأعلى. وقد اضطلع علماء الفلك الراديوي بدور ريادي في استعمال ترددات فوق 100 GHz، وتجري عمليات الرصد الآن عند ترددات تصل إلى 1 000 GHz. وقد بدأ مشروع الصيف المليميترى/دون المليميترى الكبير (ALMA) في أتاكاما عمليات الرصد في عام 2010. ويقع مرصد ALMA في صحراء أتاكاما، شيلي، ويستطيع الرصد في مدى ترددي يتراوح بين 30 و 950 GHz ويحقق استبانة مكانية تصل إلى 0,01 ثانية قوسية. ومن المتوقع أن يكشف مرصد ALMA البنية المفصلة لمواقع تكوين الكواكب وتكوين المجرات وتطورها والعلاقة بين الكون ومصدر الحياة وآفاق أخرى في علم الفلك.

وإلى جانب النتائج الجديدة المتاحة عند ترددات عالية، ثمة ظواهر ذات أهمية فيزيائية فلكية تحدث عند ترددات أدنى فقط، مثل الامتصاص الحر في المناطق المتأينة من المجرة والامتصاص الذاتي في المصادر الراديوية خارج المجرة وآليات الإرسال منخفض التردد من البلازما الواهية في مجموعات من المجرات.

الشكل 1.3

توهين جوي محسوب عبر مسيرات أفقية بطول 1 كيلومتر عند أربعة ارتفاعات مختلفة. للمقارنة، تُرسم أيضاً الخسارة في الفضاء الحر عبر 1 كيلومتر.



2.1.3 عمليات الرصد الفلكية الراديوية القائمة في الفضاء

عمليات الرصد في الفضاء مجال جديد نوعاً ما في علم الفلك الراديوي. وقد أجري العديد من عمليات الرصد الفلكية الراديوية في الفضاء، ومنها على سبيل المثال بواسطة السواتل أو المركبات الفضائية COBE و SWAS و ODIN HALCA و WMAP و PLANCK.

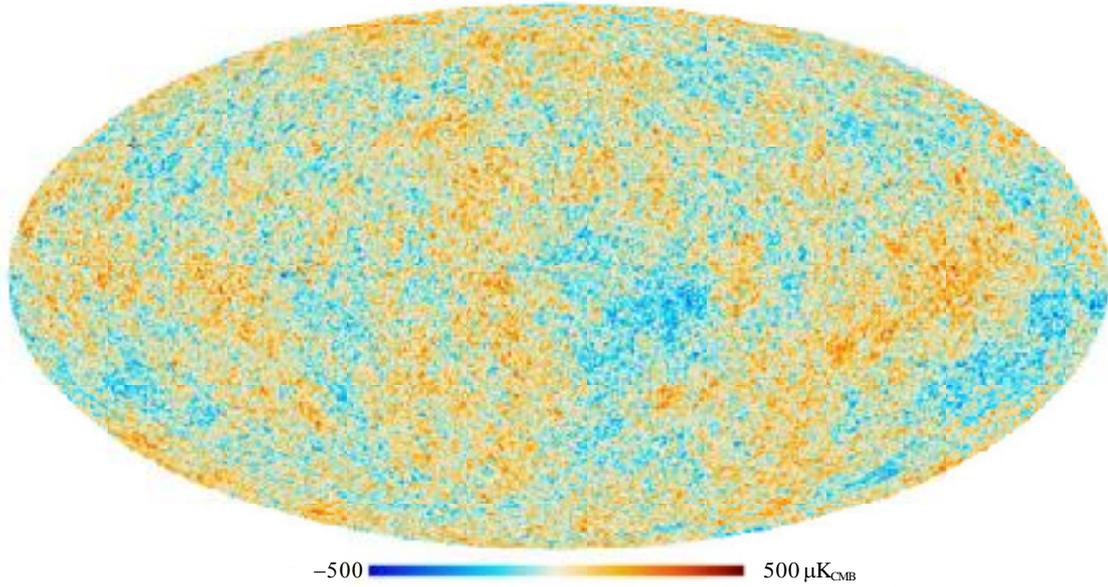
وقامت السواتل COBE و WMAP و PLANCK بكشف ورسم خريطة تباين المناحي لإشعاعات ضوضاء الخلفية الكونية بالموجات الصغرية. وأدى توزيع هذه الإشعاعات المقیسة بين 30 و 857 GHz بواسطة PLANCK (انظر الشكل 2.3) إلى تحديد عمر الكون بمقدار 13,8 مليار سنة وإلى استنباط حقيقة هامة ألا وهي أن الذرات العادية (وتسمى أيضاً باريونات) تشكل 4,9% فقط من الكون، بينما تشكل المادة المظلمة (التي لا تتكون من ذرات) 26,8% وتمثل القدرة المظلمة في شكل ثابت كوني، 68,3% من الكون، الأمر الذي يتسبب في تسريع معدل توسع الكون.

وقام الساتلان SWAS و ODIN برصد ترددات أعلى من 100 GHz وحتى 500 GHz تقريباً لقياس كميات وافرة من المكونات H₂O و O₂ وغيرها من الخطوط الطيفية التي يكاد يكون من المستحيل رصدها من سطح الأرض.

وُدُمج الساتل HALCA مع التليسكوبات الراديوية القائمة على الأرض لإجراء أولى تجارب القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) القائم على الفضاء عند الترددات 1,4 و 1,6 و 5 GHz. ونظراً لانعدام الامتصاص الجوي، فإن عمليات الفلك الراديوي في الفضاء مهمة للغاية من أجل الرصد في أمداء ترددية لا يمكن فيها إجراء عمليات رصد من الأرض.

الشكل 2.3

صورة مفصلة لكل السماء تشمل الكون في مراحله الأولى، أُعدت استناداً إلى بيانات الساتل PLANCK على مدى خمسة عشر شهراً ونصف الشهر



Radio-Astro_32

صورة مفصلة لكل السماء تشمل الكون في مراحله الأولى، أُعدت استناداً إلى بيانات الساتل PLANCK على مدى خمسة عشر شهراً ونصف الشهر. وتكشف الصورة تقلبات في درجة الحرارة عمرها 13,77 مليار سنة (موضحة بفروق اللون) تقابل البذور التي نمت لتتحول إلى مجرات. وطُرحت الإشارة الصادرة من مجرتنا باستعمال بيانات متعددة الترددات. وتبين هذه الصورة مدى درجة حرارة في حدود $500 \pm \mu\text{K}$.

فضل الصورة: وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) وفريق التعاون Planck⁸

2.3 النطاقات المتواصلة المفضلة

إن أحد أهداف عمليات الرصد المتواصلة في مجال الفلك الراديوي هو تعريف تغير تردد الإشعاع تعريفاً مفصلاً بما يكفي للتمكن من التوصل إلى الاستنتاجات المتعلقة بالآليات المادية المسؤولة. وعمليات الرصد في كل ثمانية من الطيف كافية عموماً للوفاء بهذا الغرض، رغم الحاجة إلى مبادعات أضيق في ظروف معينة. وينبغي أن يمتد اختيار نطاقات التردد من أدنى تردد إلى أعلى تردد حيث تكون عمليات الرصد القائمة على الأرض ممكنة بشكل عام، أي من حوالي 10 MHz إلى 1 000 GHz.

ويبين في الفصل 4، بالنسبة لعمليات الرصد المتواصلة، أن الإشارة الدنيا التي يمكن كشفها متناسبة عكساً مع الجذر التربيعي لعرض النطاق. ولذلك، وفي غياب التداخل، يؤدي استعمال أوسع عروض النطاق الممكنة إلى حساسيات أفضل وإلى تحسين كفاءة استخدام الأدوات الفلكية الرئيسية. وفيما يتعلق بعمليات الرصد الحساسة، تعتبر نسبة 2% الحد الأدنى لعرض النطاق وتكون نسبة 10% مرغوب فيها.

ويقدم الجدول 1.3 قائمة بالترددات الموزعة لخدمة الفلك الراديوي دون 275 GHz وهي المفضلة لعمليات الرصد المتواصلة (انظر أيضاً الجدول 3 في التوصية ITU-R RA.314).

⁸ <http://www.esa.int/Planck>

الجدول 1.3

نطاقات التردد الموزعة لخدمة علم الفلك الراديوي دون GHz 275 والمفضلة لعمليات الرصد المتواصلة

عرض النطاق (%)	نطاق التردد (GHz)	عرض النطاق (%)	نطاق التردد (MHz)
0,94	10,7-10,6	0,37	13,410-13,360
0,33	15,4-15,35	0,49	25,670-25,550
1,30	22,50-22,21	1,98	38,25-37,5
1,68	24,0-23,6	2,17	⁽¹⁾ 74,6-73
1,58	31,8-31,33	1,95	⁽²⁾ 153-150,05
2,33	43,5-42,5	2,03	328,6-322
41,67	116-76	0,96	410-406,1
25,22	158,5-123	0,98	⁽³⁾ 614-608
1,81	167-164	1,91	1 427-1 400
14,60	231,5-200	0,60	1 670-1 660
2,87	248-241	1,68	2 700-2 655
9,52	275-250	4,08	5 000-4 800

- (1) توزيع (أولي) في الإقليم 2، حماية موسى بما في الإقليمين 1 و3.
(2) توزيع (أولي) في الإقليم 1، أستراليا والهند.
(3) توزيع (أولي) في الإقليم 2، منطقة الإذاعة الإفريقية (614-606 MHz) والصين (614-606 MHz) والهند. في الإقليم 1 (باستثناء منطقة الإذاعة الإفريقية) وفي الإقليم 3 يوزع هذا النطاق على أساس ثانوي.

إن درجة الحماية الممنوحة للفلك الراديوي ليست هي ذاتها في كل نطاق، وفي بعض الحالات غير كافية للسماح لعلماء الفلك الراديوي باستخدام التام للنطاق. ويتم تقاسم بعض النطاقات مع الخدمات النشطة (الإرسال)؛ ويتناول الفصل 5 بعض الأمثلة المتعلقة بمشاكل التقاسم.

وعندما تكون الحماية كافية، تفي بعض النطاقات المبينة في الجدول 1.3 بالحد الأدنى من المتطلبات (عرض النطاق 2%) فيما يخص تغطية التردد. ومع ذلك، جدير بالملاحظة أنه من بين أكثر النطاقات استعمالاً في المجال منخفض الترددات (دون 76 GHz)، فإن النطاق MHz 1 414 فقط يقترّب من معيار عرض النطاق الأدنى. ويختلف الوضع إلى حد كبير في مجال الترددات فوق 76 GHz نظراً لتوسيع التوزيعات الممنوحة لخدمة الفلك الراديوي في المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية لعام 2000 وتجاوز أربعة من النطاقات العرض بنسبة 10%.

1.2.3 عمليات الرصد عند ترددات منخفضة

تواجه عمليات الرصد الفلكية الراديوية عند ترددات دون حوالي 50 MHz مشاكل لا تُصَادَف عند ترددات أعلى. والأدوات المتاحة لتحقيق استبانة زاوية عالية قليلة، إذ يجب أن تكون الهوائيات على امتداد عدة كيلومترات لتحقيق استبانة أفضل من درجة واحدة. وقد قام عدد قليل من المراصد الفلكية الراديوية منخفضة التردد بتطوير أجهزة قياس التداخل للتغلب على المشاكل المتعلقة بالاستبانة المكانية. ولا توزع أي نطاقات لخدمة الفلك الراديوي دون 13 MHz، ونظراً لأن الاتصالات العالمية مثل الخدمة الإذاعية تستعمل الترددات المنخفضة استعمالاً مكثفاً للانتشار عبر الانعكاسات الأيونوسفيرية، فمن الصعب للغاية العثور على مواقع فلكية راديوية على الأرض معزول عن إشارات التداخل. وتتأثر عمليات الرصد منخفضة التردد بالغلغاف الأيونوسفيري للأرض الذي يختلف باختلاف الوقت خلال النهار والوقت خلال السنة والنشاط الشمسي. ولا يمكن لعمليات

الرصد أن تتم بنجاح إلا إذا كانت كثافة الإلكترون للمنطقة F منخفضة بما يكفي للتمكن من احتراق الغلاف الأيونوسفيري وخالية نسبياً من الشذوذ على مدى كيلومتر للتقليل إلى الحد الأدنى من تشوه حزمة الهوائي بآثار التلاؤ. وقد أُجريت عمليات الرصد القليلة القائمة على الأرض دون 10 MHz في تسمانيا، التي تمثل موقعاً مناسباً فيما يتعلق بقيود الغلاف الأيونوسفيري وعدم التعرض للتداخل. وتقرح عمليات الرصد التي تمت في أوائل الستينات مقدار 1,5 MHz كحد عملي للقياسات الفلكية الراديوية القائمة على الأرض.

2.2.3 نطاقات التردد العالية من أجل عمليات الرصد المتواصلة

يكون اختيار النطاقات، عند ترددات فوق 20 GHz، مرهوناً بالحاجة إلى تفادي الحد الأقصى للامتصاص الجوي بسبب الأكسجين (O_2) وبخار الماء (H_2O). ويجب اختيار نطاقات التردد من أجل عمليات الرصد المتواصلة بحيث تقع ضمن الحدود الدنيا للامتصاص الجوي بالقرب من الترددات 30 و 90 و 150 و 240 و 410 و 470 و 670 و 850 GHz. وهكذا، وعلى الرغم من قيود الاختيار، تتاح فواصل اعتيان كافية. وتصل النطاقات الموزعة حالياً للفلك الراديوي إلى تردد 275 GHz فقط؛ وقد أملت السياسة المعتمدة لاختيار النطاقات التي تتضمن خيوطاً طيفية هامة اختيار مدى التردد للعديد من النطاقات، وخاصةً عند ترددات عالية. ويلاحظ أن النطاقات 275-323 GHz و 327-371 GHz و 388-424 GHz و 426-442 GHz و 453-510 GHz و 623-711 GHz و 795-909 GHz و 926-945 GHz قد تم تحديدها لكي تستعملها الإدارات لخدمة الفلك الراديوي. وفي القرن الحادي والعشرين، يزداد طلب الخدمات النشطة على استعمال نطاقات الترددات الأعلى من أجل الاتصالات عريضة النطاق. وقد اعتمد المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية لعام 2012 الحاشية المراجعة 565.5 التي تنص على أنه "يجوز للخدمات النشطة والمنفصلة على السواء أن تستخدم جميع الترددات في المدى 1 000-3 000 GHz".

ويقدم التقرير ITU-R RA.2189 نتائج الدراسات بشأن تقاسم الترددات بين 275 و 3 000 GHz. ويخلص التقرير إلى أن التقاسم بين خدمة الفلك الراديوي والخدمات النشطة في المدى 275-3 000 GHz لا يطرح أي مشاكل، وذلك استناداً إلى الأسباب التالية:

على الأرض، وبافتراض ظروف أسوأ حالة تقريباً، ينبغي لوصلة أرضية في المدى 275-1 000 GHz أن تكون عند ارتفاع عالٍ تعمل بقدرة متاحة قصوى بواسطة هوائي مكافئ كبير مسدد مباشرة باتجاه تليسكوب لتوليد إشارة عند ذلك التليسكوب قد يكون لها آثار سلبية على الرصد الفلكي الراديوي. وفوق 1 000 GHz، ينبغي أن يكون مسبب التداخل ضمن مسافة كيلومتر واحد يعمل بقدرة قصوى وأن يكون مسدداً باتجاه التليسكوب مباشرة لتجاوز عتبات التداخل؛ ومن المرجح أن تخضع وصلة قريبة على هذا النحو لتحكم المرصد الراديوي نفسه، أو أن تخضع لتنسيق محلي غير رسمي مع المرصد المتأثر.

وبالنسبة للتداخل من مرسلات محمولة جواً، يتطلب عرض الحزمة الصغير لمسبب التداخل والسوية العالية للتوهين الجوي عبر المسير المائل أن تخلق الطائرة فوق التليسكوب الراديوي مباشرة لإحداث تداخل. ولن يتجاوز مرور واحد من مرسل عند 275 GHz، والتحليق على ارتفاع 7 000 متر أو أكثر فوق المرصد، مستوى التداخل المحدد في التوصية ITU-R RA.769. ويمكن أن تؤدي انحرافات الطائرة عن المسار بأكثر من 1/5 كم إلى عدم رصد أي تداخل.

وبالنسبة للتداخل من جانب السواتل، تجتمع العوامل المتنافسة من حيث حجم الحزمة والسوية النسبية والخسارة في الفضاء الحر المتوقعة لإنتاج هامش ثابت نسبياً عبر سويات عتبة التداخل المحددة في التوصية ITU-R RA.769. وعلى افتراض عدم وجود خسائر إضافية بسبب التوهين الجوي، وافترض أن الساتل مر مباشرة فوق التليسكوب، يكون متوسط سوية الإشارة أثناء زمن تكامل قدره 2 000 ثانية أقل من عتبة التداخل بمقدار 18 dB أو أكثر. وحتى سويات الإشارة الصادرة من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض، يُتوقع أن تكون غير كافية لإحداث التداخل.

3.3 نطاقات لعمليات رصد الخطوط الطيفية

يجب أن تجري عمليات رصد الخطوط الطيفية عند الترددات الخاصة المحددة بالإرسال الطيفي للذرات أو الجزيئات المعنية. ويرد في الجدولين 2.3 و 3.3 (انظر أيضاً الجدولين 1 و 2 في التوصية ITU-R RA.314) الخطوط التي تعتبر ذات الأهمية الفيزيائية

الفلكية القصوى دون 1 000 GHz. وإضافةً إلى ذلك، تتضمن التوصية ITU-R RA.1860 - نطاقات التردد المفضلة للقياسات الفلكية الراديوية في المدى 1-3 THz - قائمة طويلة جداً بالخطوط الطيفية ذات الأهمية الفيزيائية الفلكية القصوى بين 1 000 و 3 000 GHz. وتستند دراسة هذه الخطوط الطيفية التي انتُقيت من بين آلاف الخطوط التي تم كشفها أو التنبؤ بها في طيف الموجات الصغيرة إلى توصية من الاتحاد الفلكي الدولي (IAU)⁹. ويقوم الاتحاد الفلكي الدولي بتحديث قوائم الخطوط الأكثر أهمية على نحو دوري، وترد المراجعات في محاضر الاتحاد الفلكي الدولي وفي التوصيتين ITU-R RA.314 و ITU-R RA.1860.

وتُحدد عروض النطاق المطلوبة لعمليات رصد الخطوط الطيفية الواردة في الجدولين 2.3 و 3.3 بالإزاحات الترددية الدوبلرية في ترددات السكون للخطوط التي تسببها السرعة القطرية لمنطقة الإرسال بالنسبة إلى راصد على الأرض. وبالنسبة لمعظم الجزئيات، يبلغ مدى السرعة $300 \pm \text{km/s}$ ، لمراعاة السرعات القطرية للخطوط الطيفية الناشئة داخل مجرتنا. وهذا يعادل إزاحة دوبلرية بمقدار $0.1 \pm \%$ من تردد السكون. ولكن يُلاحظ عدد متزايد من الخطوط الطيفية في الإرسالات الصادرة من مجرات أخرى، وقد تم تمديد النطاقات الدنيا المقترحة لبعض الخطوط في الجداول إلى ترددات أدنى لمراعاة سرعات الابتعاد الأعلى من هذه المجرات. وكُشف العديد من الخطوط فعلاً في مجرات خارجية. وفي هذه الحالات، يتعين أن تُعدّل النطاقات الدنيا المقترحة بشكل مناسب في المراجعات المقبلة للقوائم.

وحظي العديد من هذه الخطوط المدرجة في الجدول 2.3 بالاعتراف، في جدول توزيع الترددات الوارد في لوائح الراديو، على أنها ذات أهمية بالنسبة لخدمة الفلك الراديوي. وفي بعض الحالات، تكون عروض النطاق المعترف بها مساوية على الأقل للعروض المحددة في الجدول 2.3، ولكن وضع التوزيع أقل من أولي، ولا يتمتع بأي حماية. ويصح ذلك بشكل خاص في الموجات الأطول، نظراً لأن فتحة الفص الجانبي المتناحية، $\lambda^2/4\pi$ ، تزداد من 10 مليمترات مربعة عند 30 GHz إلى 10^5 متر مربع عند 300 MHz. وبالنسبة لبعض الخطوط الطيفية التي يمكن رصدها في الإرسالات الصادرة من مجرات بعيدة، مثل OH (1 612 و 1 720 MHz) و CH (3 263 و 3 335 و 3 349 MHz) و H₂CO (4 830 MHz) و H₂O (22,235 GHz)، تكون عروض النطاق الموزعة غير كافية. ومعظم آلاف الخطوط الطيفية القابلة للكشف وغير المدرجة في الجدول 2.3 لا تتمتع بالحماية إطلاقاً. ونظراً لتزايد استعمال الطيف في الخدمات النشطة، من المحتمل أن يتعذر رصد العديد من هذه الخطوط. وهذا هو الحال بوجه خاص بالنسبة للخطوط الواقعة داخل النطاقات الموزعة للخدمات التي تُرسل من السواتل أو على مقربة منها.

⁹ Splatalogue - قاعدة بيانات القياس الطيفي الفلكي <http://splatalogue.net/>؛ قاعدة بيانات كولونيا للتصوير الطيفي الجزيئي <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms>؛ ترددات السكون الموصى بها فيما يتعلق بتحويلات الموجات الصغيرة الجزيئية بين النجوم المرصودة للمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا <http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl>.

الجدول 2.3

خطوط الترددات الراديوية ذات الأهمية القصوى
بالنسبة لخدمة الفلك الراديوي عند ترددات دون GHz 275

ملاحظات ⁽¹⁾	النطاق الأدنى المقترح	تردد السكون	المادة
	MHz 327,7-327,0	MHz 327,384	الديوتيريوم (DI)
(3) (2)	MHz 1 427,0-1 370,0	MHz 1 420,406	الهيدروجين (HI)
(4)	MHz 1 613,8-1 606,8	MHz 1 612,231	جذر الهيدروكسيل (OH)
(4)	MHz 1 667,1-1 659,8	MHz 1 665,402	جذر الهيدروكسيل (OH)
(4)	MHz 1 669,0-1 661,8	MHz 1 667,359	جذر الهيدروكسيل (OH)
(4) (3)	MHz 1 722,2-1 714,8	MHz 1 720,530	جذر الهيدروكسيل (OH)
(4) (3)	MHz 3 267,1-3 252,9	MHz 3 263,794	ميتيلادين (CH)
(4) (3)	MHz 3 338,8-3 324,4	MHz 3 335,481	ميتيلادين (CH)
(4) (3)	MHz 3 352,5-3 338,0	MHz 3 349,193	ميتيلادين (CH)
(4) (3)	MHz 4 834,5-4 813,6	MHz 4 829,660	فورمالدهيد (H ₂ CO)
(3)	MHz 6 675,2-6 661,8	MHz 6 668,518	ميثانول (CH ₃ OH)
(6) (3)	MHz 8 674,3-8 657,0	MHz 8 665,650	هيليوم (³ He ⁺)
(6) (3)	GHz 12,19-12,17	GHz 12,178	ميثانول (CH ₃ OH)
(4) (3)	GHz 14,50-14,44	GHz 14,488	فورمالدهيد (H ₂ CO)
(6) (4) (3)	GHz 18,36-18,28	GHz 18,343	سيكلوبروبينيلدين (C ₃ H ₂)
(4) (3)	GHz 22,26-22,16	GHz 22,235	بخار الماء (H ₂ O)
(4)	GHz 23,71-23,61	GHz 23,694	غاز النشادر (NH ₃)
(4)	GHz 23,74-23,64	GHz 23,723	غاز النشادر (NH ₃)
(4)	GHz 23,89-23,79	GHz 23,870	غاز النشادر (NH ₃)
(6)	GHz 30,03-29,97	GHz 30,002	أول أكسيد الكبريت (SO)
(6)	GHz 36,21-36,13	GHz 36,169	ميثانول (CH ₃ OH)
(3)	GHz 42,57-42,47	GHz 42,519	أول أكسيد السليكون (SiO)
	GHz 42,86-42,77	GHz 42,821	أول أكسيد السليكون (SiO)
	GHz 43,17-43,07	GHz 43,122	أول أكسيد السليكون (SiO)
	GHz 43,47-43,37	GHz 43,424	أول أكسيد السليكون (SiO)
(6)	GHz 45,44-45,33	GHz 45,379	أحادي كبريتيد الديكربون (CCS)
	GHz 49,04-48,94	GHz 48,991	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(7) (6) (5)	GHz 63,06-56,31	GHz 61,1	أكسجين (O ₂)
	GHz 80,66-80,50	GHz 80,578	الماء الثقيل (HDO)
	GHz 85,42-85,05	GHz 85,339	سيكلوبروبينيلدين (C ₃ H ₂)
	GHz 86,33-86,16	GHz 86,243	أول أكسيد السليكون (SiO)
	GHz 86,84-86,66	GHz 86,754	فورميليوم (H ¹³ CO ⁺)
	GHz 86,93-86,76	GHz 86,847	أول أكسيد السليكون (SiO)
(5)	GHz 87,39-87,21	GHz 87,3	جذر إيثينيل (C ₂ H)
(4)	GHz 88,72-88,34	GHz 88,632	سيانيد الهيدروجين (HCN)
(4)	GHz 89,28-88,89	GHz 89,189	فورميليوم (HCO ⁺)
	GHz 90,76-90,57	GHz 90,664	إيزوسيانيد الهيدروجين (HNC)

الجدول 2.3 (تتمة)

ملاحظات ⁽¹⁾	النطاق الأدنى المقترح	تردد السكون	المادة
	GHz 93,27-93,07	GHz 93,174	ديازينيليوم (N ₂ H ⁺)
(4)	GHz 98,08-97,65	GHz 97,981	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
	GHz 100,18-99,98	GHz 99,300	أول أكسيد الكبريت (SO)
(5)	GHz 102,60-102,39	GHz 102,5	ميثيل أسيتيلين (CH ₃ C ₂ H)
	GHz 107,12-106,91	GHz 107,014	ميثانول (CH ₃ OH)
	GHz 109,89-109,67	GHz 109,782	أول أكسيد الكربون (C ¹⁸ O)
(4)	GHz 110,31-109,83	GHz 110,201	أول أكسيد الكربون (C ¹³ O)
(6)	GHz 112,47-112,25	GHz 112,359	أول أكسيد الكربون (C ¹⁷ O)
(5)	GHz 113,61-113,39	GHz 113,5	جذر سيانو (CN)
(4)	GHz 115,39-114,88	GHz 115,271	أول أكسيد الكربون (CO)
(7)	GHz 118,87-118,63	GHz 118,750	أكسجين (O ₂)
(6)	GHz 137,59-137,31	GHz 137,450	فورمالدهيد (H ₂ ¹³ CO)
	GHz 140,98-140,69	GHz 140,840	فورمالدهيد (H ₂ CO)
	GHz 147,12-146,82	GHz 146,969	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(5)	GHz 150,85-149,95	GHz 150,4	أكسيد النيتريك (NO)
	GHz 156,76-156,45	GHz 156,602	ميثانول (CH ₃ OH)
	GHz 183,50-183,12	GHz 183,310	بخار الماء (H ₂ O)
	GHz 219,78-219,34	GHz 219,560	أول أكسيد الكربون (C ¹⁸ O)
(4)	GHz 220,62-219,67	GHz 220,399	أول أكسيد الكربون (C ¹³ O)
(5)	GHz 226,83-226,37	GHz 226,6	جذر سيانو (CN)
(5)	GHz 227,03-226,57	GHz 226,8	جذر سيانو (CN)
(4)	GHz 230,77-229,77	GHz 230,538	أول أكسيد الكربون (CO)
(6)	GHz 245,20-244,72	GHz 244,953	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(5)	GHz 250,85-250,35	GHz 250,6	أكسيد النيتريك (NO)
(5)	GHz 262,26-261,74	GHz 262,0	جذر إيثينيل (C ₂ H)
	GHz 266,15-265,62	GHz 265,886	سيانيد الهيدروجين (HCN)
	GHz 267,83-267,29	GHz 267,557	فورميليوم (HCO ⁺)
	GHz 272,25-271,71	GHz 271,981	إيزوسيانيد الهيدروجين (HNC)

(1) في حال عدم إدراج الملاحظة (2) أو الملاحظة (4)، تُحدد حدود النطاق بإزاحات دوبلرية تقابل سرعات قطرية تبلغ ± 300 km/s (تقابل إشعاعات الخطوط الطيفية التي تحدث في مجرتنا).

(2) يتعين تمديد النطاق MHz 1 427-1 400 الموزع إلى حد أدنى للسماح بإزاحة دوبلرية أعلى للخط HI المرصود في مجرات نائية.

(3) التوزيع الدولي الحالي لا يمثل توزيعاً على أساس أولي و/أو لا يفي بمتطلبات عرض النطاق. لمزيد من المعلومات المفصلة، انظر لوائح الراديو.

(4) نظراً لأن خطوط الترددات هذه تُستعمل أيضاً لرصد مجرات أخرى، تشمل عروض النطاق المبينة إزاحات دوبلرية تقابل سرعات قطرية تصل إلى 1 000 km/s. وجددير بالإشارة أن الخط HI تم رصده عند ترددات بيزحزة نحو الأحمر تصل إلى 500 MHz، في حين أن بعض خطوط الجزيفات الأكثر وفرة كُشفت في مجرات ذات سرعات تصل إلى 50 000 km/s، وهو ما يقابل انخفاضاً في التردد يصل إلى 17%.

(5) هناك العديد من الخطوط المتقاربة المرتبطة بهذه الجزيفات. والنطاقات المذكورة واسعة بما يكفي للسماح برصد جميع الخطوط.

(6) لا يقع خط التردد هذا ضمن أي نطاق موزع لخدمة الفلك الراديوي، أو أن المادة 5 من لوائح الراديو لا تشير إلى استعماله في الفلك الراديوي.

(7) يمكن رصد هذه الخطوط خارج الغلاف الجوي للأرض فقط.

الجدول 3.3

خطوط الترددات الراديوية ذات الأهمية القصوى بالنسبة لخدمة الفلك الراديوي
عند ترددات تتراوح بين 275 و 1 000 GHz

ملاحظات (1)	النطاق الأدنى المقترح (GHz)	تردد السكون (GHz)	المادة
	279,79–279,23	279,511	ديازينيليوم (N ₂ H ⁺)
	294,21–292,93	293,912	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
	307,50–306,88	307,192	هيدرونيوم (H ₃ O ⁺)
	314,06–313,44	313,750	ماء ثقيل (HDO)
	329,66–329,00	329,330	أول أكسيد الكربون (C ¹⁸ O)
	330,92–330,25	330,587	أول أكسيد الكربون (C ¹³ O)
	343,23–342,54	342,883	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
	346,14–345,45	345,796	أول أكسيد الكربون (CO)
	354,84–354,13	354,484	سيانيد الهيدروجين (HCN)
	357,09–356,37	356,734	فورميليوم (HCO ⁺)
	368,87–368,13	368,498	أكسجين (O ₂)
(2)	373,05–372,30	372,672	ديازينيليوم (N ₂ H ⁺)
(2)	380,58–379,81	380,197	بخار الماء (H ₂ O)
	388,85–388,07	388,459	هيدرونيوم (H ₃ O ⁺)
	392,24–390,54	391,847	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
	425,19–424,34	424,763	أكسجين (O ₂)
	439,53–438,64	439,088	أول أكسيد الكربون (C ¹⁸ O)
	441,21–440,32	440,765	أول أكسيد الكربون (C ¹³ O)
	461,51–460,57	461,041	أول أكسيد الكربون (CO)
	465,39–464,46	464,925	ماء ثقيل (HDO)
	492,66–491,66	492,162	كربون (CI)
	509,80–508,78	509,292	ماء ثقيل (HDO)
(2)	532,25–529,94	531,716	سيانيد الهيدروجين (HCN)
(2)	539,23–536,89	538,689	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(2)	548,22–547,13	547,676	بخار الماء (H ₂ ¹⁸ O)
(2)	551,48–549,09	550,926	أول أكسيد الكربون (C ¹³ O)
(2)	557,50–556,37	556,936	بخار الماء (H ₂ O)
(2)	572,69–571,54	572,113	غاز النشادر (C ¹⁵ NH ₃)
(2)	573,07–571,92	572,498	غاز النشادر (NH ₃)
(2)	576,84–574,35	576,268	أول أكسيد الكربون (CO)
(2)	588,20–587,03	587,616	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(2)	600,53–599,33	599,927	ماء ثقيل (HDO)
(2)	621,32–620,08	620,700	بخار الماء (H ₂ O)
	625,67–624,27	625,040	كلوريد الهيدروجين (HCl)
	626,61–625,35	625,980	كلوريد الهيدروجين (HCl)
	637,17–634,41	636,532	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
	661,73–658,86	661,067	أول أكسيد الكربون (C ¹³ O)
	692,17–690,78	691,473	أول أكسيد الكربون (CO)
(2)	716,11–714,68	715,393	أكسجين (O ₂)
(2)	735,06–733,59	734,324	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(2)	752,79–751,28	752,033	بخار الماء (H ₂ O)
(2)	884,61–773,07	773,840	أكسجين (O ₂)

الجدول 3.3 (تتمة)

ملاحظات ⁽¹⁾	النطاق الأدنى المقترح (GHz)	تردد السكون (GHz)	المادة
	798,23–796,64	797,433	سيانيد الهيدروجين (HCN)
	803,85–801,85	802,653	فورميليوم (HCO ⁺)
	807,46–805,85	806,652	أول أكسيد الكربون (CO)
	810,16–808,54	809,350	كربون (CI)
	832,89–829,28	832,057	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
	834,98–833,31	834,146	أكسجين (O ₂)
	881,78–877,96	880,899	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(2)	917,09–915,26	916,172	بخار الماء (H ₂ O)
(2)	922,72–918,72	921,800	أول أكسيد الكربون (CO)
	930,65–926,62	929,723	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(2)	971,29–969,34	970,315	بخار الماء (H ₂ O)
(2)	979,51–977,55	978,529	أحادي كبريتيد الكربون (CS)
(2)	988,92–986,94	987,927	بخار الماء (H ₂ O)

(1) تُحدد حدود النطاق بإزاحات دوبلرية تقابل سرعات قطرية تبلغ ± 300 km/s (تقابل إشعاعات الخطوط الطيفية التي تحدث في مجرتنا).

(2) يمكن رصد هذه الخطوط خارج الغلاف الجوي للأرض فقط.

الفصل 4

قابلية تأثر رصدات الفلك الراديوي بالتداخل

1.4 مقدمة

يتسم الإشعاع المقيس في مجال الفلك الراديوي، في جميع الحالات تقريباً، بتوزيع احتمال غوسي في الاتساع. وفيما عدا حالة انبعاثات الخطوط الطيفية الضيقة النطاق، فهو يتسم بنفس الخصائص الإحصائية التي يتسم بها إشعاع الضوضاء الحرارية من الأرض، أو من غلافها الجوي، أو الضوضاء المتولدة في المستقبل نفسه. وعلاوة على ذلك، فإن الانبعاثات الراديوية الكونية ضعيفة جداً. وفي رصدات الفلك الراديوي، تكون نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) في أجزاء التردد الراديوي (RF) والتردد المتوسط (IF) في المستقبل عموماً في حدود -20 dB إلى -60 dB، أي أن القدرة التي ساهم فيها المصدر قيد الدراسة هو عامل بمقدار 10^{-2} إلى 10^{-6} أقل من قدرة الضوضاء غير المطلوبة من الغلاف الجوي والأرض ودارات المرسلات. وفي معظم نظم الاتصالات تكون النسبة S/N المقابلة في حدود وحدة أو أكبر. وبما أن إشارات الفلك الراديوي ضعيفة جداً بالمقارنة مع إشارات الخدمات الأخرى، فإن رصدات الفلك الراديوي معرضة بشدة للتداخل الراديوي، فيما عدا حالة النجوم النابضة؛ والإشارات الكونية عموماً ليس لها تشكيل خاص بها من شأنه أن يساعد على تمييزها عن الضوضاء أو عن الأشكال العديدة من إشارات التداخل.

والسبب في أن الرصدات التي لها نسبة S/N منخفضة جداً يمكن أن تعطي قياسات مفيدة هو أن المعلومات في الخدمات الراديوية الأخرى تكون عادةً في شكل تغيرات في خصائص الإرسال (أي التشكيل)، أما في القياسات الفلكية الراديوية فهي عادةً في شكل متوسط خصائص الإشارة. وعندما يقاس مجموع قدرة الضوضاء في مراحل التردد المتوسط (IF) باستخدام كاشف، ويحسب متوسط خرج الكاشف لعدة ثوان، أو في بعض الحالات لعدة ساعات، فإن التقلبات الإحصائية في القيم المقیسة تنخفض إلى حد كبير. ومن الممكن الآن الكشف عن تغيرات جزئية في سوية الضوضاء الكلية التي هي في حدود 10^{-8} من السوية المتوسطة، وهذا يتطلب حساب متوسط 10^{16} عينة مستقلة على الأقل. ومن أمثلة الحساسية العالية لرصدات الفلك الراديوي هو رسم البنية الزاوية في إشعاع الخلفية الكونية بواسطة الساتل PLANCK (Planck Collaboration et al 2011) الذي يعمل حالياً في L2 Lagrange Point شمس-أرض المشار إليه في التوصية ITU-R RA.1417. وقد تم قياس تقلبات في حدود 10^{-6} لدرجة حرارة الخلفية $2,8$ K، بمقدار 75 dB أو أكثر دون درجات حرارة الضوضاء للمستقبلات على الساتل. ويتم الحصول على هذه الحساسية العالية للرصدات على حساب المعلومات عن التغيرات القصيرة الأجل لخصائص أي إشارة، والتي تفقد في عملية حساب المتوسط التي لا غنى عنها في الحد من تقلبات الضوضاء. وكان اكتشاف هذه التقلبات [Smoot et al 1992]، التي تشير إلى أصل البنية الواسع المقياس في الكون في الوقت الحاضر، موضوع جائزة نوبل لعام 2006 في الفيزياء، وهي الجائزة الرابعة من نوعها التي تمنح تقديراً لبحوث فلكية راديوية.

ومن المنظور التاريخي، تعود طريقة تحليل السويات العتبية للتداخل في هذا الفصل إلى ملحق التقرير رقم 1-224 الصادر عن اللجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) السابقة [أوسلو، 1966]. وتوفر السويات العتبية للتداخل في ذلك التقرير، إلى جانب المراجعات والإضافات اللاحقة، أساساً لتنسيق الترددات في خدمة الفلك الراديوي، وهي مدرجة في الملحق 1 في التوصية ITU-R RA.769، والجدولين 1.4 و 2.4 في هذا الفصل.

2.4 الاعتبارات الأساسية في حساب سويات التداخل

1.2.4 معيار السوية الضارة من التداخل

يلاحظ، في الممارسة العملية، أن سوية الطاقة المرتفعة في خرج المستقبل، الناجمة عن وجود إشارة متداخلة، ليست ثابتة بما فيه الكفاية بحيث يمكن معايرتها وطرحها من القدرة المقیسة. وبالإضافة إلى التغيرات المتأصلة في تشكيل الإرسالات، فإن الإشارات المتداخلة التي تنتشر عبر مسافات طويلة تُظهر تقلبات كبيرة في الاتساع ناتجة عن تغيرات في الغلاف الجوي وعن عوامل أخرى

تؤثر في خسارة المسير. وتتفاوت الاشارات الصادرة من محطات متنقلة على متن مركبات متحركة بتغير المسير بين المرسل والتليسكوب الراديوي. وحتى لو كانت كثافة تدفق القدرة المتداخلة ثابتة، فإن سوية القدرة المستقبلية تتفاوت لأن حركة تتبع المصدر للتليسكوب الراديوي تنطوي على سويات متفاوتة في الفصوص الجانبية في اتجاه المرسل. وفي سويات منخفضة، يكون للتداخل تأثير إضافة تقلبات قد لا تكون قابلة للتمييز عادةً عن التقلبات الناجمة عن ضوضاء النظام، أو في بعض الحالات عن الإشارة الفلكية. ومع ذلك، وبصفة عامة، فإن تقلبات خرج المستقبل الناجمة عن التداخل لا تتساوى وسطيًا بزيادة زمن التكامل على غرار ما يحدث في الضوضاء العشوائية البحتة.

والمعيار المستخدم لتحديد الشدة التي تعتبر عندها إشارة التداخل ضارة هو سوية الانبعثات غير المطلوبة التي تتسبب في زيادة قدرها 10 في المائة في أخطاء القياس، نسبةً إلى الأخطاء الناجمة عن ضوضاء النظام فقط. والممارسة المعتادة في حسابات التداخل هي افتراض أن سوية التداخل هذه هي نفس السوية التي تتسبب في زيادة في خرج الاستقبال بنسبة 10 في المائة من جذر متوسط تربيع تقلبات الخرج بسبب ضوضاء النظام. ولننظر في قياس نموذجي تقاس فيه القدرة المستقبلية من مصدر راديوي بحساب الفرق في خرج المستقبل أولاً وحيث يكون الهوائي مسدداً نحو المصدر، ثم مع التخالف في الموضع، بغية قياس سوية الخلفية السماوية. ولنفترض وجود التداخل أثناء القياس في المصدر الراديوي ولكنه غير موجود أثناء عملية القياس المرجعية لسوية الخلفية، أو العكس، كما قد يحدث في حالة وجود إشارة اتصالات متقطعة. عندئذ، إذا كان مقدار التداخل في خرج المستقبل 10 في المائة من جذر متوسط تربيع سوية الضوضاء، فإن مجموع الخطأ في قياس القدرة من المصدر يزداد إلى ما يصل إلى 10 في المائة. ولنا أن نتصور أن هذا التأثير يزيد بنسبة 10 في المائة من مدى الخطأ في قياسات شدة مصدر راديوي، الأمر الذي يمكن رسمه بيانياً كدالة لمعلمة ما من المعلومات الفلكية الأخرى. ويلاحظ أيضاً، في غياب التداخل، أن زيادة قدرها 10 في المائة في جذر متوسط تربيع عدم التيقن في القياس يعادل خسارة قدرها 20 في المائة في زمن الرصد. وفي هذه الظروف لا تزال القياسات المفيدة ممكنة، ولكن جودة البيانات تنحط إلى حد كبير.

2.2.4 مخطط استجابة الهوائي

تؤخذ رصدات الفلك الراديوي عادةً باستخدام هوائيات كبيرة أو صفائف هوائيات عالية الكسب، من أجل توفير الحساسية والاستبانة الزاوية المطلوبة في السماء. وقد تتكون التليسكوبات الراديوية من هوائيات وحيدة كبيرة أو صفائف من العديد من الهوائيات. وباستخدام عرض حزمة نموذجي يتراوح من بضع ثوان قوسية إلى بضع درجات، واحتمال وجود مصدر تداخل يقع ضمن الحزمة الرئيسية هو احتمال صغير عموماً بما يكفي، حسبنا النظر في التداخل عبر الفصوص الجانبية. وثمة نموذج موصى به للفصوص الجانبية من هوائيات مكافئية كبيرة وارد في التوصية ITU-R SA.509 – التطبيقات الفضائية وسلسلة الأرصاد الجوية، يقوم على أساس البيانات التجريبية من عدد من الهوائيات الكبيرة. وهو ينطبق على هوائيات ذات قطر أكبر من 100 طول موجة، لترددات بين 2 GHz و 30 GHz، ولقيم زاوية φ ، مقيسة من محور الحزمة الرئيسية، أكبر من 1° . ويتراوح كسب الفص الجانبي على مقياس زاوي في حدود λ/D ، حيث λ هو طول الموجة و D عرض فتحة الهوائي. عندئذ يعطى نموذج غلاف الكسب (G) للفصوص الجانبية بالعلاقة:

$$(1.4) \quad \begin{aligned} & \text{من أجل } 1^\circ < \varphi < 47,8^\circ & G = 32 - 25 \log \varphi & \text{dBi} \\ & \text{من أجل } 47,8^\circ < \varphi < 180^\circ & G = -10 & \text{dBi} \end{aligned}$$

ومن الواضح أن تأثير إشارة تداخل ما يتوقف على زاوية الورود نسبة إلى محور الحزمة الرئيسية (خط البصر) في الهوائي، ذلك لأن كسب الفص الجانبي، مثلاً بالنموذج، يتراوح من $+32$ إلى -10 dB كدالة لهذه الزاوية. ومع ذلك من المفيد، في البند 3.4، حساب سويات عتبة التداخل الضار بالنسبة لسوية معينة في الفص الجانبي، ولهذا نستخدم قيمة 0 dBi. ولنموذج الفص الجانبي في المعادلة (1.4)، نتحقق قيمة 0 dBi، أي كسب يساوي كسب مصدر إشعاع متناح، في زاوية $19,1^\circ$ من الحزمة الرئيسية. ويلاحظ أنه إذا حسبنا سوية عتبة كثافة تدفق القدرة (pfd) أو كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) على أساس الاستقبال بكسب في الفصوص الجانبية قدره 0 dBi، عندئذ يتم تجاوز عتبة التداخل في مستقبل الفلك الراديوي إذا جاء التداخل عبر الفصوص الجانبية بكسب أكبر من 0 dBi، أي من أجل قيم φ أقل من $19,1^\circ$. وهكذا، إذا كانت إشارة سوية عتبة واردة في اتجاه يقع ضمن مخروط من نصف زاوية يساوي $19,1^\circ$ متمركزة على محور الحزمة الرئيسية، فإن القدرة المستقبلية تتجاوز معيار التداخل الضار. والزاوية الصلبة

لهذا المخروط بالراديان، Σ ، تساوي $2\pi(1 - \cos \varphi)$. وثمة قياس تقريبي لاحتمال التداخل المستقبل داخل مخروط $19,1^\circ$ يساوي Σ مقسوماً على $2B$ ستيراديان فوق الأفق من حيث يمكن ورود إشارات التداخل. ومن أجل $\varphi = 19,1^\circ$ تكون $\Sigma/2B = 5,5\%$. وبالنسبة لتصاميم الهوائيات الأحدث عهداً، اقترح استخدام نموذج فص جانبي بمقدار $29 - 25 \log \varphi$ (انظر مثلاً التوصية ITU-R S.580). ولهذا النموذج، تكون القيمة 0 dBi للزاوية φ هي $14,5^\circ$ ، والقيمة المقابلة من أجل $\Sigma/2B$ هي $3,2\%$. ومع ذلك هناك نموذج آخر للفصوص الجانبية (انظر التوصية ITU-R S.1428) يستخدم $34 - 30 \log \varphi$ ، حيث تكون الزاوية 0 dBi هي $13,6^\circ$ والقيمة المقابلة $\Sigma/2B$ هي $2,8\%$. وثمة حد أعلى للنسبة المثوية الكلية من الوقت التي يمكن فيها التغاضي عن تداخل فوق العتبة الضارة محددة في التوصية ITU-R RA.1513 بنسبة 5% ، ومنها قد يأتي ما لا يزيد عن 2% من أي شبكة واحدة (انظر البند 4.2.4). والقيم الثلاث من أجل $\Sigma/2B$ التي نوقشت أعلاه ($5,5\%$ و $3,2\%$ و $2,8\%$) متوافقة إلى حد معقول مع هذه الأرقام، ومن ثم فهي تسهم في دعم اختيار 0 dBi لسوية الفص الجانبي كقيمة ملائمة لحساب كل من كثافة تدفق القدرة (pdf) وكثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) المقابلة للعتبة الضارة.

والحالة الخاصة للسواتل في مدارات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض عبارة عن حالة دينامية، أي أن مواقع السواتل نسبة إلى حزمة هوائي الفلك الراديوي تتعرض لتغيرات كبيرة داخل نطاق التكامل الزمني البالغ 2000 ثانية. ويتطلب تحليل التداخل في هذه الحالة دمج الاستجابة عبر السويات المتفاوتة للفصوص الجانبية، وذلك مثلاً باستخدام مفهوم تكافؤ كثافة تدفق القدرة (epfd) المعرف في الرقم **5C.22** من لوائح الراديو. وبالإضافة إلى ذلك، من الضروري عادةً الجمع بين المساهمات في تليسكوب راديوي لعدد من السواتل ضمن نظام معين. ويقترح في هذه الحسابات، إلى أن يتوفر نموذج موضوع خصيصاً لهوائيات الفلك الراديوي، استخدام مخطط استجابة الهوائي لهوائيات قطرها أكبر من 100λ في التوصية ITU-R S.1428 (انظر الملحق 1 بهذا الفصل) لتمثيل هوائي الفلك الراديوي.

وتنطبق نماذج الفصوص الجانبية الموصوفة أعلاه على مكافئيات متناظرة تتأثر من تشتت الإشعاع بسبب بنية الدعم البؤري. وتكون سويات الفصوص الجانبية لعاكسات تخالف التغذية مع فتحات غير محجوبة عموماً ما بين 10 و 15 dB أقل من تلك التي قدمها النموذج. ولم يوضع سوى القليل من الهوائيات ذات تصميم تخالف التغذية من أجل خدمة الفلك الراديوي. وبالنسبة لهوائيات كبيرة، فإن التصاميم المتناظرة أكثر اقتصاداً، ويمكن كذلك تفضيلها من أجل قياسات الاستقطاب.

3.2.4 زمن التوسيط (زمن التكامل)

يتم عادةً إجراء عملية توسيط الزمن التي تخفض من تقلبات الضوضاء في خطوتين أو أكثر. ويتم توسيط البيانات عموماً لبضع عشرات المليلثانية إلى بضع عشرات الثواني ثم تسجل رقمياً. وهذه الخطوة الأولى تخفض من كمية البيانات، ولكنها تسمح بميزات مثل رشقات قصيرة من تداخل قوي يتعين ازالتها في وقت لاحق دون خسائر هامة في البيانات. وغالباً ما يتم المزيد من التوسيط "خارج الخط" أثناء تخفيض البيانات لاحقاً. مثال ذلك، قد تتكون رصدة ما من قياسات متكررة في اثنين أو أكثر من مواقع مختلفة في السماء، لمقارنة سوية القدرة المستقبلية من مصدر راديوي (بالإضافة إلى انبعاثات خلفية السماء) مع سوية القدرة من موقع خلفية مرجعي. ويحتاج الأمر لمتوسطات منفصلة لكل موقع. ويمكن تضمين البيانات المأخوذة في جلسات رصد مختلفة، ويمكن تمديد مجموع زمن التوسيط إلى عشرات أو مئات الساعات [Owen and Morrison, 2009; Walter et al., 2012]. وغالباً ما يوضع الحد بحكم الوقت المتاح في تليسكوب راديوي كبير. ويكون هذا التوسيط الطويل مطلوباً عند البحث عن إشارات ضعيفة للغاية، حيث من المؤلف جداً توسيط العديد من السجلات الفردية من الطيف من نقطة واحدة في السماء. وفي دراسات عتبات التداخل، كان من المعتاد استخدام 2000 ثانية كزمن متوسط نموذجي. كما تستخدم بشكل روتيني أزمنة تكامل أطول، ويمكن اتخاذ 360000 ثانية (100 ساعة) كزمن نموذجي للرصدات الأرضية حيث يتطلب الأمر حساسية عالية بشكل استثنائي. وبما أن حساسية رصدة ما تتفاوت بمقدار جذر تربيع زمن التوسيط، فإن الفرق بين 2000 ثانية و 360000 ثانية يقابل فرق $11,3 \text{ dB}$ في الحساسية لكل من الإشارات الفلكية والتداخل على السواء. وهناك أيضاً رصدات معينة من الظواهر المتغيرة بتغير الزمن، من قبيل رصدات الرشقات النجمية أو الشمسية، والتألؤات بين الكواكب التي قد يكون من الأنسب لها استخدام فترات زمنية أقصر بكثير.

4.2.4 النسبة المئوية من خسارة الزمن بسبب التداخل

في كثير من الحالات يكون التداخل متفرق في طبيعته، من إشارات الاتصالات المتنقلة مثلاً، أو يظهر تغيرات كبيرة في الشدة بمرور الزمن نتيجة لظروف الانتشار. ولمعرفة ما إذا كانت هذه الإشارات تضر برصدات الفلك الراديوي من الضروري تحديد نسبة مئوية قصوى من الزمن يمكن خلالها التغاضي عن التداخل الضار. وبالنسبة لمعظم الخدمات، تتوفر هذه النسب المئوية من الزمن في مختلف التوصيات، وهي تتفاوت عادةً من 0,01% للاتصالات التي تتعلق بها سلامة الأرواح، إلى بضع نقاط مئوية للخدمات التي تنطوي على جمع بيانات يمكن تكرارها. وفي حالة الفلك الراديوي، فإن نسبة 5% من صافي الخسارة من جميع المصادر هي الحد الأقصى المقبول. وبما أن التداخل، في العديد من الرصدات في مجال الفلك الراديوي، يأتي من عدة مصادر في نطاقات تردد قريبة فإن الحد الأقصى من خسارة الزمن التي يمكن تحمّلها من أي خدمة بعينها هو 2%. وهذه القيم محددة في التوصية ITU-R RA.1513. وهي ضرورية لدى إجراء حسابات مونت كارلو لتقرير كيفية الحد من المصادر المتفرقة للتداخل (انظر البند 8.4).

3.4 حساسية نظم الفلك الراديوية والقيم العتبية للتداخل الضار

1.3.4 اعتبارات نظرية

يتحقق قياس حساسية رصد ما في الفلك الراديوي بزيادة سوية القدرة عند دخل المستقبل بما يؤدي إلى تغيير في خرج المستقبل يساوي جذر متوسط تربيع تقلبات الضوضاء. وخرج كاشف المستقبل هو دالة إجمالي القدرة عند دخل المستقبل. ويتكون مجموع دخل القدرة من قدرة الإشارة المطلوبة وقدرة الضوضاء غير المطلوبة (من قبيل الضوضاء الحرارية وضوضاء المستقبل). وكلتا المساهمتين هما نتيجة عمليات عشوائية، وليس من الممكن التمييز بينهما نوعياً. ومع ذلك، كلتاها له سوية قدرة متوسطة، وإذا أمكن تحديد هذه السويات بدقة كافية، يمكن الكشف عن وجود الإشارة المطلوبة. (ويفترض أن يبقى الكسب وغيره من العلامات في نظام الاستقبال ثابتة أثناء عملية الرصد). ويمكن حساب المتوسط الإحصائي لمغيار عشوائي ثابت مثل قدرة الضوضاء، P ، بدقة متناسبة عكساً مع الجذر التربيعي لعدد العينات المستقلة، N ، والانحراف المعياري لهذا المتوسط هو:

$$\Delta P \approx \frac{P}{\sqrt{N}} \quad (2.4)$$

وكما جاء أعلاه، يمكن تحديد ΔP و P إما من حيث قدرة الضوضاء داخل عرض نطاق المستقبل أو من حيث كثافة القدرة الطيفية (W/Hz). وفي التحليل التالي سوف يشار إلى كثافة القدرة الطيفية. والانحراف المعياري، ΔP ، هو أيضاً كمية جذر متوسط تربيع. ويمكن، من خلال رصد عدد كاف من العينات، N ، قياس قدرة الضوضاء الراديوية بدقة عالية. وبتخفيض تقلبات ΔP إلى قيمة أقل من قدرة الإشارة المطلوبة، من الممكن الكشف عن إشارات ضعيفة جداً. ويمكن، ضمن نطاق عرضه Δf ، قياس حوالي $2\Delta f$ عينة مستقلة في الثانية بواسطة المستقبل، ومن خلال تمديد زمن التوسيط، t ، (يسمى أيضاً زمن التكامل)، يمكن جعل قيمة N كبيرة جداً. وهكذا يمكن القول:

$$N \approx 2\Delta f t \quad (3.4)$$

وإذا أدمجت هذه العلاقة بالمعادلة (2.4)، نحصل على

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{K}{\sqrt{\Delta f t}} \quad (4.4)$$

حيث K هو عامل تناسب يتوقف على تفاصيل المعدات وتقنية الرصد [Kraus 1966]. وبالنسبة لنظام طاقة كلي أساسي (أي نظام يقيس إجمالي قدرة الضوضاء التي يرسلها هوائي ما) تكون $K = 1$ ، وتُعمد هذه القيمة هنا لغرض التعميم. (يلاحظ أن في الحالة التي يتم فيها تقسيم زمن الرصد بالتساوي بين مصدر ما وموقع مرجعي، كما نوقش في البند 1.2.4، فإن القيمة المطلوبة للزمن t تساوي نصف زمن الرصد الإجمالي. كما أن خطأ جذر متوسط التربيع في الفرق بين القياسات في المصدر وفي الموقع المرجعي يساوي الخطأ في القياس في المصدر مضروباً بقيمة $\sqrt{2}$).

ويرتبط تقلب الضوضاء في كثافة القدرة الطيفية، ΔP ، في معادلة الحساسية (4.4) بحساسية النظام الإجمالية (تقلبات الضوضاء) معبراً عنها بالتقلبات في درجات الحرارة، ΔT ، بواسطة ثابت Boltzmann، k :

$$(5.4) \quad \Delta P \approx k \Delta T$$

ويعبر عن معادلة الحساسية بالعلاقة:

$$(6.4) \quad \Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f t}}$$

حيث:

$$(7.4) \quad T = T_A + T_R$$

T هي درجة حرارة النظام وهي مجموع T_A ، درجة حرارة ضوضاء الهوائي الناجمة عن الانبعاثات الكونية والغلاف الجوي للأرض والإشعاع من الأرض، و T_R ، درجة حرارة ضوضاء المستقبل.

2.3.4 تقديرات سويات الحساسية والتداخل الضار

يمكن استخدام المعادلة (4.4) أو المعادلة (6.4) لتقدير سويات الحساسية والتداخل في الرصدات الفلكية الراديوية. والنتائج مدرجة في الجدولين 1.4 و 2.4، ويفترض زمن الرصد (أو زمن التكامل) t بمقدار 2 000 ثانية، كما ذكر في البند 3.2.4. والحساسية، المعبر عنها بوحدات من درجة الحرارة أو كثافة القدرة الطيفية، هي السوية عند دخل المستقبل المطلوبة لزيادة الخرج بمقدار مساوٍ لجذر متوسط تريبع تقلبات الضوضاء. وفي الجدول 1.4 (الرصدات المتواصلة)، بالنسبة لترددات أقل من 71 GHz، يفترض أن يكون Δf عرض النطاق الترددي الموزع لخدمة الفلك الراديوي. وفوق هذا التردد، تستخدم قيمة 8 GHz، وهي ممثلة لعرض النطاق الترددي المستخدم عموماً للرصدات المتواصلة في هذا المدى. وفي الجدول 2.4 (رصدات الخطوط الطيفية) Δf هو عرض نطاق القناة الممثل لخط طيفي. والقيم المستخدمة من أجل Δf تقابل سرعة بحوالي 3 كيلومتر/ثانية، وهي وسيطة بين القيم المشتركة للخطوط الطيفية للمصادر داخل مجرتنا وفي المجرات الخارجية. ويلاحظ أن الصفوف الخمسة الأخيرة في الجدولين 1.4 و 2.4 هي للترددات في نطاق فوق 275 GHz، لم توزع فيه أي ترددات وقت كتابة هذه الطبعة من الكتيب. ويتم اختيار هذه الترددات بشكل اعتباطي والغرض من العتبات ضارة المقابلة هو توفير تقديرات أولية فقط.

ويعبر عن سويات التداخل الضار الواردة في الجدولين 1.4 و 2.4 بمثابة سوية التداخل التي تندرج في ΔP (أو ΔT) مكونةً تساوي 10% من جذر متوسط تريبع التقلب بسبب ضوضاء النظام، أي:

$$(8.4) \quad \Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$$

وباختصار، يمكن حساب الأعمدة المناسبة في الجدولين 1.4 و 2.4 باستخدام الطرائق التالية:

– ΔT ، باستخدام المعادلتين (6.4) و (7.4)،

– ΔP ، باستخدام المعادلة (5.4)،

– ΔP_H ، باستخدام المعادلة (8.4).

ويمكن أيضاً التعبير عن التداخل من حيث كثافة تدفق القدرة (pfd) الوارد إلى الهوائي، إما في كامل عرض النطاق الترددي أو في شكل كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd)، S_H ، في كل 1 Hz من عرض النطاق¹⁰. وكما جاء في البند 2.2.4، تعطى القيم لهوائي له كسب، في اتجاه وصول التداخل، مساوٍ لكسب هوائي متناح (يغطي مساحة فعالة قدرها $c^2/4\pi f^2$ ، حيث c هي سرعة الضوء و f هو التردد). وتستخرج قيم (Δf (dB(W/m²)) من S_H من ΔP_H (dBW) بإضافة:

10 تتبع هنا المصطلحات الموصى بها من جانب قطاع الاتصالات الراديوية (التوصية ITU-R V.574)، حيث تشير "كثافة تدفق القدرة" إلى كميات بوحدات W/m²، و"كثافة تدفق القدرة الطيفية" إلى كميات مثل S_H بوحدات W/(m² · Hz). وفي علم الفلك الراديوي، يشار إلى S_H بأنها "كثافة التدفق"، ويعبر عنها بوحدتها تسمى jansky (Jy):

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Hz)} \quad \text{أي} \quad -260 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$$

$$(9.4) \quad 20 \log f - 158,5 \quad \text{dB}$$

حيث يقدر f بوحدة Hz. عندئذ تستخرج S_H بطرح $10 \log \Delta f$ لمراعاة عرض النطاق الترددي. ويمكن أيضاً التعبير عن S_H بمثابة معادلة وحيدة على النحو التالي:

$$(10.4) \quad S_H = \frac{0,4 \pi k (T_A + T_R) f^2}{c^2 \sqrt{\Delta f t}}$$

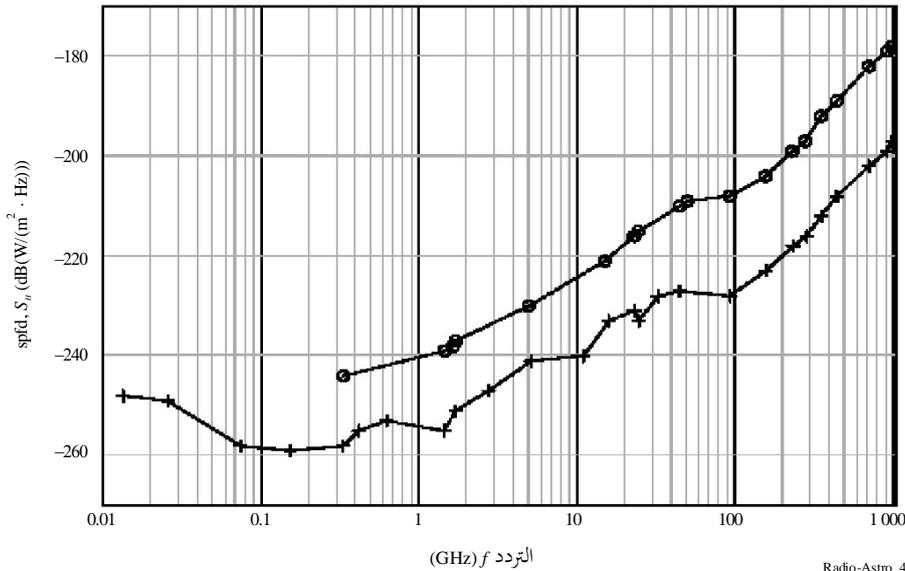
يبين الشكل 1.4 بيانياً سويات التداخل الضارة بخدمة الفلك الراديوي والمستخرجة في الجدولين 1.4 و 2.4 حيث تُرسم S_H (dB(W/(m² · Hz))) بوصفها دالة التردد. ومنحنى التواصل ليس سويماً لأن نطاقات التردد المختلفة لها عروض نطاقات موزعة مختلفة.

ومن شأن حساسية نظام استقبال فلك راديوي إزاء إشعاع عريض النطاق (متواصل) أن تتحسن بتزايد عرض النطاق (المعادلتان (4.4) و (6.4)). وتعليل ذلك ما يلي: تزداد قدرة الضوضاء بتزايد عرض النطاق، ولكن، بما أن الإشارة أيضاً هي ضوضاء نطاق عريض، كذلك هو الحال بالنسبة للإشارة. وتبقى نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) في مرحلة التردد الراديوي (RF) أو التردد المتوسط (IF) قبل الكاشف ثابتة بغض النظر عن عرض النطاق. ومع ذلك، كلما ازداد عرض النطاق، تتحسن الدقة في تحديد سويات القدرة باعتبارها الجذر التربيعي لعرض النطاق، ومن ثم تتحسن الحساسية بالمقابل.

وتوحي المعادلتان (4.4) و (6.4) بأن بالإمكان تحقيق أي درجة مطلوبة من الحساسية بتوسيع عرض النطاق و/أو زمن الرصد بما فيه الكفاية. ولكن هناك، في الممارسة العملية، عوامل أخرى غير العوامل الإحصائية المذكورة أعلاه تضع حداً عملياً لحساسية رصد الفلك الراديوي. ومن أمثلة هذه الآثار الأخرى استقرار المستقبل والتقلبات في التوهين ومسير الطور في الغلاف الجوي للأرض. وتستخدم سويات الحساسية الواردة في الجدولين 1.4 و 2.4 قيماً لعرض النطاق وزمن التكامل بحيث لا تكون لهذه العوامل الأخرى أهمية كبيرة عموماً. ومع ذلك، لا بد من التأكيد على أن سويات الحساسية هذه ليست حدوداً أساسية وأنه يتم تجاوزها بشكل روتيني في الحالات التي يمكن فيها إدراج البيانات على امتداد فترات من ساعات عديدة.

الشكل 1.4

عتبات التداخل مقابل التردد المحسوبة في الجدولين 1.4 و 2.4



ويبين الشكل 1.4 القيم العتبية لكثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) لمجال متواصل (صُلبان) وخط طيفي (دوائر) المستمدة من الجدولين 1.4 و 2.4، مرسومة بوصفها دالة التردد.

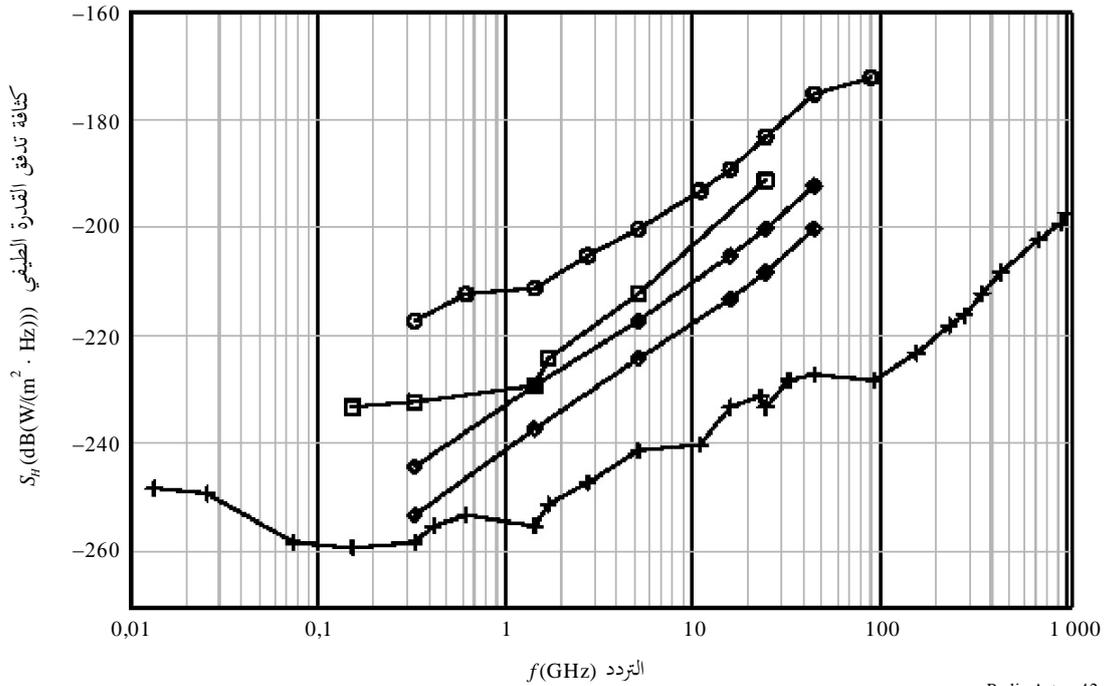
ويعطي التقرير ITU-R RA.2131 - معلومات تكميلية عن السويات العتبية الضارة للتداخل في رصدات الفلك الراديوي في التوصية ITU-R RA.769، القيم المكافئة لشدة المجال الكهربائي المقابل للبنود المدرجة في الجداول 1.4 و 2.4 و 3.4.

4.4 استجابة مقاييس التداخل والصفائف للتداخل الراديوي

أدت الحاجة إلى استبانة زاوية عالية في الرصدات الفلكية الراديوية إلى تطوير مقاييس التداخل وصفائف الهوائيات، وهي تؤدي دوراً متزايد الأهمية في دراسات المصادر ذات الأبعاد الزاوية من بضع دقائق قوسية أو أقل. ويحقق مقياس التداخل عادةً استبانة زاوية من λ/L راديان، حيث λ هو طول الموجة، و L هو أكبر تباعد مزعم من الهوائيات كما تُرى من المصدر الراديوي. وباستخدام هذه الأدوات ثمة تأثيران يخفضان من الاستجابة للتداخل. وهما يرتبطان بتردد ذبذبات الشدة الملحوظة لدى الجمع بين خرجي هوائيين، ولأن مكونات إشارة التداخل التي تستقبلها هوائيات مختلفة ومتباعدة جداً تتعرض لتأخرات زمنية نسبية مختلفة قبل إعادة جمعها. ومعالجة هذه الآثار أكثر تعقيداً من معالجة آثار هوائيات وحيدة، كما في البند 3.4. وثمة مناقشة لهذه المسألة في [Thompson, 1982] و [Thompson et al., 1986 and 2001]. وبصفة عامة، فإن النتيجة الرئيسية هي أن زمن التكامل الفعال الذي يؤثر خلاله التداخل على القياس ينخفض من الزمن الإجمالي للرصد إلى متوسط زمن تذبذب طبيعي واحد. وهذا يتراوح عادةً من بضع ثوانٍ لصفيف متراس بتباعد $\lambda \sim 1000$ إلى أقل من مملثانية للصفائف عابرة للقارات بتباعد $\lambda \sim 10^7$. وهكذا، ومقارنةً بهوائي فلك راديوي وحيد، يكون لمقياس التداخل درجة من الحصانة إزاء التداخل تزداد بتزايد حجم الصفيفة معبراً عنه بأطوال الموجة.

الشكل 2.4

عتبات التداخل الضار لرصدات متواصلة بأنماط متعددة من نظم التليسكوبات الراديوية



Radio-Astro_42

وتظهر في الشكل 2.4 عتبات التداخل الضار المحسوبة لبعض الصفائف الممثلة في أسلوب متواصل. وتمثل المعينات الصفيف الواسع جداً (VLA)، حيث المنحنى الأخفض للتشكيل D (أطول تباعد هوائي 1 كم) والمنحنى الأعلى للتشكيل A (أطول تباعد هوائي 36 كم). وتمثل المربعات صفيفة MERLIN والدوائر المفتوحة القياس بالتداخل ذي خط أساس طويل جداً (VLBI) (الجدول 3.4). وبالنسبة لصفيف واسع جداً (VLA) في المرصد الفلكي الوطني، نيومكسيكو، الولايات المتحدة، يمتد تباعد الهوائي حتى 1 كم في التشكيل D وحتى 36 كم في التشكيل A. وبالنسبة لصفيف MERLIN في مختبرات نوفيلد للفلك الراديوي، جودريل بانك، المملكة المتحدة، يمتد التباعد حتى 218 كم. وتتوقف النتائج على تباعدات الهوائيات، ومن ثم هناك منحنيات منفصلة لتشكيلي VLA ومن أجل MERLIN. وهي تنطوي أيضاً على افتراضات أن المرسل المتداخل مستقر بالنسبة إلى الأرض، وأن قدرة إشارة التداخل الواردة عبر الفصوص الجانبية للهوائي تبقى ثابتة أثناء الرصد.

الجدول 1.4

السويات العتبية للتداخل الضار برصدات الفلك الراديوي المتواصلة

سويات التداخل العتبية ⁽¹⁾			حساسية النظام (تقلبات الضوضاء)		درجة حرارة ضوضاء المستقبل	درجة حرارة ضوضاء الهوائي الدنيا	عرض النطاق المفترض ⁽³⁾	التردد المركزي ⁽²⁾
spfd	pdf	قدرة الدخل	كثافة القدرة الطيفية	درجة الحرارة				
S_H (dB(W/(m ² · Hz)))	$S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	ΔP_H (dBW)	ΔP (dB(W/Hz))	ΔT (mK)	T_R (K)	T_A (K)	Δf (MHz)	f (MHz)
(9)	(8)	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
248-	201-	185-	222-	5 000	60	50 000	0,05	13,385
249-	199-	188-	229-	972	60	15 000	0,12	25,610
258-	196-	195-	247-	14,3	60	750	1,6	73,8
259-	194-	199-	254-	2,73	60	150	2,95	151,525
258-	189-	201-	259-	0,87	60	40	6,6	325,3
255-	189-	203-	259-	0,96	60	25	3,9	408,05
253-	185-	202-	260-	0,73	60	20	6,0	611
255-	180-	205-	269-	0,095	10	12	27	1 413,5
251-	181-	207-	267-	0,16	10	12	10	1 665
247-	177-	207-	267-	0,16	10	12	10	2 695
241-	171-	207-	267-	0,16	10	12	10	4 995
240-	160-	202-	272-	0,049	10	12	100	10 650
233-	156-	202-	269-	0,095	15	15	50	15 375
231-	146-	195-	269-	0,085	30	35	290	22 355
233-	147-	195-	271-	0,050	30	15	400	23 800
228-	141-	192-	269-	0,083	65	18	500	31 550
227-	137-	191-	271-	0,064	65	25	1 000	43 000
228-	129-	189-	274-	0,011	30	12	8 000	89 000
223-	124-	189-	278-	0,011	30	14	8 000	150 000
218-	119-	188-	277-	0,016	43	20	8 000	224 000
216-	117-	187-	276-	0,019	50	25	8 000	270 000
212-	113-	185-	274-	0,030	64	55	8 000	335 000
208-	109-	183-	272-	0,044	80	95	8 000	420 000
202-	103-	181-	270-	0,079	130	185	8 000	670 000
199-	100-	180-	269-	0,086	170	175	8 000	875 000
197-	98-	179-	268-	0,104	180	235	8 000	940 000

- (1) افترض زمن تكامل قدره 2 000 ثانية؛ وإذا استخدمت أزمنة تكامل من 15 دقيقة أو ساعة أو ساعتين أو 5 ساعات أو 10 ساعات، ينبغي تعديل القيم ذات الصلة في الجدول بمقدار +1,7 أو -1,3 أو -2,8 أو -4,8 أو -6,3 dB على التوالي. وسويات التداخل المدرجة هي تلك التي تنطبق على قياسات إجمالي القدرة التي يتلقاها هوائي واحد. وقد تكون سويات أقل صرامة أنسب لأنواع أخرى من القياسات، كما جاء في البند 4.4. وبالنسبة للمرسلات في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فمن المستحسن تعديل السويات بمقدار -15 dB (أي تخفيض السويات بمقدار 15 dB)، كما هو موضح في البند 3.7.4.
- (2) ليس القصد من هذا الجدول إعطاء قائمة كاملة بنطاقات الفلك الراديوي وإنما مجرد أمثلة نمطية عبر الطيف. ويستند حساب سويات التداخل إلى التردد المركزي المبين في العمود (1) وإن لم يكن لجميع الأقاليم نفس التوزيعات.
- (3) في ترددات فوق 71 GHz استخدمت قيمة 8 GHz في العمود (2)، وهو يمثل لعرض النطاق الذي يستخدم عادةً للرصدات المتواصلة في هذا المدى.

الجدول 2.4

السويات العتبية للتداخل الضار برصدات الفلك الراديوي في الخطوط الطيفية

سويات التداخل العتبية ⁽¹⁾			حساسية النظام (تقلبات الضوضاء)		درجة حرارة ضوضاء المستقبل	درجة حرارة ضوضاء الهوائي الدنيا	عرض نطاق قناة الخطوط الطيفية المفترض	التردد المركزي ⁽²⁾
spfd	pdf	قدرة الدخل	كثافة القدرة الطيفية	درجة الحرارة				
S_H (dB(W/(m ² · Hz)))	$S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	ΔP_H (dBW)	ΔP (dB(W/Hz))	ΔT (mK)	T_R (K)	T_A (K)	Δf (MHz)	f (MHz)
(9)	(8)	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
244-	204-	215-	245-	22,3	60	40	10	327
239-	196-	220-	253-	3,48	10	12	20	1 420
238-	194-	220-	253-	3,48	10	12	20	1 612
237-	194-	220-	253-	3,48	10	12	20	1 665
230-	183-	218-	255-	2,20	10	12	50	4 830
221-	169-	214-	256-	1,73	15	15	150	14 500
216-	162-	210-	254-	2,91	30	35	250	22 200
215-	161-	210-	254-	2,91	30	35	250	23 700
210-	153-	207-	254-	2,84	65	25	500	43 000
209-	152-	207-	254-	3,00	65	30	500	48 000
208-	148-	209-	259-	0,94	30	12	1 000	88 600
204-	144-	209-	259-	0,98	30	14	1 000	150 000
199-	139-	207-	257-	1,41	43	20	1 000	220 000
197-	137-	206-	256-	1,68	50	25	1 000	265 000
192-	132-	204-	254-	2,66	64	55	1 000	335 000
189-	129-	203-	253-	3,91	80	95	1 000	420 000
182-	122-	200-	250-	7,04	130	185	1 000	670 000
179-	119-	200-	250-	7,71	170	175	1 000	875 000
178-	118-	199-	249-	9,28	180	235	1 000	940 000

- (1) افترض زمن تكامل قدره 2 000 ثانية؛ وإذا استخدمت أزمنة تكامل من 15 دقيقة أو ساعة أو ساعتين أو 5 ساعات أو 10 ساعات، ينبغي تعديل القيم ذات الصلة في الجدول بمقدار +1,7 أو -1,3 أو -2,8 أو -4,8 أو -6,3 dB على التوالي. وسويات التداخل المدرجة هي تلك التي تنطبق على قياسات إجمالي القدرة التي يتلقاها هوائي واحد. وقد تكون سويات أقل صرامة تناسب لأنواع أخرى من القياسات، كما جاء في البند 4.4. وبالنسبة للمرسلات في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فمن المستحسن تعديل السويات بمقدار -15 dB (أي تنخفض السويات بمقدار 15 dB)، كما هو موضح في البند 3.7.4.
- (2) ليس القصد من هذا الجدول إعطاء قائمة كاملة بنطاقات الفلك الراديوي وإنما مجرد أمثلة نمطية عبر الطيف.

شرح الأعمدة في الجدولين 1.4 و 2.4:

العمود

- (1) تردد مركزي للنطاق الموزع لخدمة الفلك الراديوي (الجدول 1.4) أو تردد خط طيفي اسمي (الجدول 2.4).
 - (2) عرض نطاق مفترض أو موزع (الجدول 1.4) أو عرض قناة نمطية مفترضة مستخدمة في رصدات الخطوط الطيفية (الجدول 2.4).
 - (3) درجة حرارة ضوضاء الهوائي الدنيا، وهي تتضمن مساهمات من الأيونوسفير والغلاف الجوي للأرض والإشعاع من الأرض وإشعاع خلفية المجرة والخلفية الكونية.
 - (4) درجة حرارة ضوضاء المستقبل المثلثة لنظام عالي الحساسية. بالنسبة لترددات فوق 1 GHz تنطبق القيم على المستقبلات المبردة بالتجميد الشديد.
 - (5) مجموع حساسية النظام بوحدة milli-Kelvin كما يحسب من المعادلة (6.4) باستخدام مجموع درجتي حرارة ضوضاء الهوائي والمستقبل، وعرض النطاق المدرج، وزمن تكامل بمقدار 2 000 ثانية.
 - (6) على غرار (5) أعلاه، ولكن في شكل كثافة طيفية لقدرة الضوضاء باستخدام المعادلة $\Delta P_s = k \Delta T$ ، حيث $k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K) (ثابت Boltzmann). والقيم ΔP_s في شكل ديسيبل.
 - (7) تعتبر سوية القدرة عند دخل المستقبل ضارة بالرصدات عالية الحساسية (ΔP_H). ويناقش هذا المعيار في البند 3.2.4، ويعبر عنه في الحساب في شكل $\Delta P \Delta f = 0,1 \Delta P_H$ والقيم ΔP_H في شكل ديسيبل.
 - (8) كثافة تدفق القدرة اللازمة لإنتاج سوية قدرة ΔP_H في نظام استقبال له هوائي استقبال متناح. والقيم $S_H \Delta f$ في شكل ديسيبل.
 - (9) كثافة تدفق القدرة الطيفية اللازمة لإنتاج سوية قدرة ΔP_H في عرض نطاق المستقبل (الجدول 1.4) أو في قناة خط طيفي (الجدول 2.4)، وهوائي استقبال متناح. والقيم S_H في شكل ديسيبل. للحصول على سويات القدرة المقابلة في عرض نطاق مرجعي بمقدار 4 kHz أو 1 MHz، يضاف 36 dB أو 60 dB، على التوالي.
- وفي حالة قياس تداخل خط أساس طويل جداً (VLBI)، حيث الهوائيات متباعدة جداً بما يجعل فرصة حدوث تداخل مترابط ضئيلة جداً، لا تنطبق عادةً الاعتبارات السابقة. (وقد يكون الاستثناء حالة ساتل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض (GSO) مرئي في آن واحد من أكثر من محطة VLBI واحدة.) عندئذ تتحدد عتبة التداخل بالسوية التي يبدأ عندها التداخل بالخط من ترابط الإشارات المقيس بين هوائيين. ويمكن من أجل هذه العتبة استخدام سوية تداخل تساوي 1% من قدرة ضوضاء النظام في المستقبل [Thompson et al., 1986 and 2001]. (يلاحظ أن هذه السوية أكبر بكثير من 10% من تقلبات الضوضاء بعد الكشف والتكامل، كما في معيار نظام القدرة الكلي لتشغيل هوائي وحيد.) وقيم العتبة من أجل القياس VLBI، بناءً على معيار قدرة ضوضاء 1% معبراً عنها في شكل كثافة تدفق قدرة طيفية (spfd)، تساوي $1,930 \times 10^{-23} (T_A + T_R) f^2$ وتعطى كقيم ديسيبل في الجدول 3.4 وهي مرسومة في الشكل 2.4. ودرجات حرارة النظام المستخدمة هي نفسها كما في الجدولين 1.4 و 2.4، وقد أدرج عامل بمقدار 1,4 لمراعاة آثار التكميم في الاعتيان الرقمي المستخدم في تدوين البيانات. ولا تتوقف النتائج على التباعدات المفصلة بين الهوائيات. ويفترض في جميع الحالات أن الإشارة المتداخلة تستقبل في الفصوص الجانبية بكسب قدره 0 dB. ولأغراض المقارنة، تظهر قيم مجموع رصدات القدرة (هوائي وحيد) من الجدول 1.4 في أدنى منحني.

الجدول 3.4

سويات التداخل العتبية لرصدات VLBI

التردد المركزي (MHz)	السوية الضارة (dB(W/(m ² · Hz)))
325,3	217-
611	212-
1 413,5	211-
2 695	205-
4 995	200-
8 400	196-
10 650	193-
15 375	189-
23 800	183-
43 000	175-
89 000	172-
150 000	167-
224 000	162-
270 000	160-

وكدليل في مجال تأثر نظم VLBI بالتداخل، جدير بالإشارة أن الشكل 1.4 يشير إلى أن العتبات الضارة لنظم VLBI هي أكبر بحوالي 40 dB مما هي لنظم قدرة كلية متواصلة في نفس التردد. والمساحة الواقعة بين منحنى VLBI ومنحنى إجمالي القدرة تغطي مدى العتبات لجميع أنماط التليسكوبات الراديوية. ويجب التأكيد على أن استخدام مقاييس التداخل والصفائف يقتصر عموماً على دراسات مصادر لَمعان عالية منفصلة لها أبعاد زاوية لا تزيد عن بضعة دقائق قوسية للصفائف الواسعة جداً (VLA)، أو بضعة أعشار من الثواني القوسية لنظم قياس التداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI). وهكذا تظل نتائج القدرة الكلية في الجدولين 1.4 و 2.4 صالحة لحماية خدمة الفلك الراديوي عموماً.

5.4 النجوم النابضة

تناول الفصل 2 بالوصف خصائص النجوم النابضة. وفي رصدات هذه النجوم يستخدم عموماً نظام استقبال خط طيفي، بحيث يمكن مواءمة الإشارات في مختلف قنوات التردد في الوقت المناسب لإزالة تأثير تشتت التردد، ومن ثم جمعها. وفي عمليات البحث عن النجوم النابضة تسجل البيانات ثم تستكشف بعد ذلك باستخدام مجموعة من قيم التشتت ومجموعة من القيم لأزمنة تكرار النبضة. وتأثير تصحيح التشتت على التداخل الذي قد يكون موجوداً هو عبارة عن تمهيد أي ملامح حادة في الزمن ولكن دون التأثير كثيراً على جذر متوسط تربيع سوية التداخل. وحالما يتم حساب التشتت وزمن التكرار يمكن مواءمة النجوم النابضة من حيث الزمن وحساب المتوسط لدراسة شكل النبضة وتحسين دقة قياس التوقيت. وعند النظر في حساسية تأثر هذه الرصدات يكون عرض النطاق قيد النظر هو عرض نطاق المستقبل بأكمله، ولكن زمن التكامل الفعال هو الزمن الذي تكون فيه النبضة موجودة. وهكذا فإن عتبة التداخل الضار هي قيمة التواصل المكافئ مقسوماً على الجذر التربيعي لجزء الزمن الذي تكون فيه النبضة موجودة. وهذا الجزء هو مدة النبضة مقسوماً على زمن التكرار، وهي في حدود بضعة أجزاء في المائة إلى بضعة عشرات أجزاء في المائة. وهكذا فإن العتبات الضارة لرصدات النجوم النابضة هي أكبر من قيم التواصل المكافئة في الجدول 1.4 بمقدار 2 إلى 10 dB. وتجري رصدات النجوم النابضة عادةً باستخدام هوائيات كبيرة تستخدم أيضاً لرصدات كامل القدرة عموماً، ومن ثم فهي لا تضيف أي قيود خاصة إلى مجمل المتطلبات من أجل الحماية من التداخل.

6.4 درجات الحساسية المحققة

الحساسية التي تمم علماء الفلك الراديوي أكثر من غيرها هي الحساسية إزاء الإشعاع من مصادر داخل الحزمة الرئيسية لهوائي الفلك الراديوي، وليس في الفصوص الجانبية، التي نظر فيها فيما يتعلق بالتداخل. وينطبق هذا القول على هوائي وحيد يستخدم لقياسات إجمالي القدرة المستقبلية أو على فرادى الهوائيات في صيف ما. مثال ذلك، يكون لهوائي وحيد قطره 70 متراً يعمل في تردد 5 GHz مساحة تغطية فعالة من حوالي 2700 متر مربع، وكسب قدره 70 dB. وهكذا فإن حساسية الحزمة الرئيسية من حيث كثافة تدفق القدرة تكون 70 dB أكبر من مثيلتها لإشعاع يدخل الفصوص الجانبية متناحية السوية. ويبين العمود 6 في الجدول 1.4 أن الحساسية عند دخل المستقبل لإشارة ذات قوة مساوية لضوضاء النظام هي $(-267 \text{ dB(W/Hz)}) (2 \times 10^{-27} \text{ W/Hz})$ ، ولذلك، وبالنسبة لمساحة تغطية قدرها 2700 متر مربع، تكون كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) المقابلة هي:

$$(11.4) \quad 2 \times 2 \times 10^{-27} / 2700 = 1,5 \times 10^{-30} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$$

$$(12.4) \quad = -298,2 \quad \text{dB W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$$

حيث يتم تضمين عامل بقيمة 2 في البسط في الجانب الأيسر لأن أي خرج واحد من هوائي يقابل نصف القدرة في موجة راديوية عشوائية الاستقطاب. وهذا مثال لحساسية عالية جداً، أعلى بعدة مراتب مما يعتبر غالباً عملياً في خدمات راديوية أخرى.

ويقدم الجدول 4.4 أمثلة لرصدات متواصلة ورصدات خطية حساسة جداً تظهر في الكتابات المنشورة في علم الفلك الراديوي. وبالنسبة لرصدات هوائي وحيد تقارن مع السويات الضارة في الجدولين 1.4 و 2.4، وبالنسبة للصفائف تقارن مع القيم المأخوذة من الشكل 2.4 أو تحسب. والقياسات الفلكية هي أدنى بكثير من السويات الضارة لأنها تحدث في الحزمة الرئيسية لهوائيات الفلك الراديوي في حين أن السويات الضارة تقابل الاستقبال في الفصوص الجانبية، أي إن الفروق مرتبطة بكسب الهوائيات. وتشير هذه النتائج إلى أن الرصدات الحساسة للغاية تحدث في مرصد الفلك الراديوي، ومن ثم تؤكد أن المعلومات في الجدولين 1.4 و 2.4 مناسبة للنظم الحالية.

الجدول 4.4

مقارنة نتائج الرصد مع السويات العتبية للتداخل

التردد (GHz)	نمط الأداة	خط أم تواصل	spfd المرصودة (dB(W/(m ² · Hz)))	الحد الضار (dB(W/(m ² · Hz))) ¹	المراجع
1,4	صيف	تواصل	309-	255-	[Owen & Morrison 2008]
5,0	صيف	تواصل	308-	222-	[Fomalont et al., 1991]
1,42	مكافئ وحيد	خط (H I)	288-	239-	[Lockman et al., 2011]
37,3	صيف	خط (منزاح نحو الأحمر CO)	295-	211-	[Walter et al., 2012]
93,2	صيف	خط (منزاح نحو الأحمر CO)	289-	208-	[Walter et al., 2012]

⁽¹⁾ من الجدولين 1.4 و 2.4 وكما هو مستخرج من الشكل 1.4

قد يكون من المتوقع أن تستمر في الزيادة حساسية رصدات الفلك الراديوي إزاء كل من الإشارات الكونية والتداخل بتزايد توفر معدات الاستقبال الأكثر حساسية. وفي ترددات تصل إلى حوالي 100 MHz لا تسهم حرارة المستقبل مساهمة كبيرة في إجمالي حرارة النظام (انظر الجدول 1.4). وفي جانب التردد العالي من الطيف، من المرجح أن يكون للتحسينات في تكنولوجيا الاستقبال أكبر الأثر. ولكن أكبر الزيادات في الحساسية ربما تتحقق من خلال تطوير هوائيات وصفائف هوائيات أكبر مما كان ممكناً في الماضي.

7.4 مناقشة التداخل

1.7.4 سويات التداخل

غالباً ما تكون الإشارات المتداخلة، عند سويات القدرة بين العتبات الضارة المعروفة لتوها والقيم الواقعة حوالي 10 dB فوق هذه القيم، أشد الإشارات ضرراً على رصدات الفلك الراديوي. ذلك لأنها قوية بما فيه الكفاية للتسبب في أخطاء في البيانات، ولكنها ضعيفة بما فيه الكفاية بحيث قد لا يكون من السهل كشف وجود التداخل. ومن السهل عادةً الكشف عن التداخل بقيمة 20 dB وأكثر فوق القيم العتبية. وفي هذه الحالات تكاد تكون القياسات دائماً غير مجددة لأغراض الفلك الراديوي، ولا بد من تنقية البيانات الملوثة.

2.7.4 التداخل من مصادر فلكية

ثمة عدد ضئيل من المصادر الفلكية الراديوية القوية بما فيه الكفاية لتداخل في رصدات عالية الحساسية. ويمكن أن تتجاوز كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) من هذه المصادر القيم الواردة في الجدول 1.4. ومن أبرز هذه الأمثلة كوكب الشمس، وهو مصدر قوي من مصادر الانبعاثات. ونظراً لهذا التداخل الناجم عن الشمس، هناك بعض التحريات التي لا يمكن إجراؤها إلا في الليل. وثمة تجارب أخرى ممكنة في النهار، ما عدا أثناء فترات النشاط الشمسي الشديد. وانبعاثات الرشقات الشمسية قوية بصفة خاصة بالنسبة للترددات دون حوالي 200 MHz. والشمس الهادئة تكون ذات قطر زاوي كبير وكثافة تدفق ثابتة، وهي عادةً أقل إشكالية.

وهناك، دون 1 GHz، عدد من المصادر الراديوية الكونية الأخرى التي تتجاوز قيمة spfd الواردة في الجدول 1.4. ولكن مواقع هذه المصادر معروفة بدقة ولها شدة ثابتة معروفة لا تختلف إلا قليلاً باختلاف التردد. ومن حيث المبدأ وفي الممارسة العملية، يستطيع عالم الفلك الراديوي إجراء تصحيحات لمراعاة آثارها عند إجراء رصدات في أعلى درجة ممكنة من الحساسية. ومن ناحية أخرى، لا يُعرف عادةً موقع التداخل الأرضي منخفض السوية ولا كثافة التدفق ولا الطيف، وقد يتغير كثيراً بتغير الزمن، ومن ثم لن يكون ممكناً عموماً التخفيف من آثاره على الرصدات إلا من خلال بتر البيانات غير الصالحة للاستعمال.

3.7.4 اعتبارات خاصة بشأن مرسلات السواتل في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض

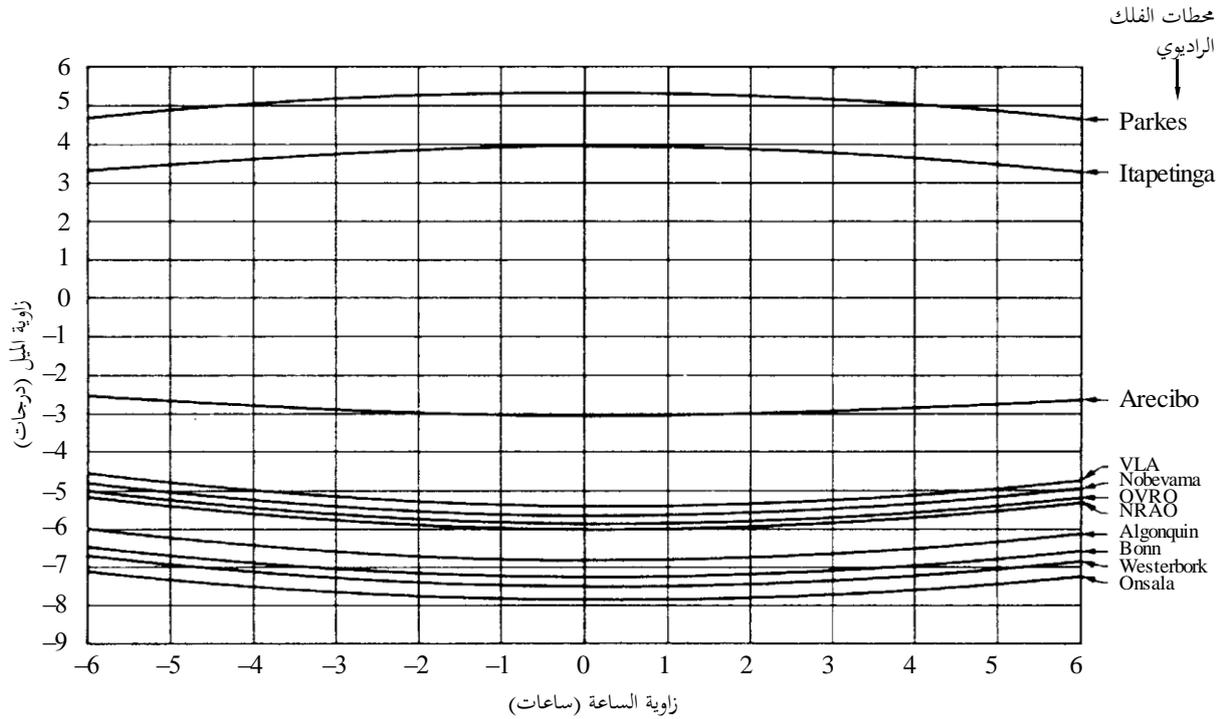
يُعتبر التداخل من انبعاثات السواتل في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض حالة تتسم بأهمية خاصة. ولا بد من الإشارة أولاً إلى أن علماء الفلك الراديوي لا يمكنهم الرصد بوجود إشارات في الوصلة الهابطة في نفس النطاق الترددي. وهكذا، تتناول اعتبارات التداخل من السواتل عموماً الانبعاثات غير المطلوبة التي تقع ضمن نطاقات الفلك الراديوي.

وبما أن سويات القدرة في الجدولين 1.4 و 2.4 محسوبة بافتراض كسب هوائي بمقدار 0 dBi، فإن التداخل الضار يصادف عندما تكون الفصوص الجانبية للهوائي التي لها كسب أكبر من 0 dBi مسددة نحو مرسل يث في السويات المبينة في الجدولين 1.4 و 2.4. وبالنسبة لهوائي فلك راديوي له فصوص جانبية مساوية لفصوص الهوائي المرجعي المحدد في المعادلة (1.4)، يحدث التداخل إذا كان الهوائي مسدداً بزوايا 19° أو أقل باتجاه ساتل يث عند هذه السويات. وهكذا من شأن سلسلة من السواتل المتماثلة الواقعة على مسافات حول المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض أن تستبعد رصدات الفلك الراديوي ذات الحساسية العالية من نطاق سماوي باتساع 38° أو أكثر متمركزة على المدار. وفقدان هذه المساحة الكبيرة من السماء يفرض قيوداً شديدة على رصدات الفلك الراديوي.

وثمة معيار مفيد لحماية الفلك الراديوي من انبعاثات السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض مقترح في الشكل 3.4. ويبين هذا الشكل إسقاط المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض في الإحداثيات السماوية كما يُرى من خطوط العرض لعدد من مرصدي الفلك الراديوي الرئيسية. وإذا أمكن تسديد تليسكوب راديوي ضمن 5° من المدار دون مواجهة تداخل ضار، عندئذ يكون لهذا التليسكوب فسحة من السماء باتساع 10° غير متاحة للرصدات عالية الحساسية. وبمثل ذلك لأي مرصد معين خسارة كبيرة. ومع ذلك، يمكن لمجموعة من التليسكوبات الراديوية الموجودة في خطوط العرض الشمالية والجنوبية، تعمل في نفس الترددات، أن تنفذ إلى السماء بأكملها. ولذلك ينبغي أن تُعتبر قيمة 5° مطلوبة من أجل الحد الأدنى من التباعد الزاوي بين الحزمة الرئيسية لهوائي فلك راديوي والمدار المستقر بالنسبة إلى الأرض.

الشكل 3.4

إسقاط المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض على القبة السماوية
كما يُرى من عدد من المراصد الراديوية



Radio-Astro_43

وفي استجابة الهوائي النموذجي في المعادلة (1.4)، تكون سوية الفص الجانبي عند زاوية 5° من الحزمة الرئيسية 15 dBi. وهكذا، ولتجنب أي تداخل ضار في تليسكوب راديوي مسدد بزاوية 5° من المرسل، ينبغي خفض انبعاثات السواتل ضمن نطاقات الفلك الراديوي بمقدار 15 dB دون سوية كثافة تدفق القدرة الواردة في الجدولين 1.4 و 2.4. وعند مباعده السواتل على مسافات بضع درجات فقط على طول المدار، يجب أن تكون سويات القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) لفرادى الإرسالات في اتجاه مرصد ما أدنى من ذلك أيضاً لتلبية اشتراط أن يكون مجموع القدرات من كل إشارات التداخل الواردة بمقدار 15 dB دون ΔP_H في الجدولين 1.4 و 2.4.

ومن الواضح أن من الممكن توفير قدر إضافي من الحماية من انبعاثات السواتل وذلك بتخفيض سوية كسب الفص الجانبي بالقرب من الحزمة الرئيسية إلى الحد الأدنى. وينبغي أن يكون هذا من الاعتبارات الهامة في تصميم هوائيات الفلك الراديوي في المستقبل.

4.7.4 الترشيح

تُرفض قدرة الإشارة غير المطلوبة خارج نطاق التمرير في مستقبل فلك راديوي باستخدام مرشحي التمرير. ويمكن إدراج عدة مرشحي في مراحل مختلفة في نظام الاستقبال لضمان ألا تكون الإشارات غير المطلوبة قوية في أي نقطة بما فيه الكفاية لتسبب عدم الخطية. ويمكن الحصول على الانتقائية العالية جداً باستخدام مرشحي رقمية، ولكن يجب أن تكون هذه مسبقة بقدر كافٍ من التضخيم بحيث يمكن رقمنة الإشارات. وقد يتعين أن تكون الاستجابة عند حواف النطاق منخفضة بما يصل إلى -100 dB نسبةً إلى مركز النطاق، بحيث يكون عرض المرشاح عند نقاط -3 dB أقل من العرض الكامل للنطاق المخصص. وبما أن الترددات الوسيطة منخفضة نسبياً، بين MHz ميغاهيرتز و 10 GHz عموماً، من الممكن التوصل إلى حواف ترشيح شديدة الانحدار نسبياً. ويتوقف انحدار حواف استجابة المرشاح على عدد أقسام المرشاح وعلى الاستجابة المصممة. ويتضمن الفصل 6 المزيد من المناقشة بشأن الترشيح.

5.7.4 سويات التداخل القادرة على إتلاف أو إشباع مستقبل فلك راديوي

يشير التقرير ITU-R RA. 2188 - سويات كثافة تدفق القدرة والقدرة المشعة المكافئة المتناحية التي قد تضر بمستقبلات الفلك الراديوي، إلى أن قدرات الدخل في حدود 25 ميغاواط تكفي لتعطيل أو إتلاف معظم مستقبلات الفلك الراديوي في حين أن سويات الدخل الأضعف بكثير تكفي لتشيع كسبها. وهناك عدة سيناريوهات تتناول رادارات قائمة يمكن أن تؤدي إلى دخل بهذه السويات من القدرة.

- الاقتران من حزمة رئيسية إلى حزمة رئيسية. يمثل الكسب العالي لهوائيات الفلك الراديوي، مقترناً بالقدرة العالية وضآلة حجم البقع لمختلف رادارات استشعار الأرض في المدار العاملة في ترددات ما بين 1 و 94 GHz مثل هذا الاحتمال [SFCG Ref]، لو حدث أن تداخلت الحزم الرئيسية لكلا النظامين في أي وقت. وعلى الرغم من أن حدوث هذا الاقتران نادر جداً بالمعنى الإحصائي، فإن عواقب حدوث هذا التداخل بالنسبة لمشغل فلك راديوي وخيمة.
 - الاقتران من حزمة رئيسية إلى فص جانبي. كما أشير في التوصية ITU-R 1750 - التخطيط المتبادل بين الخدمة الساتلية (النشطة) لاستكشاف الأرض (EESS) وخدمة الفلك الراديوي (RAS) في النطاقين 94 GHz و 130 GHz، فإن مستقبل فلك راديوي يتشيع كلما تعرض الهوائي الذي يحمله مباشرة لتغطية من رادار عالي القدرة في مدار لاستشعار الأرض، حتى بالنسبة للاستقبال في فص جانبي بمقدار 0 dBi هوائي الفلك الراديوي. وعلى العكس من ذلك، فإن مستقبل الفلك الراديوي يتشيع عندما تتعرض الحزمة الرئيسية لهوائي الفلك الراديوي لمقدار 0 dBi أو حتى فص جانبي أضعف من رادار دائر في مدار، على افتراض أن كسب هوائي الفلك الراديوي أعلى من كسب الرادار الدائر في المدار.
- وحتى المرسلات المتواضعة إلى حد ما، مثل رادارات المركبات بتردد 76-77 GHz و 77-81 GHz الموصوفة في التوصية ITU-R M.1452 - رادارات تفادي تصادم السيارات وأنظمة الاتصالات الراديوية العاملة بالموجات المليمترية من أجل تطبيقات أنظمة النقل الذكية، قد تؤدي إلى تشيع أو إلى سويات قدرة ضارة عندما تعمل على مقربة من هوائي فلك راديوي، نظراً لارتفاع الكسب وضآلة مساحة البقعة التي تقترب بالترددات التي تعمل فيها.

8.4 تحليل مونتني كارلو

يستخدم تحليل مونتني كارلو أحياناً لتقدير الجزء من الزمن الذي تتجاوز أثناءه إشارة التداخل العتبة الضارة لخدمة الفلك الراديوي. وهذا الإجراء مفيد في الحالات التي تتغير فيها بسرعة الزاوية بين اتجاه مصدر التداخل والحزمة الرئيسية للتليسكوب الراديوي. وقد ينجم التغير عن حركة المصدر المتداخل، شأن سائل في مدار غير مستقر بالنسبة إلى الأرض، و/أو التغير في تسديد التليسكوب الذي يتطلبه البرنامج الفلكي. ويمكن أيضاً أن يتغير عدد ومسافة مصادر التداخل النشطة، كما في حالة تداخل من مركبات متنقلة على الأرض. ويتناول تحليل مونتني كارلو عدداً كبيراً من تشكيلات التجربة، حيث يتم في كل منها اختيار قيمة كل معلمة مجهولة عشوائياً من مجموعة من القيم تتمتع بالتمثيل الإحصائي المناسب للمعلمة المعنية. وفي الواقع إن تحليل مونتني كارلو هو تجربة إحصائية تتكون من عدد من التجارب المستقلة. وتنتقى كل المعلمات عشوائياً في كل تجربة وفقاً لتوزيعات احتمالية ثابتة مقرر مسبقاً. ويوفر الجزء من التجارب الذي يتم فيه تجاوز عتبة التداخل مؤشراً على احتمال التداخل في وضع حقيقي. ومع ذلك، إذا لم يشر مثلاً أكثر من 2% من التجارب إلى تداخل فوق سوية العتبة الضارة، فلا يمكن القول على وجه اليقين إن احتمال التداخل لا يزيد عن 2%، ولكن للحصول على درجة معينة من اليقين يمكن اشتقاق حد أعلى مقابل لاحتقال التداخل. وتدرس هذه العلاقات باقتضاب فيما يلي أدناه، باتباع تحليل Ponsonby [2002]. ويلاحظ أنه في الحالات التي يكون فيها احتمال وقوع الحدث منخفضاً، فإن طريقة مونتني كارلو ليست مناسبة تماماً لتحديد دقيق لهذا الاحتمال لأن الأمر يتطلب عدداً كبيراً جداً من محاكاة التجارب لبناء قدر هام من الإحصاءات.

ولننظر في تحليل يشتمل على عدد N من التجارب، وفي n من الحالات تكون النتيجة غير مقبولة، أي إن التداخل يتجاوز العتبة الضارة. ولتكن p احتمال أن أي تجربة تفضي إلى نتيجة غير مقبولة. وتميل قيمة p المستمدة من التجارب نحو n/N ، حيث تميل N نحو اللانهاية. وبالنسبة لقيمة محدودة من N ، فإن احتمال الحصول على عدد n من النتائج غير المقبولة لقيمة معينة من p يعطى بواسطة توزيع Bernoulli، وهو:

$$(12.4) \quad P_p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)}$$

ولتفسير نتيجة تحليل مونتني كارلو يتعين معرفة $P_n(p)$ ، وهي توزيع احتمال p للحصول على n نتيجة غير مقبولة في عدد محدود من التجارب. وهذه هي المشكلة العكسية التي يحتاج حلها إلى علاقة التكامل التالية وذلك لتسوية التوزيع إحصائياً:

$$(13.4) \quad \frac{N!}{n!(N-n)!} \int_0^1 x^n (1-x)^{(N-n)} dx = \frac{1}{N+1}$$

عندئذ يتبين أن الاحتمال العكسي هو:

$$(14.4) \quad P_n(p) = \frac{(N+1)!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)}$$

لنفترض أننا نتطلب 90% من اليقين بأن القيمة الحقيقية لاحتمال p ليست أكبر من قيمة معينة p_{90} . عندئذ يجب أن تلي $P_n(p)$ معادلة التكامل:

$$(15.4) \quad \int_0^{p_{90}} P_n(p) dp = 0.9$$

بالنسبة لاحتمال كون 2% من النتائج غير مقبولة، تكون $p_{90} = 0,02$ والمعادلة (15.4) توفر حلولاً لقيم N و n بحيث يمكن التخلص من عدد N من التجارب إلى أن هناك 90% من اليقين بأن احتمال وجود نتيجة غير مقبولة في أي تجربة واحدة لا يتجاوز 2%. وللحصول على قيم مختلفة من N ، يبين الجدول 5.4 قيم n التي يجب عدم تجاوزها بحيث يمكن، باحتمال 90%، التخلص إلى أن احتمال حدوث نتيجة غير مقبولة في أي تجربة واحدة لا يتجاوز 2%. ويلاحظ أنه عندما يصبح العدد N كبيراً جداً، تقترب n/N من 2%. ولكن لعدد $N = 390$ ، يتطلب الأمر قيمة n/N لا تزيد عن 1% من أجل 90% من اليقين بأن احتمال وجود نتيجة غير مقبولة لا يزيد عن 2%.

الجدول 5.4

قيم N و n من أجل احتمال لا يزيد عن 2% من حدوث نتيجة غير مقبولة، بنسبة 90% من اليقين

p_{90} (%)	n/N (%)	n	N
2,0	0,52	1	292
2,0	1,01	4	397
2,0	1,29	10	776
2,0	1,58	30	1900
2,0	1,81	181	10000
2,0	1,92	960	50000

الملحق 1

بالفصل 4

نموذج لفص جانبي مقتبس من التوصية ITU-R S.1428

نموذج كسب الفص الجانبي من التوصية ITU-R S.1428، لهوائيات قطرها، D ، أكبر من 100 طول موجة، λ ، هو على النحو التالي (يقراً من اليسار إلى اليمين):

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \{D\varphi/\lambda\}^2 \quad \text{dBi} & \text{for } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) &= G_1 & \text{for } \varphi_m < \varphi < \varphi_r \\
 G(\varphi) &= 29 - 25 \log(\varphi) \quad \text{dBi for } & \varphi_r < \varphi < 10^\circ \\
 G(\varphi) &= 34 - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} & \text{for } 10^\circ < \varphi < 34,1^\circ \\
 G(\varphi) &= -12 \quad \text{dBi for } & 34,1^\circ < \varphi < 80^\circ \\
 G(\varphi) &= -7 \quad \text{dBi for } & 80^\circ < \varphi < 120^\circ \\
 G(\varphi) &= -12 \quad \text{dBi for } & 120^\circ < \varphi < 180^\circ
 \end{aligned}$$

حيث:

$$\begin{aligned}
 G_{max} &= 10 \log\{\eta (\pi D/\lambda)^2\} \quad \text{dBi} \\
 \eta: & \text{ aperture efficiency for } \eta = 0,7, G_{max} = 20 \log\{D/\lambda\} + 8,4 \quad \text{dBi} \\
 G_1 &= -1 + 15 \log\{D/\lambda\} \quad \text{dBi} \\
 \varphi_m &= \{20\lambda/D\}(G_{max} - G_1)^{1/2} \quad \text{degrees} \\
 \varphi_r &= 15,85 \{D/\lambda\}^{-0,6} \quad \text{degrees}
 \end{aligned}$$

المراجع

- BARNBAUM, C. and BRADLEY, R. F. [1998] A new approach to interference excision in Radio Astronomy: real-time adaptive cancellation. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 2598-2614.
- CCIR [1966] Report 224-1. Documents of the XIth Plenary Assembly, ITU, Geneva, Vol. IV, p. 537-548.
- ELLINGSON, S. W. and CAZEMIER, W. [February 2003] Efficient multibeam synthesis with interference nulling for large arrays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*
- FOMALONT, E. B. *et al.* [1991] The micro-jansky radio source population at 5 GHz. *Astron. J.*, Vol. 102, p. 1258-1277.
- KRAUS, J. D. [1966] *Radio Astronomy*. McGraw Hill, New York, NY, Second ed. 1986, Cygnus-Quasar Books, Powell, OH.
- LOCKMAN, F. J., FREE, N. L. and SHIELDS, J. C. [2012] The Neutral Hydrogen Bridge Between M31 and M33, *Astron. J.*, Vol. 144, p. 52 – 67.
- OWEN, F. and MORRISON, G. E., [2008] The Deep Swire Field I. 20 cm Continuum Radio Observations: A Crowded Sky, *Astron.. J.*, Vol. 136, p. 1889-1900.
- PONSONBY, J. E. B. [10-14 June 2002] On 2% by Monte Carlo, Proc. of IUCAF Summer School In Spectrum Management And Frequency Coordination, NRAO, Green Bank, West Virginia.
- Planck Collaboration *et. al* [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys.*, Vol. 536, 1
- SFCG: information available at <https://www.sfcgonline.org>
- SMOOT, G. *et al.* [1992] Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 396, L1-L5.
- THOMPSON, A. R. [1982] The response of a radio-astronomy synthesis array to interfering signals, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, p. 450-456.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. Jr. [1986 and 2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. John Wiley, New York, NY, reprinted by Krieger Press, Melbourne, FL., see Chapter 14. Second ed., John Wiley, 2001, see Chapter 15.
- WALTER, F. *et al* [2012] *Nature*, The intense starburst HDF 850.1 in a galaxy overdensity at $z \approx 5.2$ in the Hubble Deep Field, Vol. 486, p 233-238.

الفصل 5

تقاسم نطاقات خدمة الفلك الراديوي مع الخدمات الأخرى

1.5 ملاحظات عامة

معظم نطاقات خدمة الفلك الراديوي متقاسمة مع خدمات نشطة تبث إرسالات. ويتسم هذا التقاسم بصعوبة خاصة بالنسبة لخدمة الفلك الراديوي باعتبارها خدمة منفصلة وحساسة جداً للتداخل. ونظراً للبعد الشاسع لمسافات المصادر الفلكية، تقل سويات كثافة تدفق القدرة للانبعاثات قيد الاستقصاء في كثير من الأحيان بمقدار 100 dB أو أكثر عن انبعاثات الإرسال التي هي من صنع الإنسان بالقرب من المرصد الراديوي. وتحدد قوة الإشارات الفلكية وخصائصها بقوانين الطبيعة وهي خارجة عن سيطرة عالم الفلك الراديوي. وعلاوة على ذلك، ونظراً للطبيعة التجريبية لهذا العلم كثيراً ما يتعذر على عالم الفلك الراديوي أن يعرف مسبقاً ما ستكون عليه خصائص الانبعاثات. وهذه العوامل تجعل خدمة الفلك الراديوي عرضة للتداخل بوجه خاص. ولا يقتصر ضرر التداخل عندما يكون قوياً يطمس الإشارات الفلكية بل يمكن أن يحدث الضرر عندما يكون ضعيفاً أيضاً. فثمة خطر مستتر يحدق بخدمة الفلك الراديوي يكمن في التداخل الذي يقل قليلاً عن سوية القدرة التي يمكن عندها التعرف عليه في القياسات الفردية، والموجود خلال جزء كبير من الزمن الإجمالي. وفي هذه الحالة قد لا تكون هناك وسيلة لكشف وقوع التداخل أثناء التجربة، ويمكن أن تنطوي النتائج اللاحقة على أخطاء خطيرة.

وتقع مرصد الفلك الراديوي عادةً في مواقع مختارة خصيصاً لتقليل التداخل من الخدمات الأخرى. فتبعد المواقع عادةً مسافة كبيرة عن المصادر الرئيسية للتداخل من الأرض، وعندما لا تُستخدم الموجات المليمترية في الرصد، حيث من المهم الارتفاع إلى أعلى ارتفاع ممكن في الغلاف الجوي، فإنها كثيراً ما تحجبها المرتفعات القريبة. وتوفر هذه الحماية للمرصد، والحماية التي يوفرها انحناء الأرض، يتسنى التقاسم مع أجهزة الإرسال للأرض عندما تنخفض قدرة الإرسال وعندما يوجد فاصل جغرافي كافٍ. بيد أن الضرورة تقتضي عادةً مسافات فاصلة كبيرة، نظراً لشدة حساسية النظم المستخدمة في خدمة الفلك الراديوي. ويتبين في الفقرة 3.5 أن التقاسم متعذر بصفة عامة عندما يقع المرسل على خط البصر مع هوائي أو تغذية هوائي في خدمة الفلك الراديوي. وتستدعي الضرورة عادةً أن يكون موقع المرسل بعيداً وراء الأفق على مسافة 100 كيلومتر أو أكثر. ويمكن لأجهزة الإرسال المحمولة على متن الطائرات أو المركبات الفضائية أو محطات المنصات عالية الارتفاع أو المناطيد أن تبقى ضمن خط بصر مرصد ما لمسافات شاسعة جداً، مما يطيح بالمزايا المرتبطة بموقع المرصد المختار بعناية وبالتوهين جراء انحناء الأرض على السواء. وفي الموجات الديكامترية (HF) (3-30 MHz)، ينتشر أي تداخل مستقبلي في كل الحالات تقريباً عبر الأيونوسفير. وفي هذه الحالة لا تتوفر الحماية باختيار موقع المرصد وانحناء الأرض، وفي بعض الظروف يمكن توقع تداخل من مرسل في قناة مشتركة في أي مكان على سطح الأرض.

ويمكن التمييز تمييزاً مفيداً بين مشاكل التقاسم المحلية والإقليمية والعالمية. إذ يتعين حل مشكلة محلية، من قبيل التداخل الذي يسببه مرسل بالقرب من مرصد راديوي، على المستوى المحلي مع أخذ عوامل، مثل حجج الموقع، بعين الاعتبار. بينما يقتضي الأمر معالجة المشاكل الإقليمية، مثل التداخل الناجم عن مرسلات تلفزيونية، على المستوى الإقليمي، مع مراعاة الخطط الوطنية للترددات والعوامل الإقليمية الأخرى، من قبيل اختلاف الشروط وتخصيصات التردد في البلدان المتجاورة جغرافياً. أما المشاكل العالمية، مثل التداخل الناجم عن أجهزة الإرسال المحمولة على متن السواتل، فلا يمكن حلها إلا على مستوى الاتحاد الدولي للاتصالات. وتتطلب كل فئة من مشاكل التقاسم نمط الحلول الخاص بها.

1.1.5 معايير حماية خدمة الفلك الراديوي

ثمة معيار هام لحماية خدمة الفلك الراديوي وهو سوية قدرة التداخل التي تُعتبر ضارة. وتتوقف عتبة الضرر على تواتر الرصد ونوع القياس الذي يجري، كما جاء في الفصل 4. وقد يتعين أيضاً أن تؤخذ الخصائص التفصيلية للتداخل في الاعتبار.

ويتعلق معيار آخر بالفسحة السماوية التي يتعين فيها حماية رصدات الفلك الراديوي. وتُعتمد، للمصادر الأرضية للتداخل، قيمة 0 dB لكسب هوائي الفلك الراديوي في اتجاه مصدر التداخل، أو في اتجاه الأفق بالنسبة لمرسِل بعيد. ويعني اعتماد هذه القيمة أن المصادر المحتملة للتداخل في سويات العتبة الضارة الواردة في التوصية ITU-R RA.769 لن تسبب تداخلاً ضاراً في الرصدات التي تجرى في زوايا ارتفاع أكبر من 19° (استناداً إلى مخطط الإشعاع النموذجي الوارد في التوصية ITU-R SA.509). أما الرصدات التي تجرى في زوايا ارتفاع أقل من 19° فهي تتعرض للتداخل إذا استُقبلت الإرسالات من مصدر التداخل (من الأرض) عبر الفصوص الجانبية بكسب يزيد عن 0 dB . وفي هذه الحالة، يحتجب جزء من الفسحة السماوية فعلياً أمام رصدات الفلك الراديوي، على النحو الموضح في الملحق 1 بالتوصية ITU-R RA.1513. وفي الواقع، قد يكون علماء الفلك الراديوي على استعداد لقبول هذا التقييد لتغطيتهم السماوية، ذلك لأن دوران الأرض يسمح بالنفوذ إلى معظم الأجرام السماوية في زاوية ارتفاع مواتية أكثر. بيد أن هذا الحجب السماوي يمكن أن يكون مقيداً جداً لرصدات المصادر السماوية التي لا تظهر إلا لفترة قصيرة فوق الأفق (مثال ذلك، إجراء رصدات مركز المجرة انطلاقاً من خطوط العرض الشمالية العالية)، أو للرصدات الحرجة من حيث الزمن. وبالنسبة للتداخل من المركبات الفضائية المستقرة بالنسبة إلى الأرض، تكون قيمة $12-15 \text{ dB}$ مرغوبة لكسب هوائي فلك راديوي، وذلك للسماح بإجراء رصدات في حدود 5° من سائل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض، كما دُكر في الفصل 4. ويرد في التوصيتين ITU-R S.1586 و ITU-R M.1583 وصف تطبيق مفهوم الحجب السماوي على حالات التداخل من مرسلات على متن طائرات أو مركبات فضائية في مدار غير مستقر بالنسبة إلى الأرض.

وثمة معيار ثالث يجب أخذه بعين الاعتبار هو النسبة المئوية من الزمن التي يمكن فيها تجاوز سوية عتبة التداخل دون حصول انحطاط خطير في تشغيل الخدمة. وتنظر التوصية ITU-R RA.1513 في معيار النسبة المئوية من الزمن وقضية الحجب السماوي ذات الصلة، وتحدد خسارة البيانات الكلية بنسبة 5% من المرسلات في جميع الخدمات، في أي نطاق ترددي موزع لخدمة الفلك الراديوي على أساس أولي، وبنسبة لا تزيد عن 2% من المرسلات في أي خدمة واحدة. وحديثاً بالذكر أن مفهوم خسارة البيانات الكلية لم يكتمل تطوره بعد، وأن الحاجة تدعو إلى مزيد من الدراسات لقسمة التداخل بين مختلف الشبكات والخدمات. وتقضي التوصية ITU-R RA.1513 أيضاً بأن تحدّد النسبة المئوية لخسارة البيانات كنسبة مئوية من فترات تكامل مدتها 2000 ثانية يتجاوز فيها متوسط كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) في تليسكوب راديوي السويات المحددة في التوصية ITU-R RA.769 (على افتراض أن كسب الهوائي يساوي 0 dB). ويتطلب تأثير التداخل الدوري، لفترات زمنية في حدود بضعة ثوانٍ أو أقل، مزيداً من الدراسة.

ويجب التأكيد على أن معدل تعطل بنسبة 5% بسبب التداخل، بالنسبة لبعض أنواع الرصدات، يفرض قيوداً صارمة على عالم الفلك الراديوي. وبالنسبة لبعض الرصدات، كرصود مذنب أو كسوف القمر أو تفجر نجم، من المرغوب فيه تحقيق احتمال كبير للنجاح، وذلك بسبب صعوبة الرصد أو استحالة تكرارها. وتتطلب أنواع أخرى من الرصد قياسات متآونة على أطوال موجة مختلفة وفي عدد من المواقع، ولا بد من تحقيق النجاح في كل منها كي تكون التجربة ككل ناجحة. مثال ذلك دراسة متعددة أطوال الموجة منسقة لانفجار نجم متجدد. وقد تتضرر هذه التجربة بشدة إذا كانت الرصدات في أي من المراصد غير صالحة للاستعمال بسبب التداخل. ويتطلب المرصد الذي يواجه صعوبات من هذا النوع اتخاذ ترتيبات وطنية خاصة في ترددات معينة في أوقات معينة.

وانعكاس إشارة التداخل هو أثر آخر للانتشار يتعين النظر فيه. فالانعكاسات عن الطائرات هي أسباب محتملة للتداخل في نطاق متقاسم حتى عندما يكون المرسل للأرض بعيداً. وإمكانية التداخل بالانعكاس عن سواتل منخفضة المدار قائمة أيضاً. ولن يكون الانعكاس عن جرم سماوي واحد فعالاً إلا لوقت قصير وهنا تتوقف مشكلة التداخل على كثافة الحركة في الغلاف الجوي أو في الفضاء. وتتمثل المشكلة في وجود عدد كبير من الأجسام المعدنية في المدار حول الأرض نتيجة للأنشطة الفضائية. وفي أنواع معينة من القياس الفلكي الراديوي في النطاقات المتقاسمة، يمكن لانعكاسات الإرسال الأرضية عن القمر أن تسبب تداخلاً خطيراً.

وقد تضمنت معايير الحماية التي نُظر فيها حتى الآن عتبة قدرة التداخل والنسبة المئوية من السماء التي يجب حمايتها والجزء من وقت الرصد الذي يتعين حمايته. وتتعلق كل هذه المعايير مباشرة بالتقاسم الجغرافي، أي التباعد الجغرافي لخدمتين الذي يمكنهما من العمل في نفس التردد في نفس الوقت. وفي مجال التقاسم بين بعض الخدمات، يمكن الحصول على حماية إضافية باستخدام استقطابين متعامدين. ولا يستفاد من هذه التقنية في حماية خدمة الفلك الراديوي لأن كلا الاستقطابين يجب أن

يُستخدم للعديد من الرصدات، وكذلك لأن التداخل ينفذ عموماً إلى نظام الفلك الراديوي من خلال الفصوص الجانبية البعيدة لهوائي عالي الكسب بخصائص استقطاب مختلفة جداً عن خصائص الحزمة الرئيسية.

ولا بد من الإشارة إلى أنه، باستثناء حالات نادرة، لا يمكن التقاسم مع خدمة الفلك الراديوي إلا بتحقيق التباعد الجغرافي الفعال. وقد يمكن تحقيق التقاسم لوقت محدود للسماح برصدات خاصة في موقع فلك راديوي ما، وربما يكون هذا التقاسم ضرورياً في الواقع في بعض الأحيان، كما يرد بحثه في البند 9.5. وعلى وجه الخصوص، قد يكون ذلك مفيداً في نطاقات غير موزعة لخدمة الفلك الراديوي.

2.5 مسافات التباعد المطلوبة للتقاسم مع مرسل وحيد (انظر التوصية ITU-R RA.1031)

إذا أُريد نَجاح التقاسم الجغرافي، فلا بد من مبادعة المرسل المسبب للتداخل عن المستقبل المعرض للتداخل بمسافة لا يُعتبر التداخل عندها ضاراً. وبالنسبة للمعايير التي وُضعت في الفصل 4، يجب أن يكون التوهين عبر هذه المسافة كافياً لخفض إشارة التداخل دون المستوى المناسب المذكور في التوصية ITU-R RA.769، طيلة الوقت عدا نسبة $p\%$ منه. ويعرّف التذييل 7 في لوائح الراديو خسارة الإرسال $L_b(p)$. وتعطى هذه المعادلة أدناه، مع إضافة حد يراعي التوهين الناجم عن الغلاف الجوي، A :

$$(1.5) \quad L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p) - A$$

حيث:

$L_b(p)$: الحد الأدنى المسموح به لخسارة الإرسال الأساسية (dB) خلال $p\%$ من الزمن؛ ويجب أن يتم تجاوز خسارة الإرسال الفعلية بهذه القيمة طيلة الوقت عدا نسبة $p\%$ منه

P_t : سوية قدرة الإرسال (dBW) في عرض النطاق المرجعي عند دخل الهوائي

G_t : كسب (dBi) هوائي الإرسال في اتجاه هوائي الفلك الراديوي

G_r : كسب (dBi) هوائي الفلك الراديوي في اتجاه المرسل

$P_r(p)$: قدرة التداخل القصى المسموح بها (dBW) في عرض النطاق المرجعي التي يتعين عدم تجاوزها لأكثر من $p\%$ من الزمن عند دخل جهاز الاستقبال

A : عامل الخسارة الإضافي بسبب الامتصاص في الغلاف الجوي.

وباستخدام معايير الحماية الواردة في الفصل 4، واعتبار أن $G_r = 0$ dBi تتخذ المعادلة (5.1) الشكل التالي:

$$(2.5) \quad L_b(p) = P_t + G_t - P_r(p) - A$$

حيث تؤخذ P_r من العمود 7 من الجدول 1.4 أو الجدول 2.4 في الفصل 4. وينبغي أن تُحسب $L_b(p)$ باستخدام نموذج مناسب، كما في المجموعة الشاملة الواردة في التوصيات ITU-R P.452 و ITU-R P.526 و ITU-R P.617.

ويزداد التوهين الناجم عن الغلاف الجوي بسرعة بتزايد الرطوبة وتردد الرصد. وما دون التردد 15 GHz، يكون التوهين السمتي للغلاف الجوي صغيراً في الغالب، $> 0,1$ dB، ويمكن تجاهله في المعادلة (2.5). وما بين 15 و 115 GHz، تكون العتامة السمتية متواضعة في مواقع المرتفعات الجافة، > 1 dB، ولا توفر إلا حماية طفيفة من التداخل. وما فوق التردد 115 GHz، تتفاوت عتامة الغلاف الجوي بسرعة بالقرب من ترددات الرنين للجزيئات في الغلاف الجوي، وتوفر حماية قوية من التداخل (انظر البند 7.5).

وفي الإرسال في خط البصر، لا تتفاوت خسارة الإرسال في الفضاء الحر بصفة عامة، ولا يكون معيار النسبة المئوية من الوقت مجدياً. وفي هذه الحالة تتخذ L_b شكلاً تحليلياً بسيطاً ويمكن كتابة المعادلة (2.5) على النحو التالي:

$$(3.5) \quad 20 \log(4\pi d) - 20 \log(\lambda) = P_t + G_t - P_r - A$$

حيث d هي المسافة (بالمتر) بين المرسل والمستقبل و λ هو طول الموجة (بالمتر).

وفي التحليل الوارد أعلاه، تكون P_i هي القدرة المرسلّة ضمن عرض النطاق B_r لمستقبل الفلك الراديوي. وإذا وُزعت قدرة المرسل على عرض نطاق $B_i > B_r$ عندئذ:

$$(5.4) \quad P_i = P_T - 10 \log(B_i/B_r) + A$$

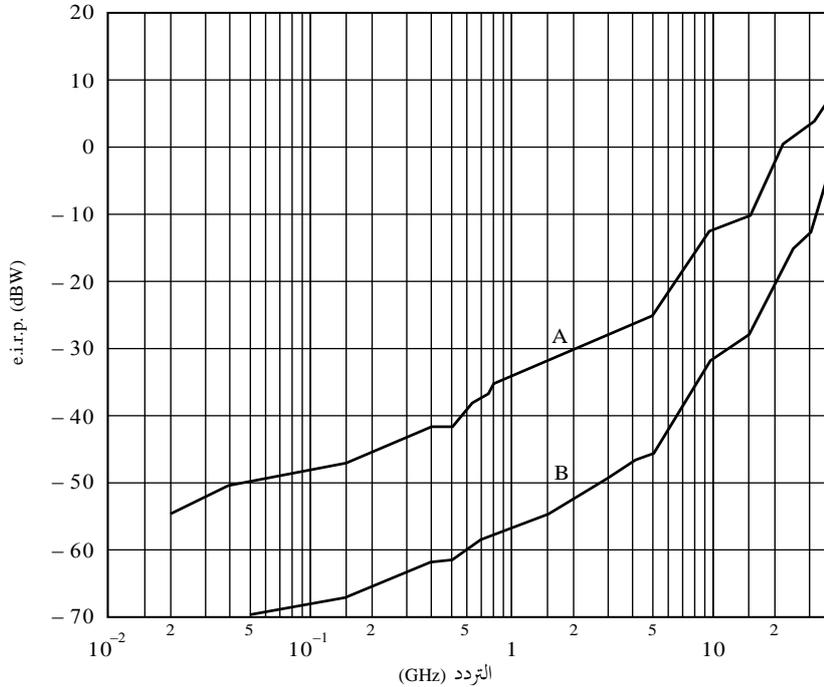
وذلك بافتراض انتظام الكثافة الطيفية لقدرة المرسل.

3.5 التقاسم ضمن خط البصر

قلّما تنجح خدمة الفلك الراديوي في تقاسم الطيف الموزّع مع أي خدمة أخرى تقع مرسلاتها في خط البصر مع المرصد. ويوضح الشكل 1.5 هذا الواقع. وقد حُسبت القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) القصوى باستخدام المعادلتين (3.5) و(4.5) لمسافتين. ومسافة 600 كيلومتر هي المسافة الممثلة لمرسل للأرض على مسافة كبيرة ضمن خط البصر، وهو على وجه التحديد مرسل محمول جواً في الأفق على ارتفاع 20 كيلومتراً. أما المسافة الأخرى فهي مسافة مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض، ومن ثم فهي تمثل المسافة القصوى لمعظم المرسلات المحمولة في الفضاء في رحلات غير رحلات الفضاء السحيق. وقد استُخدمت سويات عتبة التداخل الواردة في الجدول 1 في التوصية ITU-R RA.769 في حالة مرسل للأرض. وكما جاء في البند 3.7.4، يستحسن توفر حماية إضافية بمقدار 12-15 dB لحالة مرسل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض من أجل السماح برصدات ضمن 5° من سائل في المدار. وتنطبق هذه المنحنيات على أجواء جافة صافية. وفي ترددات تزيد عن حوالي 50 GHz، يمكن أن يبلغ امتصاص الغلاف الجوي عدة أعشار dB في الكيلومتر، تبعاً لكثافة بخار الماء، وقد يكون التقاسم مع مرسلات منخفضة القدرة عبر خطوط بصر طويلة ممكناً في بعض الظروف.

الشكل 1.5

القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) كدالة للتردد



ملاحظة - سوية القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) التي يتعدى فوقها التقاسم بين خدمة الفلك الراديوي والخدمات النشطة وتقع مرسلاتها على خط بصر مرصد فلك راديوي. يُفترض هنا أن نطاق تمرير مستقبل الفلك الراديوي يساوي نطاق التردد الموزّع لخدمة علم الفلك الراديوي وأن القدرة المشعة المكافئة المتناحية تساوي القدرة المشعة المتناحية ضمن ذلك النطاق. ويبين المنحنى A النتائج لمرسل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض، فيما يبين المنحنى B النتائج لمرسل للأرض على خط البصر على بعد 600 كيلومتر.

ويتضح من الشكل 1.5 استبعاد إمكانية التقاسم مع مرسل للأرض على خط البصر في ترددات أقل من 10 GHz بسبب التقييد الشديد الذي يفرضه التقاسم على القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) للمرسل. وحتى بالنسبة لترددات تصل إلى 40 GHz، يجب ألا تزيد قدرة المرسل عن بضعة مللي واط، أو يجب أن يوفر هوائي الإرسال تمييزاً عالياً باتجاه المرصد، ليكون التقاسم ممكناً. وبالنسبة لمرسلات محمولة في الفضاء وليس في الفضاء السحيق، بقدرة تغطية تزيد عن 1 واط، يتعذر التقاسم حتى خارج منطقة تغطية الهوائي المحمول في الفضاء لترددات تصل إلى حوالي 20 GHz. وما بين 20 GHz و 50 GHz تُستبعد إمكانية التقاسم ضمن منطقة تغطية الهوائي المحمول في الفضاء. وتدعو الحاجة لتقييد المرسلات على متن المركبات الفضائية على ارتفاعات أقل من 400 6 كيلومتر بقدرة مشعة مكافئة متناحية تقع بين المنحنيين A و B، ليكون التقاسم ممكناً. ويرد في البند 8.5 وصف حالة خاصة من التقاسم مع مركبة فضائية في رحلات الفضاء السحيق.

4.5 التقاسم مع خدمات لها مرسلات للأرض

يوفر إنشاء مناطق تنسيق حول مواقع خدمة الفلك الراديوي وسيلة لتجنب التداخل الضار من مرسلات الأرض للخدمات الأخرى التي تتقاسم نطاق فلك راديوي. ويتضح من المناقشة السابقة أن التقاسم لن يتسنى إلا للخدمات التي تقع مرسلاتها وراء الأفق. ويتمثل المعيار الأساسي المستخدم لتحديد منطقة التنسيق في أن التداخل الكلي من جميع المستخدمين خارج المنطقة يجب ألا يتجاوز سوية العتبة الضارة المقيسة في موقع الفلك الراديوي. وهكذا فإن مقياس منطقة التنسيق يتوقف على عدد من العوامل. وتحدد أنواع القياسات التي تجرى في موقع الفلك الراديوي عتبات التداخل المقابلة الواردة في التوصية ITU-R RA.769. وتحدد كثافة تدفق قدرة التداخل في موقع الفلك الراديوي بحكم عدد المستخدمين وتوزعهم خارج منطقة التنسيق، وبالقدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) لإرسالات المستخدم في اتجاه موقع الفلك الراديوي، وبالجزء من الوقت الذي تنشط فيه، وبخصائص الانتشار. وتتوقف خصائص الانتشار على عوامل مثل التضاريس ووجود الأشجار والظروف الجوية. ويُقترح في البند 2.5 نماذج انتشار مناسبة.

ونظراً لتعدد العوامل المعنية، يتعين إنشاء حدود مناطق التنسيق إفرادياً لكل موقع من مواقع الفلك الراديوي يستلزم منطقة تنسيق، مع المراعاة الواجبة لأي سمات خاصة لقياسات الفلك الراديوي والخدمة النشطة التي تتقاسم النطاق. وجدير بالملاحظة أن مقياس منطقة التنسيق يرجح أن يبلغ 100 كيلومتر أو أكثر. وبالنسبة لكثير من البلدان الصغيرة المساحة، قد تتجاوز منطقة التنسيق المطلوبة الحدود الوطنية إلى داخل بلدان تختلف فيها التوزيعات الترددية. ومن ثم قد تستدعي الحاجة تطبيق شروط خاصة عند تحديد مناطق التنسيق لحماية خدمة الفلك الراديوي في البلدان الصغيرة.

وتحدد منطقة التنسيق منطقة حول المرصد الراديوي يمكن خارجها مستعملي الخدمة النشطة الإرسال بكل حرية دون التسبب في تداخل في رصدات الفلك الراديوي. ويجب توفير الوسائل التقنية للمستخدمين داخل منطقة التنسيق لتجنب أي تداخل ضار في خدمة الفلك الراديوي. فعلى سبيل المثال، يمكن أن ينطوي ذلك على توشي الحرس في اختيار موقع المرسل الثابت للاستفادة من الحجب الطبيعي، أو تصميم هوائي الإرسال بحيث ينعدم بثه في اتجاه المرصد. وفي حالات أخرى، قد يتمثل الحل التقني الوحيد في تجنب أي إرسالات في نطاق خدمة الفلك الراديوي داخل منطقة التنسيق.

5.5 التقاسم مع الخدمات المتنقلة

يمكن، من حيث المبدأ، إنشاء مناطق تنسيق لحماية مواقع خدمة الفلك الراديوي من المرسلات المتنقلة. وفي هذه الحالة يجب أن تتوفر للمستخدم المتنقل وسيلة ما لمعرفة أنه دخل إلى منطقة التنسيق ووسيلة ما للحد من التداخل في المرصد الراديوي إلى سوية أدنى من العتبة الضارة. وتضع التوصية ITU-R M.1316 مبادئ ومنهجية للتقاسم بين الخدمة المتنقلة الساتلية (أرض-فضاء) وخدمة الفلك الراديوي في النطاقين 1 610,6-1 613,8 MHz و 1 660,1-1 660,5 MHz، استناداً إلى نهج محاكاة مونت كارلو. ويقدم هذا الأسلوب، بالإضافة إلى منطقة التنسيق، منطقة حظر داخلية لا يمكن للاتصالات المتنقلة أن ترسل ضمنها، إلى جانب منطقة تقييد متوسطة قد تتخللها بعض القيود على تشغيل الاتصالات المتنقلة. ولكن صحة نهج مونت كارلو كأساس لحماية فعالة لخدمة الفلك الراديوي لم تُثبت بعد على صعيد الواقع العملي.

وفي حالة المرسلات المتنقلة على متن الطائرات، يكون مقياس منطقة التنسيق أكبر بكثير منه في حالة المرسلات الأرضية. إذ من المرجح أن تبقى الطائرات ضمن خط البصر مع مرصد راديوي لمسافات كبيرة، كما جاء في البند 3.5، ويرجح أن يكون التقاسم صعباً جداً. وستدعو الحاجة إلى مناطق تنسيق تمتد لمئات الكيلومترات عموماً، ما لم يكن موقع خدمة الفلك الراديوي محجوباً بشكل جيد على نحو استثنائي بأفق مرتفع.

6.5 التقاسم في نطاقات خدمة الفلك الراديوي دون 40 GHz

يعطي الجدول 1.5 نتائج حسابات التقاسم التي أجريت في النطاقات المتقاسمة لخدمة الفلك الراديوي دون 40 GHz (وهي مأخوذة من التقرير 2-696 للجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) السابقة). ويوضح الجدول المجموعة الواسعة من سيناريوهات التقاسم لخدمة الفلك الراديوي، والمسافات الفاصلة الكبيرة اللازمة. وبالنسبة لمعظم النطاقات، حُسبت المسافة الفاصلة اللازمة للتقاسم بين مرسل مفترض ومستقبل مفترض لخدمة الفلك الراديوي على النحو الموضح في الفقرات السابقة. وتتوقف المسافة الفاصلة التي توفر ما يلزم من خسارة الإرسال الأساسية على آلية الانتشار. وفي الترددات التي تصل إلى 38 MHz تهيمن المؤثرات الأيونوسفيرية. وفي الترددات الأعلى يكون الانتشار التروبوسفيري هو المسؤول الأول عن التداخل عند 10% من سوية الزمن. وقد حُسبت المسافات الفاصلة في الترددات من 74 MHz إلى 408 MHz دون الاستفادة من أحدث النماذج (التوصيات ITU-R P.452 و ITU-R P.526 و ITU-R P.617). وتشير التقديرات إلى أن خسائر الانتشار قد تخطى بنحو 10 dB، من أصل مجموع خسارة الإرسال الأساسية البالغة عادةً 220 dB. وهذا بدوره يعني أن المسافات الفاصلة قد تخطى عادةً بنحو 50-100 كيلومتر، بالمقارنة مع النتائج التي يتم الحصول عليها باستخدام أحدث نماذج الانتشار. وقد حُسبت المسافات للترددات فوق 408 MHz باستخدام التوصية ITU-R P.452-5. وافترض ارتفاع هوائي الفلك الراديوي في جميع الحسابات بمقدار 25 متراً. ولا تتوقف النتائج كثيراً على هذا الافتراض. وتعطى النتائج لحالتين، واحدة لموقع بزاوية أفق قدرها 1°، والأخرى في موقع محمي جيداً بزاوية أفق قدرها 4°. ويرد أدناه بحث نطاقات ترددية معينة بمزيد من التفصيل.

الجدول 1.5

معلومات التقاسم والمسافات الفاصلة من التقرير 2-696 للجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) السابقة (1990)

المسافة الفاصلة		خسارة الإرسال المطلوبة	المستقبل المفترض للفلك الراديوي			المرسل المفترض مسبب التداخل						التردد (MHz)
$d(4^\circ)$ (km)	$d(1^\circ)$ (km)		L (dB)	B_r (MHz)	P_r (dBW)	C/SL	No.	B_t (MHz)	e.i.r.p. (dBW)	G_t (dBi)	P_t (dBW)		Service
(13)	(12)	(11)	(10)	(9)	(8)	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
4 000 <	4 000 <	195	0,05	185-	C	1	0,01	10			F	13
4 000 <	4 000 <	198	0,12	188-	C	1	0,01	10			F	25
700	930	213	0,50	190-	C	5	0,02	16	3	13	F	38
780	990	228	1,6	195-	C	7	0,03	25	10	15	F	74
600	820	223	2,95	199-	C	10	0,03	14	0	14	M	150
550	730	227	6,60	201-	C	15	0,03	14	0	14	M	327
560	760	232	3,9	203-	C	12	0,025	18	4	14	M	408
345	685	242	6,0	202-	C	1	6,0	40			B	610
155	440	232	27,0	205-	C	1	0,50	27	0	27	R	1 365
160	450	233	0,02	220-	SL	1	0,50	27	0	27	R	
220	525	243	0,02	220-	SL	1	3,5	45	38	7	F	1 665
100 >	155	205	0,02	220-	SL	1	3,5	7	0	7	F	
100 >	290	220	0,02	220-	SL	1	0,004	0	-	-	LMS(E-S)	
305	630	252	10,0	207-	C	2	3,5	45	38	7	F	
100 >	230	214	10,0	207-	C	2	3,5	7	0	7	F	
100 >	215	217	10,0	207-	C	1	10	10	0	10	F	2 700
135	410	243	0,05	218-	C	1	40	54	44	10	F	4 830
100 >	100 >	199	0,05	218-	C	1	40	10	0	10	F	
230	540	255	10,0	207-	C	1	40	54	44	10	F	5 000
100 >	125	211	10,0	207-	C	1	40	10	0	10	F	
155	430	253	100	202-	C	1	100	51	44	7	F	10 600
100 >	100 >	209	100	202-	C	1	100	7	0	7	F	
100 >	100 >	216	0,15	214-	SL	1	50	27	0	27	FS(E-S)	14 500
100 >	100 >	224	0,25	210-	SL	1	50	38	45	7-	F	22 200
100 >	100 >	227	500	192-	C	2	100	35	45	10-	F	31 000

(1) تردد نطاق الفلك الراديوي.

(2) الخدمة التي يعمل فيها المرسل (F: ثابتة، M: متنقلة، B: إذاعية، R: تحديد راديوي للموقع، FS (E-S): عمليات ساتلية ثابتة في الاتجاه أرض-فضاء، LMS (E-S): متنقلة بريا ساتلية (أرض-فضاء)).

(3) قدرة المرسل (dB بالنسبة إلى 1 واط).

(4) كسب المرسل في اتجاه مرصد فلك راديوي.

(5) القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) لمرسل في اتجاه مرصد فلك راديوي.

(6) عرض نطاق بث مرسل وحيد.

(7) عدد المرسلات المفترض أنها تبث في وقت واحد ضمن نطاق خدمة الفلك الراديوي.

(8) نمط الرصد الفلكي الراديوي (C تدل على التواصل وSL على رصدات الخط الطيفي).

(9) عتبة التداخل الضار، مأخوذة من العمود 7 في الجدولين 1.4 و2.4 في الفصل 4، لرصدات التواصل والخط الطيفي على التوالي.

(10) عرض نطاق الفلك الراديوي المستخدم في الحساب.

(11) خسارة الإرسال المطلوبة والمحسوبة باستخدام المعادلتين (2.5) و(4.5).

(12) المسافة الفاصلة المطلوبة لتفادي أي تداخل ضار على رصدات الفلك الراديوي في الحالة حيث يقع الأفق في المرصد بزاوية ارتفاع قدرها θ_1 .(13) المسافة الفاصلة المطلوبة لتفادي أي تداخل ضار على رصدات الفلك الراديوي في الحالة حيث يقع الأفق في المرصد بزاوية ارتفاع قدرها θ_4 .

1.6.5 النطاق MHz 1 427-1 330

تعتبر منطقة الطيف الترددي القريبة من الخط الطيفي الهيدروجيني بطول موجة 21 سنتيمتراً بالغة الأهمية لخدمة الفلك الراديوي. وقد اعترف بهذه الأهمية من خلال التوزيع لخدمة الفلك الراديوي على مستوى العالم في النطاق المنفصل حصراً الممتد من MHz 1 400 إلى MHz 1 427 لرصدات الخط والتواصل على السواء. وعلى مر السنين، تنامت أهمية رصدات الخط الطيفي الهيدروجيني التي تحفّض تردداتها بانزياح دوبلر. وهذا الانزياح نحو ترددات أخفض هو نتيجة للسرعات الكبيرة التي تتعد فيها المجرات النائية عن مجرتنا. ويُعترف بأهمية هذه الرصدات في حاشية الرقم 149.5 من لوائح الراديو التي تعطي بعض الحماية لخدمة الفلك الراديوي في النطاق دون MHz 1 400. ففي هذا النطاق يكون للتحديد الراديوي للموقع وضع أولي في الإقليمين 2 و3 ويتقاسم الوضع الأولي مع الخدمتين الثابتة والمتنقلة في الإقليم 1.

وثمة نظام نموذجي للتحديد الراديوي للموقع يستخدم لأغراض الطيران في هذا النطاق وهو رادار أرضي تبلغ ذروة قدرته النبضية kW 500 ويبلغ كسب هوائي 34 dBi. وإذا كان المدى الدينامي لمستقبل في خدمة الفلك الراديوي كافياً لاستيعاب ذروة قدرة الرادار، فإن المعلمة المهمة فيما يتعلق بالتداخل هي متوسط القدرة الواردة إلى المستقبل الفلكي الراديوي خلال فترة تكامله. وفي رادار بمسح بزوايا 360°، يكون متوسط القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) في اتجاه مرصد الفلك الراديوي في حدود متوسط القدرة من المرسل. وتتوقف القدرة الفعلية المرسلة كذلك على مخطط إشعاع هوائي الرادار وعلى طبيعة المسح. وبافتراض أن دورة تشغيل الرادار تبلغ 0,001، فإن متوسط القدرة يبلغ 500 واط. وبالنسبة لرصد الخط الطيفي، يُستخدم الجدول 2 في التوصية ITU-R RA.769، ويبلغ مستوى التداخل الضار -220 dBW في نطاق 20 kHz. ويُفترض انتظام توزيع قدرة خرج الرادار البالغة 500 واط على 0,5 MHz (نبضة بعرض 2 μs). ويقلل ذلك من القدرة الواردة إلى قناة واحدة في مستقبل فلك راديوي بمقدار $10 \log(500/20) = 14$ dB. وعندئذ تبلغ خسارة الإرسال الأساسية المطلوبة 233 dB، مما يؤدي إلى مسافتين فاصلتين بطول 450 كيلومتراً و160 كيلومتراً في زاويتي ارتفاع عن الأفق 1° و4° على التوالي: انظر الجدول 1.5. ولا بد من الإشارة إلى أن ذروة القدرة الواردة إلى دخل المستقبل تبلغ -142 dBW عند مجرد وصول متوسط التداخل إلى العتبة الضارة. ويعلو ذلك بنحو 15 dB فوق قدرة ضوضاء المستقبل في نطاق 0,5 MHz، وخاصة في حال وجود أكثر من إشارة رادارية واحدة في نطاق تمرير الواجبة الأمامية للمستقبل، ويمكن للمؤثرات غير الخطية أن تبطل التحليل من حيث متوسط القدرة.

2.6.5 النطاق MHz 5 000-4 800

يوزع النطاق MHz 4 990-4 800 لخدمة الفلك الراديوي توزيعاً ثانوياً، في حين أنه يوزع للخدمتين الثابتة والمتنقلة توزيعاً أولياً. غير أن حاشية الرقم 149.5 من لوائح الراديو تخص النطاقين MHz 4 835-4 825 و MHz 4 990-4 950 بمعاملة خاصة. وأول هذين النطاقين هو لرصد الخط الطيفي للفورمالديهايد.

ويوزع النطاق MHz 5 000-4 990 لخدمة الفلك الراديوي توزيعاً متساوياً على أساس أولي مع الخدمتين الثابتة والمتنقلة (باستثناء المتنقلة للطيران). ويمكن أن يكون استخدام الخدمة الثابتة في هذا النطاق إما لأنظمة المرحلات الراديوية المنخفضة القدرة أو لأنظمة الانتشار التروبوسفيري. ونظراً لمتوسط القدرة العالي جداً المستخدم في النظامين الأخيرين، فإن التقاسم مع خدمة الفلك الراديوي صعب جداً. أما في نظم المرحلات الراديوية التي قد تبلغ قدرة إرسالها 10 واط، فتكون مشكلة التقاسم أسهل بعرض نطاق مقداره 40 MHz في الترددات الراديوية وكسب هوائي بنسبة 44 dBi. وترد النتائج في الجدول 1.5 لالتين من نظم المرحلات الراديوية، واحد هوائي موجّه مباشرة نحو المرصد الراديوي، والآخر موجّه بعيداً عن المرصد (كسب بمقدار 0 dBi في اتجاه المرصد).

3.6.5 النطاقان GHz 22,5-22,21 و 22,21-22,01

في أول هذين النطاقين، لا يوجد توزيع لخدمة الفلك الراديوي، ولكن الإدارات تُحث على حماية رصدات الفلك الراديوي فيه. وفي النطاق الثاني، لا تتمتع خدمة الفلك الراديوي بتوزيع أولي. وفي كلا النطاقين، يكون التقاسم مع الخدمتين الثابتة والمتنقلة (باستثناء المتنقلة للطيران). ويحتوي هذا النطاق على الخط الطيفي المهم لبخار الماء عند التردد GHz 22,235، وهو متقاسم مع رصدات الخط الطيفي قيد النظر هنا. ويمكن لهذا الخط الطيفي للماء أن ينتج بثاً ميزرياً قوياً ("ميغا ميزر") من حول الثقب

الأسود الهائل في مركز مجرة نشطة، ويمكن أن يُكشف في انزياحات دوبلرية من تردد السكون [Greenhill et al., 2003]. وتُعرض النتائج في الجدول 1.5 لحالة هوائي الخدمات الثابتة الموجّه نحو المرصد الراديوي.

7.5 التقاسم في نطاقات الفلك الراديوي فوق التردد 40 GHz

هناك توزيعات فوق التردد 40 GHz لخدمة الفلك الراديوي من أجل رصدات التواصل والخطوط الطيفية على السواء. وبعض هذه التوزيعات متقاسم مع مجموعة متنوعة من الخدمات النشطة. وحتى عهد قريب كان عدد النظم النشطة التي تعمل فوق التردد 40 GHz قليلاً نسبياً، ومن ثم قلة حالات التداخل المبلغ عنها في خدمة الفلك الراديوي. وهذا الوضع أخذ بالتغير الآن، إذ تجرى دراسات التقاسم لعدة نطاقات ترددية، بما فيها النطاق 42,5-43,5 GHz الذي تتقاسمه خدمة الفلك الراديوي مع الخدمة الثابتة والخدمة الثابتة الساتلية (أرض-فضاء) والخدمة المتنقلة (باستثناء المتنقلة للطيران). وتشمل تطبيقات الخدمة الثابتة تطبيقات الخدمة الثابتة عالية الكثافة، (انظر حاشية الرقم 547.5 في لوائح الراديو). ولعل التقاسم مع الخدمات النشطة فوق 40 GHz أسهل منه في الترددات المنخفضة لعدة أسباب. فأولاً، يسهل تحقيق اتجاهية الإرسال العالية عند هذه الترددات بموائيات ذات مقاس متواضع؛ وثانياً، يكون توهين الغلاف الجوي أعلى عند هذه الترددات؛ وثالثاً، يتناقض تشتت الإشارات بسبب التروبوسفير بتزايد التردد.

1.7.5 التقاسم ما بين 60 و 275 GHz

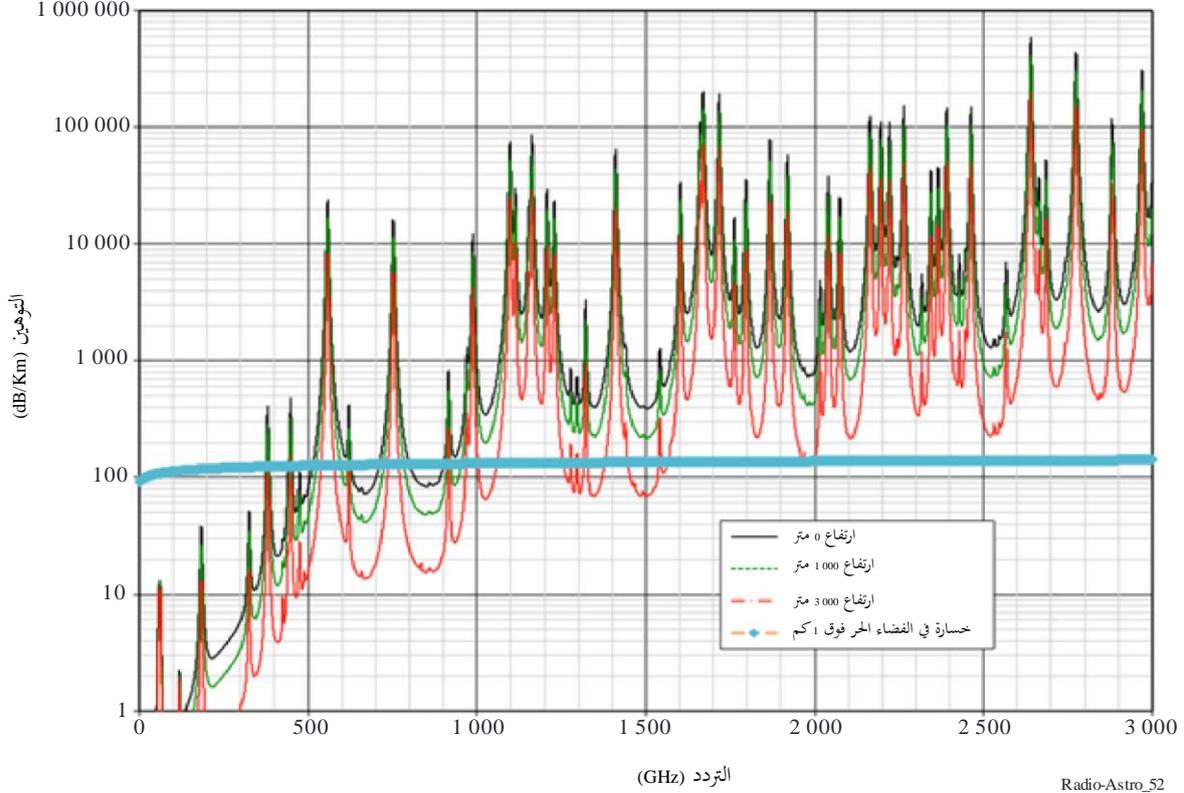
تنظر التوصية ITU-R RA.1272 في حماية قياسات الفلك الراديوي فوق التردد 60 GHz من التداخل الأرضي. وثمة صعوبات تقاسم خاصة تنفرد بها هذه الترددات العالية. وتصمّم مستقبلات الموجات المليمترية في خدمة الفلك الراديوي عادةً لتغطية العرض الكامل لنواخذ الغلاف الجوي (68-116 GHz و 130-170 GHz و 200-323 GHz وغيرها)، إما للاستفادة من المعلومات الواردة في العديد من الخطوط الطيفية أو لتحقيق عرض نطاق عالٍ لقياسات التواصل الحساسة. وعلاوة على ذلك، فإن مازجات 'الموصل الفائق-العازل-الموصل الفائق' المستخدمة كمراحل أولى في أجهزة استقبال المغايرة بالغة الحساسية معرضة بشدة للتشبع أو حتى للتلف بإشارات التداخل من أي مكان في النطاق الذي تغطيه، في حين أن تكنولوجيا الترشيح منخفض الخسارة لحمايتها ليست متاحة بعد. ولكن على الجانب الإيجابي، لا يوجد سوى عدد قليل نسبياً من مرصّد الموجات المليمترية الواجب حمايتها في جميع أنحاء العالم، وهي تقع في أماكن نائية معزولة، كلما تيسر ذلك عملياً، وتستفيد إلى أقصى حد من الظروف الجوية الجافة للغاية ومن انخفاض سويات التداخل من الأرض. ومن ثم يمكن حماية مرصّد الموجات المليمترية فعلياً من الإرسالات الأرضية في جميع الترددات فوق 60 GHz بتحديد مناطق تنسيق متواضعة المقاس تكفل الحد الأدنى من تعطل الخدمات الأرضية. وتوصي التوصية ITU-R RA.1272 بإقامة مناطق تنسيق حول مرصّد الموجات المليمترية لجميع الترددات فوق 60 GHz، حيثما تيسر ذلك عملياً. وتحدّد مناطق التنسيق باستخدام عتبات التداخل الواردة في التوصية ITU-R RA.769 والإجراءات المبينة في التوصية ITU-R RA.1031.

2.7.5 التقاسم فوق التردد 275 GHz

تجتمع خصائص معينة في المدى الترددي 275-3 000 GHz للحد من احتمال التداخل بين خدمة الفلك الراديوي والخدمات النشطة في هذا المدى. وفي المدى 275-3 000 GHz، يتأثر الانتشار عبر الغلاف الجوي للأرض بشدة بالامتصاص من جراء الجزيئات في الغلاف الجوي. والأنواع الجزيئية المسؤولة بالدرجة الأولى عن الامتصاص هي الأكسجين (O₂) وبخار الماء (H₂O). ويخلق الامتصاص غير الرنان توابعاً عاماً للامتصاص الذي يتزايد باطراد بتزايد التردد، في حين هنالك قيم كبيرة جداً من التوهين في ترددات محددة تقابل أحوال الرنين الطبيعية للجزيئات. وعند مستوى سطح البحر، يبلغ التواصل العام للامتصاص حوالي 5 dB/km في التردد 275 GHz و 300 dB/km في التردد 1 000 GHz و 4 000 dB/km في التردد 3 000 GHz. وفي حالات رنين جزيئي محددة في هذا المدى، يمكن للتوهين أن يعلو إلى 550 000 dB/km. ويتناقض التوهين بتزايد الارتفاع بسبب تناقص تركيز الأكسجين وبخار الماء. ويظهر الشكل 2.5 التوهين بوحدة dB/km في ارتفاعات مختلفة: مستوى سطح البحر و 1 000 متر و 3 000 متر. وترد المعلمات المستخدمة في حساب هذه المنحنيات في التقرير ITU-R RA.2189.

الشكل 2.5

التوهين في الغلاف الجوي المحسوب عبر مسيرات أفقية بطول 1 كيلومتر على ارتفاعات مختلفة، على افتراض خصائص الغلاف الجوي الواردة في الجدول 1. ومن باب المقارنة، رُسمت أيضاً الخسارة في الفضاء الحر عبر مسير بطول 1 كيلومتر



ويجد التقرير ITU-R RA.2189 مسافات لا تتجاوز بعدها الإشارة المرسلة في ترددات بين 275 و 1000 GHz عتبات التداخل في خدمة الفلك الراديوي المستخرجة من التوصية ITU-R RA.769، على أساس الافتراضات القريبة من أسوأ حالة.

وبما أن امتصاص الغلاف الجوي عامل قوي في النظم الأرضية في ترددات THz فيجب تضمينه في حساب خسارة المسير بين مرسل ومستقبل. وللسبب نفسه، غالباً ما تقع المراصد الفلكية التي ترصد في هذا المدى على قمم الجبال العالية. وفي التردد 275 GHz وارتفاع 3000 متر، يبلغ معدل الامتصاص في خط الأساس حوالي 1 dB/km، ويتجاوز التوهين بسبب الغلاف الجوي الخسارة في الفضاء الحر لمسافات تمتد لحوالي 186 كيلومتراً. وفي التردد 1000 GHz، يقارب معدل الامتصاص 100 dB/km ويتجاوز التوهين بسبب الغلاف الجوي الخسارة في الفضاء الحر لمسافات تمتد لحوالي 1,6 كيلومتر، أما الأرقام المقابلة في التردد 3000 GHz فهي تناهز 1000 dB/km ويتجاوز التوهين بسبب الغلاف الجوي الخسارة في الفضاء الحر على مسافة تمتد لحوالي 150 متراً. وختاماً، وبالنسبة لترددات فوق حوالي 1000 GHz، يُعتبر امتصاص الغلاف الجوي عادةً عاملاً أكثر أهمية من التمديد الهندسي (الخسارة في الفضاء الحر).

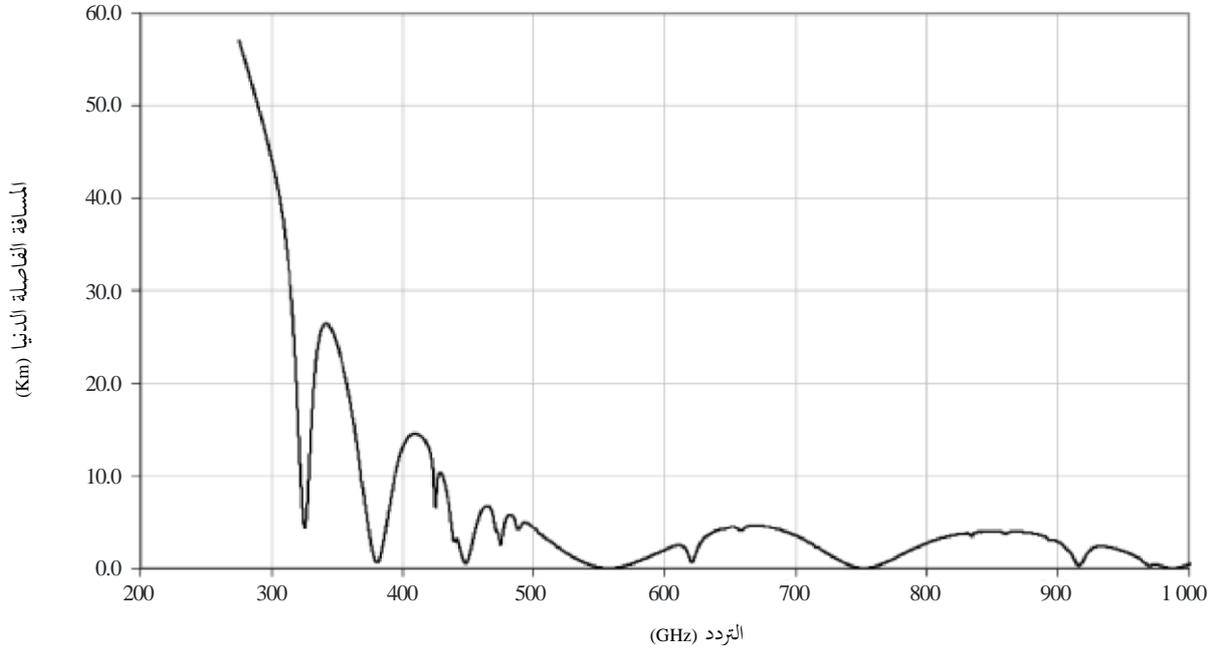
وتساهم مقاسات حزم الهوائي الصغيرة أيضاً في تقليل فرص التداخل العرّضي. ففي ترددات فوق 275 GHz، تتضاءل عروض حزم الهوائي كثيراً، حتى بالنسبة للمكافئيات الصغيرة. وكمثال على ذلك، فإن مكافئاً قطره 30 سنتيمتراً (مقاس طبق طعام كبير تقريباً) يولد حزمة بزواية 0,28° فقط في التردد 275 GHz، على افتراض إنارة 75% من قطر المكافئ بالتغذية. ونظراً لتناقص مقاس الحزمة بتزايد التردد، تضيق عروض الحزمة أكثر في ترددات فوق 275 GHz. وأخيراً، وبالنسبة لمعظم النظم العملية، تكون قدرة الترددات الراديوية المتولدة في هذه الترددات ضعيفة حالياً.

ويتمثل السيناريو الأرضي "القريب إلى أسوأ حالة" للتداخل في خدمة الفلك الراديوي من نظام نشط في المدى 275-3000 GHz في مرسل يث القدرة القصوى المتاحة بالترددات الراديوية إلى هوائي إرسال كبير نسبياً موجّه مباشرة نحو تليسكوب راديوي، حيث

يكون كل من المرسل والتليسكوب على ارتفاع عالٍ. ومحاكاة هذا السيناريو وتحديد المسافة التي يمكن لوجود المرسل فيها أن يشكل مشكلة للتليسكوب الراديوي، يُفترض أن التليسكوب الراديوي والمرسل كليهما على ارتفاع 3 000 متر، وأن المرسل ييثر بقدرة تتناقص من 2,75 dBm عند التردد 275 GHz إلى -20 dBm عند التردد 3 000 GHz وأن قطر هوائي الإرسال يبلغ 30 سنتيمتراً وبنار بكفاءة 75%. وفي ظل هذه الافتراضات، يمكن حساب المسافة التي يحدث فيها تداخل، على النحو المحدد في التوصية ITU-R RA.769 مع إضافة امتصاص الغلاف الجوي كما في الشكل 2.5. وتُرسم النتائج في الشكل 3.5 للمدى 275-1 000 GHz وفي الشكل 4.5 للمدى 1 000-3 000 GHz.

الشكل 3.5

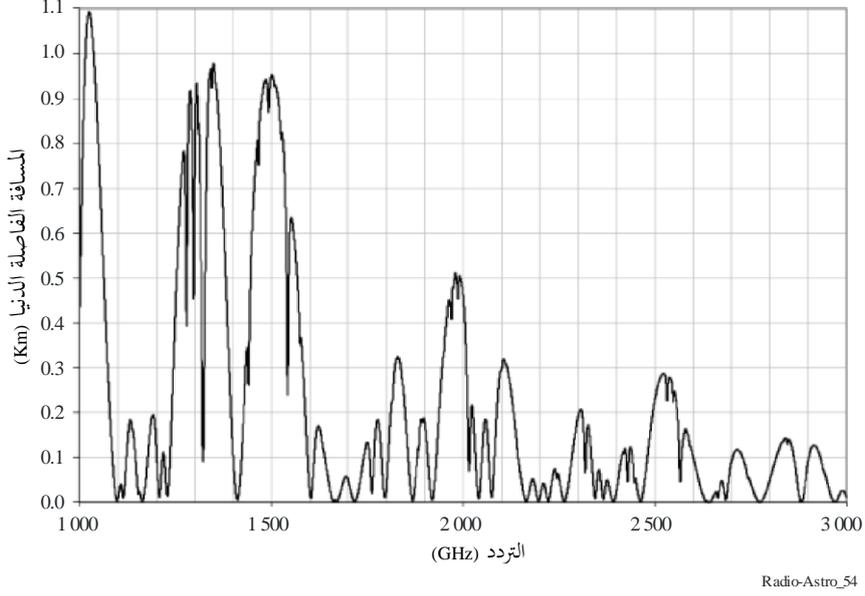
المسافة التي لن تتجاوز بعدها الإشارة المرسلة في ترددات بين 275 و 1 000 GHz
عُتبت التداخل في خدمة الفلك الراديوي المستخرجة من التوصية
ITU-R RA.769 على أساس افتراضات حالة قريبة من الأسوأ



Radio-Astro_53

الشكل 4.5

المسافة التي لن تتجاوز بعدها الإشارة المرسلة في ترددات بين 275 و 3 000 GHz
عتبات التداخل في خدمة الفلك الراديوي المستخرجة من التوصية
ITU-R RA.769 على أساس افتراضات حالة قريبة من الأسوأ



والاستنتاج هو أنه يتعين، للترددات في المدى 3 000-1 000 GHz، أن يكون المرسل للأرض في الجوار المباشر لتليسكوب ما ليسبب تداخلاً، على افتراض سيناريو أسوأ حالة لكل من المرسل والتليسكوب الواقعين على قمة جبل مرتفع وجاف. وعلى ارتفاعات أخفض يكون التوهين أكبر بكثير وتقتصر مسافة التداخل، ولكن التليسكوبات الراديوية العاملة في هذا المدى الترددي لا تكون موجودة في هذه المناطق.

أما مصادر التداخل المحمولة جواً في التليسكوبات الراديوية فهي عابرة لأن الطائرات تتحرك بالنسبة إلى التليسكوب الراديوي. ويصح ذلك بشكل خاص بالنسبة للترددات في المدى 3 000-1 000 GHz لأن امتصاص الغلاف الجوي على مسير مائل شديد الارتفاع يقصر إمكانية التداخل على وقت مرور الطائرة فوق الموقع مباشرة تقريباً وتوجه هوائها نحو الأرض مباشرة. ولأن الطائرة تتحرك بسرعة كبيرة بالنسبة إلى الأرض، ولأن الحزمة في مدى THz ضيقة جداً، فإن التداخل يدوم لفترة قصيرة جداً. وفي حين يمكن تصور تداخل، من مرسل بترددات THz يعمل على متن مروحية تحوم على ارتفاع عالٍ فوق تليسكوب راديوي مباشرة، يتجاوز مستوى عتبة التداخل الضار المستخرجة من التوصية ITU-R RA.769، فإن احتمال حدوث هذا السيناريو، دون تنسيق مسبق على الأقل، بعيد في أحسن الأحوال. ولذلك، يُستبعد أيضاً التداخل المحمول جواً في مرصد فلك راديوي. وبفضل الجمع بين صغر مقياس الحزمة وسرعة الحركة والخسارة في الفضاء الحر، تتضاءل جداً إمكانية التداخل في تليسكوب راديوي من سواتل في مدارات غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض.

ومن ثم يمكن الاستنتاج بأن التقاسم بين خدمة الفلك الراديوي والخدمات النشطة في المدى الترددي 3 000-275 GHz، لا يشكل مشكلة، إلا إذا طرأ تغير هائل على القيود العملية المفروضة على توليد القدرة في الترددات الراديوية.

8.5 التقاسم مع أبحاث الفضاء السحيق

تستخدم النطاقات الموزعة لإرسالات أبحاث الفضاء السحيق (فضاء-أرض) في الترددات 2,3 GHz و 8,4 GHz على نحو رتيب لرصدات القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) في خدمة الفلك الراديوي والجيوديسيا (دراسة الصفائح التكتونية). ويعرّف الفضاء السحيق في لوائح الراديو على أنه منطقة من الفضاء على مسافة أبعد من 2×10^6 كيلومتر عن الأرض. وتشمل الرحلات إلى الفضاء السحيق استكشاف الكواكب والمذنبات والكويكبات والرياح الشمسية. ومن المعلمات المميزة لإرسالات فضاء-أرض من مركبات الفضاء السحيق 20 واط لقدرة الإرسال و4 أمتار لقطر الهوائي، حيث يوفر هذا الأخير كسباً قدره 36 dBi عند 2,3 GHz أو 47 dBi عند 8,4 GHz. وعلى مسافة 2×10^6 كيلومتر عن الأرض، تبلغ السويات الأرضية المقابلة من كثافة تدفق القدرة -148 dB(W/m²) عند 2,3 GHz و-137 dB(W/m²) عند 8,4 GHz. ويتضح بالرجوع إلى الفصل 4 أن هذه السويات تتجاوز العتبات الضارة للتداخل في مجموع قياسات القدرة في خدمة الفلك الراديوي. غير أن سويات كثافة تدفق القدرة تقع دون العتبات الضارة لقياسات VLBI. وتؤكد التجربة حتى الآن الإمكانية العملية للتقاسم بين خدمة الفلك الراديوي والاتصالات في الفضاء السحيق في الحالة المحددة المتمثلة في قياسات VLBI.

وفي مركبة فضائية لها نفس معلمات الإرسال، تقتضي الضرورة مسافة فاصلة طولها 6×10^7 كيلومتر لتجنب التداخل الضار في مجموع قياسات القدرة في خدمة الفلك الراديوي. ومن باب المقارنة فإن الزهرة، وهو أقرب كوكب، يبعد 4×10^7 كيلومتر في أقرب مسافة له. وهكذا، من حيث العتبات المذكورة في الفصل 4، يمكن للإشارات الواردة من مركبة فضائية في الأجزاء الأقرب من الفضاء السحيق أن تسبب تداخلاً يضر بالتليسكوبات الراديوية التي تتقاسم النطاق نفسه، في حين أن من شأن المركبة الفضائية في رحلات إلى الكواكب الخارجية أن تسبب في حدوث تداخل طفيف جداً (وتكون اتجاهات المركبة الفضائية المسببة للتداخل معروفة جيداً)؛ علماً بأن إشارات المركبة الفضائية يُفترض استقبالها هنا عبر الفصوص الجانبية للتليسكوب الراديوي التي لا يزيد كسبها عن 0 dBi.

9.5 التقاسم الزمني

نظراً لطبيعة الظواهر المرصودة في الفلك الراديوي فلا يمكن وضع برامج تقاسم زمني بين خدمة الفلك الراديوي والخدمات النشطة التي تعمل في النطاق الترددي نفسه إلا في إطار شروط خاصة. وعلاوة على ذلك، قد يمتنع أو يعجز المستخدمون الذين يقدمون خدمة للعملاء عن اعتماد نهج التقاسم الزمني. ولئن تسنى التقاسم الزمني في بعض الأحيان من حيث المبدأ، فإن الصعوبات المرتبطة به في الممارسة العملية هي صعوبات تشغيلية أكثر منها تقنية.

ومع ذلك، قد يتسنى التقاسم الزمني لفترة محدودة في موقع لفلك راديوي، بل قد يكون في الواقع ضرورياً أحياناً. وقد بحث الفصل السابق في الحالة الخاصة لتعظيم مستقبل بغية السماح برصدات في وجود مرسلات راديوية. وبشكل أعم، كثيراً ما تتطلب خدمة الفلك الراديوي من العاملين فيها القيام بالرصد خارج النطاقات الترددية الموزعة لها، وفي هذه الحالات قد يكون التقاسم الزمني مع الخدمات النشطة هو الخيار الوحيد المتاح. وتقر التوصية ITU-R RA.314 بهذا الواقع، وتحث على أن يُطلب إلى الإدارات تقديم المساعدة في تنسيق الرصدات التجريبية للخطوط الطيفية في نطاقات لم تُوزع لخدمة الفلك الراديوي.

1.9.5 تنسيق التقاسم الزمني والتقاسم الترددي

يمكن للتليسكوبات الراديوية الحديثة القيام برصدات عبر مدى هائل من الترددات. ولكن الإقبال على استخدام التليسكوبات شديد وتكلفة الوقت المستغرق في استخدامها عالية والمنافسة على وقت الرصد ضارية. ونتيجة لذلك، يتعين على علماء الفلك الراديوي تشغيل التليسكوبات بأجمع وسيلة ممكنة. ويتطلب ذلك أن يعمدوا، قدر الإمكان، إلى تكييف تردد الرصد لأفضل الظروف الجوية المحتملة في جميع الأوقات، ومن ثم اعتمد بعض مرصدي الفلك الراديوي جدولة دينامية للزمن. وكمثال على ذلك، فإن تليسكوب غرين بانك (GBT) في المرصد الفلكي الراديوي الوطني الأمريكي قادر على القيام برصدات في المدى 1-100 GHz. ولكن الرصدات عبر أعلى الترددات لا يمكن أن تجرى إلا في أوقات معينة في أشهر الشتاء، في ظروف جوية جافة للغاية، ويُستحسن اغتنام هذه الأوقات إلى أقصى حد ممكن. ويغطي التليسكوب الراديوي في بون التابع لمعهد ماكس بلانك الألماني مدىً ترددياً مماثلاً.

ونظراً لتعدد القنوات التي تستخدمها بعض الخدمات النشطة، يمكن في بعض الحالات تنسيق الوقت، حتى لفترات زمنية قصيرة. ويمكن للمرصد أن ترسل جداولها الزمنية إلى الخدمات النشطة العاملة في النطاقات موضع الاهتمام، ومن ثم يمكن لهذه الخدمات في بعض الحالات التحول إلى القنوات التي لا تسبب تداخلاً في رصدات الفلك الراديوي. ومن المسلّم به أن على هذه الترتيبات، لا سيما عندما يرغب علماء الفلك الراديوي في الرصد خارج النطاقات الموزعة لهم، أن تنصف جميع الأطراف وأن تنفّذ على أساس كل حالة في حد ذاتها. ومن الجدير بالذكر أن آثار الانتشار تختلف بشدة باختلاف التردد، بحيث يمكن أحياناً تقصير فترات خسارة البيانات بإعادة الجدولة الزمنية دينامياً.

المراجع

- CCIR [1990] Report 696-2 – Feasibility of Frequency Sharing between Radio Astronomy and other Services. Doc. of the XVIIth Plenary Assembly, Düsseldorf, 1990, Annex to Vol. II, p. 568-584.
- GREENHILL, L. J., KNODRATKO, P. T., LOVELL, J. E. J., KUIPER, T. B. H., MORAN, J. M., JAUNCEY, D. L. and BAINES, G. P. [2003] *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 582, L11-L14.

الفصل 6

التداخل في خدمة الفلك الراديوي من مرسلات في نطاقات أخرى

1.6 مقدمة

إن الانبعاثات الراديوية الكونية التي تكشفها وتقيسها التليسكوبات الراديوية أضعف بكثير من الإشارات المستخدمة في الخدمات (المرسلة) النشطة. ولقياس هذه الإشارات الضعيفة، فإن أجهزة الاستقبال المستخدمة في رصدات الفلك الراديوي هي عموماً أكثر الأجهزة حساسية في سياق التكنولوجيا الراديوية الحالية وعرض النطاق الترددي المتاح. ونظراً لضعف الإشارات وحساسيات أجهزة الاستقبال فإن رصدات الفلك الراديوي شديدة التأثير جداً بالتداخل، وقد يحدث ذلك حتى من أجهزة الإرسال التي لا تتقاسم نفس النطاق. وينجم هذا التداخل من آثار حواف النطاقات وتوافقيات أجهزة الإرسال وآثار التشكيل البينية، وما إلى ذلك. وقد نوقشت في الفصلين 4 و5 السويات العتبية للتداخل في رصدات الفلك الراديوي ومعايير الحماية والقيود الممكنة على التقاسم مع خدمات أخرى.

وتتفاوت سويات الإشارات التي تصادف في النطاقات المجاورة للنطاقات التي تستخدمها الخدمات النشطة تفاوتاً واسعاً بحكم طبيعة الخدمة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن تسميات الخدمات ذات طبيعة عامة جداً ويمكن أن ينطوي أي منها على عدد من أنواع مختلفة من معدات الإرسال. ومن المرجح أن تكون أعلى سويات ذروة الإشارة في النطاقات المخصصة للتحديد الراديوي للموقع والملاحاة الراديوية للطيران، لأنها يمكن أن تشمل رادارات عالية القدرة على متن الطائرات. ومتوسط كثافة تدفق القدرة لهذه الإشارات في مواقع المراصد المعزولة نسبياً يتجاوز عادةً $100 \text{ dB(W/m}^2)$. كما تنجم أيضاً سويات إشارة عالية جداً عن التلفزيون بالموجات الديسيمةترية (UHF).

1.1.6 تعاريف مقتطفة من لوائح الراديو

التعاريف التالية المقتطفة من القسم الرابع في المادة 1 من لوائح الراديو مفيدة في مناقشة التداخل من أجهزة إرسال في نطاقات أخرى.

عرض النطاق اللازم (المادة 152.1 من لوائح الراديو): هو عرض نطاق الترددات الذي يكفي على الضبط، في صنف إرسال معطى، لتأمين إرسال المعلومات بالسرعة والجودة المطلوبتين في ظروف معينة.

البث خارج النطاق (المادة 144.1 من لوائح الراديو): هو بث بتردد واحد أو بترددات واقعة خارج عرض النطاق اللازم، ولكنها في جواره المباشر، وهو ناتج عن عملية التشكيل، باستثناء البث الهامشي.

البث الهامشي (المادة 145.1 من لوائح الراديو): هو بث بتردد واحد أو بترددات واقعة خارج عرض النطاق اللازم، ويمكن إنقاص سويته دون المس بإرسال المعلومات المقابلة. ويشمل البث الهامشي الإرسالات التوافقية، والإرسالات الطفيلية، وأنتجة التشكيل البيني وتحويل التردد، باستثناء البث خارج النطاق.

البث غير المطلوب (المادة 146.1 من لوائح الراديو): هو مجموعة إرسالات تتكون من البث الهامشي والبث خارج النطاق.

2.1.6 تعاريف إضافية

تحدث بعض الاستثناءات والتعديلات في التعاريف الواردة في البند 1.1.6 في حالات معينة. مثال ذلك، تحتوي التوصية ITU-R SM.1541 على التعاريف التالية.

المجال الهامشي¹¹ (لإرسال ما): مدى الترددات الواقعة بعد حدود مجال البث خارج النطاق (OoB)، وبهيمن البث الهامشي عادةً في هذا المدى.

المجال خارج النطاق¹¹ (لإرسال ما): مدى الترددات الواقعة مباشرة خارج عرض النطاق اللازم والتي تستبعد مجال البث الهامشي، وبهيمن البث خارج النطاق عادةً في هذا المدى.

الإرسالات في المجال خارج النطاق: أي بث خارج عرض النطاق اللازم يحدث في مدى التردد المفصول عن التردد المخصص للبث بنسبة أقل من 250% من عرض النطاق اللازم للبث يعتبر عمومًا بثًا في المجال خارج النطاق. ولكن هذا الفصل في الترددات قد يتوقف على نمط التشكيل، والحد الأقصى لمعدل الرمز في حالة التشكيل الرقمي، ونمط جهاز الإرسال، وعوامل تنسيق الترددات. على سبيل المثال، في حالة بعض النظم الرقمية ذات النطاق العريض أو النظم المشكلة بالنمض، قد يتعين أن يختلف فصل الترددات عن العامل 250%.

الإرسالات في المجال الهامشي: لأغراض هذه التوصية تعتبر جميع الإرسالات، بما في ذلك نواتج التشكيل البيني، ونواتج التحويل والإرسالات الطفيلية، التي تقع في ترددات مفصولة عن التردد المركزي للبث بنسبة 250% أو أكثر من عرض النطاق اللازم من البث، عمومًا إرسالات في المجال الهامشي. ولكن هذا الفصل في الترددات قد يتوقف على نمط التشكيل، والحد الأقصى لمعدل الرمز في حالة التشكيل الرقمي، ونمط جهاز الإرسال، وعوامل تنسيق الترددات. على سبيل المثال، في حالة بعض النظم الرقمية ذات النطاق العريض أو النظم المشكلة بالنمض، قد يتعين أن يختلف فصل الترددات عن العامل 250%.

وبالنسبة للمرسلات/المرسلات-المستجيبات متعددة القنوات أو متعددة الحاملات، حيث يمكن إرسال عدة حاملات في وقت واحد من مضخم خرج نهائي أو هوائي نشط، يعتبر التردد المركزي للبث إما مركز عرض النطاق المخصص للمحطة أو مركز عرض النطاق -3 dB للمرسِل/المرسَل-المستجيب، وذلك باستخدام عرض النطاق الأضيق بين الاثنين.

البث الهامشي خارج النطاق: يتم عادةً التمييز بين البث خارج النطاق (OoB) والبث الهامشي من حيث التردد، على النحو التالي (انظر التوصية ITU-R SM.329-9). ووفقاً للمبادئ المنصوص عليها في التذييل 3 من لوائح الراديو، يتألف المجال الهامشي عمومًا من ترددات مفصولة عن التردد المركزي للبث بنسبة 250% أو أكثر من عرض نطاق البث اللازم. ومع ذلك، قد يتوقف فصل التردد هذا على نمط التشكيل المستخدم، ومعدل البتات الأقصى في حالة التشكيل الرقمي، ونمط جهاز الإرسال، وعوامل تنسيق الترددات. وعلى سبيل المثال، في حالة بعض النظم الرقمية أو نظم النطاق العريض أو النظم المشكلة بالنمض، قد يتعين أن يختلف فصل الترددات عن عامل $\pm 250\%$. وبما أن لوائح الراديو تحظر على أي خدمة راديوية أن تتسبب في حدوث تداخل ضار خارج النطاق الموزع لها، ينبغي تحديد ترددات المرسل بحيث لا تتسبب الإرسالات خارج النطاق في تداخل ضار خارج النطاق الموزع وفقاً للرقم 5.4 من لوائح الراديو.

وبدلاً من ذلك، قد تنطبق النسبة $\pm 250\%$ على فصل القنوات بدلاً من عرض النطاق اللازم. مثال ذلك، لتنسيق الترددات للخدمة الثابتة الرقمية، توصي التوصية ITU-R F.1191 باستخدام $\pm 250\%$ من الفاصل بين القنوات في ترتيب قنوات التردد الراديوية ذات الصلة بمثابة حدود تردد بين مجال خارج النطاق والمجال الهامشي.

وفي حالة عرض نطاق ضيق جداً أو واسع، قد لا يكون هذا الأسلوب لتحديد المجال الهامشي مناسباً، وتوفر التوصية ITU-R SM.1539 المزيد من الإرشاد.

11 أدخل التعبير "مجال البث خارج النطاق OoB" و "مجال البث الهامشي" من أجل إزالة بعض التضارب القائم الآن بين تعريف تعبير "البث خارج النطاق" و "البث الهامشي" في المادة 1 من لوائح الراديو، من جهة، والاستخدام الفعلي لهذين التعبيرين في التذييل 3 من لوائح الراديو (Rev.WRC-12)، من جهة أخرى. وتنطبق حدود البث خارج النطاق وحدود البث الهامشي، على التوالي، على جميع الإرسالات غير المطلوبة في مجال البث خارج النطاق ومجال البث الهامشي.

3.1.6 آليات التداخل من المرسلات في نطاقات أخرى

- يمكن أن ينشأ التداخل في حافة النطاق، أي التداخل الناجم عن مرسل في نطاق مجاور، من خلال ثلاث آليات:
 - يمكن أن تقع النطاقات الجانبية للتشكيل ضمن نطاق الفلك الراديوي عندما لا ينقطع الطيف المرسل من جهاز إرسال في نطاق مجاور بشكل حاد بما فيه الكفاية عند حافة النطاق.
 - يمكن أن تولد إشارتان قويتان أو أكثر تعمل على عنصر غير خطي ترددات إيقاع في شكل $(mf_1 \pm nf_2)$ ، حيث f_1 و f_2 هما تردد الإرسال m و n هما عدداً صحيحان. ويدعى العدد الصحيح $(m + n)$ ترتيب التشكيل البيئي. وقد يكون العنصر غير الخطي في خرج مرسل، أو مراحل الدخل في مستقبل فلك راديوي، أو جسم قريب مثل مفصل صدئ في برج أو سياج في منطقة تكون فيها شدة المجال الكهربائي عالية.
 - قد يستجيب مستقبل الفلك الراديوي لإشارات في النطاق المجاور إذا لم تكن حساسية المستقبل للترددات خارج نطاق الفلك الراديوي منخفضة بما فيه الكفاية.
- ويمكن أن ينجم التداخل من مرسلات في نطاقات أكثر تباعداً في تردد من نطاق فلك راديوي عن الآليات التالية:
- من المحتمل أن تتولد توافقيات تردد الإرسال الموزع في المرسل، ويمكن أن تشع في سوية يمكن أن تتسبب في تداخل في رصدات الفلك الراديوي.
 - يمكن أن يولد التشكيل البيئي بين إشارتين متباعدين إلى حد كبير من حيث التردد تردداً ثالثاً منفصلاً بشكل جيد عن أي من الترددات الأوليين.
 - يمكن أن يؤدي استخدام التشكيل العريض النطاق وتقنيات نشر الطيف إلى نطاقات جانبية طيفية واسعة جداً قد تتسبب، إن لم ترشح في خرج المرسل، في تداخل خطير.

وينجم كل من التشكيل البيئي في مراحل دخل المستقبل وعدم كفاية رفض الإشارات خارج حواف نطاق الفلك الراديوي على السواء من عدم كفاية تصميم المستقبل. وينبغي أن تتضمن مستقبلات الفلك الراديوي القدر الكافي من الترشيح في مراحل الدخل لرفض الإشارات التي قد تسبب التشكيل البيئي. وكذلك ينبغي أن تكون مصممة ومزودة بمراشيع تردد وسيط قادرة على توفير الرفض المطلوب في حواف نطاق الفلك الراديوي، والتي قد تصل إلى -100 dB نسبة إلى مركز النطاق.

وبشكل عام، قد يؤدي توزيع نطاقات مجاورة لنطاقات الفلك الراديوي إلى خدمات تستخدم مرسلات عالية القدرة إلى مشكلات تقنية صعبة ومكلفة. وتتوقف بعض آليات التفاعل، كذلك التي تشمل توافقيات أو نطاقات تشكيل جانبية، إلى حد كبير على خصائص المرسل، ويجب أن تُدرس كل على حدة لمختلف الخدمات. وتمثل الإرسالات من السواتل والطائرات مشكلة خاصة لخدمة الفلك الراديوي بسبب شيوع ظروف الانتشار على خط البصر. وقد تبين أن الخدمات، مثل خدمة الاستدلال الراديوي الساتلية وخدمات الاتصالات الرقمية التي تستخدم تقنيات تشكيل النطاق العريض وانتشار الطيف من السواتل، هي أمثلة تنطوي على مشكلات تؤثر بشكل خاص في خدمة الفلك الراديوي.

2.6 حدود الإرسالات غير المطلوبة من خدمات نشطة

1.2.6 الحدود ضمن مجال البث الهامشي

- الحدود المفروضة على الإرسالات الهامشية مدرجة في التذييل 3 في لوائح الراديو وكذلك في التوصية ITU-R SM.329 (سلسلة إدارة الطيف)، وهي تحدد مختلف الفئات. وهي تشمل:
- حدود الفئة A هي قيم التوهين المستخدمة لحساب الحد الأقصى المسموح به لسويات قدرة الإرسال في المجالات الهامشية. والتذييل 3 في لوائح الراديو مستمد من حدود الفئة A؛
 - حدود الفئة B هي مثال على حدود هامشية أكثر صرامة من حدود الفئة A. وهي تستند إلى حدود معينة ومعتمدة في أوروبا ومستخدمة في بعض البلدان الأخرى؛

- حدود الفئة C هي مثال على حدود هامشية أكثر صرامة من حدود الفئة A. وهي تستند إلى حدود معينة ومعتمدة في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا ومستخدمة في بعض البلدان الأخرى؛
- حدود الفئة D هي مثال على حدود هامشية أكثر صرامة من حدود الفئة A. وهي تستند إلى حدود معينة ومعتمدة في اليابان ومستخدمة في بعض الدول الأخرى؛
- الفئة Z: حدود الإشعاع من أجل تجهيزات تكنولوجيا المعلومات (ITE) حددتها اللجنة الدولية الخاصة المعنية بالتداخل الراديوي (CISPR).

وتعطى الحدود في شكل سوية القدرة القصوى من البث الهامشي المعبر عنه بوحدات dB دون القدرة في خط إرسال هوائي.

وبالنسبة لخدمات الأرض، فإن حدود الفئة A، وهي محور اهتمام علماء الفلك الراديوي، تحدد الحد الأدنى للتوهين بمقدار $43 + 10 \log PdBc$ ، أو $70 dBc$ ، أيهما أقل صرامة، حيث P هي متوسط القدرة في خط الإرسال. ويقاس البث الهامشي لهذه الحالة في عرض نطاق مرجعي قدره $100 kHz$ للترددات من $30 MHz$ إلى $1 GHz$ ، و $1 MHz$ للترددات فوق $1 GHz$.

وبالنسبة لخدمات الفضاء، تحدد حدود الفئة A مقدار $43 + 10 \log PdBc$ ، أو $60 dBc$ ، أيهما أقل صرامة. ومع ذلك، ومن أجل خدمات الفضاء، يتحدد عرض النطاق المرجعي الذي يقاس فيه البث الهامشي بمقدار $4 kHz$ ، مما يؤدي إلى كثافة قدرة طيفية أقل صرامة من مثيلتها لخدمات الأرض بمقدار $14 dB$ ($10 \log(4/100) dB$) للمدى من $30 MHz$ إلى $1 GHz$ ، و $24 dB$ ($10 \log(4/1000) dB$) للترددات فوق $1 GHz$.

وكمثال على آثار الإرسالات الهامشية من الخدمات الفضائية، فإن ساتلاً على مسافة h متر فوق محطة فلك راديوي قد ينتج كثافة تدفق قدرة طيفية (spfd) هامشية بمقدار $dB(W(m^{-2} Hz^{-1})) = 10 \log(4\pi h^2) - 79$ حيث G_{SAT} هو كسب هوائي الساتل في اتجاه المرصد الراديوي في تردد البث الهامشي. ولتقدير قيم spfd الهامشية للترددات في نطاقات الفلك الراديوي لساتل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض نستخدم $h = 6,39 \times 10^6 m$ ونأخذ اعتباطياً قيم G_{SAT} التي تقابل فتحة $1 m^2$ لهوائي الساتل. ونسمح بكسب أقصى قدره $40 dB$ بحيث يكون مقدار قطر التغطية 1400 كيلومتر. وتبدو القيم الناتجة عن spfd في شكل منحنى منقط في الشكل 1.6. وبعد ذلك، وكمثال على ساتل في مدار أرضي منخفض (LEO) نأخذ $h = 800 km$ ، و G_{SAT} مرة أخرى تقابل فتحة $1 m^2$ ، وتكون القيمة العظمى $20 dB$ بحيث يكون قطر التغطية حوالي 300 كيلومتر، وهي مساحة صغيرة بقدر ما هي التغطية الشائعة الاستخدام. وترسم القيم الناتجة في شكل المنحنى المستمر في الشكل 1.6، بينما تمثل قيم عتبة التداخل لرصدات فلك راديوي متواصلة، على النحو الوارد في التوصية ITU-R RA.769، في شكل صلبان. وتبين منحنيات spfd الهامشية في الشكل 2.6 قيم أسوأ حالة لأننا افترضنا أن كامل كسب الهوائي الساتلي يحدث في اتجاه محطة الفلك الراديوي. وكذلك استخدمنا، من قبيل التبسيط، مسافات لساتل في السمات وتجاهلنا التوهين في الغلاف الجوي وآثاراً ضئيلة مماثلة. ومع ذلك، فإن المدى الذي تتجاوز فيه سويات spfd المسموح بها العتبات الضارة، أي 20 إلى $50 dB$ ، يشير بوضوح إلى أن حدود البث الهامشي عموماً قاصرة جداً عن حماية خدمة الفلك الراديوي. وبالنسبة لخدمات الأرض فإن الحدود على spfd الهامشية فوق تردد $1 GHz$ هي أكثر صرامة بمقدار $24 dB$ مما هي من أجل الخدمات الفضائية، وذلك بسبب اختلاف عروض النطاقات المرجعية. وتكون مسافات مرسلات الأرض عادةً أقل من مسافات مرسلات خدمات الفضاء، ولكن الحجب بواسطة التضاريس يمكن أن يوفر حماية كبيرة. وبالنسبة لإرسالات خط البصر، تعجز حدود البث الهامشي مرةً أخرى عن حماية خدمة الفلك الراديوي في معظم الحالات. والتوصية ITU-R SM.329، التي تفرض حدوداً على الإرسالات الهامشية، تدرج أيضاً (في الملحق 3 من التوصية) عتبات التداخل في خدمة الفلك الراديوي، ولكن توفير الحماية لهذه الحدود غير مفروض، وهي مسألة جديدة بالنظر في فرادى الحالات عندما تنشأ نظم جديدة.

2.2.6 الحدود ضمن البث خارج النطاق

تعطى الحدود المفروضة على البث خارج النطاق في التوصية ITU-R SM.1541. وباختصار، توفر هذه التوصية أقنعة البث بالنسبة لكثير من الخدمات، التي تبين الحدود في المنطقة من حواف النطاق اللازم إلى الحواف الداخلية لمنطقة الإرسالات الهامشية. وهذه الحدود أقل صرامة من الحدود المفروضة على البث الهامشي، ولكنها ترمي نحو الحدود الهامشية عند المجال الفاصل خارج النطاق/الهامشي. وهكذا، مرة أخرى، ليس المقصود من الحدود حماية خدمة الفلك الراديوي، ويبقى التنسيق قيد النظر على أساس كل حالة على حدة.

3.2.6 الحدود على الإرسالات غير المطلوبة من الخدمات النشطة لحماية نطاقات الفلك الراديوي

ثمة عدد من الحواشي في لوائح الراديو ترمي إلى حماية خدمة الفلك الراديوي من الإرسالات غير المطلوبة من الخدمات النشطة (انظر مثلاً الرقم 208A.5 من لوائح الراديو). وفي العديد من المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية، وضعت حواش إضافية من أجل توفير حماية إضافية لخدمة الفلك الراديوي من الخدمات النشطة القائمة والجديدة.

وتتعلق الحاشية 443B.5 بالحماية من الإرسالات غير المطلوبة من خدمة الملاححة الراديوية الساتلية (فضاء-أرض) العاملة في النطاق 5 030-5 010 MHz:

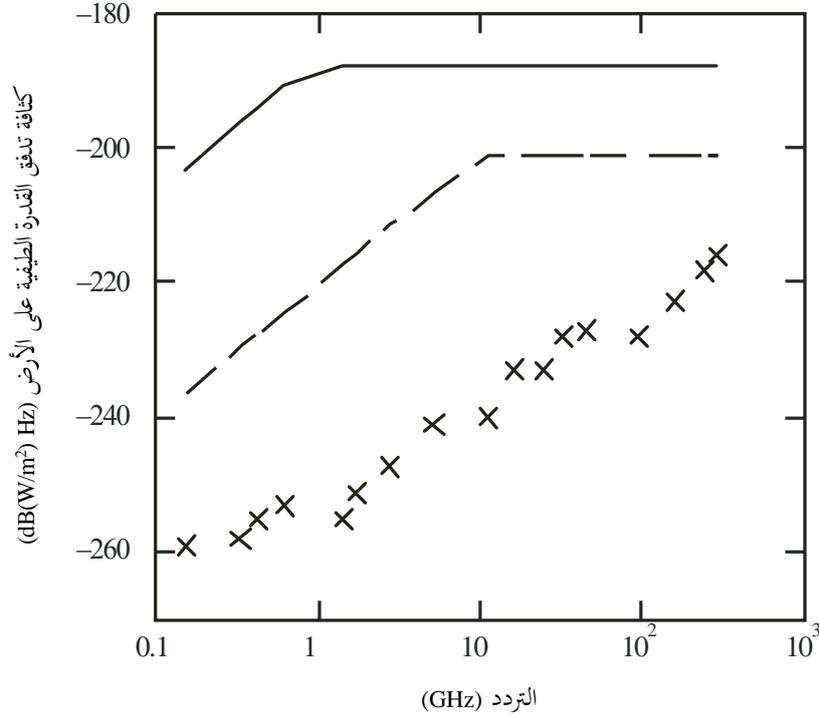
"443B.5 ... لكيلا يحدث أي تداخل ضار لأنظمة الهبوط بالموجات الصغيرة العاملة فوق التردد 5 030 MHz، يجب على كثافة تدفق القدرة التراكمية الناتجة عند سطح الأرض في النطاق 5 150-5 030 MHz من جميع المحطات الفضائية التابعة لنظام في خدمة الملاححة الراديوية الساتلية (فضاء-أرض) عامل في النطاق 5 030-5 010 MHz، ألا تتجاوز القيمة -124,5 dB(W/m²) في نطاق قدره 150 kHz. ولكي لا يحدث أي تداخل ضار لخدمة الفلك الراديوي في النطاق 5 000-4 990 MHz، يجب على أنظمة خدمة الملاححة الراديوية الساتلية (فضاء-أرض) العاملة في النطاق 5 030-5 010 MHz، أن تمتثل للحدود المقررة في النطاق 5 000-4 990 MHz المنصوص عليها في القرار (Rev.WRC-12) 741 (WRC-12)"

وتتناول الحاشيتان 511A.5 و511F.5 من لوائح الراديو الحماية من الإرسالات غير المطلوبة من الخدمة المتنقلة الساتلية (MSS) (فضاء-أرض) العاملة في النطاق 15,43-15,63 GHz:

"511A.5 ... ومن أجل حماية خدمة علم الفلك الراديوي في النطاق 15,4-15,35 GHz، يجب على كثافة تدفق القدرة التراكمية التي تشعها في النطاق 15,4-15,35 GHz جميع المحطات الفضائية التابعة لأي وصلة تغذية (فضاء-أرض) من نظام ساتلي غير مستقر بالنسبة إلى الأرض في الخدمة المتنقلة الساتلية، عامل في النطاق 15,63-15,43 GHz، ألا تتجاوز القيمة -156 dB(W/m²) في عرض نطاق قدره 50 MHz، في أي موقع للرصد تابع لعلم الفلك الراديوي أثناء أكثر من 2% من الوقت. (WRC-2000)"

الشكل 1.6

كثافة تدفق القدرة الطيفية على الأرض التي تقابل
حدود البث الهامشي للسواتل



يبين المنحنى المستمر والمنحنى المنقط القيم الممكنة للكثافة spfd في سوية الأرض من سواتل في مدار أرضي منخفض (LEO) وسواتل في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض (GEO)، على التوالي، تشع عند حدود البث الهامشي للمركبة الفضائية. للتفاصيل انظر النص. وتبين الصليبان القيم العتبية للتداخلات الضارة بخدمة الفلك الراديوي كما ترد في الجدول 1.4.

Radio-Astro_61

3.6 أداء مستقبلات خدمة الفلك الراديوي

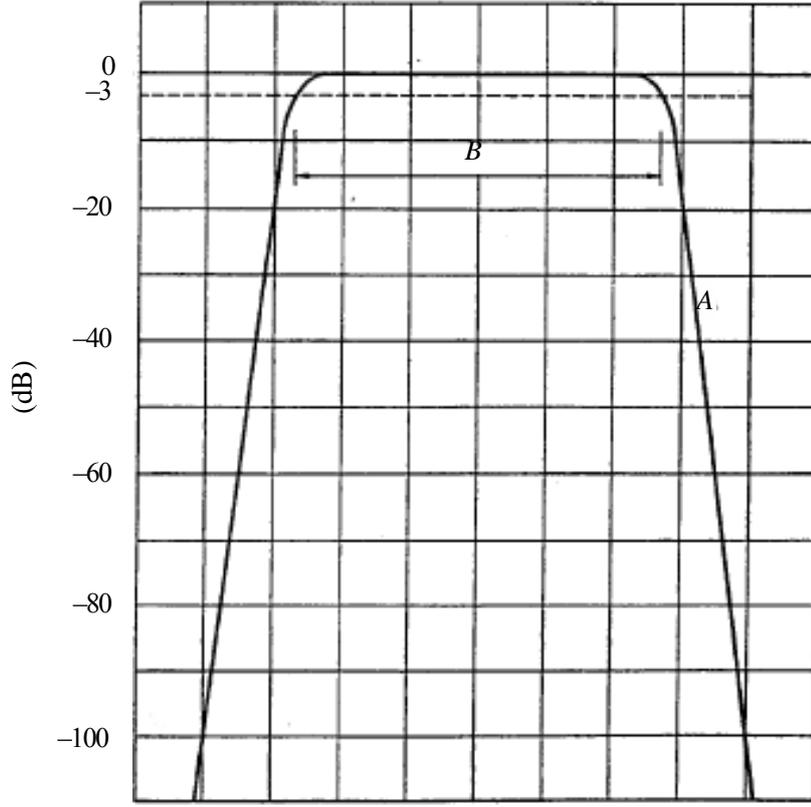
1.3.6 ترشيح التداخل في حواف النطاقات

لحساب دخل القدرة الفعالة P في مستقبل خدمة فلك راديوي من إشارات نطاقات مجاورة، لا بد من معرفة استجابة حواف نطاق المستقبل بقدر من الدقة. ولننظر مثلاً في حافة التردد الأعلى للنطاق في الشكل 2.6، حيث a_0 dB هو السوية التي يخفض بها الكسب النسبي للمقياس الراديوي عند حافة النطاق و k dB/MHz هو منحدر استجابة المستقبل في تلك النقطة.

الشكل 2.6

خاصية نطاق تمرير المستقبل المصممة لتتواءم مع نطاق فلك راديوي

نطاق فلك راديوي



A: منحدر -dB/MHz k

B: عرض نطاق نصف القدرة

Radio-Astro_62

ولنفترض أن أي إشارات متداخلة ضمن نطاق الفلك الراديوي تساوي العتبة الضارة في الجدول 1.4، ولكننا نصادف، خارج حافة النطاق، تداخلاً في شكل spfd منتظماً، $S \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$. وإذا كانت A هي مساحة تغطية هوائي الفلك الراديوي في اتجاه الإشارة المتداخلة، و f_0 هو التردد في حافة النطاق، تكون قدرة التداخل الواردة:

$$(1.6) \quad P = AS \int_{f_0}^{\infty} 10^{-[a_0 + 10^{-6}k(f - f_0)/10]} df = 4,34 \times 10^{-a_0/10} AS/k$$

والحد الذي يمثل اللانهاية في التكامل مبرر في الممارسة العملية ما دام التداخل يمتد بعيداً بما فيه الكفاية وراء حافة النطاق.

ويقع الحد الأقصى لسويات قدرة التداخل الممكن تحمله الواردة في الجدول 1.4 في المدى من 10^{-17} إلى 10^{-21} W لعروض نطاقات نموذجية عند ترددات فوق 1 GHz. وبالنسبة لإشارة مستمرة بقيمة $S = 2 \times 10^{-13} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ (مألوفة لإشارة ترحيل راديوي) وهوائي A بقيمة 10^3 m^2 (كسب متناح عند حوالي 3 GHz)، لن يحدث تجاوز السوية 10^{-21} W إذا كانت الاستجابة، مثلاً، عند حافة النطاق، a_0 ، هو 102 dB والانحدار، k ، هو 50 dB/MHz. وقيمة k أقل أهمية من قيمة a_0 ، ومن أجل $k = 10 \text{ dB}/\text{MHz}$ تُستقبل نفس سوية القدرة $a_0 = 109 \text{ dB}$. وهكذا فإن استجابة مستقبل فلك راديوي لترددات في المدى GHz ينبغي أن تكون في حدود -100 إلى -110 dB عند حافة النطاق نسبةً إلى مركز النطاق، وأكبر تبعاً لذلك إذا وقع مصدر البث خارج النطاق في اتجاه تكون فيه استجابة التليسكوب أكبر من 0 dBi. ويلاحظ أنه في الممارسة العملية لا يمكن لطيف الخدمة في النطاق

المجاور أن يقطع فجأة عند حافة النطاق، بل ينبغي أن يرمي نحو الحافة لكي لا يتجاوز السوية الصارة ضمن نطاق الفلك الراديوي. وعلى الرغم من أن الحالة قيد النظر هي حالة مبسطة فإنها توفر مؤشراً مفيداً لاستجابة حافة النطاق المطلوبة. وثمة بضعة أمثلة أخرى في الجدول 1.6 يفترض فيها استجابة متناحية في هوائي الفلك الراديوي.

الجدول 1.6

أمثلة لاستجابات حافة النطاق المطلوبة لخدمة الفلك الراديوي

الخدمة	مسافة المرسل المفترضة (km)	السويات النموذجية لمتوسط الإشارة في المرصد	استجابة حافة النطاق المطلوبة (dB)
ساتل إذاعي (التدفق الأقصى المسموح به)	36 000	$W/(m^2 \cdot Hz)^{18-10} \times 5$	56- إلى 63-
مرسل ترحيل راديوي نموذجي	60	$W/(m^2 \cdot Hz)^{13-10} \times 2$	102- إلى 109-
رادار محمول جواً (متوسط القدرة 10 W)	10	$2m/W^{8-10}$	100-
	300	$2m/W^{11-10}$	70-

وفي حالة إشارات الرادار النابضة يتوقف تأثير التداخل لدورة عمل منخفضة في مستقبل فلك راديوي على نوع الرصد، وقد لا يكون أكبر من التأثير الذي تسببه إشارة مستمرة من نفس متوسط سوية القدرة. وبالنسبة لاستجابة حافة النطاق في مستقبل فلك راديوي بمقدار 100 dB في الوصلة الهابطة، ومنطقة تغطية، A، بمساحة $10^{-3} m^2$ ، فإن متوسط القدرة المستقبلية لا يتجاوز $10^{-21} W$ لمتوسط سويات كثافة تدفق القدرة دون $10^{-13} m^2/W$. وهذا يقابل ذروة كثافة تدفق القدرة بجوالي 10^{-9} إلى $10^{-10} m^2/W$. وهكذا فإن استجابة حافة النطاق بمقدار 100 dB قد تسمح بالتشغيل في وجود إشارات رادار قوية في النطاق المجاور. ومن ناحية أخرى، فإن آثار فرط الحمولة أثناء النبضة قد تكون هامة وتؤدي إلى آثار تشكيل بيني في مراحل دخل المستقبل، كما هو موضح أدناه.

ومن أجل الحصول على تخفيض في الاستجابة عند حواف النطاق بمقدار 100 dB نسبة إلى مركز النطاق، يجب أن يكون عرض المرشاح عند نقاط 3- dB أقل من العرض الموزع لنطاق الفلك الراديوي. وبما أن الترددات الوسيطة منخفضة نسبياً، ما بين 100 MHz و 1 GHz عموماً، من الممكن تحقيق انتقائية قطاعية حادة نسبياً. ويتوقف انحدار حواف استجابة المرشاح على عدد من أقسام الترشيح والاستجابة المصممة. على سبيل المثال، يُعتبر المرشاح الذي يوفر عرض نطاق بمقدار 3- dB في 75% من عرض نطاق 100- dB حاد الجوانب. وتتطلب زيادة انحدار الاستجابة عند حواف نطاق التمرير زيادة في عدد أقسام المرشاح، وهذا بدوره يجعل مواءمة المرشاح أكثر صعوبة ويزيد من تباير الطور بتغاير درجة الحرارة. وهكذا فإن الترشيح لا يوفر دائماً حلاً سهلاً لمشكلة التداخل في حافة النطاق. وتخفيض عرض النطاق الصالح للاستعمال في نطاق خدمة الفلك الراديوي مهم بشكل خاص لرصدات الخطوط الطيفية، لأن كامل عرض النطاق مطلوب عادةً لرصد التحولات في تردد الخطوط، ولتوسيع عرض الخطوط، نتيجة لزعزعات دوبلر وغيرها من الآثار. ويمكن لحواف المرشاح المتعددة الأطوار الرقمية أن توفر الترشيح المستقر حاد الأطراف المطلوب، وهي منبعا لتغاير درجة الحرارة. وقد أصبح استخدام هذه المرشاح مألوفاً في مقاييس الطيف الحديثة.

2.3.6 الآثار غير الخطية والتشكيل البيئي

قد تؤدي إشارتان أو أكثر من الإشارات الموجودة في وقت واحد عند دخل المستقبل ولكن خارج نطاق تمرير المستقبل، بسبب اللاخطية في المراحل المبكرة، إلى إشارة ضمن نطاق تمرير المستقبل. ومن المرجح أن يكون أهم تأثير تشكيل بيني من المرتبة الثالثة حيث يولد الترددان f_1 و f_2 بالقرب من حافة نطاق التمرير مكونةً $(2f_1 - f_2)$ أو $(2f_2 - f_1)$ ضمن نطاق التمرير.

ويوصف أداء التشكيل البيئي لمضخم ما من حيث أنه اعتراض التشكيل البيئي من المرتبة الثالثة ثنائي النغمة. وهذا الاعتراض هو النقطة التي يتقاطع فيها، في رسم لوغاريتمي (log-log) لقدرة الخرج مقابل قدرة الدخل، الخطان المستقيمان اللذان يمثلان استجابة المضخم المطلوبة واستجابة التشكيل البيئي. وتكون سوية قدرة الدخل في هذه النقطة هي I_{IM} ، تستخدم لها قيمة 40 dBW هنا بوصفها ممثل مضخم ترانزستور منخفض الضوضاء بكسب حوالي 30 dB . ويمكن أن تنجم إشارة تداخل فعالة قدرتها ΔP_H عن التشكيل البيئي لإشارات خارج النطاق بقدرة P_{IM} كما يلي:

$$(2.6) \quad P_{IM} = (2I_{IM} + \Delta P_H)/3 \quad \text{dBW}$$

وباعتماد قيم ΔP_H الواردة في الجدول 1.4، وعلى افتراض كسب هوائي الاستقبال 0 dBi ، يمكن اشتقاق قيم كثافة تدفق القدرة المقابلة، S_{IM} . ويرد في الجدول 2.6 القيم المناسبة لبعض نطاقات خدمة الفلك الراديوي بتوزيع أولي، باستخدام قيمة I_{IM} المذكورة أعلاه. وإذا تجاوزت كثافة تدفق القدرة في ترددات بالقرب من نطاقات الفلك الراديوي هذه السويات، فإن نواتج التشكيل البيئي الناجمة عن ذلك تتجاوز العتبات الصارمة المدرجة في الجدول 1.4. وفي هذه الحالة يحتاج الأمر إلى مرشاح عند دخل المستقبل. وقد ينجم عن هذا الترشيح انخفاض في الحساسية بسبب حسارة الإدراج التي تزيد من حرارة ضوضاء النظام عند دخل المستقبل. ومع ذلك، فإن التحسينات الأخيرة في المراشيع التي تستخدم فيها مواد فائقة التوصيل تيسر عملياً ترشيح الدخل في مستقبلات الفلك الراديوي. ويتم حالياً استكشاف خيار توزيع كسب المضخم الأمامي والترشيح.

الجدول 2.6

القيم النموذجية للقدرة الواردة وكثافة تدفق القدرة لإشارتين بشدة متساوية
قد تتسببان في تداخل عند العتبة الصارمة بالتشكيل البيئي

S_{IM} (dB(W/m ²))	P_{IM} (dBW)	التردد المركزي في نطاق الفلك الراديوي (MHz)
82-	94-	325,3
71-	95-	1 413,5
60-	96-	4 995
52-	94-	10 650
49-	94-	15 375
43-	92-	23 800
36-	90-	43 000

3.3.6 الخطية

رغبةً في تجنب المشاكل التي نوقشت في البند 2.3.6، تصمم أجهزة استقبال التليسكوب الراديوي عموماً للحفاظ على إجمالي القدرة داخل نطاق التمرير دون سوية انضغاط بنسبة 1% عند أي نقطة في سلسلة من مراحل التضخيم والمرشحات وما إلى ذلك، من الهوائي إلى خرج المستقبل. ويمكن لمستقبل يعمل عند نقطة انضغاط 1%، في وجود إشارات قوية مباشرةً خارج نطاق الفلك الراديوي، أن يؤدي إلى نواتج تشكيل بيئي من سوية منخفضة داخل نطاق الفلك الراديوي. وكذلك يفضل أن تكون مواصفة المستقبل قريبة من الخطية لأنها تبسط معايرة الخرج من حيث سويات إشارة الدخل. ومن المستحسن توفر "هامش رأسي" واسع بين سوية قدرة التشغيل وسوية القدرة التي يحدث عندها انضغاط بنسبة 1%، وخاصةً في وجود سوية تداخل متفاوتة من حيث الزمن. وتفاوت سوية القدرة عند أي نقطة في المستقبل باختلاف تسديد الهوائي وسوية التداخل، وقد صمم النظام بشكل عام لمنع الهامش الرأسي من الانخفاض إلى 0 dB . وإذا هيمن شرط تريبي على مواصفة الاستجابة، تكون نقطة انضغاط الكسب 1% عادةً 16 dB دون نقطة انضغاط الكسب 1 dB ، و 26 dB دون سوية الاعتراض من المرتبة الثالثة.

4.3.6 الترشيح والرقمنة

يمكن التحكم جزئياً في النمو نحو اللاخطية في النظم عالية الكسب باستخدام مرشحي أضيق تبعاً في مسير الإشارة. ويمكن أن يحدث الترشيح في مراحل متعددة في مستقبل الفلك الراديوي وأن يشمل المرشحي التماثلية والرقمية على السواء. ويتعين أن توفر أي مرحلة تماثلية القدر الكافي من الكبت لحماية الخطية في مراحل المضخم التالية. ويمكننا أن نحدد المعلمات التالية للمرحلة i في سلسلة الإشارات:

$$- G_i(f) : \text{نسبة كسب القدرة } P_{out}(f)/P_{in}(f) \text{ في المرحلة } i, \text{ كدالة للتردد } f$$

$$- N_i : \text{رقم الضوضاء}$$

- P_{Nii} : مجموع القدرة المتكاملة عبر التردد عند دخل المرحلة i ، التي يمكن أن تتسبب من أجلها اللاخطية ضمن تلك المرحلة بنسبة 1% من انضغاط الكسب.

ويكون الشرط لتجنب اللاخطية ضمن المرحلة الخامسة، مثلاً، هو:

$$(3.6) \int P_{in}(f) G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) df + k T \int \{ [N_1(f) - 1] G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) + [N_2(f) - 1] G_2(f) G_3(f) G_4(f) \} df < P_5$$

حيث $P_{in}(f)$ هي دخل القدرة من الهوائي، و k هو ثابت Boltzmann، $T = 290$ K، وقد افترض أن الكسب في المرحلتين الأوليين كبير بما فيه الكفاية بحيث يمكن تجاهل مساهمة ضوضاء المراحل اللاحقة.

وفي معظم مستقبلات الفلك الراديوي المستخدمة مع هوائي واحد، تتم معالجة الإشارات في جهاز توليف ذاتي لتوفير أطيف إجمالي القدرة. وفي حالة صيف من الهوائيات، تعالج الإشارات بواسطة نظام توليف متصلب. وفي كلتا الحالتين ترقمن إشارة التردد المتوسط وتجري المعالجة اللاحقة رقمياً. ويتطلب الأمر مرشحاً تماثلياً مضاداً للتعرج عند دخل محوالت التماثلي إلى الرقمي (A/D)، وذلك لتحديد انقطاعات التردد في طيف التردد المتوسط، بحيث يمكن إجراء الاعتيان عند ضعف عرض نطاق الإشارة على النحو المطلوب لاعتيان Nyquist. وإذا تم تجنب اللاخطية في النظام التماثلي وتجنب التعرج في تحويل التماثلي إلى الرقمي، عندئذ يمكن إدراج المزيد من الترشيح رقمياً قبل مرحلة التوليف الذاتي أو التوليف المتصلب. وتؤدي إشارات التداخل عند العتبات الصاروة الواردة في التوصية ITU-R RA.769، (والجدولين 1.4 و 2.4) إلى سويات إشارة في نظام التردد المتوسط أدنى بحوالي 40 dB من السوية التي تنطوي على خطر اللاخطية. وهكذا فإن الإشارات التي تتجاوز هذه السويات ببضع عشرات dB يمكن رفضها على نحو ملائم بواسطة المرشحي الرقمية إذا كانت تقع خارج نطاق خدمة الفلك الراديوي. ويمكن للمرشحي الرقمية من نمط استجابة النبضة المحدودة (FIR) أن توفر قطعاً حاداً جداً عند حواف النطاق، ويمكن أن تؤدي مع المرشحي التماثلية في المراحل السابقة إلى رفض يزيد عن 100 dB. والمرشحي المتعددة الأطوار، التي يجري فيها تلفيف إشارة التردد المتوسط مع تقريب رقمي لدالة جيبيية، فعالة بشكل خاص وقد أصبحت شائعة الاستخدام. وهكذا من الممكن عموماً تصميم مستقبلات فلك راديوي لرفض التداخل الذي يقع خارج نطاق خدمة الفلك الراديوي.

4.6 التداخل من مرسلات لخدمات في نطاقات أخرى

تتناول التوصية ITU-R RA.517 - حماية خدمات الفلك الراديوي من المرسلات العاملة في النطاقات المجاورة، والتوصية ITU-R RA.611 - حماية خدمة الفلك الراديوي من البث الهامشي، بعض الحالات التي قد تسبب فيها المرسلات العاملة في نطاقات مجاورة أو غير مجاورة التداخل في خدمة الفلك الراديوي.

1.4.6 الخدمات التي قد تتسبب في تداخل في خدمة الفلك الراديوي عبر نطاقات مجاورة أو آليات توافقية

تعتبر أكثر الخدمات نشاطاً العاملة في النطاقات المجاورة لنطاقات خدمة الفلك الراديوي، أو على ترددات دون التوافقية لترددات خدمة الفلك الراديوي، المصادر المحتملة للتداخل في خدمة الفلك الراديوي. ومع ذلك، فإن احتمال أن تتسبب أي خدمة في تداخل من هذا القبيل يتوقف إلى حد كبير على طبيعة الإرسالات. مثال ذلك أن الإرسالات من الخدمات الثابتة والمتنقلة

(باستثناء المتنقلة للطيران) نادراً ما تنطوي على أي مشاكل. وتشمل الخدمات التي من الأرجح أن تسبب تداخلاً من خلال التشكيل البيئي والآثار التوافقية الخدمات التي لها خرج قدرة عال، مثل التلفزيون بالموجات الديسيمتريّة (UHF). وكذلك فإن الخدمات التي تستخدم الإرسالات من السواتل يمكن أن تسبب مشاكل خطيرة بسبب الانتشار على خط البصر، والحاجة إلى تقليل الوزن في السواتل، مما يمكن أن يجعل تركيب المراشيع صعباً ومكلفاً. والتقنيات التي تنتج طيفاً واسعاً من النطاقات الجانبية، مثل تمديد الطيف بالتتابع المباشر، دون ترشيح النطاقات الجانبية غير المستخدمة على نحو ملائم، تنطوي على إمكانية التسبب في مشاكل خطيرة جداً لخدمة الفلك الراديوي.

2.4.6 الانتقال إلى التلفزيون الرقمي وأثره على استخدام خدمة الفلك الراديوي، دون حماية، للنطاقات المستخدمة للبث التلفزيوني للأرض

أصبح التلفزيون شكلاً أساسياً من أشكال الاتصالات في كل بقاع العالم. وسرعان ما اتضحت فائدته، كمصدر للأخبار والترفيه والمعلومات في حالات الطوارئ، منذ أن ظهر قبل أكثر من 60 عاماً. وإذ توفر الإذاعة التلفزيونية للأرض في الوقت الحاضر تغطية لسكان في العالم يبلغ عددهم المليارات فقد أصبحت واحداً من أشيع استخدامات الطيف الراديوي في كل مكان.

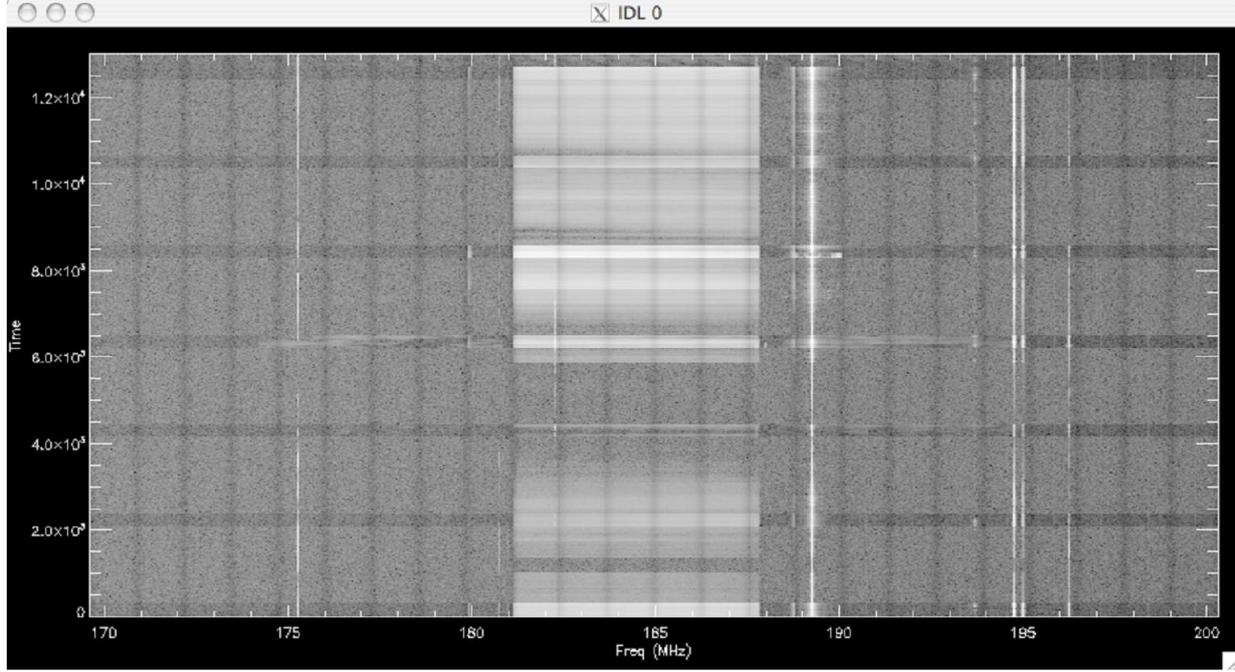
ومع أن خدمة الفلك الراديوي لا تتقاسم أي توزيعات مع الإذاعة التلفزيونية للأرض فإن هذه الإرسالات تحتل عموماً قدرًا من الطيف في غاية الأهمية بالنسبة للفيزياء الفلكية منخفضة التردد ورصد الهيدروجين المحايد (HI) المزاح نحو الأحمر الناشئ عن الحقب المبكرة في تشكيل الكون. وقد استخدم علماء الفلك الراديوي حتى الآن نطاقات التلفزيون لإجراء الرصدات، وفقاً للرقم 4.4 من لوائح الراديو.

وفي الوقت الحاضر، ثمة العديد من البلدان في طور الانتقال من الإذاعة التلفزيونية التماثلية إلى معايير الإذاعة التلفزيونية الرقمية وبعضها يعكف أيضاً على مراجعة توزيعاتها الإذاعية لاسترداد الطيف الذي من المتوقع أن يتحرر بفضل ما يسمى "المكاسب الرقمية". ومن المرتقب أن تؤدي بعض جوانب التحول الرقمي إلى انخفاض في قدرة علماء الفلك الراديوي على الاستفادة من نطاقات الإذاعة التلفزيونية للأرض لعمليات الرصد التي تجرى حالياً على أساس عدم الحماية (انظر الشكل 3.6). وقد تفضي بعض الجوانب إلى تحسين القدرة على إجراء رصدات سلبية في النطاقات الموزعة للإذاعة التلفزيونية.

وتوجز الأقسام التالية أدناه خطط الانتقال إلى التلفزيون الرقمي للعديد من البلدان في جميع أنحاء العالم إلى جانب برامج الفلك الراديوي الراهنة العاملة ضمن نطاقات مستخدمة للإذاعة التلفزيونية للأرض، وبالنسبة للبلدان ذات الأهمية الاستراتيجية لمخطات الفلك الراديوي في المستقبل وهي في الوقت الحاضر قيد التصميم والتطوير وتعتزم استخدام هذه النطاقات. كما تناقش أثر قواعد الخدمة للتلفزيون الرقمي على استخدام نطاقات الإذاعة التلفزيونية بالنسبة لخدمة الفلك الراديوي.

الشكل 3.6

مثال لأثر الإشارات التلفزيونية الرقمية مقارنةً بالتلفزيون التماثلي. الأطياف مستخرجة في موقع فلك راديوي خلال فترة وجيزة من الانتشار المعزز للغاية. الإشارات التلفزيونية صادرة من موقع يبعد حوالي 290 كيلومتراً



Radio-Astro_63

الإشارة الرقمية في المدى MHz 188-181 "تملاً" الطيف على نحو أغزر بكثير مما تفعله إشارات التلفزيون التماثلي التي تحتل النطاقات 181-174 و 195-188 و MHz 202-195 والتي تتركز أطيفها في حاملات فيديو وتلونية وسمعية منفصلة.

1.2.4.6 أستراليا

أعلنت الحكومة الأسترالية عن برنامج للتحويل من البث التماثلي إلى البث الرقمي. ومن المزمع تشغيل التلفزيون الرقمي ضمن النطاقات الموزعة لخدمات الإذاعة الموجودة في النطاقات الثالث (MHz 230-174) والرابع (MHz 582-526) والخامس (MHz 820-582). وقد حُطت لخدمات الإذاعة التلفزيونية الأسترالية للأرض على قناة تنقيطية بتردد 7 MHz في كل من نطاقي الموجات المترية VHF والديسيمترية UHF. ومن المخطط أن تكون القدرة المشعة الفعالة (e.r.p.) للخدمات الرقمية في أستراليا عموماً أقل بمقدار 6 dB مما هي لخدمات التلفزيون التماثلية في نفس النطاق.

وليس هنالك من مخصصات أسترالية لخدمة الفلك الراديوي في هذه النطاقات، ولذلك تقام التليسكوبات الراديوية في المناطق قليلة السكان لتقليل احتمال التداخل من مختلف نظم الاتصالات الراديوية، بما في ذلك الإذاعية. ويرصد التليسكوب الراديوي Parkes حالياً في النطاق MHz 764-700 على أساس عدم الحماية من التداخل. وتليسكوب صيف الكيلومتر المربع (SKA) الأسترالي Pathfinder (ASKAP)، المخطط لتشغيله منذ عام 2013، له مدى تردد تشغيل من 700 إلى MHz 1 800. وعلاوة على ذلك، فإن أستراليا موقع محتمل للتلسكوب SKA.

2.2.4.6 البرازيل

من المقرر، في البرازيل، التحويل من جميع نظم الإذاعة التلفزيونية التماثلية للأرض في 29 يونيو 2016. وبعد المرحلة الانتقالية، تكون كل الإرسالات فقط في مجال الموجات الديسيمترية UHF، MHz 806-470.

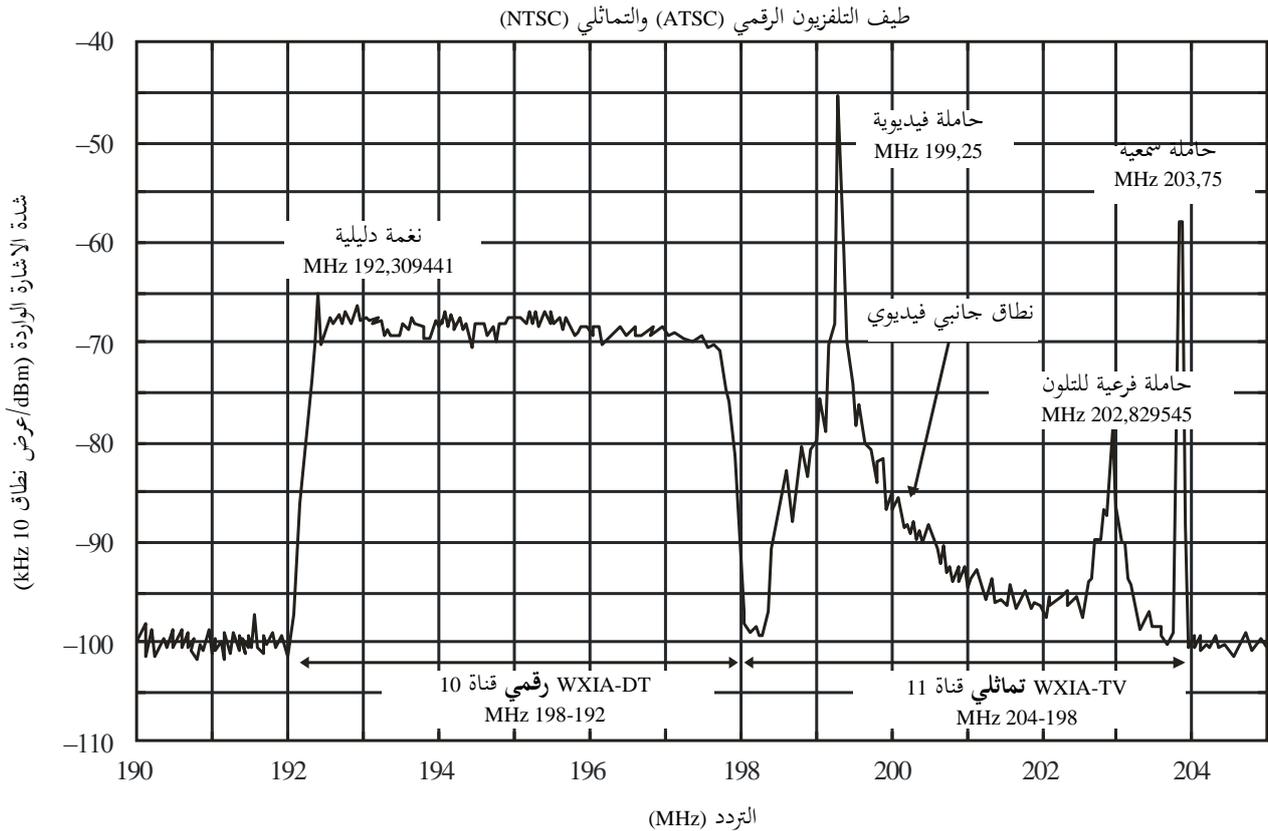
وبالمقارنة مع جدول التعيينات للتلفزيون التماثلي، فإن عدداً قليلاً جداً من محطات التلفزيون الرقمي سوف يشغل الجزء الأخفض من الموجات المترية VHF مقارنة بما كان عليه الحال قبل الانتقال. ومن شأن ذلك عموماً أن يحسن من إمكانية استخدام كل من المدى MHz 72-54 والمدى MHz 88-76 لرصدات خدمة الفلك الراديوي غير المحمية، مع أن هذا يتوقف تحديداً على قرب المحطات في القنوات 2 إلى 6 من محطة فلك راديوي معينة.

ويكون إجمالي قدرة البث اللازمة لنظم التلفزيون الرقمية أقل بعض الشيء من القدرة المطلوبة لتغطية البث التلفزيوني التماثلي السابق، بعامل حوالي اثنين (للموجات المترية VHF) وخمسة (للموجات الديسيمترية UHF). وبالإضافة إلى ذلك، فإن الحدود المفروضة على الإرسالات غير المطلوبة من محطات التلفزيون الرقمي محددة على نحو أفضل. وفيما بعد MHz 6 من حافة النطاق، يجب أن يكون التوهين بمقدار dB 110 على الأقل.

يقارن الشكل 5.6 مباشرة الإشارة التماثلية لنظام NTSC والإشارة الرقمية لنظام ATSC المقابلة المرسل من نفس المحطة على نفس البرج، وذلك باستخدام القنوات التلفزيونية المجاورة.

الشكل 5.6

مقارنة مباشرة بين طيف التلفزيون الرقمي ATSC المكافئ (يسار) وطيف التلفزيون NTSC التماثلي (يمين)
المرسل من نفس المحطة ومن نفس البرج وفي نفس الوقت



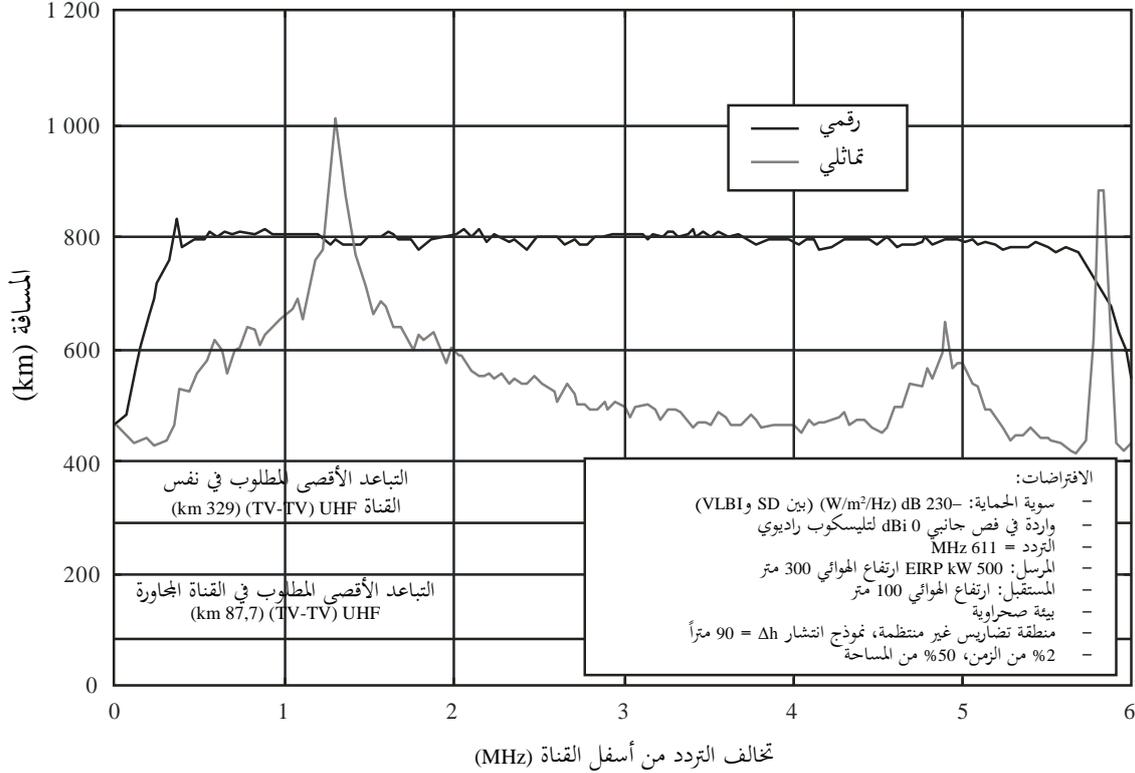
Radio-Astro_65

على الرغم من أن قدرة الإشارة الرقمية أقل نوعاً ما من نظيرتها التماثلية، فإن الإشارة التماثلية تتركز بشدة في حاملات المكونات الثلاث. وعلى مدى أكثر من 94% من الطيف، تتجاوز كثافة القدرة الطيفية الرقمية نظيرتها في الإشارة التماثلية بما يصل إلى عامل 100 (> 30 dB). ولهذا السبب، من المتوقع، بعد استكمال الانتقال إلى التلفزيون الرقمي، أن تنطوي إشارة رقمية في محطة تلفزيون ما على تحدٍ أكبر أمام الاستخدام الانتهازي للنطاق من جانب خدمة الفلك الراديوي بالمقارنة مع سلف المحطة

التمائلي. ومن باب التوضيح، يقارن الشكل 6.6 الفاصل المقدر المطلوب من إشارتي التلفزيون التماثلية والرقمية لمراعاة سويات التداخل الضار المستخرجة في التوصية ITU-R RA.769.

الشكل 6.6

مسافة التباعد الدنيا بين محطات التلفزيون الرقمي والتمائلي لمراعاة أهداف تداخل خدمة الفلك الراديوي في ظل افتراضات معينة



Radio-Astro_66

مواد التلفزيون الرقمي هذه مقتطفة من التقرير ITU-R RA.2195، حيث هنالك المزيد من التفصيل.

3.4.6 التداخل من الإرسالات الساتلية

تنطوي الإرسالات الساتلية على إمكانية التسبب في تداخل شديد في خدمة الفلك الراديوي. ولئن كانت مصادر التداخل على الأرض عادةً في منطقة الفص الجانبي البعيدة لهوائي التليسكوب الراديوي، وربما متواهنة أكثر جراء التضاريس المحيطة بالمرصد الراديوي، فإن من المرجح أن يأتي التداخل من المرسلات الساتلية عبر الفصوص الجانبية الداخلية، مع كسب أعلى بكثير. وتتوقف طبيعة التداخل على نوع المرسل والخدمة التي يقدمها النظام، وما إذا كانت السواتل في مدارات مستقرة أم غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض، وعدد السواتل في النظام قيد النظر التي تكون فوق الأفق من منظور المرصد الراديوي. وجدير بالملاحظة أن مشاكل التداخل المرتبطة بالإرسالات من السواتل تنطبق أيضاً إلى حد كبير على الإرسالات من الطائرات.

1.3.4.6 السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض

ثمة العديد من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض المرئية من جميع التليسكوبات الراديوية تقريباً العاملة حالياً، وهي تحتل الحزام الساتلي عبر السماء المستقر بالنسبة إلى الأرض. ويبلغ نصف قطر المدار المتزامن مع الأرض حوالي 6,6 أضعاف نصف قطر الأرض. وفي هذه المسافة يمكن لساتل واحد أن يغطي ثلث سطح الأرض، وبالتالي يغطي العديد من التليسكوبات الراديوية، مع إشارات في خط البصر. ويبين الشكل 3.4 موقع حزام السواتل المتزامن مع الأرض في الإحداثيات السماوية كما يُرى من خطوط

العرض لبعض مرصد الفلك الراديوي الرئيسية. وتستدعي الخطط الرامية إلى تطوير بعض الخدمات النشطة عدداً كبيراً من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ومن شأن سلسلة من هذه المصادر المحتملة للتداخل التي يمكن استقبالها عبر الفصوص الجانبية القريبة لمخطط هوائي تليسكوب راديوي أن تمثل مشكلة تداخل فريدة لعلماء الفلك الراديوي.

ويرد في التوصية ITU-R RA.769 تحديد عتبات التداخل الضارة في خدمة الفلك الراديوي. ويدرج في هذه التوصية، في كل من نطاقات خدمة الفلك الراديوي، سوية القدرة التي تدخل المستقبل التي تكفي بالكاد لأن تسبب التداخل الضار. كما يدرج فيها أيضاً مقادير كثافة تدفق القدرة ($dB(W/m^2)$) التي تسبب التداخل الضار، والتي تحسب مع افتراض أن كسب التليسكوب الراديوي هو 0 dBi في اتجاه مصدر التداخل. وهذا الكسب مناسب للنظر في مصادر الأرض للتداخل التي تقتصر على المنطقة القريبة من الأفق. أما بالنسبة لحالة المصادر المستقرة بالنسبة إلى الأرض فإن الوضع مختلف.

وإذا افترضنا أن هوائي الفلك الراديوي له خصائص الفص الجانبي المفترضة في التوصية ITU-R SA.509 فإن كسب الفص الجانبي ينخفض حتى 0 dBi عند 19° من محور الحزمة الرئيسية. وبالنسبة لهوائي من هذا القبيل سوف يتم تجاوز سوية التداخل الضار إذا كانت الحزمة الرئيسية مسددة ضمن 19° من ساتل ينتج داخل عرض نطاق خدمة الفلك الراديوي كثافة تدفق قدرة عند المرصد الراديوي تساوي العتبة الضارة المحددة في التوصية ITU-R RA.769. ومن شأن سلسلة من السواتل متباعدة بحوالي 30° على طول مدار ساتلي مستقر بالنسبة إلى الأرض يشع تداخلاً عند هذه السوية أن تؤدي إلى منطقة عرض بحوالي 38° متمركزة على المدار الذي يستبعد منه رصد الفلك الراديوي الخالي من التداخل الضار. ويزداد عرض هذه المنطقة المستبعدة بتزايد عدد السواتل المتداخلة في المدار ويمكن، من حيث المبدأ، أن تغطي السماء كلها. ويتوقف عدد السواتل المتداخلة الفعال على ما إذا كانت الإشارات المتداخلة تقع في حزم هوائيات الإرسال في السواتل أو أنها تشع على نطاق أوسع. ومن المرجح أن يكون البث خارج النطاق غير المفصول بمسافة واسعة عن تردد مرسل الساتل موجهاً من جانب الهوائيات على نحو مماثل لتوجيه الإشارات المقصودة. وقد تشع الإرسالات غير المطلوبة، المتباعدة على نحو أكبر من حيث التردد، مثل التوافقيات، على نطاق أوسع ولكن من الممكن إزالتها بسهولة أكبر من خلال الترشيح في جهاز الإرسال.

وينطوي حل مشكلة التداخل من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض بوضوح على حل وسط بين مساحة السماء المحجوبة عن رصدات الفلك الراديوي وصعوبة كبت الإرسالات غير المطلوبة من المرسلات الساتلية. ويبين الشكل 3.4 أن موقع المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض في السماء، كما يرى من الأرض، يتغير بنحو 10° عندما تنتقل من مرصد في أحد نصفي الكرة الأرضية إلى الآخر. وهكذا إذا أمكن إجراء رصدات ضمن 5° من مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض، فإن من الممكن رصد كل موقع في السماء من مرصد قائم واحد على الأقل، شريطة أن يكون مجهزاً بشكل مناسب لذلك الرصد المعين. ويناقش في الفصل 4 استحسان الحد من الإرسالات الهامشية لتمكين رصدات الفلك الراديوي ضمن 5° من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض.

ويقوم هذا النقاش بشأن الإشعاع من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض على افتراض أن المدارات تقع في المستوي الاستوائي للأرض. ومع ذلك، ولأغراض تنسيق الترددات، فإن تعريف السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض يشمل جميع السواتل المتزامنة مع الأرض بزوايا ميل أقل من 15° . ويتوقف تأثير الميل المداري على اعتبارات تنسيق الترددات لخدمة الفلك الراديوي على توزيع زوايا الميل لتلك السواتل التي هي مصادر محتملة للتداخل.

2.3.4.6 السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض

يتفاهم احتمال التداخل الضار من المدارات المنخفضة (LEO) غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض بتشغيلها بأعداد كبيرة، الأمر الذي يمكن وقوع الكثير منها في وقت واحد فوق الأفق من منظور مرصد راديوي، وضمن خط البصر لهوائي تليسكوب راديوي. وهذا يؤدي إلى حالة يتلقى فيها هوائي التليسكوب الراديوي إرسالات غير مطلوبة من تلك المدارات LEO المرئية وغير المستقرة بالنسبة إلى الأرض عبر الفصوص الجانبية القريبة والبعيدة في حزمة الهوائي، وكذلك من خلال الحزمة الرئيسية. وتزداد مشكلة التداخل تعقيداً باستمرار تغير اتجاهات وصول إشارات التداخل، والحاجة إلى أن يتتبع هوائي التليسكوب الراديوي المصدر السماوي قيد الرصد. وقد تدفع مدخلات متعددة من إشارات قوية نقطة التشغيل في المستقبل إلى منطقة غير خطية، مما يؤدي إلى توليد نواتج تشكيل بيئي.

ويمكن تحديد أثر الإرسالات غير المطلوبة في مواقع الفلك الراديوي بواسطة كوكبة من السواتل في مدارات (منخفضة) غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض باستخدام منهجية كثافة تدفق القدرة الطيفية (epfd) التي ورد وصفها في التوصية ITU-R S.1586 - حساب سويات الإرسال غير المطلوب التي يولدها نظام سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض تابع للخدمة الثابتة الساتلية في مواقع علم الفلك الراديوي، أو التوصية ITU-R M.1583 - حسابات التداخل الناجم عن نظام سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض للخدمة المتنقلة الساتلية أو خدمة الملاحة الراديوية الساتلية عند مواقع تليسكوب الفلك الراديوي، وكسوب الهوائيات الواردة في الملحق 1 بالفصل 4.

ويمكن استخدام هذه التوصيات لتحديد النسبة المئوية من البيانات المفقودة أثناء الرصدات الجارية في موقع معين في خدمة الفلك الراديوي بسبب التداخل من نظام ساتلي معين. وتحدد النسبة المئوية القصى المقبولة من البيانات المفقودة في التوصية ITU-R RA.1513.

1.2.3.4.6 مثال لإرسالات غير مطلوبة من خدمة ثابتة ساتلية

النطاق GHz 10,7-10,6 موزع إلى خدمة الفلك الراديوي على أساس أولي؛ والنطاق الفرعي GHz 10,7-10,68 موزع حصراً إلى الخدمات المنفصلة (تنطبق الحاشية رقم 340.5 من لوائح الراديو، وتدرج عدداً من النطاقات التي يحظر ضمنها جميع الإرسالات). وقد استخدم النطاق بنجاح لرصد التواصل الراديوي للإرسال الراديوي المجري وخارج المجري، بما في ذلك خصائص الاستقطاب، ولبحوث النجوم النابضة.

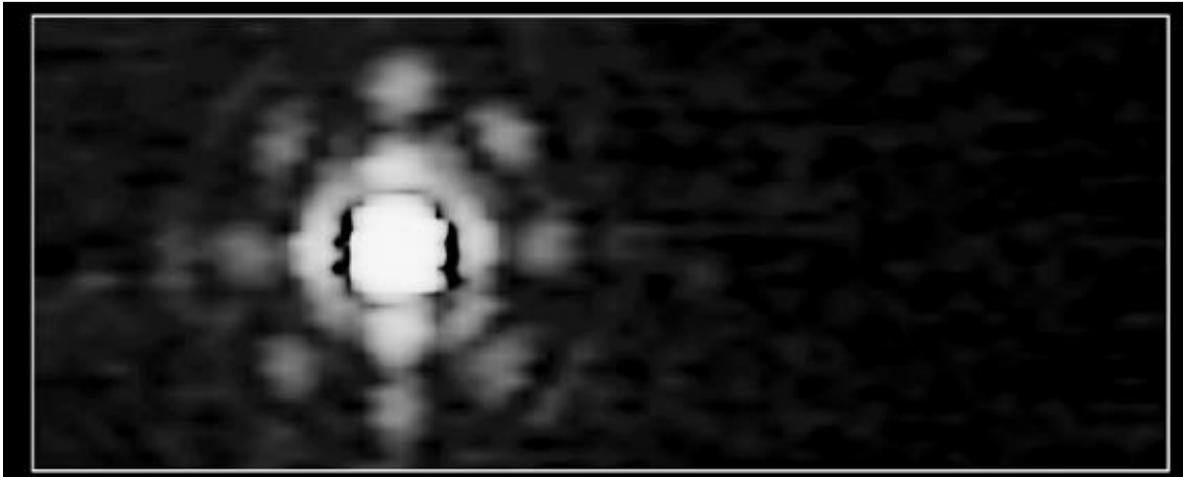
والنطاق GHz 11,7-10,7 موزع إلى الخدمة الثابتة الساتلية على أساس أولي. ويتم استخدام النطاقين GHz 10,95-10,7 (فضاء-أرض) و GHz 11,45-11,2 (فضاء-أرض) في نظم الخدمة الثابتة الساتلية المستقرة بالنسبة إلى الأرض وفقاً لأحكام المادة 10 من التذييل 30B من لوائح الراديو.

وفيما يلي أدناه وصف لحالة تداخل في عمليات خدمة الفلك الراديوي، تنطوي على نظام ساتلي معين في الخدمة الثابتة مستقر بالنسبة إلى الأرض.

ويبين الشكل 7.6 نتائج قياس خدمة فلك راديوي في تردد GHz 10,6 في تليسكوب Effelsberg الراديوي بقطر 100 متر، مسدد نحو 3C84، أحد أقوى المصادر الراديوية الكونية شبيهة النقطة. وقد تم هذا القياس قبل عام 1995. وحجم المجال هو 30×12 دقيقة قوسية، وكثافة التدفق من المصدر هي 20,5 $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1})$ (-247 dB). وتمثل البنية المرئية الحزمة الرئيسية والفصوص الجانبية للتليسكوب الراديوي.

الشكل 7.6

خارطة المصدر 3C84 خارج المجرة في النطاق GHz 10,7-10,6 بواسطة تليسكوب راديوي Effelsberg قطره 100 متر

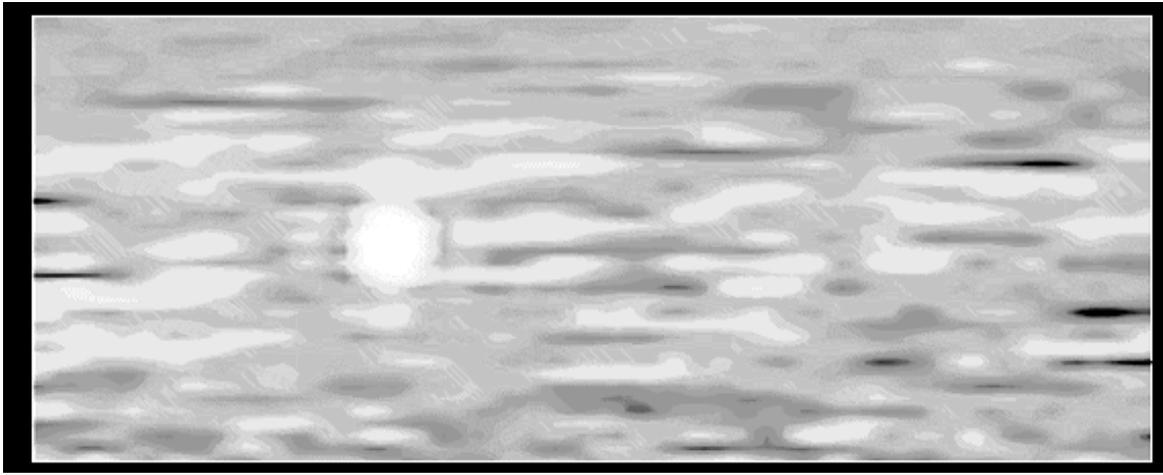


وبعدئذ وضع حيز التنفيذ، في عام 1995، ساتل في الخدمة الثابتة الساتلية مستقر بالنسبة إلى الأرض في موقع مداري معين، حيث كانت سواتل أخرى تعمل منذ فترة من الزمن. ويبلغ تردد الإرسال المركزي الأدنى للساتل 10,714 GHz وعرض النطاق الترددي للمرسل المستجيب 26 MHz. وكان تقلب الضوضاء الناتجة عن انبعاثات الخدمة الثابتة الساتلية غير المطلوبة من ذلك الموقع المداري إلى نطاق خدمة الفلك الراديوي المجاور 10,6-10,7 GHz قوي جداً بحيث حجب تماماً أي إشارات فلكية.

ويبين الشكل 8.6 خارطة بما يستتبع ذلك في نفس المجال 12×30 دقيقة قوسية من السماء كما هو مبين في الشكل 7.6 ولكنها رسمت بعد وضع الساتل حيز التنفيذ في عام 1995، وموقعه المداري متباعد بمقدار 10° من المجال المرسوم من السماء. وقد اكتُشِح مصدر النقطة القوية جداً 3C84 بسبب سوية التداخل ولم يعد من الممكن تمييزه بوضوح بمثابة مصدر كوني.

الشكل 8.6

خارطة نفس المجال السماوي كما في الشكل 7.6، ولكن مع تداخل وارد من تليسكوب Effelsberg الراديوي



Radio-Astro_68

وللتحقيق في قضية التداخل هذه، عمدت محطة رصد السواتل في Leeheim التابعة لهيئة التنظيم الألمانية إلى قياس طيف من إرسالات الخدمة الثابتة الساتلية من الموقع المداري الساتلي المعين (انظر الشكل 8.6)، من أجل تحديد سوية الانبعاثات غير المطلوبة الداخلة في نطاق خدمة الفلك الراديوي. ومع ذلك، لا بد من الإشارة إلى أن الحساسية والمدى الدينامي لمحطة الرصد لم يكونا في ذلك الوقت كافيين للتحقق من التداخل في السويات المعينة كمعايير حماية لخدمة الفلك الراديوي في التوصية ITU-R RA.769.

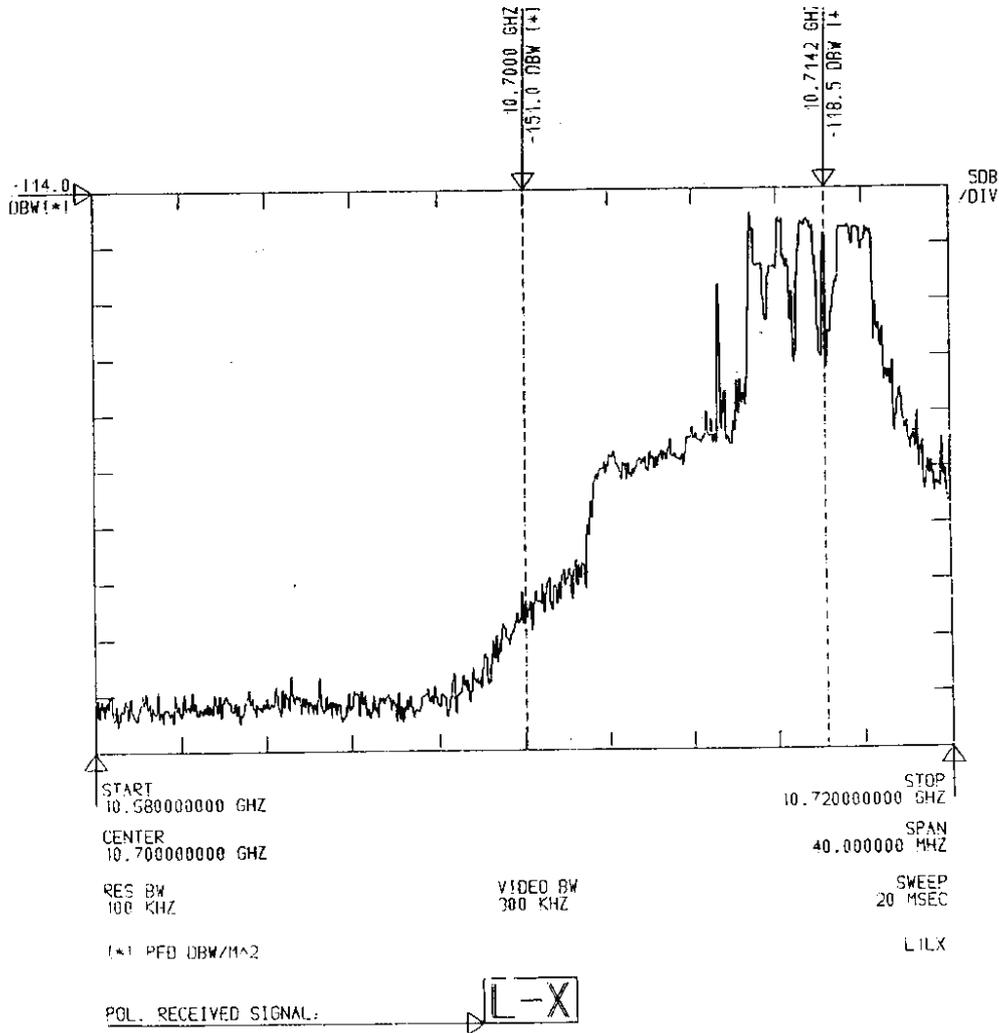
ويبدو من الشكل 9.6 أن سوية الإرسالات غير المطلوبة، في توزيع خدمة الفلك الراديوي على حافة التردد 10,7 GHz في النطاق الحصري المنفعل، بلغت $151 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ في عرض نطاق مرجعي قدره 100 kHz. وهذا يقابل $201 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$ في حين تعطي التوصية ITU-R RA.769 سوية أخفض بمقدار 39 dB، أي $240 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$ بمثابة عتبة التداخل. وعلاوة على ذلك، من المستحسن وضع حدود في مجال 12-15 dB أكثر صرامة في حالة السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض، كما نوقش في البند 3.7.4. ويحدث هذا التفاوت الكبير عند الحافة العالية من النطاق 10,6-10,7 GHz، وهو أخفض في باقي النطاق.

واعتباراً من حافة النطاق 10,7 GHz إلى ما يقرب من 10,69 GHz، حيث تصل إشارة التداخل إلى سوية ضوضاء الخلفية لمحطة الرصد Leeheim (كثافة تدفق القدرة ~ $160 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$)، يكون تدني الإشارة حوالي 10 dB لكل 4 MHz. وإذا افترضنا أن معدل التدني هذا يستمر حتى 10,6 GHz، فإن إجمالي القدرة المقدرة المنبعثة من الموقع المداري في النطاق 10,6-10,7 GHz هو $145,6 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ ، أي بمقدار 14,4 dB فوق العتبة $160 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ المحددة في التوصية ITU-R RA.769 لهذا النطاق. وهكذا، يصبح كامل النطاق 10,6-10,7 GHz غير صالح إطلاقاً لرصدات الفلك الراديوي، كما هو مبين في الشكل 8.6.

وقد نُقل ساتل الخدمة الثابتة الساتلية هذا إلى موقع آخر ولم يعد يؤثر على رصدات تليسكوب Effelsberg.

الشكل 9.6

قياس تداخل الخدمة المتنقلة الساتلية في مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض
جرى في محطة رصد Leeheim (1995)



Radio-Astro_69

3.3.4.6 حالات ممكنة من تداخل توافقيات من السواتل

1.3.3.4.6 إشعاع التوافقيات الثانية في النطاق GHz 24,0-23,6 الوارد من السواتل الإذاعية

هناك أسلوب ممكن من التداخل في خدمة الفلك الراديوي وهو إشعاع التوافقيات الثانية من السواتل الإذاعية في النطاق GHz 12,5-11,7. ويتضمن المدى التوافقي GHz 25,0-23,4 النطاق الحصري المنفعل GHz 24,0-23,6. وبالنسبة للإقليمين 1 و3، يحدد الملحق 3 من التذييل 30 من لوائح الراديو، من أجل الاستقبال الإفرادي، الحد الأدنى من كثافة تدفق القدرة في النطاق GHz 12,5-11,7 بمقدار $103 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ عند حافة منطقة التغطية، وتكون كثافة تدفق القدرة في وسط منطقة التغطية عادةً $100 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$. وتنطبق هذه القيم من كثافة تدفق القدرة على كل قناة من الخدمة الإذاعية الساتلية. وقد يصل إجمالي كثافة تدفق القدرة داخل النطاق GHz 12,0-11,8 إلى قيمة $91 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$.

ووفقاً للجدول 1.4، يحدث التداخل الضار بخدمة الفلك الراديوي من أجل إشارات أكبر من $147 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ في عرض نطاق 400 MHz في تردد 24 GHz. ومن ثم، وبالنسبة لكسب في الفص الجانبي قدره 0 dBi لهوائي الفلك الراديوي، يكون الكبت المطلوب للتوافقيات الثانية هو 56 dB، وهو ما يمكن تحقيقه في تقنيات التصميم القائمة.

2.3.3.4.6 إشعاع التوافقيات الثانية بالقرب من 22.2 GHz من الخدمة الثابتة الساتلية

ثمة حالة مماثلة لتلك التي نوقشت في البند 1.2.3.4.6 من أجل نطاق بخار الماء في خدمة الفلك الراديوي عند تردد 22,2 GHz، ولكن كثافات تدفق القدرة المسموح بها في الأرض من المرسلات في الخدمة الثابتة أخفض مما هي في الخدمة الإذاعية الساتلية، ومن ثم فإن مشكلة التداخل أقل حدّة. وهذا ينطبق أيضاً على النطاقين المنفصلين 15,4-15,35 GHz و 164-168 GHz، اللذين يحتويان أيضاً على توافقيات ثانية من الترددات الموزعة للإرسالات فضاء-أرض.

3.3.3.4.6 إشعاع التوافقيات الثانية في النطاق 4 990-5 000 MHz من نطاق خدمة الاستدلال الراديوي الساتلية والخدمة المتنقلة الساتلية

تم توزيع النطاق 2 500-2 483 MHz إلى خدمة الاستدلال الراديوي الساتلية والخدمة الساتلية المتنقلة لإرسالات الوصلة الهابطة من السواتل إلى وحدات المستعمل. وتمتد التوافقيات الثانية لهذه الإرسالات عبر نطاق خدمة الفلك الراديوي على صعيد العالم 4 990-5 000 MHz (في الأرجنتين وأستراليا وكندا). وتكون العتبة الضارة للتداخل في خدمة الفلك الراديوي في النطاق 4 990-5 000 MHz هي $-171 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ من الجدول 1.4.

4.3.3.4.6 إشعاع التوافقيات الثالثة في النطاق 1 400-1 427 MHz من خدمة الأرصاد الجوية الساتلية

تستخدم بعض سواتل الأرصاد الجوية النطاق 460-470 MHz لاستجواب المنصات على الأرض للحصول على بيانات يتم ترحيلها بعد ذلك إلى مراكز جمع البيانات. وتقع التوافقية الثالثة لهذه الإرسالات فوق تردد 466 MHz ضمن نطاق خدمة الفلك الراديوي 1 400-1 427 MHz. وتستخدم لهذه الإرسالات قدرات تصل إلى 40 W. وبافتراض وجود ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض وكسب 0 dBi في هوائي الإرسال في التوافقية الثالثة، فإن كثافة تدفق القدرة عند نقطة الساتل الفرعي على الأرض هي $-146 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$. ومن أجل استقبال في كسب 0 dBi في الفصوص الجانبية لهوائي فلك راديوي يجب أن يكون كبت التوافقية 34 dB على الأقل نسبة إلى كثافة الإرسال الأساسية.

5.6 الإرسالات غير المطلوبة من تشكيل النطاق العريض

انظر التوصية ITU-R RA.1237 - حماية خدمة الفلك الراديوي من البث غير المرغوب فيه الناجم عن تطبيقات التشكيل الرقمي عريض النطاق.

1.5.6 استخدام التشكيل الرقمي عريض النطاق

في أنواع معينة من الإرسالات، غالباً ما تكون مرتبطة بالبيانات الرقمية، تتولد نطاقات جانبية طيفية عبر مدى تردد أعرض بكثير مما يستخدم في استقبال الإشارات. وعلى وجه الخصوص، تنتج التقنيات الرقمية لتشكيل الإبراق بزحزحة الطور طيف قدرة في شكل $[\sin(\pi x)/\pi x]^2$ مع حدود قصوى متكررة تابعة خارج النطاق المطلوب، وهي تتضاءل ببطء فقط بتزايد التردد. ومع أن الحد الأقصى المركزي من الطيف فقط يستخدم عموماً في الاستقبال في الخدمة المعنية، فإن النطاقات الجانبية تشع أحياناً دون ترشيح فعال. وينخفض غلاف النطاقات الجانبية غير المرشحة، على سبيل المثال، على مسافة 10 أضعاف عرض نطاق الطيف 3- dB من التردد المركزي، بمقدار 29 dB فقط دون سوية القدرة عند الحد الأقصى المركزي. وبالإضافة إلى ذلك، إذا كان تردد إبراق الإرسال بواسطة الإبراق بزحزحة الطور الإثيني (BPSK) هو 10-20 MHz، عندئذ تمتد عروض النطاق العشرة هذه على عدة مئات وحدات MHz حول التردد المخصص. لننظر مثلاً في مرسل BPSK بسيط غير مرشح بتردد إبراق 10 MHz متمركز على 1 615 MHz وقدرة خرج 40 W يشع من خلال هوائي متناح على متن طائرة. وعلى مسافة 400 كيلومتر خط البصر من مرصد، تؤدي النطاقات غير المطلوبة إلى سوية من كثافة تدفق القدرة عند الحدود الطيفية القصوى في نطاق خدمة الفلك الراديوي 1 400-1 427 MHz، أي 48 dB فوق سوية العتبة الضارة المقابلة في الجدول 1.4. وتكون الإرسالات في النطاقين 1 610,6-1 613,8 MHz و 1 660-1 670 MHz، الموزعين أيضاً لخدمة الفلك الراديوي، عند سوية أعلى بكثير.

ويستخدم الإبراق بزحزحة الطور (PSK) أيضاً في تشكيل تمديد الطيف بالتسلسل المباشر. وثمة خاصية مشتركة لمعظم تقنيات تمديد الطيف هي إشارة نطاق عريض ذات كثافة طيف قدرة منخفضة. وهذه الخاصية تقلل من احتمال الإرسالات التي تسبب التداخل في نظم اتصالات النطاق الضيق التقليدية، حيث المصلحة الوحيدة هي استرداد التشكيل من إشارة ما. وعلى النقيض من ذلك، ينصب الاهتمام في علم الفلك الراديوي على دقة قياس القدرة الواردة من مصادر طبيعية. وتتمتع الموجات الراديوية الكونية عموماً بخصائص الضوضاء العشوائية، ويجب في كثير من الأحيان أن تستخدم عروض نطاق واسعة في المستقبل لتوفير الحساسية المطلوبة. وهكذا، كثيراً ما لا تكون هناك أي وسيلة للتمييز بين إشارات تمديد الطيف والإشارات الكونية. وتنطبق العتبات الصارمة لكثافة تدفق القدرة للتداخل في خدمة الفلك الراديوي في الفصل 4 على الإرسالات غير المطلوبة وكذلك الإرسالات المتعمدة، وعلى جميع أنماط التشكيل بما في ذلك الأنماط التي نوقشت أعلاه.

2.5.6 تكوين شكل النبضات لتخفيض الإرسالات غير المطلوبة

يمكن تخفيض سويات الإرسالات غير المطلوبة من التشكيل الرقمي إلى حد كبير من خلال تكوين شكل النبضات، أي باستخدام أشكال من النبضات تتجنب التحولات الحادة شبه المستطيلة في الاتساع أو الطور. وثمة نظرية من تحويلات Fourier تشير إلى أنه إذا أصبح شكل الإشارة كدالة للزمن نبضياً عند المشتق ذي الترتيب n ، عندئذ تتراجع النطاقات الجانبية في طيف القدرة بمعكوس التردد مرفوعاً إلى القوة $2n$. وفي حالة نبضات مستطيلة في المجال الزمني، تصبح دالة شكل الإشارة نبضية عند أول مشتق ($n = 1$)، وتتراجع النطاقات الجانبية في شكل f^{-2} ، كما في شكل جيب التربيع المذكور أعلاه. وكمثال على تكوين شكل النبضة لنظر في حالة النبضات التي تستبدل فيها التحولات المستطيلة لوحدة الاتساع بمقدار $[1 + \sin(x)]/2$ حيث تذهب x خطياً من $-\pi/2$ إلى $\pi/2$ من أجل التحولات الموجبة ومن $\pi/2$ إلى $-\pi/2$ من أجل التحولات السالبة. ويصبح شكل الموجة النبضية الناتجة عند المشتق الثالث، ولذلك يتراجع طيف القدرة في شكل f^{-6} . وقد جاء التبرير على هذه النتيجة في [Ponsonby, 1994]. وهكذا، مثلاً، عند تردد ينخفض فيه غلاف طيف القدرة إلى -20 dB نسبةً إلى الحد الأقصى لنبضات مستطيلة الشكل، كان يمكن أن ينخفض إلى -60 dB بحسب تكوين الشكل الجيب الموصوف لتوه. وهذه النتيجة مفيدة للغاية، نظراً لتخفيض المدى الطيفي إلى حد كبير، إذ يمكن أن تكون الإرسالات غير المطلوبة الناجمة عن التشكيل ضارة بخدمة الفلك الراديوي. وقد ورد وصف العديد من الأشكال العملية الأخرى لتخفيض الإرسالات غير المطلوبة، من ذلك مثلاً الإبراق بأدنى زحزحة بمرشاح غوسي (GMSK) [Murota and Hirade, 1981؛ Otter, 1994].

ولا يكون استخدام تقنيات التشكيل الرامية إلى تقليل الإرسالات غير المطلوبة فعالاً إلا إذا كانت مراحل تضخيم القدرة بعد المشكال خطية بما فيه الكفاية لتجنب توليد إرسالات غير مطلوبة كمنتجات تشكيل بيني. وهذه مشكلة خاصة بالنسبة للإرسالات الساتلية التي قد تؤدي فيها الحدود المفروضة على الطاقة الكهربائية إلى تعظيم كفاءة الإرسال على حساب الخطية. وفي بعض سواتل الاتصالات يستخدم عدد من الحزم المختلفة لإرسالات الوصلة الهابطة لتمكين إعادة استخدام التردد. وتشكل الحزم بتحديد الطور المناسب لعدد كبير من العناصر المشعة، يدفع كل منها مضخم قدرة منفصل. ولا يعتبر ترشيح الإشارات المضخمة لإزالة الإرسالات غير المطلوبة عملياً دائماً في هذه الحالات.

3.5.6 مثال للتداخل من تشكيل عريض النطاق

كانت سلسلة سواتل الاستدلال الراديوي في النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS) [Daly, 1988؛ Ponsonby, 1991]، مصدر تداخل في رصدات خدمة الفلك الراديوي في النطاقين 1 610,6-1 613,8 MHz و 1 660-1 670 MHz منذ منتصف الثمانينيات [Galt, 1990]. ويشمل النظام المنشور بالكامل 24 ساتلاً في ثلاثة مستويات مدارية. وكان من المزمع في البداية استخدام 24 قناة إرسال لها ترددات مركزية متباعدة بمسافة 0,5625 MHz من 1 602,5625 MHz إلى 1 615,5 MHz. ويحدث التداخل من السواتل التي لها قنوات بعيدة خارج نطاقات خدمة الفلك الراديوي نتيجة النطاقات الجانبية من تشكيل تمديد الطيف. وتُظهر النطاقات الجانبية بنية في طيفها الترددي يتكرر على مسافات 0,511 و 5,11 MHz ناتجة عن ترددات الإبراق في تشكيلات الشفرة المنخفضة الدقة والشفرة العالية الدقة على التوالي. والبنية الرئيسية في النطاقات الجانبية هي سلسلة من القيم العظمى المتباعدة بمقدار 5,11 MHz، وتنوءات ضيقة في التردد تحدث في بعض القيم الصفرية. وتصادف بعض التنوءات الصفرية عند ترددات بعيدة عن قناة الإرسال بقدر ما هو بعيد نطاق الفلك الراديوي 1 660-1 670 MHz.

وقد أجرت إدارة النظام العالمي للملاحة الساتلية (GLONASS)، بالتعاون مع اللجنة المشتركة بين الاتحادات والمعنية بتخصيص ترددات لعلم الفلك الإشعاعي وعلوم الفضاء (IUCAF)، سلسلة متوالية من الاختبارات في نوفمبر 1992. وأزيح التردد في السواتل التي تستخدم قنوات البث القريبة من النطاق 1 610,6-1 613,8 MHz أو توقفت على مراحل. وساعد 15 مرصداً في أنحاء العالم في تقييم آثار هذه التعديلات في نظام GLONASS على نوعية البيانات الفلكية. وشكل تقييم النتائج أساساً لاتفاقيات رسمية بين إدارة GLONASS واللجنة IUCAF والعديد من الحكومات الوطنية، الأمر الذي يصف حلاً شاملاً لمشكلة تداخل GLONASS في نطاقات خدمة الفلك الراديوي. ويتألف هذا الحل مما يلي:

- تخفيض عدد قنوات التردد المطلوبة باستخدام نفس القناة لسواتل في أماكن متقابلة؛
- والتحول النزولي في ترددات القناة المخصصة بعيداً عن نطاق الفلك الراديوي؛
- وتطبيق الترشيح فوق أول صفر في تمديد الطيف في قناة أعلى تردد.

ومنذ اتفاق GLONASS-IUCAF، لم تُطلق أي مركبة فضائية ذات قدرة تردد أعلى من 1 610 MHz، وكلها مزودة بمرشحات خارج النطاق؛ وبعد عام 1999 أزيلت الإرسالات الرئيسية في نطاق الفلك الراديوي 1 612 MHz. وتم الاعتراف صراحة بالاتفاق GLONASS-IUCAF في لوائح الراديو، حيث جاء في الجدول 1-2 من الملحق 1 بالقرار (Rev.WRC-07) 739 ما يلي: "لا ينطبق هذا القرار على التخصيصات الحالية والمستقبلية لنظام الملاحة الراديوية الساتلية GLONASS/GLONASS-M في النطاق 1 610-1 559 MHz بغض النظر عن تاريخ استلام معلومات التنسيق أو التبليغ ذات الصلة حسب الاقتضاء. وتُكفل حماية خدمة الفلك الراديوي في النطاق 1 610,6-1 613,8 MHz وستستمر وفقاً للاتفاق الثنائي بين الاتحاد الروسي والإدارة المبلّغة لنظام GLONASS/GLONASS-M ونظام IUCAF، وللاتفاقيات الثنائية اللاحقة مع إدارات أخرى".

4.5.6 مثال: تداخل راديوي من نظام IRIDIUM (HIBLEO-2) في الخدمة المتنقلة الساتلية

هذا القسم مقتبس من التقرير ECC 171 الصادر عن لجنة الاتصالات الأوروبية، الذي يحتوي على تفاصيل مستفيضة بشأن المنهجية والقياسات.

1.4.5.6 عمليات خدمة الفلك الراديوي في النطاق 1 610,6-1 613,8 MHz

النطاق 1 610,6-1 613,8 MHz موزع لخدمة الفلك الراديوي على أساس أولي. وهو يستخدم لرصدات الخطوط الطيفية لجذر الهيدروكسيل (OH). وانتقال جذر الهيدروكسيل في تردد السكون 1 612 MHz هو واحد من أهم الخطوط الطيفية في خدمة الفلك الراديوي، وهو مدرج على هذا الأساس في التوصية ITU-R RA.314. وكان جذر الهيدروكسيل أول جذر كوني تم الكشف عنه بالترددات الراديوية (1963) وما زال أداة بحث قوية. وفي حالته الأرضية ينتج جزيء OH أربعة خطوط طيفية، عند ترددات حوالي 1 612 و 1 665 و 1 667 و 1 720 MHz، وكلها لوحظت في أحوال انبعاث وامتصاص في مجرتنا، وكذلك في مجرات خارجية. وتوفر دراسة خطوط OH معلومات عن طائفة واسعة من الظواهر الفلكية، من قبيل تشكل النجوم البدائية وتطور النجوم. ولتفسير معظم رصدات الجزيء OH من الضروري قياس القوة النسبية للعديد من هذه الخطوط. وفقدان القدرة على رصد أي واحد من هذه الخطوط يمنع دراسة هذه الفئات من الظواهر الفيزيائية.

2.4.5.6 وصف الكوكبة IRIDIUM

للخدمة المتنقلة الساتلية (أرض-فضاء) توزيع في النطاق 1 610,0-1 626,5 MHz وللخدمة المتنقلة الساتلية (فضاء-أرض) توزيع ثانوي في النطاق 1 613,8-1 626,5 MHz. وتنص الحاشية 208B.5 على أن القرار (WRC-07) 739 ينطبق على النظم المقبلة المزمع تشغيلها في هذا النطاق.

ويشتمل نظام IRIDIUM على 66 ساتلاً في مدار منخفض حول الأرض (LEO) تدعم الاتصالات من مستعمل إلى مستعمل، ومن مستعمل إلى بوابة، ومن بوابة إلى بوابة. وتتوزع السواتل 66 بالتساوي في ستة مستويات مدارية ميلها 86,4°، وهنالك ساتل احتياطي في المدار لكل مستو مداري. وباستثناء المستويين 1 و6، تدور المستويات المدارية معاً متباعدة بمقدار 31,6° بعضها عن

بعض. ويبلغ تباعد المستويين المداريين الأول والأخير بمقدار 22° ويشكلان سطح تماس يتعكس فيه دوران السواتل. وتدور السواتل على ارتفاع 780 كيلومتراً وتبلغ فترتها المدارية ما يقرب من 100 دقيقة و28 ثانية.

وتتواصل السواتل في النطاق 1618,25-1626,5 MHz بواسطة معدات متنقلة خاصة على الأرض وفي الجو وتوفر خدمة اتصالات عالمية تصل إلى جميع المواقع على كوكبنا.

3.4.5.6 طبيعة وخصائص تداخل IRIDIUM

يوجز الملحق 6 في التوصية ITU-R SM.1633 (2003) التنبؤات النظرية التي أجريت في عام 1998 بشأن كوكبة Iridium (HIBLEO-2) في ظروف حمولة اصطناعية كاملة:

"2.4 حساب سوية التداخل

قُدّرت الانبعاثات غير المطلوبة من حيث كثافة تدفق القدرة الطيفية ($spfd$) الكلية للإرسالات الساتلية HIBLEO-2 في النطاق 1610,6-1613,8 MHz نظرياً بأنها تتراوح بين -214 dB(W/(m²/Hz)) و-223 dB(W/(m²/Hz)) في بعض مواقع خدمة الفلك الراديوي، في شروط تحميل كامل."

وينجم تداخل سائل IRIDIUM في النطاق 1610,6-1613,8 MHz عن منتجات التشكيل البيني من المرتبة السابعة التي يولدها السائل وليس عن فرط تحميل مستقبلات الفلك الراديوي. ويظهر تحليل أطياف التداخل في تليسكوب Effelsberg (تقرير اعتباراً من 2006.3.1) أن حاملتي Iridium الأساسيتين عند $f_1 = 1618,25$ MHz و $f_2 = 1620,25$ MHz تتجان التداخل المرصود عند 1612,25 MHz، وهو ما يقابل علاقة التشكيل البيني $f_1 - 3df = 4f_1 - 3f_2$ ويشير إلى وجود ناتج تشكيل بيبي من المرتبة السابعة، $7 = 3 + 4$. ولم يظهر أي دليل على وجود أي منتجات من مرتبة أدنى في الترددات 1,61425 GHz و 1,61625 GHz. ومن شأن المضخمات والحلاطات العادية أن تنتج نمط تداخل تتناقص فيه القدرة في منتجات التشكيل البيني بتزايد المرتبة. ومن الواضح أن كبت مراتب التشكيل البيني (3-5) المنخفضة هذه يجري من خلال معالجة الإشارات على متن السائل IRIDIUM بينما تبقى واضحة منتجات التشكيل البيني عالية المرتبة.

وتتمتع أحدث مضخمات الموجات الصغرية ومستقبلات الفلك الراديوي بنقاط اعتراض من المرتبة الثالثة (IIP_3) في المدى من -30 إلى -25 dBm. وليس بمقدور حاملة رئيسية بقيمة -178 dBm في سائل IRIDIUM (كما هو مرصود) أن تتسبب في تداخل ذاتي قابل للكشف في مقدمة مستقبل فلك راديوي. ويمكن شدة التداخل من تقدير اعتراض من المرتبة السابعة المرسل ساتلي بقيمة +19 dBW، وهي قريبة من قدرة مشعة مكافئة متناحية (e.i.r.p.) لسائل بقيمة +11 dBW. وهذا يشير إلى أن مرسل سائل دُفع إلى الانضغاط ينتج انبعاثات قوية خارج النطاق في جانبي نطاق IRIDIUM. وبالنسبة لبعض توزيعات قنوات الإرسال، تقع منتجات التشكيل البيني من المرتبة السابعة في نطاق خدمة الفلك الراديوي.

4.4.5.6 القياسات والتحقق

ثمة برنامج اختبار تعاوني، شاركت فيه هيئة HIBLEO-2 (Iridium) والمرصد الفلكي الراديوي الوطني (NRAO) في الولايات المتحدة في عام 1998، عمد إلى قياس قيم لكثافة تدفق القدرة الطيفية ($spfd$) تتراوح من -220 إلى -240 dB(W/(m²/Hz)) في هذه المواقع. وتشير هذه القيم إلى ما يسمى القنوات الصوتية التي تعمل عندما يحدث التواصل. وبالإضافة إلى ذلك، تبين أن نظام HIBLEO-2 يشع إشارات إذاعية في جميع الأوقات. وأظهرت أطياف قنوات البث الإذاعي 9-10 ذرى ضيقة (أقل من 40 kHz) ضمن نطاق خدمة الفلك الراديوي. وتبين أن متوسط قيم ذرى كثافة تدفق القدرة الطيفية يبلغ -227 dB(W/(m²/Hz)) على مدى 90 ملي ثانية. (المصدر: التوصية ITU-R SM.1633 (2003) كما ذكر في تقرير لجنة الاتصالات الأوروبية 171 ECC).

5.4.5.6 القياسات في محطة الرصد في Leeheim في الفترة 2010.6.9-8

تقع محطة الرصد الراديوي الفضائي Leeheim على بعد حوالي 35 كيلومتراً جنوب غرب مدينة فرانكفورت/ماين. وتشتمل محطة الرصد Leeheim على عدد من الهوائيات الساتلية بما فيها الهوائي العاكس المكافئ رقم 1 بقطر 12 متراً المصمم لتغطية مدى التردد 1-13 GHz الذي يجري به الرصد. ويسمح التسديد الزاوي عالي الدقة بتتبع دقيق للسواتل المتحركة.

وقد شارك في حملة القياس الرئيسية في Leeheim معهد MPIfR ومعهد ASTRON والوكالة BNetzA على سواتل Iridium يومي 8 و9 يونيو 2010. وأخذت القياسات مرة واحدة في الثانية في قنوات 6.1 kHz في المدى 1610,6-1613,8 MHz من 28 مرور ساتلي للكوكبة Iridium، المرصودة ما بين 08:30 و17:30 (بالتوقيت المحلي) على مدى يومين.

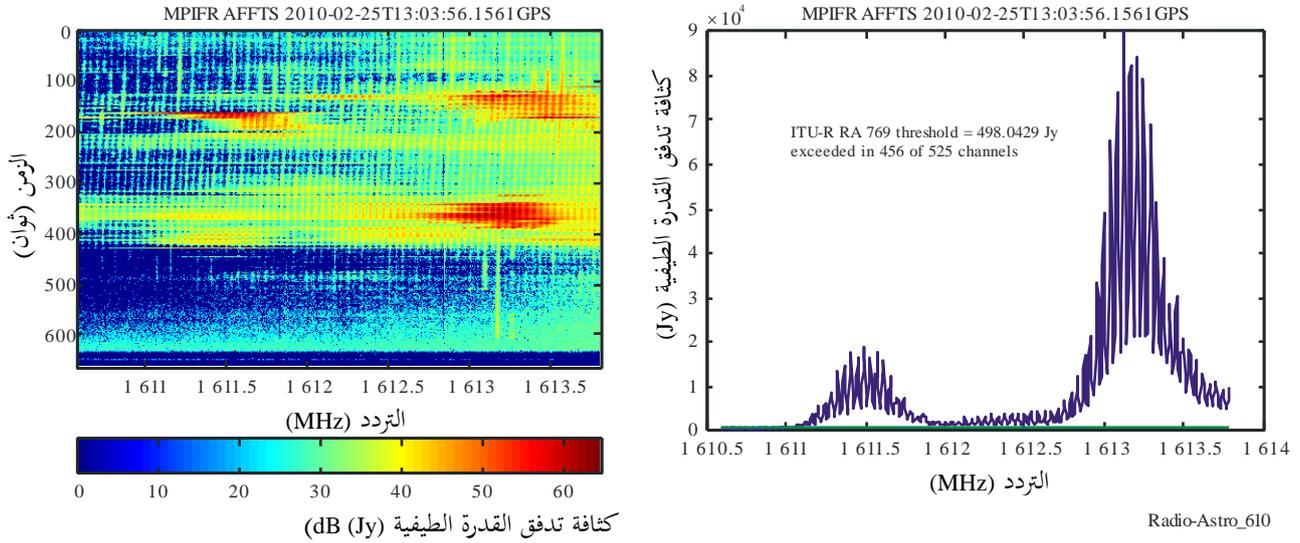
واستخدم مرشح نطاق إيقاف بمقدار 70 dB أمام المستقبل لكبت الانبعاثات الساتلية القوية في النطاق 1613,8-1626,5 MHz من أجل تجنب أحوال اللاخطية في نظام المستقبل عندما يتعقب الهوائي ساتلاً نشطاً.

وجرت المعايرت مباشرة على المصدرين الراديوين Cas-A وCyg-A في نفس اليوم، باستخدام نفس التشكيل المستخدم للقياسات الساتلية مما يوفر معايرة كثافة تدفق لجميع قنوات مقياس الطيف.

ويرد في الشكل 10.6 مثال نموذجي للأطياف التي تم الحصول عليها. ويتسم التداخل المرصود في نطاق خدمة الفلك الراديوي بنفس خصائص الذروة المبلغ عنها في التقرير SM.1633 الذي يعود تاريخه إلى عام 1998. وقيم البث الذروي التي تم الحصول عليها في قياسات محطة الرصد Leeheim مماثلة للقيم المتنبأ بها نظرياً لظروف تحميل كامل، حيث تترجم قيمة $-214 \text{ dB(W/m}^2\text{Hz)}$ إلى 40 kJy .

الشكل 10.6

رسم بياني طيفي معاير (يسار) ومتوسط طيف (يمين) لإرسالات IRIDIUM 97 غير المطلوبة في النطاق 1610,6-1613,8 MHz



وأظهر تحليل قياسات محطة Leeheim أن أي عبور واحد لساتل IRIDIUM يسبب التداخل على سوية الأرض يتجاوز عتبة الزمن وعرض النطاق المعدلة في التوصية ITU-R RA.769 للنطاق 1610,6-1613,8 MHz بأكثر من 20 dB طوال أي فترة من ثانية واحدة إلى 800 ثانية. وقد تجاوزت خسارة عرض النطاق 30% في متوسط جميع أطيايف المرور (متوسط 76% وكان لا بد من إهمال حد أدنى بنسبة 11% (متوسط 47%) في جميع أطيايف الثانية الواحدة بسبب التلوث الطيفي من انبعاثات IRIDIUM

خارج النطاق. وتؤكد القياسات في محطة Leeheim أيضاً النتائج التي توصل إليها تقرير التداخل في Effelsberg أنف الذكر اعتباراً من 2006.3.1.

وجدير بالذكر أن القياسات التي أجراها المرصد الفلكي الراديوي الوطني (NRAO) على سواتل فردية في ظروف حمولة اصطناعية كاملة في عام 1998 أظهرت نتائج مماثلة لنتائج هذا التحليل الساكن. وقد أدخلت تغييرات على بعض المعلمات التشغيلية لنظام Iridium بعد اختبارات المرصد NRAO (حوالي 2003) لتحسين التوافق مع خدمة الفلك الراديوي.

وأظهر تحليل كثافة تدفق القدرة المكافئة (EPFD) اللاحق وفقاً لما تقضي به التوصية ITU-R RA 1513 أن فقدان البيانات تفاوت بشكل كبير عبر النطاق. وقد تبين أنه يبلغ 93,2% عندما يكون وقت التكامل 2000 ثانية. ولتلبية معيار 2% ينبغي خفض سوية قدرة التداخل بمقدار 13 dB. وتبين أن فقدان البيانات عبر السماء لتردد 1 613,7878 MHz عند الحافة الأعلى من نطاق تردد خدمة الفلك الراديوي يبلغ 100% عندما يكون وقت التكامل 2000 ثانية. ولتلبية معيار 2% ينبغي خفض سوية قدرة التداخل بمقدار 20 dB. وبالنسبة لأوقات تكامل قصيرة في حدود 30 ثانية كان التفاوت من 4,7% عن الحد الأدنى من نطاق تردد خدمة الفلك الراديوي و43,5% قرب الحد الأعلى من النطاق الموزع لخدمة الفلك الراديوي. ولتلبية معيار 2% ينبغي خفض سوية قدرة التداخل بمقدار 11 dB.

وقد شارك ممثلون من IRIDIUM في جميع مراحل القياسات وفي صوغ تقرير لجنة الاتصالات الأوروبية (ECC) الذي يستند إليه هذا القسم.

6.6 الاستنتاجات

- أفضت دراسة مشكلات التداخل في خدمة الفلك الراديوي من المرسلات إلى عدد من الاستنتاجات، من أبرزها ما يلي:
- تتطلب مستقبلات خدمة الفلك الراديوي عناية فائقة للترشيح في مراحل التردد الراديوي (RF) والتردد المتوسط (IF) وذلك للحد من مشكلات النطاقات المجاورة، ولكن ليس من الصعب عموماً تحقيق ذلك.
 - يمكن أن تتسبب المرسلات العاملة في النطاقات غير المجاورة لنطاقات خدمة الفلك الراديوي في حدوث تداخل في خدمة الفلك الراديوي من خلال إشعاع التوافقيات وآثار التشكيل البيئي وتشكيل النطاق العريض غير المرشح.
 - يمكن أن تشكل المرسلات على السواتل أو الطائرات صعوبات خاصة بسبب وجود ظروف الانتشار على خط البصر عموماً واحتمال الاستقبال في الفصوص الجانبية بالقرب من الحزمة الرئيسية (بدلاً من الفصوص الجانبية البعيدة) أكبر مما هو في الإرسالات للأرض.
 - بصفة عامة، قد يؤدي توزيع النطاقات المجاورة لنطاقات خدمة الفلك الراديوي إلى خدمات تستخدم إرسالات أرض أو مرسلات على سواتل عالية القدرة إلى مشكلات تقنية صعبة ومكلفة.
 - قد تؤدي إرسالات النطاق العريض من السواتل، مثل الإشارات التي تستخدم تشكيل تمديد الطيف بالتتابع المباشر، إلى مشكلات خطيرة بصفة خاصة لخدمة الفلك الراديوي ما لم يتم ترشيح هذه الإرسالات على نحوٍ كافٍ. ويمكن تخفيف هذه الإرسالات غير المطلوبة إلى حدٍ بعيد باستخدام تقنيات التشكيل النبضي.

المراجع

DALY, P. [1988] Aspects of the Soviet Union's Glonass satellite navigation system. J. of Navigation, Vol. 41, p. 186-198.

GALT, J. [1990] Contamination from satellites. Nature, Vol. 345, p. 483.

MUROTA, K and HIRADE, K. [1981] GMSK modulation for digital mobile radiotelephony. IEEE Trans. Commun., Vol. COM-29, p. 1044-1050.

OTTER, M. A. [June 1994] A comparison of QPSK, OQPSK, BPSK and GMSK modulation schemes. Report of the European Space Agency, European Space Operations Center, Darmstadt, Germany.

PONSONBY, J. E. B. [July 1991] Spectrum management and the impact of the GLONASS and GPS satellite systems on Radioastronomy. J. of Navigation, Vol. 44, p. 392-398.

PONSONBY, J. E. B. [July 1994] Impact of the direct sequence spread spectrum signals from the Global Satellite Navigation System GLONASS on radio astronomy: problem and proposed solution. Proc. of the IEEE Spread Spectrum Symposium, Oulu, Finland.

الفصل 7

التقنيات الخاصة والتطبيقات ومواقع الرصد

1.7 مقدمة

يناقش هذا الفصل التقنيات ومواقع الرصد التي لم تشملها بالكامل الاعتبارات الأعم في الفصول السابقة. وعلى وجه الخصوص، تتناول بعض تطبيقات الفلك الراديوي عمليات الرصد بواسطة هوائي أو أكثر في الفضاء، ويشار إليها أحياناً باسم الفلك الراديوي الفضائي. ومن أسباب ضرورة استخدام هوائي في الفضاء ما يلي:

- في القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI)، يوفر ترابط الإشارات من هوائيات الأرض مع الإشارات من هوائي في الفضاء خطوط أساس أطول، وبالتالي المزيد من الاستبانة الزاوية مما يمكن تحقيقه باستخدام هوائيات أرض لوحدها. وتوفر حركة هوائي الفضاء في مدار حول الأرض تغييراً في اتجاهات خطوط الأساس التي تشكلها مع هوائيات الأرض، وهو أمر مهم للتصوير ثنائي الأبعاد.
- رغبة في رصد وقياس بنية إشعاع الخلفية الكونية من الموجات الصغرية (CMB)، يتطلب الأمر حساسية عالية جداً عند ترددات حوالي 30 GHz وما فوق. ومن المهم جداً تجنب امتصاص الغلاف الجوي، وعلى وجه الخصوص التغيرات في شدة الإشارة الناتجة عن أحوال الشذوذ في الغلاف الجوي، وخاصة بالنسبة لقياسات هوائي واحد (إجمالي القدرة).
- بالنسبة للترددات القريبة من ترددات خطوط الامتصاص القوية للماء H_2O والأكسجين O_2 في الغلاف الجوي للأرض (انظر الشكل 1.3)، تكون الرصدات من الفضاء ضرورية.
- بالنسبة للرصدات عند ترددات منخفضة، حيث لا تستطيع الموجات الراديوية أن تخترق الأيونوسفير أو تكون موهنة بشدة، تكون الرصدات من الفضاء ضرورية أيضاً.

أهم مواقع هوائيات الفضاء لخدمة الفلك الراديوي هي كما يلي:

- مدار الأرض، مفيد بشكل خاص للقياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) (انظر البند 2.7).
- نقطة Lagrange شمس-أرض L_2 (انظر البند 3.7)، حوالي 1.5×10^6 كيلومتر من الأرض، وبالتالي توفير بعض الحماية من التداخل الأرضي.
- مدارات تعقب الأرض حيث يكون الساتل قريباً من مدار الأرض حول الشمس ولكنه يتعقب الأرض بمسافة 10^6 - 10^7 كيلومتر عموماً، مرة أخرى توفير بعض الحماية من التداخل الأرضي.
- المنطقة المحجوبة من القمر، (انظر البند 4.7) التي توفر أنجع حماية من التداخل الأرضي ولكنها لم تستخدم حتى الآن.

تقع النقطة L_2 ، المنطقة المحجوبة من القمر، ومعظم المدارات الأرضية المخطط لها داخل المسافة 2×10^6 كيلومتر التي تفصل ما بين الفضاء القريب من الأرض والفضاء السحيق. وقد استخدمت مدارات الأرض والنقطة L_2 في رصدات بنية إشعاع الخلفية الكونية من الموجات الصغرية (CMB). كما استخدمت المواقع الأرضية المختارة لأدنى قدر من بخار الماء في الغلاف الجوي والقطب الجنوبي وصحراء أتاكاما لرصدات CMB (انظر البند 5.7).

وتشمل التقنيات والتطبيقات الخاصة الأخرى التي يتناولها هذا الفصل القياسات الجيوديسية باستخدام القياس VLBI (انظر البند 2.2.7) ورصد النجوم النابضة التي لها تطبيقات ممكنة في ضبط الوقت (انظر البند 6.7) ورصدات الشمس وتأثيرها على طقس الفضاء (انظر البند 7.7).

2.7 تقنية القياس VLBI، بما في ذلك في الفضاء

تنطوي تقنية القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) على عمليات رصد متآونة من مصدر راديوي باستخدام هوائيات تفصل بينها مسافات كبيرة، وغالباً في بلدان مختلفة أو في مدار حول الأرض. والاستبانة الزاوية لرصدات VLBI لم تتخطاها أي تقنية فلكية أرضية أخرى. ويمكن أن تحقق صفائف VLBI التي لها أقصى قدر من خطوط الأساس المقترية من قطر الأرض استبانة زاوية بأقل من مللي ثانية قوسية واحدة. ويمكن التوصل إلى ترددات مرصودة متطابقة بدقة في الهوائيات التي لها صفيغة VLBI تستخدم ميقاتيات ذرية مستقرة للغاية للحفاظ على تماسك الطور دون وصلة مرجعية في الوقت الفعلي. وعندما تستخدم أجهزة مازر الهيدروجين بمثابة ميقاتيات، فإن وقت التكامل المتناسك محدود عموماً فقط بحكم التغيرات التفاضلية في طول المسير عبر الغلاف الجوي والأيونوسفير. ومع ذلك، قد يكون استقرار أجهزة مازر (10⁻¹⁴) عند ترددات عالية هو العامل المقيد؛ فقد يقيد، عند 100 GHz مثلاً، وقت التكامل المتناسك حتى 1 000 ثانية. والبيانات المستقاة من فرادى مواقع الهوائيات (حالياً على أقراص مغنطيسية) إما تدوّن أو ترسل عبر شبكات مناطق واسعة عالية السرعة. وتتوقف معدلات البيانات المدونة أو المرسل على الأهداف العلمية وإجراءات الرصد وعلى المرافق التقنية المتاحة. والمعدلات القصوى المستخدمة في الممارسة الحالية تقارب 2 جيجابت/ثانية، وهو معيار جديد معتمد في صفيغ خط أساس طويل جداً (VLBA)، وهو أداة قياس VLBI مخصصة لها عشر محطات رصد موزعة على اتساع الولايات المتحدة الأمريكية. ويقوم مرفق معالجة مركزي برصف الإشارات المستنسخة في الزمن، مع مراعاة التأخر الكبير في انتقال الضوء بما يصل إلى 20 مللي ثانية، ويجمع بين جميع أزواج الإشارات لتشكيل منتجات ترابط.

وتتمكّن استبانة تقنية VLBI علماء الفلك الراديوي من رصد الحركات النسبية لفرادى التكتفات في البلازما عالية الطاقة التي تُطلق بسرعات نسبية من النوى المجريّة النشطة. وضمن مجرة درب التبانة، يمكن لتقنية VLBI أن تقيس المسافات المئّية عبر قرص المجرة بأكمله، ويقوم برنامج رصد مكثف الآن بمسح بنية دوامة المجرة بدقة لم يسبق لها مثيل. وتقنية VLBI هي مكونة رئيسية في تعريف الأطر المرجعية السماوية والأرضية والمواقيت القياسية ولها تطبيقات هامة في مجالات أخرى تتراوح من حركة طبقات القشرة الأرضية إلى تحديد المواقع الزاوية الدقيقة لمركبة فضائية بعيدة.

وتناقش حساسية شبكات VLBI للتداخل من الخدمات النشطة في البند 4.4 ويناقش استخدام نطاقات تردد معينة في البند 8.5.

1.2.7 تقنية VLBI في الفضاء

من شأن تقنية القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) في الفضاء أن توسع مقدار استبانة هذه التقنية إلى ما وراء الحدود التي يفرضها حجم الأرض، وذلك بوضع هوائي في مدار عالٍ حول الأرض في صفيغة الرصد. وتستعرض البنود الفرعية التالية البعثات الماضية والحالية والمخطط لها في المستقبل (البند 1.1.2.7) ومزايا الأدوات التي تنفرد بها تقنية VLBI في الفضاء (البند 2.1.2.7) وعلى وجه الخصوص متطلبات التقنية لترددات الاتصالات (البند 3.1.2.7).

1.1.2.7 مشاريع تقنية VLBI في الفضاء

يلخص الجدول 1.7 المعلمات الأساسية لمشاريع تقنية القياس VLBI في الفضاء الموضحة في هذا البند. وتشير الترددات المدرجة في الجدول والمناقشات اللاحقة إلى الانبعاثات الراديوية الواردة من المصادر الراديوية الكونية الطبيعية.

الجدول 1.7

بعثات VLBI الفضائية

نطاقات الرصد [GHz]	قطر الهوائي	معلومات المدار	التاريخ	البعثة / التجربة
2,285-2,271 15,43-15,35	m 4,9	متزامن مع الأرض km 38 000	1988-1986	تجربة experiment
1,73-1,60 5,0-4,7 22,3-22,0	m 8	الأوج: km 21,400 الحضيض: km 560 الميل: 31°	2003-1997	VSOP / HALCA
0,332-0,316 1,684-1,652 4,852-4,812 22,252-22,212	m 10	الأوج: km 353,000 - 280,000 الحضيض: km 81,500 - 7,100 الميل: 5° - 85°	-2011	Radioastron
116-84، 45-31، 26-18 950-787، 720-602، 275-211	m 10	نقطة الشمس-الأرض L ₂ ، 1,5 × 10 ⁶ كيلومتر من الأرض	2019	Millimetron
9-6 24-20 46-40	هوائيات ثنائية قطر m 10	الأوج: km 60,000 الحضيض: km 1,200 الميل: 28,5°	2020	صفيغة VLBI طويلة بموجات ملليمترية

وقد ثبت لأول مرة نجاح تقنية القياس VLBI في الفضاء في عام 1986، باستخدام هوائي قطره 4,9 أمتار على ساتل في نظام TDRSS (تتبع البيانات وترحيلها) لدى وكالة NASA [Levy et al., 1989]. وتم تشغيل تجربة أولية بتردد 2,3 GHz. وأجريت تجارب أخرى في عام 1988 في تردد 15 GHz باستخدام النظام الساتلي ذاته.

وتمت الرصدات العلمية الأولى بواسطة هوائي في مدار مخصص لتقنية VLBI من جانب بعثة VSOP اليابانية - برنامج المرصد الفضائي VLBI - [Hirabayashi et al., 1998]، من عام 1997 حتى عام 2003. وأطلق ساتل تلك البعثة HALCA في عام 1996 من قبل معهد علوم الفضاء والملاحة (ISAS)، وهو الآن جزء من وكالة استكشاف الفضاء اليابانية (JAXA). وكان على متن HALCA هوائي قطره 8 أمتار في مدار بعيد عن المركز بأوج 21 400 كيلومتر وفترة مدارية من 6,3 ساعات. وكانت نطاقات التردد العاملة هي 1,6 و 5 و 22 GHz، ولكن نطاق التردد الأخير لم يكن يستخدم للمرصد الروتيني لأن الأداء كان مختلفاً. وكان عرض الحزمة التركيبي الأدنى 1,8 و 0,6 ملليثانية قوسية عند 1,6 و 5 GHz، على التوالي. وجرت رقمنة عرض نطاق إشارة كلي بتردد 32 MHz ونقل إلى الأرض عن طريق وصلة 128 ميغابتة في الثانية بتردد 14,2 GHz. وقدمت ISAS و NASA و NRAO شبكة مخصصة من محطات على الأرض للقياس عن بعد. وشاركت صفيغة واسعة الانتشار من التليسكوبات الراديوية على الأرض في رصدات بعثة VSOP المنسقة من قبل كونسورتيوم دولي على مستوى العالم. وأنشأت URSI فريقاً عاملاً يعنى بتقنية VLBI العالمية للتعامل مع تنسيق صفائف الأرض وقضايا التوافق لاستقاء البيانات ونقلها. وتتناول الأهداف العلمية الرئيسية لبرنامج المرصد الفضائي لبعثة VSOP النوى المجرية النشطة، ومناطق مازر جذر الهيدروكسيل OH والنجوم النابضة والنجوم المتوهجة.

ويضطلع بتقنية VLBI الفضائية حالياً بعثة المركبة الفضائية الروسية Radioastron. وقد طُوّر هذه المركبة، بجواري قطره 10 أمتار، مركز Astro للفضاء ومعهد Lebedev للفيزياء في الأكاديمية الروسية للعلوم ورابطة Lavochkin للعلوم والإنتاج. وقد أُطلق الساتل في عام 2011، في مدار بعيد جداً عن المركز، الحد الأقصى للأوج 353 000 كيلومتر تقريباً، يكاد يبلغ المسافة إلى القمر. وتُستغل الاضطرابات المدارية المتعمدة التي يستحثها القمر لكي تسبب تغيرات سريعة في المعلمات المدارية وتمكن تغطية فتحة جيدة في تعاقب سريع من الاتجاهات في السماء. والمركبة Radioastron هي أول بعثة VLBI في الفضاء تحمل على متن الساتل معيار تردد مازر هيدروجين. وهي تعمل في نطاقات التردد 0,32 و 1,66 و 4,8 و 22 GHz. وقد جرت رقمنة عرض نطاق إشارة كلي بتردد 32 MHz ونقل إلى الأرض عن طريق وصلة 128 ميغابتة في الثانية بتردد 15 GHz. وقد أدرجت عدة تليسكوبات راديوية رئيسية حول العالم في شبكة VLBI أرضية مترابطة. والتمست بعثة Radioastron مؤخراً مقترحات في مجالات علوم أساسية، بما في ذلك النوى المجريّة النشطة والثقوب السوداء الفائقة الكتلة والتدفقات النسبية وأجهزة مازر داخل المجرة وخارجها والنجوم النابضة.

وقد اقترح مركز أسترو للفضاء ومعهد لبيديف للفيزياء في الأكاديمية الروسية للعلوم احتمال إطلاق ساتل Millimetron في عام 2019. وسوف يحمل على متنه هوائي قطره 10 أمتار، ويعمل في نقطة لاغرانج L₂ شمس-أرض، في رصد نطاقات تتراوح من 18 إلى 950 GHz. وتشمل الجوانب التي ينفرد بها Millimetron، غير الواردة في بعثات الفضاء VLBI السابقة، تبريد سطح الهوائي بالتحديد وتخزين البيانات المرصودة على متن المركبة. وتشمل الأهداف العلمية تكوين النجوم والمنظومات الكوكبية والمراحل النسبية للتطور النجمي والثقوب السوداء الفائقة الكتلة والتطور المجري والكوي. وهناك أيضاً جانب مكافئ رئيسي وحيد للمشروع، وهو ليس موضع البحث هنا.

ويشكل صيف VLBI الفضائي بالموجات المليمترية الطويلة المرحلة الأولى من صيف VLBI الفضائي المليمترية المعتمد لدراسة تصميم من قبل لجنة مشاريع علوم الفضاء التابع للأكاديمية الصينية للعلوم، المزمع إطلاقه بحلول عام 2020. وسوف تحمل المركبة الفضائية المزدوجة هوائيين قطر كل منهما 10 أمتار، في مدارين بأوج 60 000 كيلومتر في مستويات بزواية ميل 120° درجة، يرصدان في نطاقات تردد 8 و 22 و 43 GHz. وتضم المركبة الفضائية على متنها معايير تردد مازر هيدروجين ومرفقاً لتخزين البيانات. ومن شأن وصلة بيانات فضاء-أرض أن ترسل من البيانات ما يصل إلى 2 جيجابتة في الثانية. وتشمل الأهداف العلمية دراسة الثقوب السوداء الفائقة الكتلة والمازرات الضخمة في أقراص تراكم خارج المجرة ونفاثات في نوى مجريّة نشطة وتطور النجوم الضخمة.

2.1.2.7 الملامح المميزة لتقنية VLBI الفضائية وتطورها حديثاً

ثمّة عدة جوانب لتقنية VLBI الفضائية كانت قد حدّت من مقدرات البعثات المبكرة فتحت الطريق الآن لتكنولوجيا أكثر تطوراً. وعلى وجه الخصوص، ثمّة مازر هيدروجين على متن المركبة يعمل بنجاح في بعثة Radioastron ومن المخطط له أن يعمل في المشاريع الروسية والصينية المقبلة. ومع ذلك، يبقى نظام تحويل الطور ذهاباً وإياباً المستخدم من أجل بعثة VSOP قابلاً للعمل، ومن الممكن جداً أن يستمر العمل به من باب الاحتياط في المستقبل.

ويمكن أيضاً التخفيف إلى حد كبير من القيود المفروضة على تحديد المدار للبعثات المبكرة بسبب تزايد أمداء تأخر قياس التداخل ومعدل الهامش التي تدعمها رابطات البرمجيات الحديثة.

ومن شأن القدرة على تخزين البيانات المرصودة على متن المركبة لإرسالها لاحقاً إلى الأرض أن تفضي إلى تبسيط كبير لدعم البعثة على الأرض. وعلى الرغم من أن عدد محطات القياس الأرضية المطلوبة يمكن ألا يتجاوز محطة واحدة في أسلوب تشغيل من هذا القبيل، فإن الأمر يتطلب عرض نطاق أوسع للإرسال، يتناسب عكساً مع دورة العمل الهابطة. وفي الوقت نفسه، يتوقف نجاح العديد من الأهداف العلمية لبعثات VLBI الفضائية بشكل حاسم على الحساسية ويفرض شروطاً صارمة على نحو متزايد على عرض نطاق الوصلة الهابطة للبيانات.

وثمة مسألة ما زالت تتحدى تصوير VLBI الفضائي وما زالت دون حل في الوقت الحاضر وهي أن تقنية المعايرة الذاتية العادية المستخدمة في تحليل بيانات VLBI لا تعمل على نحو فعال في صفيحة تكون فيها محطة واحدة-هوائي الفضاء-معزولة هندسياً عن جميع المحطات الأخرى. والهوائيات الفضائية المتعددة المقترحة لصفيف VLBI الطويل بموجات ملليمترية قد تكون خطوة أولى نحو التغلب على هذه الصعوبة.

3.1.2.7 متطلبات التردد لتشغيل VLBI الفضاء

إن اعتبارات تقاسم التردد المرتبطة بتقنية VLBI الفضائية معقدة أكثر مما هي لتقنية VLBI على الأرض وذلك بسبب المتطلبات الثلاث من حيث وصلات التحكم وإشارات نقل الطور في اتجاهين وإرسال البيانات فضاء-أرض في نطاق عريض. وهي تحتاج إلى حماية من التداخل الضار عندما تقع ضمن نطاقات التردد التي تستخدمها نظم أبحاث فضائية أخرى.

ونطاقات التردد التي تستخدمها بعثات VLBI الفضائية الحالية تقع ضمن نطاقات أبحاث الفضاء في المدى GHz 7,235-7,190 (أرض-فضاء) و GHz 8,500-8,025 (فضاء-أرض) و GHz 15,35-14 (فضاء-أرض) و GHz 15,35-14,5 (أرض-فضاء). ويمكن تلبية متطلبات عرض النطاق لهذه البعثات ضمن هذه التوزيعات. ومع ذلك ربما تتطلب البعثات المقبلة نطاقات بعرض عدة جيجاهيرتز في بيانات الوصلة الهابطة وتوزيعات في ترددات فوق GHz 20. ولم يتم بعد انتقاء الترددات لبيانات الوصلة الهابطة عريضة النطاق من أجل بعثتي VLBI الفضاء المقبلتين الموصوفتين في نهاية البند 1.1.2.7. وثمة توزيعات أخرى متاحة ضمن النطاقات GHz 38-37 (فضاء-أرض) و GHz 40,5-40 (أرض-فضاء) و GHz 84-74 (فضاء-أرض).

وعلى الرغم من أن عملية نقل الطور الاحتياطية لم تعد ضرورية فإنها تتطلب التخطيط المسبق لإقامة الوصلات المناسبة. وتتطلب آثار الانتشار الأيونوسفيرية والتروبوسفيرية ترددات تتراوح ما بين GHz 7 و GHz 20. وينبغي أن تكون ترددات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة متقاربة قدر الإمكان، ولكن بما أنها غير متماثلة عموماً فإن نمذجة الغلاف الجوي مطلوبة للتعويض عن أثر تغيرات طول المسير.

ومعايير الحماية لوصلات الاتصالات لسواتل الأبحاث القريبة من الأرض المأهولة وغير المأهولة مدرجة في التوصية ITU-R SA.609. وهذه المعايير مناسبة أيضاً لوصلات القياس عن البعد والتوقيت لنظم VLBI الفضائية المخطط لها. وعتبة التداخل الضار الموصى بها، والتي يتعين عدم تجاوزها لأكثر من 0,1% من الزمن، هي -216 dB(W/kHz) في مستقبل المحطة الأرضية و-177 ديسيبل dB(W/kHz) في مستقبل الساتل. ونطاقات التردد التي يتعين استخدامها لوصلات الاتصالات لمشاريع VLBI الفضائية المخطط لها موزعة إلى العديد من خدمات الاتصالات الراديوية. ومع ذلك، فإن النظر في سويات التداخل المحتملة بوصفها دالة تابعة للموقع المداري للسواتل يشير إلى أن التقاسم الفعال ممكن. وفي بعض الحالات، قد تدعو الحاجة إلى التنسيق الدقيق.

2.2.7 التطبيقات الجيوديسية باستخدام تقنية VLBI

تقنية VLBI أداة أساسية في قياس الأرض ورصدها. ونظراً لوجود شبكة من الهوائيات في مواقع مختلفة حول العالم، فضلاً عن منظومة من المصادر الراديوية المحددة مواقعها بدقة، يمكن تحديد المسافات بين أزواج من الهوائيات بدقة في حدود بضعة ملليمترات. وتقنية VLBI هي التقنية الجيوديسية الوحيدة القادرة على توفير مجموعة كاملة من معلمات توجه الأرض (EOP) (طول النهار واتجاه القطب) التي تحدد موقع الأرض في الإطار المرجعي السماوي (CRF) الذاتي القصور الموصوفة في قائمة من أشباه النجوم. ومن خلال قياس معلمات توجه الأرض، توفر تقنية VLBI توجهاً مطلقاً ومقياساً للإطار المرجعي الأرضي (TRF). ومعلمات توجه الأرض ضرورية جداً لملاحة المركبات الفضائية لكنها تتغير عبر فترات زمنية قصيرة ولا يمكن التنبؤ بها، ولذلك فهي تتطلب قياساً منتظماً. وليس من الممكن مثلاً معايرة بيانات سواتل النظام العالمي لتحديد المواقع GPS دون الاستعانة بتقنية VLBI. وخدمة VLBI الدولية (IVS) للجيوديسياء والقياسات الفلكية (Schuh and Behrend 2012) مكلفة بمهمة الحفاظ على الإطار المرجعي السماوي وتوفير قياسات منتظمة لمعلمات توجه الأرض.

وفي السنوات الأخيرة وُضعت خطة لتحديث شبكة التليسكوبات التي تسهم في خدمة VLBI الدولية لتحقيق بعض الأهداف الصعبة، بما في ذلك تحقيق دقة في حدود 1 ملليمتر من حيث الموقع و0,1 ملليمتر/سنة من حيث السرعة [Petrachenko et al, 2013]. وهذه المبادرة، التي أطلق عليها اسم النظام العالمي للرصد بتقنية VLBI2010 (VGOS)، تتطلب تليسكوبات جديدة

الجدول 2.7

بعثات الفلك الراديوي الفضائية العاملة أو المخطط لها
أن تعمل بالقرب من نقطة L_2 Lagrange شمس-أرض

نطاقات تردد الرصد (GHz)	تاريخ التشغيل	نمط البعثة أسلوب الرصد	البعثة/المشغل الفتحة
96-18	2009-2001	تصوير متواصل بمكافئي وحيد للخلفية الكونية للموجات الصغيرة متواصل	MAP/NASA m 1,6 × m 1,4
3 ± 30 4,4 ± 44 7 ± 70 10 ± 100 28 ± 150 40 ± 217 65,5 ± 353 101 ± 545 158,5 ± 857	2012-2009	تصوير متواصل بمكافئي وحيد للخلفية الكونية للموجات الصغيرة متواصل	PLANCK/ESA m 1,9 × m 1,5
642-490 802-640 962-800 1 122- 960 1 250-1 120 1 800-1 600 2 600-2 400	2013-2009	فلك راديوي بمكافئي وحيد خط طيفي وتواصل	Herschel/ESA m 3,5
4 800 -18	2030-2015	فلك راديوي بمكافئي وحيد وقياس تداخل خط أساس طويل جداً فضائي (sVLBI) خط طيفي وتواصل	Millimetron/ ROSKOSMOS m 12
1 500-10 000	2018	فلك راديوي بمكافئي وحيد/خط طيفي وتواصل	SPICA/JAXA m 3,5

4.7 رصدات الفلك الراديوي من المنطقة المحجوبة من القمر

يستخدم الطيف الكهرمغناطيسي الآن استخداماً مكثفاً على الأرض لدرجة أن كثيراً من قيمته لبحوث الفلك الراديوي تراجعت كثيراً. وليس مرد ذلك فقط الزيادة العامة في الاتصالات الراديوية، ولا سيما باستخدام سواتل الأرض، وإنما يعزى أيضاً إلى أن بعض الرصدات في الفلك الراديوي مطلوبة في ترددات خطوط طيفية ليس لها حماية في لوائح الراديو، ولها أمل ضعيف في اكتساب الحماية في المستقبل.

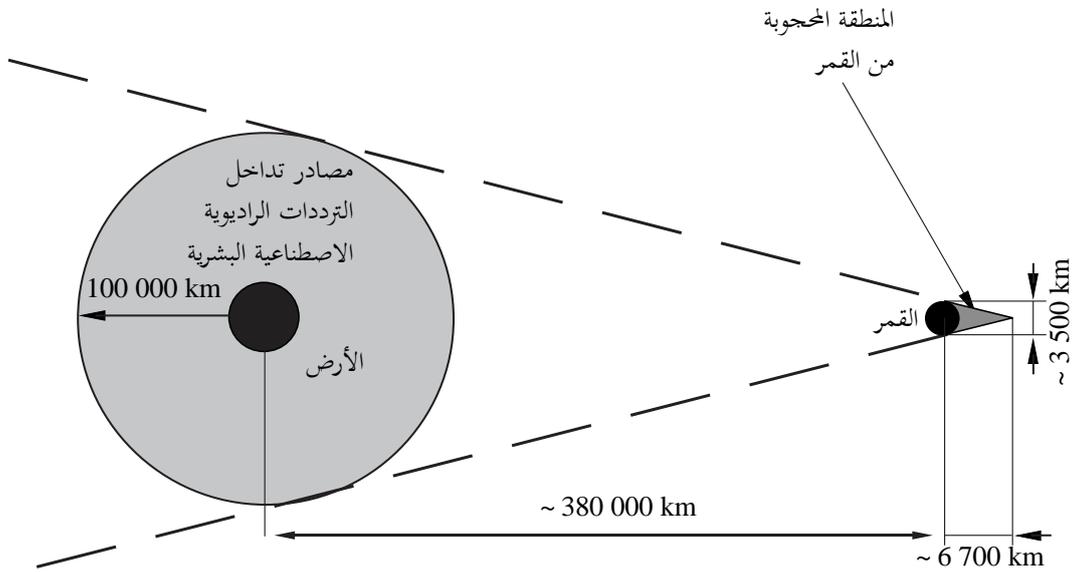
ولعل الجانب البعيد من القمر هو الموقع المتبقي الذي يمكن الوصول إليه والذي يمكن فيه إجراء رصدات الفلك الراديوي عبر كامل الطيف الراديوي دون أي تداخل. ومع ذلك، فإن عمليات السبر في الفضاء السحيق والسواتل القمرية ورزم الأدوات العلمية ومحطات البحوث على سطح القمر لا تزال تنطوي على إمكانية التداخل في الرصدات، ومن ثم ينبغي توزيع الترددات بعناية لتفادي أي تداخل في خدمة الفلك الراديوي في المنطقة المحجوبة.

1.4.7 المنطقة المحجوبة من القمر

إن فترة دوران القمر حول محوره تساوي فترة دورانه حول الأرض، وهو ما يعني أن نفس الجانب يواجه الأرض دائماً. وبما أن المدار حول الأرض إهليلجي إلى حد ما ومائل، فإن أكثر من نصف سطح القمر مرئي للراصد على الأرض. والجزء المحتجب من سطح القمر محمي دائماً من إشارات التداخل المتولدة على الأرض أو بالقرب منها (انظر الشكل 2.7). والمنطقة المحمية على السطح هي التي تقع على زاوية أكبر من 23.2° خارج متوسط طرف القمر كما يُرى من مركز الأرض. ويعرّف الرقم 1.22.22 من لوائح الراديو المنطقة المحمية من القمر بأنها المنطقة المحمية إلى جانب حجم مجاور من المساحة المحمي من التداخل الناشئ ضمن مسافة 100 000 كيلو متر من مركز الأرض.

الشكل 2.7

مخطط مبسط للمنطقة المحجوبة من القمر



Radio-Astro_72

2.4.7 الأمداء الطيفية المفضلة للرصدات من القمر

إن رصدات الفلك الراديوي في الترددات المنخفضة قادرة على توفير بيانات هامة عن النشاط الشمسي والأشعة الكونية والمجالات المغناطيسية في مجرتنا، وعن أطراف التردد المنخفض من المصادر الراديوية المنفصلة داخل المجرة وخارجها. ومع ذلك، فإن أداء هذه الرصدات صعب للغاية على الأرض دون حوالي 30 MHz بسبب عتامة الأيونوسفير وعدم تجانسه. والرصدات دون 20 MHz غير ممكنة إلا في ظروف استثنائية وفي مواقع خاصة ولفترات محدودة من الزمن فقط (انظر الفصل 3). ويؤثر أيضاً التداخل الراديوي الأرضي، سواء الطبيعي أم من صنع الإنسان، على رصدات الفلك الراديوي في هذه الترددات. ودون حوالي 500 kHz، يكون الإشعاع الشفقي هو المصدر الرئيسي للضوضاء. وما بين 1 و30 MHz، تهيمن إرسالات الاتصالات الطويلة المدى. وفي الواقع، يُستخدم الطيف حتى 300 MHz بشكل مكثف من جانب الخدمات النشطة. ونظراً لهذه القيود، من المهم تكريس المنطقة المحجوبة من القمر، التي لا تتأثر بالآثار الأيونوسفيرية ولا بالانبعاثات التي من صنع الإنسان، لرصدات الفلك الراديوي المنخفضة الترددات.

وعند ترددات أعلى، تصل إلى حوالي 20 GHz، تكون خدمة الفلك الراديوي على الأرض مقيدة إلى حد كبير بحكم الانبعاثات من صنع الإنسان. ومع أن العديد من التحولات في الخطوط الطيفية الهامة من الناحية الفلكية الفيزيائية تتمتع بقدر من الحماية في لوائح الراديو (انظر الفصل 3)، هناك بشكل عام القليل من الحماية للترددات المزحجة بتأثير دوبلر والمرتبطة بالمجرات النائية المزحجة نحو الأحمر. وعلاوة على ذلك، ما زالت تكتشف تحولات هامة ولها ترددات غير محمية، من ذلك مثلاً خطوط ميثانول (CH_3OH) في تردد 6,7 GHz و 12,2 GHz وسيكلوبروبينيليدين (C_3H_2) في تردد 18,3 GHz. وقد تم الكشف عن الخط 1 420 MHz من الهيدروجين الذري المحايد في ترددات مزحجة بتأثير دوبلر منخفضة تصل إلى 323 MHz [Uson et al., 1991]، وينبغي التماس الحماية لكامل المدى الطيفي دون 1 420 MHz.

وفي ترددات فوق 20 GHz، تعاقب رصدات الفلك الراديوي التي تجري من سطح الأرض بحكم عتامة الغلاف الجوي بسبب تحولات قوية في الماء H_2O والأكسجين O_2 (انظر الفصل 3). ومع أن بعض الرصدات أجريت بنجاح في نوافذ الغلاف الجوي بين التحولات، فقد ازدادت صعوبة تدريجياً بتزايد التردد. وتقع معظم الخطوط الجزيئية في الترددات العالية، وبعضها لا يمكن رصده من الأرض. وبالنسبة لخدمة الفلك الراديوي، يتسم غياب التداخل في نطاقات التردد التي يحجبها الغلاف الجوي للأرض بأهمية للمرصد في المنطقة المحجوبة من القمر، مع أن رصدات ناجحة في هذه الترددات قد تكون ممكنة أيضاً في مواقع فضائية أخرى.

3.4.7 تنظيم استخدام المنطقة المحجوبة من القمر

بما أن الطيف الترددي بأكمله في المنطقة المحجوبة من القمر خال من الإشعاعات القادمة من محيط الأرض، فإن هذه المنطقة هي بمثابة موقع فريد لإجراء الرصدات العلمية. ومن الممكن إجراء التجارب الفلكية الراديوية والتجارب العلمية الأخرى في هذه المنطقة في المستقبل المنظور، ولذا من الضروري تنظيم أنشطة خدمات الاتصالات الراديوية التي قد تشع مرافقها في هذه المنطقة. ويجب أن تؤخذ في الحسبان متطلبات سواتل الأرض ومسابير الفضاء السحيق وأجهزة الإرسال المرتقب استخدامها في المنطقة المحجوبة، علماً بأن من المرغوب فيه الحفاظ على المنطقة خالية قدر الإمكان من التداخل الراديوي وبالتالي الحفاظ على قيمتها العظيمة للرصدات المنفصلة.

وتقر الأرقام من 22.22 إلى 25.22 في لوائح الراديو بضرورة الحفاظ على المنطقة المحجوبة كمجال لإمكانات هائلة لرصدات الفلك الراديوي وخدمات بحوث الفضاء المنفصلة، وبالتالي الحفاظ عليها خالية من الإرسالات قدر الإمكان.

وتوصي التوصية ITU-R RA.479، في إطار التخطيط لاستخدام الطيف الراديوي في المنطقة المحجوبة من القمر، وطنياً ودولياً على السواء، بضرورة أن تؤخذ في الاعتبار الحاجة إلى مراعاة متطلبات رصدات الفلك الراديوي. كما توصي بإيلاء اهتمام خاص لنطاقات التردد التي تكون فيها الرصدات صعبة أو مستحيلة من سطح الأرض، وبأن يكون استخدام الطيف متماسكاً مع مجموعة من المبادئ التوجيهية الأولية. ومن ثم يكون، بموجب هذه المبادئ التوجيهية، كامل طيف الترددات الراديوية في المنطقة المحجوبة متاحاً للاستخدام من قبل الخدمات المنفصلة باستثناء نطاقات التردد المتاحة حالياً أو التي توزع في المستقبل:

- لدعم أبحاث الفضاء من قبل خدمة أبحاث الفضاء وخدمة العمليات الفضائية وخدمة استكشاف الأرض الساتلية وخدمة الاستدلال الراديوي الساتلية،
- للاتصالات الراديوية وإرسالات أبحاث الفضاء داخل المنطقة.

ويحتاج الأمر إلى خدمات راديوية فضائية لها أجهزة إرسال تعمل على مسافات تزيد عن 100 000 كيلو متر من الأرض وذلك لتنسيق أنشطتها مع خدمة الفلك الراديوي. والتوصية النهائية هي ضرورة حماية خدمة الفلك الراديوي من التداخل الضار عندما تعمل في المنطقة المحجوبة من القمر في ترددات تنظر في استخدامها المحطات الفضائية النشطة والمنفصلة في المنطقة المذكورة.

ويمكن وضع مبادئ توجيهية لاختيار نطاقات التردد التي يتعين حجزها لخدمة الفلك الراديوي في المنطقة المحجوبة من القمر. وتبرز التحولات لتردد 1 420 MHz من أجل HI، و 115 GHz من أجل CO، وإلى حد أقل 1 612 MHz و 1 665 MHz، و 1 667 MHz و 1 720 MHz من أجل OH، بشكل كبير في دراسات الانزياح نحو الأحمر في المجرات النائية. وهكذا، بالنسبة لدراسات HI و OH وحدها، يجب أن تبقى المنطقة الطيفية دون 2 GHz خالية من الانبعاثات. وبالنسبة لرصدات CO المنزاحة بتأثير دوبلر، فإن أهم المناطق الطيفية التي يتعين حجزها هي تلك التي تكون فيها عتامة الغلاف الجوي الأرضي عالية. وينبغي

حجز نطاقات التردد بالنسبة لكثير من أهم التحولات الفلكية الفيزيائية، ولا سيما تلك التي تتمتع بحماية ضئيلة حالياً. وهذا من شأنه تمكين رصدات VLBI التي تشمل هوائياً في المنطقة المحجوبة. وينبغي أن يتاح لهذه الترددات أقصى قدر من الحماية من التداخل الضار، سواء من الانبعاثات داخل النطاق أم خارج النطاق (بما في ذلك من النطاقات المترابطة توافقياً). وفي ترددات فوق 15 GHz، ينبغي أن تبقى المناطق الطيفية المحجوبة عن الأرض بواسطة الغلاف الجوي في متناول علماء الفلك الراديوي. ويمكن التخفيف من مشكلة الكشف المستقبلي للخطوط الطيفية في النطاقات غير المحمية إذا توفرت لنظم الاتصالات الراديوية وإرسال البيانات في المنطقة المحجوبة المرونة في التردد لتمكينها من تغيير النطاقات في حال اكتشاف خط طيفي رئيسي ضمن نطاق الإرسال.

5.7 المواقع على الأرض حيث امتصاص الغلاف الجوي منخفض

توفر المناطق التي يكون فيها بخار الماء في الغلاف الجوي منخفضاً أفضل المواقع للرصد من الأرض في مدى الطول الموجي دون المليمتر، أي في الترددات الراديوية فوق 300 GHz. وللاطلاع على المزيد من التفاصيل عن معالم المواقع علاوة على ما يشار إليه هنا، انظر الفصل 13 في المرجع [Thompson et al., 2001].

1.5.7 القارة القطبية الجنوبية

يؤدي ارتفاع الهضبة القطبية والبرد الشديد فيها إلى انخفاض شديد في كثافة عمود بخار الماء مما يجعله أفضل موقع معروف على الأرض للرصدات الفلكية في مدى التردد 300-15 000 GHz (مدى طول الموجة 1-0,02 مليمتر). وثمة ميزة إضافية، تتصل برصدات الفلك الراديوي في ترددات منخفضة نسبياً، وهي أن السواتل في المدار المستقر حتماً بالنسبة إلى الأرض هي دون الأفق في هذا الموقع. ولكن الهضبة القطبية الجنوبية يتعذر الوصول إليها نسبياً، وهي غير متطورة حالياً كموقع مرصد. وعلى الرغم من قلة جودة الرصد مقارنةً بالهضبة، يمكن القول بأن القطب الجنوبي هو أفضل موقع مرصد للترددات العالية في العالم الذي يمكن الوصول إليه. وهنا تستطيع التليسكوبات أن تقوم برصدات من الصعب جداً أو من المستحيل القيام بها في أي مكان آخر، وذلك لأن الغلاف الجوي شفاف في المدى الطيفي المذكور أعلاه كل الوقت تقريباً. والاستقرار العالي جداً لعناتمة الغلاف الجوي مؤاتٍ بشكل خاص لقياس ملامح اللمعان المنخفض. ويلاحظ، مع ذلك، على افتراض أن التليسكوبات الراديوية يمكنها أن تغطي السماء نزولاً حتى حوالي زاوية ارتفاع 5°، أن الجزء من القبة السماوية الذي يمكن رصده من القطب هو مجرد نصف ما يمكن رصده من مواقع درجات عرض أخفض، مثل Cerro Chajnantor أو Mauna Kea المشار إليهما أدناه.

ويرصد تليسكوب القطب الجنوبي الذي قطره 10 أمتار في ترددات 95-350 GHz. كما يعمل في القطب الجنوبي أيضاً مقياس التداخل الزاوي DASI بتغذية 13 عنصراً وهو يرصد في مدى التردد 26-36 GHz [Leitch et al., 2002].

2.5.7 Cerro Chajnantor، شيلي

توفر صحراء أتاكاما في شيلي، في جوار موقع تليسكوب ALMA في الإحداثيات "67°45'11,4 غرباً و"23°01'22، موقعاً على ارتفاع 5 000 متر حيث الظروف الجوية لخدمة الفلك الراديوي مماثلة لما هي عليه في القطب الجنوبي. وتليسكوب ALMA أداة معقدة تتألف من صفائف هوائيات بمقاييس 12x50 و 7x12 و 12x4 متراً ترصد في المدى 30-950 GHz. وهناك بالقرب منه التليسكوبان APEX وASTE بقطر 12 متراً. ونفس المنطقة هي أيضاً موقع لأداة أخرى مصممة خصيصاً لقياس خلفية الموجات الصغرية الكونية (CMB)، أداة تصوير الخلفية الكونية، والتي تستخدم نفس المدى 26-36 GHz شأن مقياس التداخل DASI ولكنها تغطي مدى إضافياً من البنية الزاوية [Padin et al., 2001].

3.5.7 Mauna Kea، هاواي

قمة Mauna Kea في هاواي ("155°28'18 غرباً و"19°49'36+) على ارتفاع 4 080 متراً هي موقع صفيحة 6x10 أمتار دون مليمترية (SMA) [Moran, 1998]، وتليسكوب CSO بقطر 10 أمتار وتليسكوب JCMT بقطر 15 متراً، وهي تعمل في المدى 180-900 GHz.

4.5.7 Mt. Graham، أريزونا

يستضيف هذا الموقع، على ارتفاع 3 200 متر ($109^{\circ}53'28.5''$ غرباً و $32^{\circ}42'05.8''$) تليسكوب SMT بقطر 10 أمتار، يعمل في المدى 200-700 GHz، والتليسكوب البصري الكبير LBT بمقاس 8x2 أمتار.

6.7 رصدات النجوم النابضة وتطبيق معايير التوقيت

نوقشت النجوم النابضة الراديوية بالتفصيل في الفصل 2.

وتتراوح فترات النبض المرصودة من بضعة ثوانٍ نزولاً إلى بضعة مليثوان. وقد رصدت فترة قصيرة تصل إلى 1,55 مللي ثانية. ولا تحتل النبضة الرئيسية، وأحياناً نبضة ثانوية ضعيفة، عموماً سوى جزءاً صغيراً من الدورة. وبصفة عامة، فإن دورات النبض منتظمة بشكل ملحوظ. ومع ذلك، تعاني الفترات في بعض الحالات من تغيرات مفاجئة. وبالإضافة إلى ذلك، تُظهر بعض الفترات تغيرات دورية منتظمة ضئيلة، مما يشير إلى أن النجم النيوتروني هو جزء من نظام اثني، وهو يدور حول رفيق نجمي منخفض الكتلة. ولا تسفر قياسات زمن وصول النبضات، التي تمتد طوال عدة سنوات، عن المواقع الدقيقة والتحركات الملائمة ذات الصلة (أي الحركات الزاوية عبر السماء) للنجوم النابضة فحسب وإنما توفر أيضاً معلومات عن الاستقرار الطويل الأجل لفترات النجم النابض.

والكشف عن نبضات مفردة غير ممكن إلا بالنسبة للنجوم النابضة الأقوى. وفي هذه الحالات، تبين أن شدة النبضات يمكن أن تتغير إلى حد كبير، ويعتقد أن يكون بعض التباين تلافؤاً يعزى إلى الوسط ما بين النجوم الذي سافرت عبره النبضات. وبالنسبة للنجوم النابضة الضعيفة، تستخدم تقنيات توسيط النبضات على أساس أوقات تكامل تصل إلى عدة ساعات وذلك لتعريف متوسط جانبية نبضية. وعموماً، تنخفض شدة انبعاثات النجم النابض بسرعة أكبر بتزايد التردد مما هو الحال لمعظم أنواع المصادر الراديوية الأخرى.

1.6.7 النجوم النابضة بمثابة مقياسيات معيارية

تبين أن النجوم النابضة التي لها فترات من مللي ثانية مستقرة جداً. ومشتق الفترة (تغير الفترة مع الزمن) هو في المدى من 10^{-18} إلى 10^{-20} ، وهو أصغر بمقدار حوالي أربع إلى خمس مراتب مما هو بالنسبة لنجوم نابضة أخرى. وهذه النجوم النابضة موضع اهتمام كبير في مجال الفلك الفيزيائي، وتقوم عدة مرصد في أنحاء العالم بعمليات بحث عن هذه الأجرام. وهناك حوالي 100 نجم نابض بمقدار ملليثوان معروف اليوم.

وتجري رصدات التوقيت الطويل المدى للنجوم النابضة بمقدار ملليثوان. وهي تشير إلى أن الاستقرار على المدى الطويل لفترات النجوم النابضة هو على الأقل مماثل لما يتحقق في الوقت الحاضر باستخدام معايير التردد الذرية. وهذا يشير إلى إمكانية استخدام هذه النجوم النابضة لضبط الوقت بدقة في المستقبل. وقد تعزز هذا الرأي بفضل الكشف عن نجم نابض جنوبي من فئة المللي ثانية أكثر لمعاناً بمرتين من أي نجوم نابضة من فئة مللي ثانية أخرى مكتشفة. وتمكن شدة هذا النجم من اعتميان فرادى النبضات. والبحوث جارية لدراسة استخدام هذه النجوم النابضة في وضع مقياس زمني دقيق في المستقبل.

ولا بد من التوصل إلى عدة قرارات قبل العمل على استخدام النجوم النابضة من فئة مللي ثانية في ضبط الوقت في المستقبل (انظر مثلاً المسألة ITU-R 205/7، التقرير ITU-R RA.2099). وتتناول هذه القرارات جوانب الرصد مثل نطاقات التردد المفضلة لرصدات النجوم النابضة (اقترح، على سبيل المثال، نطاق عريض في المدى 1 330-1 427 MHz) وسويات الإشارات غير المطلوبة التي قد تتسبب في حدوث تداخل ضار وحدوى تقاسم الترددات في نطاقات الرصد مع خدمات أخرى. وتشمل الشواغل الأخرى مقارنة بيانات التوقيت مع مقياس الزمن الذري وتعريف وقت وصول النبضة وتقييم دقة قياس التوقيت وطرائق الكشف عن وجود تداخل والإجراءات الواجب اتباعها في مقارنة بيانات التوقيت مع مقياس الزمن الذري.

2.6.7 النجوم النابضة بمثابة نقاط إحداثيات مرجعية

نوقش في بداية هذا الفصل تطبيق القياس VLBI في خدمة الفلك الراديوي بمثابة تقنية توفر أعلى استبانة زاوية في VLBI فضائية معينة. والأبعاد الزاوية للنجوم النابضة صغيرة جداً تتراوح من 10^{-7} إلى 10^{-10} زاوية قوسية. ويعتقد أن توزيع اللمعان في محيطها

المغناطيسي لا يمكن حله. ويمكن اعتبار النجوم النابضة نفسها بمثابة نقاط إحداثيات مرجعية في السماء. ويقاس التوقيت بالسنوات لموقع نجم نابض في الإطار المرجعي الدينامي بدقة قدرها 0.5 مللي ثانية قوسية، ما يقابل عدم يقين بمقدار 1 ميكروثانية في التوقيت و300 متر في مدار الأرض. ويمكن تحقيق دقة مماثلة بواسطة VLBI العابرة للقارات في النطاق S (كالبازين، روسيا-كاشيما، اليابان) [Sekido et al., 1998]. ويتم الحصول على بيانات VLBI لإحداثيات النجم النابض في الإطار المرجعي السماوي الدولي (ICRF). وهو يوفر إمكانية ضبط نظام الاحداثيات السماوي بدرجة عالية من الدقة. ويمكن استخدام إحداثيات النجوم النابضة من بيانات VLBI بمثابة احداثيات مستقلة عند تطبيق إجراء توفيق لمعرفة معلمات النجم النابض (الفترة ومشتقات زمن الفترة والاحداثيات والحركة المناسبة ومعلمات Kepler لنظام اثنيي).

7.7 الرصد الشمسي

بما أن النشاط الشمسي يمكن أن يؤثر على تشغيل بعض الخدمات، مثل مرافق الكهرباء، فهو يخضع للمراقبة على صعيد العالم في مناطق مختلفة من الطيف الكهرمغناطيسي. وكمثال على هذه المراقبة، قام المجلس الوطني للبحوث في كندا منذ عام 1947 بقياسات يومية للانبعثات الراديوية الشمسية في موجة طولها 10,7 سنتيمترات. وقد وفر هذا البرنامج، وهو يتألف من قياسات دقيقة لكثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd) الكلية ومراقبة التوهج، أطول سجل كمي موجود للنشاط الشمسي. ويرمز للقياس، في وحدات تدفق الطاقة الشمسية (sfu) ($1 \text{ sfu} \equiv 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$)، عادةً بالرمز $F_{10,7}$ ويستخدم في جميع أنحاء العالم باعتباره المؤشر الرئيسي للنشاط الشمسي. ولا يقتصر استخدامه على أوساط الفيزياء الشمسية، بل يستخدمه أيضاً علماء الغلاف الجوي ومهندسو الاتصالات ومرافق الطاقة الكهربائية وغيرها من المنظمات التي يمكن أن تتأثر عملياتها بفعل النشاط الشمسي المرتفع والعواصف المغناطيسية الأرضية المصاحبة. كما تستخدمه وكالات الفضاء في نمذجة كثافة الغلاف الجوي العلوي للأرض لإجراء الحسابات المدارية الساتلية. وبما أن البث الراديوي الشمسي في أطوال الموجات الستيمترية تهيمن عليه مساهمة (المكونة المتغيرة ببطء) تتكون في تركيزات من البلازما تدعمها المجالات المغناطيسية والإلكترونات الحرارية في المجالات المغناطيسية، فإن الشدة بمقدار 10,7 سنتيمترات ترتبط بقوة بالتدفق المغناطيسي الكلي. كما ترتبط أيضاً بشكل جيد بتدابير أخرى من النشاط الشمسي، وتستخدم على نطاق واسع كبديل عن كميات مثل عدد بقع زيوريخ الشمسية ولمعان الشمس وشدة الأشعة فوق البنفسجية المتكاملة، والتي يصعب قياسها مع مراعاة الاتساق والاستمرارية المطلوبين. وثمة مناقشة تفصيلية لوحدات $F_{10,7}$ في المرجع [Tapping, 2013].

ونظراً لشدة الانبعثات الشمسية، ولأن معظم القياسات في السنوات الأخيرة أُخذت من مواقع محمية جيداً، لم يكن التداخل الضار من الخدمات النشطة يمثل مشكلة. ومع ذلك، أشار أبرز المستعملين للمعلومات المرصودة إلى أن أي معدلات لفقدان البيانات بسبب عطل تقني أو تداخل يجب أن تبقى دون 1% في أي سنة معينة.

وثمة أداة أقوى لرصد الشمس، وهي مرصاد الشمس الراديوي Nobeyama (اليابان)، استكمل في عام 1992، وهو يعمل يومياً في تردد 17 GHz باستبانة زاوية على الشمس بمقدار 10 ثوان قوسية واستبانة زمنية تصل إلى 20 مللي ثانية. وهناك أداة جديدة متعددة الأغراض، وهي صفيغة شمسية متقلبة الترددات (FASR)، سوف تكون قادرة على التقاط صور للشمس وغلافها الجوي باستبانة ثانية قوسية على مدى تردد 0,1-30 GHz، وهي قيد الدراسة [Bastian et al., 1998].

المراجع

- BASTIAN, T. S., GARY, D. E., WHITE, S. M. and HURFORD, G. J. [1998] *Broadband imaging spectroscopy with a solar-dedicated array*. Proc. SPIE, Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes. T. G. Phillips, ed. p. 609-619.
- D'ADDARIO, L. R. [1991] Time synchronization in orbiting VLBI. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-40, p. 584-590.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- HIRABAYASHI, H. *et al.* (52 coauthors) [1998] Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme. *Science*, Vol. 281, p. 1825-1829.
- LEITCH, E. M. *et al.* [2002] Experiment design and first season observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 28-37.
- LEVY, G. S. *et al.* (31 co-authors) [1989] VLBI using a telescope in Earth orbit. 1. The observations. *Astrophys. J.*, Vol. 336, p. 1098.
- LOVELL, J. E. J., MCCALLUM, J. N., REID, P. B., MCCULLOCH, P. M., BAYNES, B. E., DICKEY, J. M., SHABALA, S. S., WATSON, C. S., TITOV, O., RUDDICK, R., TWILLEY, R., REYNOLDS, C., TINGAY, S. J., SHIELD, P., ADADA, R., ELLINGSEN, S. P., MORGAN, J. S., & BIGNALL, H. E. [2013], "The AuScope geodetic VLBI array", *Journal of Geodesy* 87 527-538
- MORAN, J. M. [1998] *The submillimeter array*. Proc. Spie. Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes, T. G. Phillips, ed., p. 208-219.
- PADIN, S. *et al.* [2001] First intrinsic anisotropy observations with the cosmic background imager. *Astrophys. J. Lett.*, L1-L5.
- PETRACHENKO, WILLIAM, BEHREND, DIRK, HASE, HAYO, MA, CHOPO, NIELL, ARTHUR, SCHUH, HARALD, & WHITNEY, ALAN 2013, "The VLBI2010 Global Observing System (VGOS)" EGU General Assembly, held 7-12 April, [2013] in Vienna, Austria, id. EGU2013-12867, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..1512867P>
- PRESTON, R. A., BURKE, B. F., DOXSEY, R., JORDAN, J. F., MORGAN, S. H., ROBERTS, D. H. and SHAPIRO, I. I. [1983] *The future of VLBI observatories in space. (Techniques d'interférométrie à très grande base)*. F. Biraud, ed., Cepadues, Toulouse, France.
- SEKIDO, M., IMAE, M., HANADO, Yu., HAMA, S., KOYAMA, Y., KONDO, T., NAKAJIMA, J., KAWAI, E., KURIHARA, N., ILYASOV, Yu. P., ORESHKO, V. V. and RODIN, A. E. [1998] Pulsar VLBI experiment with Kashima (Japan) – Kalyazin (Russia) baseline. *New Astronomy Rev.* Vol. 43, p. 599-602.
- SCHUH, H. and BEHREND, D. [2012], "VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry". *Journal of Geodynamics*, 61, 68-80.
- TAPPING, K.F., "The 10.7cm solar radio flux ($F_{10.7}$)", *Space Weather*, Volume 11, Issue 7, July [2013], Pages: 394–406.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. [2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. 2nd ed. Wiley, New York, United States of America.
- USON, J. M., BAGRI, D. S. and CORNWELL, T. S. [1991] Radio detection of neutral hydrogen at redshift $z = 3.4$. *Phys. Rev. (Lett.)*, Vol. 67, p. 3328-3331.

الفصل 8

تخفيف التداخل

يتناول هذا الفصل مسائل التخفيف من تداخل الترددات الراديوية (RFI) في مجال الفلك الراديوي. وهناك وصف شامل ومراجع وافية في التقرير ITU-R RA.2126 - تقنيات التخفيف من تداخل الترددات الراديوية في عمليات الفلك الراديوي.

1.8 مقدمة - الأهداف

الغرض من تخفيف التداخل في عمليات الفلك الراديوي هو خفض أو إزالة أثر الإشارات من الخدمات النشطة والتي تنشأ داخل نطاقات خدمة الفلك الراديوي أو خارجها. ويكاد يؤدي التداخل دائماً إلى خسارة في البيانات وينال من جودة البيانات على السواء، الأمر الذي يطرح مشكلة تنظيمية إذا حدث التداخل ضمن نطاق مخصص لخدمة الفلك الراديوي. بيد أنه لا يمكن اللجوء إلى أي إجراء تنظيمي في حال فقدان البيانات في نطاقات غير مخصصة لخدمة الفلك الراديوي. ومن الأفضل طبعاً تجنب فقدان البيانات باتخاذ إجراءات تنظيمية يمكن أن تحول دون وجود إشارات تداخل، والوقاية أفضل بكثير من العلاج. ويمكن تنفيذ طرائق التخفيف، التي تشمل طرائق استباقية لتغيير بيئة تداخل الترددات المحلية عن طريق التنظيم وطرائق ما قبل الكشف وبعده، ومختلف طرائق ما قبل الارتباط والطرائق المطبقة وقت الارتباط وما بعده، وذلك في نقاط شتى ضمن نظام الحصول على البيانات. ومع ذلك، من الأفضل دوماً التصدي للمشكلة في أولى مراحل سلسلة المعالجة. فالتدخل المبكر يجد من فقدان البيانات ويخفض من تكاليف العمليات اللاحقة ويخفف من تعقيد النظام. ومن الأسر التوصل إلى تخفيف التداخل عندما تكون نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) عالية. ومن الأفضل معالجة التداخل الضعيف لاحقاً في سلسلة المعالجة بعد تكامل البيانات لزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR).

ولأسباب العلمية في الوقت الحاضر، تعمل نظم الفلك الراديوي الحالية بعروض نطاق أوسع على نحو متزايد وبدرجة متزايدة من حساسية النظام. ونتيجة لذلك، غالباً ما تغطي الرصدات نطاقات موزعة لخدمات نشطة لا تتوفر فيها الحماية لخدمة الفلك الراديوي. ولذلك فإن تقنيات تخفيف التداخل ضرورية للحصول على بيانات فلكية صالحة في النطاقات غير الموزعة لها.

وثمة مشكلة رئيسية تواجهها خدمة الفلك الراديوي في التشغيل عبر عروض نطاقات أوسع نشأت من استخدام أجهزة الطيف المنتشر العريض النطاق المنخفض الطاقة، وهي غير مرخصة ومصنعة على نطاق واسع. ويحتاج الأمر إلى حلول تخفيف مبتكرة لتمكين عمليات الفلك الراديوي على النحو الأمثل. وثمة مشكلة أخرى لعمليات الفلك الراديوي خارج النطاق وهي النفاذ الدينامي إلى الطيف (DSA) الذي يمكن النظم من العمل في الطيف الشاغر (المساحات البيضاء). ومن المتوقع للأجهزة الراديوية الإدراكية أن تملأ بشكل متزايد الطيف في شكل جديد من أشكال تقاسم الطيف. وبطبيعة الحال، يتوقف تشغيل عمليات الفلك الراديوي في النطاق العريض على نفس مبدأ النفاذ الدينامي إلى الطيف، على غرار الأجهزة الراديوية الإدراكية الجديدة المستخدمة.

2.8 توقع مصادر التداخل الراديوي وأثرها

يتوقف الأثر الفعلي للتداخل بالنسبة للبيانات المستقاة بواسطة التليسكوبات الفلكية على عدد من العوامل، أولها نوع التليسكوب الراديوي المستخدم. والتليسكوبات الوحيدة المكافئة هي الأكثر تأثراً إذ ليس لديها الكثير من التمييز التوجيهي إزاء التداخل الوارد، مما يؤدي إلى ضم الإشارات الفلكية وإشارات التداخل على نحو متماسك. وهذا يتناقض مع حساسية التليسكوبات للتداخل المدرجة في صفائف موصولة لقياس التداخل، حيث يدخل التداخل النظام جزئياً على نحو غير متماسك. وفي هذه التشكيلات تخدم خطوط الأساس الممتدة كعامل ترشيح مكاني يميز إزاء التداخل. ولكل نظام لقياس التداخل يستخدم تقنيات "الوقف الهامشي" قدرة لرفض التداخل تتوقف على خط الأساس، وترداد هذه القدرة بتزايد طول خط الأساس. ومع ذلك، ما زالت تتأثر معايرة كل محطة في الصيف بحكم التداخل المحلي الذي تتعرض له.

أما العامل الثاني فيتوقف على نمط الرصد. فبينما تستطيع القياسات المتواصلة أن تضحّي ببعض فتحات الزمن أو نطاقات التردد داخل مخطط الزمن-التردد لرصد ما فإن رصدة خط طيفي ما تتضرر كلما أثر تردد وعرض التداخل تأثيراً مباشراً على الإشارة الفلكية.

وثالثاً، يتوقف الأثر الذي تتعرض له البيانات على نمط التداخل. فهل التداخل متغير بتغير الزمن (نبضي)، و/أو هل هو ضيق النطاق أم واسع النطاق، و/أو هل هناك تراكم في أنماط التردد؟ ومن شأن البث المباشر (وغير المباشر) من شبكات الأرض، التي تتبع الكثافة السكانية وثرء المجتمع المحلي، أن يعطي خلفية إشارات ثابتة. وقد تسبب السواتل وخدمات الطيران في مكونات تداخل ثابتة وعابرة على السواء. وقد يضمن موقع مرصد ما نسبة إلى مسالك مرور الطيران وجود انبعاثات مباشرة منها وانعكاسات إشارات من الأرض، كتلك الآتية من رادارات المطارات. ويأتي معظم التداخل من اقتران الفص الجانبي مع خدمات نشطة، مع أن اقتران الحزمة الرئيسية الهدام يمكن أن ينشأ من السواتل ومن خدمات الطيران كما يمكن أن يحدث مثلاً من سائل Cloudsat في تردد 94 GHz. وبالإضافة إلى التداخل الخارجي، هناك أيضاً احتمال التداخل الجانبي المتولد عن المرصد بالذات من أجهزة الحوسبة والالكترونيات في الموقع، ويمكن تحديد هذه المصادر كما ينبغي تدريعها بشكل كافٍ.

رابعاً، قد يؤثر تغاير التداخل بمرور الزمن بشكل خاص في الرصدات الفلكية الحرجة من حيث الزمن. إذ من شأن التداخل المتغاير غير المتكرر الذي يحدث أثناء دراسات الأحداث العابرة والنجوم النابضة أن يتلف رصدات حرجة فريدة لا يمكن تكرارها. وقد يؤثر على التتابع الزمني للنبضات كما يمكن أن يؤثر أيضاً على معايرة البيانات الحرجة من حيث الزمن.

وأخيراً، فقد تغيرت بيئة التداخل بسرعة في السنوات الأخيرة الماضية، حيث دخلت تطبيقات خدمات جديدة وخرجت تطبيقات أخرى. ومن شأن استخدام النطاق العريض وتطبيقات انتشار الطيف للبث والاتصالات، فضلاً عن الأجهزة غير المرخصة التي تستبعد إشارات الماضي الذرية عالية الطاقة وتستبدلها بإشارات أوسع وأخفض طاقة، أن تولد إشارات ليس من السهل إزالتها من بيانات الفلك الراديوي. ولسوف يغير تكاثف استخدام الطيف والنفاد الدينامي إلى الطيف على نحو متزايد طابع بيئة التداخل، وسوف يتطلب على نحو متزايد من خدمات الفلك الراديوي أن تعدل نهجها في الحد من تأثير التداخل على البيانات الخاصة بها.

3.8 منهجيات تخفيف التداخل الراديوي - طبقات التخفيف

يمكن استخدام عدد من طرائق تخفيف التداخل في مراحل مختلفة من عملية الحصول على البيانات. والطريقة الأولى والأجمع هي التحكم في إشارات التداخل الواردة قبل أن تدخل المستقبل وذلك بتعديل بيئة التداخل الراديوي المحلية والإقليمية. وثمة طبقة ثانية للتخفيف وهي إمكانية تطبيق طرائق ما قبل الكشف في نظام الاستقبال بالذات، وربما في مجال الطرف الخلفي لاستقاء البيانات. والطبقة الثالثة تتألف من البتر الرقمي وطرائق إزالة التداخل الراديوي، ويمكن استخدامها قبل الارتباط. ولدى ظهور الارتباط بواسطة البرمجيات، يمكن أيضاً دمج هذه الطرائق الرقمية في عملية الارتباط. وثمة طبقة رابعة ممكنة تستدعي تطبيق الطرائق الرقمية بعد الارتباط وبعد تكامل البيانات أو تخزين البيانات المؤقت. وأخيراً، تتكون طبقة التخفيف الخامسة من مناولة (بتر وتعليم) البيانات الفلكية التي تم جمعها لإزالة آثار مصادر التداخل المعروفة وغير المعروفة.

ويتوقف أداء كل هذه الطرائق على نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR)، أي على الشدة النسبية للتداخل أو على نسبة تغاير ضوضاء النظام إلى تغاير التداخل. ومعظم الطرائق لا تكون فعالة إلا عندما يكون التداخل قابلاً للكشف بوضوح ضمن البيانات، ويمكن إزالة آثاره فقط حتى سوية الضوضاء الآتية. ومقياس الجدارة لهذه الطرائق هو كسب المعالجة بعد كبت التداخل أو تخفيضه مقدراً بقياس نسبة الإشارة إلى الضوضاء (بعد المعالجة) إلى نسبة الإشارة إلى الضوضاء (قبل المعالجة).

وتتوقف جودة أداء أي طريقة على السوية المطلوبة من كبت التداخل، ذلك لأن كل طبقة من طبقات التخفيف تخضع للقيود الخاصة بها. وفي هذا الصدد ثمة دور لعرض النطاق الذي تشغله إشارة فلكية نسبة إلى عرض نطاق التداخل. ومن المهم أن يؤخذ في الاعتبار فقدان الإشارة موضع الاهتمام في معرض الحكم على نتائج التخفيف، لأن ذلك يختلف من طريقة إلى أخرى. وفي الواقع يكون لاستخدام طبقات من عدة طرائق أثر تراكمي، حيث أن كل طبقة لاحقة من التخفيف تعمل على ما يتبقى من أي إشارة تداخل من معالجة أسبق. وبالإضافة إلى ذلك، قد يترتب على تطبيق كل طريقة إدخال قدر من "السمية"، أي الضرر الذي لحق بالبيانات الذي يزيد تدريجياً من انحطاط نوعية البيانات. وتجري كمية الضرر الكلي الذي يلحق

بالبينات، كقياس لفقدان البيانات الناجم عن معالجة تخفيف (لاحقة)، بقياس نسبة الإشارة إلى الضوضاء (بعد المعالجة) إلى نسبة الإشارة إلى الضوضاء (في غياب التداخل).

4.8 الطرائق الاستباقية - تغيير بيئة التداخل الراديوي

من شأن التنسيق مع المستخدمين النشطين واللجوء إلى اللوائح الوطنية والدولية أن يقلل من حدوث التداخل في محطة ما من محطات الفلك الراديوي، ويمكن أن يقلل من أثر التداخل على الرصدات. ويسهم تحسين الإطار التنظيمي وتعزيزه على المستويات الوطنية والإقليمية والدولية بدور هام في حماية الاستخدام المنفصل للطيف: المصادر الداعمة لهذا النهج متوفرة في هذا الكتيب، وفي توصيات القطاع ITU-R، وخاصة سلسلة علم الفلك الراديوي (RA)، وفي سلسلة الفلك الراديوي من تقارير القطاع ITU-R، وفي كتيب اللجنة المعنية بترددات الفلك الراديوي (CRAF). ويمكن أن تستخدم مناطق التنسيق ومناطق الصمت الراديوي لتعديل بيئة التداخل الراديوي التي سوف تتولد عن مصادر التداخل الأرضية في تليسكوب ما. ويتمتع العديد من المراصد بلوائح محلية ووطنية تمنع تركيب مرسلات في مواقع قريبة جداً (في حدود 2-6 كيلومترات) من المرصد. وقد تم تنفيذ تنسيق على نطاق واسع وحددت مناطق صمت لبضعة مواقع، مثل منطقة الصمت الراديوي الوطنية حول غرين بانك، فرجينيا الغربية في الولايات المتحدة الأمريكية، ومنطقة التنسيق في بورتوريكو حول مرصد أريسيبو، أو منطقة التنسيق التي أنشئت حول مرصد ALMA في صحراء أتاكاما في شيلي. ويجري تنظيم بيئات لتليسكوبات جديدة، مثل الموقعين المحتملين لصفيف الكيلومتر المربع، بواسطة لوائح وطنية استشرافية لتمكين أكثر الرصدات حساسية التي ستجري في هذه المواقع.

ولما كان من الأفضل حل قضايا التداخل المحتمل قبل التنفيذ، فمن الضروري تحديد كل من المرسلات القائمة والجديدة المحتملة على السواء والتي قد تؤثر على تلك الأجزاء من الطيف الراديوي موضع اهتمام مرصد ما، وذلك من خلال مواكبة التغيرات في الترخيص المحلي ومعرفة الاتجاهات في استعمال الطيف. ويمكن استخدام مراقبة الطيف لمعرفة الاتجاهات، ولمعرفة "جيران الطيف"، ولمعرفة "مواطن الخطر". ومراقبة الطيف هي أيضاً أداة لتحديد النسبة المتوقعة من فقدان البيانات التي يسببها التداخل في النطاقات المنفصلة.

وتبين التجربة أن المراصد ذاتها غالباً ما تكون من مصادر التداخل الهامة. إذ يمكن أن يتولد عن معدات الحوسبة والأجهزة الإلكترونية في المباني انبعاثات توافقية وعريضة النطاق تدخل نظام الكشف في تليسكوب ما. ويتسم تحديد هذه المصادر وإزالتها بأولوية عالية بالنسبة لكل مرصد. ومن شأن استخدام الخزائن المانعة لانبعاث التداخل و"أقفص فارادي" لاحتواء الأجهزة الإلكترونية والمعدات الحاسوبية، وكذلك للحد من النشاط البشري (غرف التحكم عن بعد) وفرض القيود على استخدام الحواسيب المحلية، أن يساعد على تمتع مرصد ما "بصمت راديوي". وهذه القائمة بما يجب القيام به هي جزء من الاستعدادات اللازمة لكي يتمكن مرصد ما من إجراء أكثر الرصدات حساسية.

5.8 الكشف السابق والكشف اللاحق

هناك طريقة موحدة لإزالة التداخل في مجال الترددات وهي تركيب نطاق تمرير أو مرشح تمرير عال/منخفض في جهاز الاستقبال، مما يؤدي إلى فقد الإدراج ويرفع بشكل كبير من حرارة النظام عند ترددات قريبة من حافة النطاق. وبمقدور تكنولوجيا ترشيح النقل الفائق أن تقلل إلى حد كبير من أثر هذه المرشحات. ويعمل ترشيح نطاقات خدمة الفلك الراديوي على منع الضرر الناجم عن إشارات قوية خارج النطاقات. ويؤدي الترشيح أيضاً إلى فقدان في البيانات بالنسبة للرصدات المتواصلة، بينما غالباً ما يكون ضرورياً لتمكين رصدات الخطوط الطيفية عندما يحدث التداخل في تردد حرج داخل نطاق تمرير مستقبل ما.

ويمكن اللجوء إلى عملية الطمس أو وقف عملية إستقاء البيانات، مثل وقف تراكم البيانات في مرحلة الترابط، لتحقيق الإزالة في المجال الزمني. وقد استخدمت هذه الطريقة بنجاح للإشارات النبضية والدورية. وقد نفذ مرصد أريسيبو نظام طمس راداري في مطار من شأنه أن يوقف معالجة الارتباط بالتزامن مع فترة نبض الرادار خلال نافذة زمنية مصممة لكي تشمل أي عيوب رادارية ناجمة عن أثر التضاريس والتشتت المتعدد المسارات. وتحتسب البيانات المفقودة باعتبارها خسارة في زمن الرصد عند حدوث هذا النوع من التداخل ضمن نطاق موزع لخدمة الفلك الراديوي.

وقد تكرر الكثير من البحوث لتصميم مستقبلات قوية تتسم بدرجة عالية من الخطية، بحيث لا تؤثر عليها بيئات التداخل الراديوي القاسية. ورصدت النطاق العريض ممكنة عندما تكون نظم الاستقبال خطية بما فيه الكفاية بحيث لا يحدث أي تعرج ولا يتولد أي منتجات ما بين التشكيل ولا يحدث أي فرط في الحمولة.

6.8 الترابط السابق

1.6.8 المعالجة الرقمية القائمة على الهوائي

يمكن تنفيذ المعالجة الرقمية في الوقت الفعلي كجزء من معالجة التردد المتوسط (IF) في التليسكوبات الراديوية وحيدة المكافئ، وكجزء من المعالجة في المحطة و/أو عملية تكوين الحزمة لأدوات الصيف. وتعمل هذه الطريقة الفعالة من حيث التكلفة على ما يرام في حال التداخل الراديوي النبضي (العابر) وتتطلب اعتيان بيانات سريع فضلاً عن توفر دورات حوسبة في كل محطة من المحطات. وتتحدد كمية فقدان البيانات بحكم طبيعة التداخل العابرة. ومن شأن التعليم والإزالة في التردد المتوسط وفي الوقت الفعلي أن يقلل من فقدان البيانات الذي يحدث في طريقة التعليم-الإزالة من خلال التعامل فقط مع تلك الأجزاء من الزمن والتردد المصابة بالتداخل؛ وينبغي ألا يلحق ذلك أضراراً جانبية بالفترات الزمنية وفترات التردد المجاورة. وهذا يختلف عن معالجة ما بعد الارتباط، وهي أشد لأن عينات البيانات المتكاملة تستخدم من أجل التعليم والإزالة عند خط الأساس وفي الهوائي.

ويمكن تحديد العتبات في كل من المجال الزمني ومجال التردد عندما يكون التداخل في البيانات المعتانة قوياً وقابلاً للاستبانة، وعندما يكون الحيز الذي يشغله التداخل في الطيف منخفضاً نسبياً. وقد استخدم تحديد العتبات لأول مرة لإزالة التداخل في تليسكوب Ratan 600 واستخدم كثيراً منذ ذلك الحين. وثمة تطبيق ناجح نُفذ مؤخراً في التليسكوب الراديوي التجميعي في ويستربورك (WSRT)، حيث تمت معالجة بيانات استقطاب ثنائي بمقدار 20 MHz من كل من التليسكوبات الأربعة عشرة في الوقت الفعلي. كما تم تطبيق طريقة تحديد العتبات هذه على بيانات النجوم النبضية قبل عملية طي الفتحات.

وتبحث طرائق ترشيح الفضاءات الفرعية عن توقيع محدد في مكون قدرة التداخل في البيانات من أجل استبانته وإزالته. وثمة تطبيق ناجح بشكل خاص هو البحث عن الدورية-السكونية ضمن البيانات، وهو يعمل بشكل جيد بالنسبة لإشارات التداخل المشكّلة رقمياً.

وثمة شكل آخر من أشكال إزالة الفضاءات الفرعية يستغل تحليل التوزيع الاحتمالي للإشارات. وبما أن مساهمة التداخل تغير طيف القدرة إلى توزيع غير مركزي (تربيع كاي)، على النحو الذي تحدده اللحظات الأعلى، فإنه يمكن إزالتها من البيانات. وثمة نهج مماثل يكمن في استخدام التفرطح (اللحظة الرابعة من طيف القدرة) لاستبانة مكون التداخل وإزالته. وقد استخدم هذا النهج للرصدات الشمسية وحيدة المكافئ، ولمعالجة الترابط (اللاحق) في بيئة ترابط البرمجيات. كما يستغل أيضاً الترشيح المتوسط والاستفادة من خصائص التوسيط في نظام متعدد التغذية الخصائص الإحصائية للبيانات وهي فعالة في تخفيف التداخل في بيانات الخطوط الطيفية في الوقت الفعلي.

وتؤدي طرائق تخفيف ما قبل الارتباط التي تنطوي على إزالة عينات البيانات إلى تغييرات في معايرة كسب البيانات. وهذا يتطلب مسك دفاتر دقيق لتحديد التأثير على البيانات وفقدان البيانات المرتبطة به. ولا يؤثر استبدال البيانات المتضررة في مجال التردد (أو الزمن) مع خط أساس مجهز سوى على جذر متوسط تربيع القنوات المتأثرة.

2.6.8 إلغاء الضوضاء التكيفي (الزمني)

كثيراً ما يستخدم إلغاء الضوضاء التكيفي (ANC) في مجال الاتصالات والتكنولوجيا العسكرية. والمبدأ الأساسي للترشيح التكيفي الزمني هو تحويل فورييه السريع (FFT) للبيانات الواردة وتنفيذ عملية تكيف على فترات التردد ومن ثم العودة إلى مجال التردد عبر معكوس تحويل فورييه السريع. وهذه الطريقة، القائمة على أساس ترشيح Wiener، تعمل في إشارات التداخل التي تكون نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) فيها هامة، أي عندما يهيمن التداخل على ضوضاء النظام. ويمكن أن يساوي كبت إشارة التداخل ما يقرب من نسبة تداخلها الآنية إلى الضوضاء. وتكون المرشحات التكيفية فعالة عندما تكون المعلومات الطيفية غير ذات أهمية، كما في دراسات النجوم النابضة والتواصل. كما استخدمت هذه الطريقة على نحو فعال في الصفائف المتعددة

التغذية أو صفائف المستوي البؤري في مكافئيات وحيدة (انظر القسم التالي). وهناك شكل مغاير للترشيح التكميلي وهو طرح قناة بيانات مرجعية من قناة بيانات إشارة باستخدام نسخة من التداخل الراديوي نفسه، من خلال مقارنة الإشارات في المصدر زائد التداخل بالإشارات خارج المصدر زائد التداخل. وفي بعض نظم التليسكوبات القائمة، تؤخذ النسخة من التداخل من هوائي مرجعي مساعد موجه نحو مصدره. ولكن في هذه الحالة يتطلب كل مصدر متميز من التداخل الهوائي الخاص به.

وقد تم بنجاح تطبيق تقدير معلماتي لإشارات تداخل معلومة وطرحها من البيانات وذلك للإرسالات الساتلية بشفرة C/A في النظام العالمي الساتلي للملاحة (GLONASS) باستغلال خصائص التشكيل المعروفة لها، حيث تم التوصل إلى إلغاء إشارة من أكثر من 20 dB دون اللجوء إلى هوائيات مساعدة. ويهدف تنفيذ حديث العهد لتقنيات الترشيح التكميلية إلى إزالة التوقيع على إرسالات L3 من ساتل واحد للنظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) في مرصد Arecibo.

3.6.8 الترشيح المكاني والتوجيه الصفري

كل صفيح متعدد الهوائيات له فصوص جانبية وقيم صفرية في مخطط حزمته يمكن استخدامها لتخفيض الإشارات من مصادر تداخل محددة المكان. وبشكل عام، يتطلب النظام التكميلي الذي يستخدم خوارزمية تشكيل حزمة نسبة تداخل إلى ضوضاء (INR) عالية ويقتصر على عدد صغير من أهداف التداخل لتعقبها أثناء الرصد. وتحتاج مصادر التداخل أيضاً إلى أن تبقى مستقرة ويمكن التنبؤ بها خلال رصدة ما. والترشيح المكاني في أسلوب تشكيل الحزمة لعدد محدود من مصادر التداخل لا ينال عموماً من الصورة المتولدة بواسطة الحزمة الرئيسية.

وتستخدم تقنيات الهوائيات الذكية، المتعددة المحاسيس في نظم الرادارات والاتصالات، لتحديد اتجاه الوصول ولتنفيذ خوارزميات تشكيل الحزمة. وكذلك الأمر، من شأن تليسكوبات المحاسيس المتعددة من الجيل الجديد، التي ترى مباشرة مصادر التداخل المحددة (مثل صفيح التردد المنخفض (LOFAR) وصفيح Murchison Widefield (MWA))، أن تسمح بتحسين عملية تشكيل الحزمة لكي تشمل عملية التصغير التكميلي والترشيح المكاني لمصادر التداخل المتميزة هذه في الوقت الفعلي. وعلى صعيد التطبيق العملي، استخدمت مائة هوائيات LOFAR لتوليد حزمتين منفصلتين، وفي الوقت ذاته وضع صفر دائم في موضع واحد 15 درجة فوق الأفق. وتوفر الصفائف الطورية متعددة المحاسيس والمعايرة جيداً إمكانية توجيه صفري لتعقب ساتل ما مع الحفاظ على حزمة كسب عال في مجال مستهدف، مع أن تعقيد المعالجة يزداد بسرعة إذا كان الأمر يتناول نظاماً متعدد السواتل.

وبالنسبة للصفائف المتباعدة، التي لها خطوط أساس طويلة نسبياً، يمكن تنفيذ الارتباط أولاً ثم تصنيع الحزم بعد ذلك. وعلى افتراض تحديد مواقع مصادر التداخل، فإن كبتها يتحقق عندئذ من خلال معالجة فترات زمنية قصيرة من تدفق البيانات وتطبيق عملية ترجيح معقدة أثناء معالجة الصور. وتبين عمليات المحاكاة الحاسوبية للترشيح المكاني بعد الارتباط أن عملية التنظيف بواسطة حزمة مصححة التداخل يمكن أن يكون فعالاً.

وتوفر نظم الصفائف في المستوي البؤري (FPA) والمستقبلات المتعددة الحزم فرصاً جديدة للترشيح المكاني، حيث إن لكل من مكونات التغذية إشارة سماوية مستقلة إلى جانب إشارة التداخل المشتركة. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن دوماً استخدام إحدى وصلات التغذية في نظام متعدد الحزم بمثابة هوائي مرجعي.

7.8 عند الارتباط

يتم، كجزء من عملية الارتباط، دمج البيانات المرقمنة عموماً عبر فترات زمنية تتراوح من زمن الاعتيان إلى بضع ثوان، مما يزيد كثيراً نسبة التداخل إلى الضوضاء. ونتيجة لذلك، يصبح من الممكن معالجة التداخل المستمر وإن كان ضعيفاً، والذي لا يمكن معاملته في الوقت الفعلي، والبقايا (الطيفية) الضعيفة من عمليات تخفيف سابقة. ومن ناحية أخرى، يمكن تخفيض شدة ذرى هامة من إشارة تداخل متغايرة بفضل هذا التكامل. وبالنسبة لأدوات الصفائف، من شأن الترشيح المكاني الناتج عن تتبع التأخير (الهامشي) لمصدر سماوي أيضاً أن يقلل من شدة التداخل من الأرض في البيانات المتصلة الترابط.

وعند هذه النقطة من عملية استقاء البيانات، يمكن إدراج بروتوكولات مضادة للصدفة لتحديد مكونات التداخل، فضلاً عن معالجة التخفيف الرقمي واستخدام البيانات المستقاة من هوائي مرجعي. وتسمح وسائل الترابط البرمجية من الجيل الجديد

بإدماج تطبيقات (تعليم على أساس التفرطح) قبل ترابط FX (تحويل فورييه قبل عملية الضرب) وبروتوكولات التكدس وبعده. ويجري تنفيذ التخفيف في مراحل مختلفة أثناء المعالجة في صيف التردد المنخفض LOFAR. وبالنسبة لأدوات وحيدة المكافئ قد تتضمن معالجة ارتباط نطاقات (متعددة) وحيدة كلاً من تحديد العتبة أو الطرائق الإحصائية وإلغاء الضوضاء باستخدام هوائي مرجعي.

ونشر المعالجة الرقمية والمدخلات من الهوائيات المرجعية خلال ارتباط وحيد الموجة (SW) يكافئ المعالجة السابقة للارتباط في النطاق القاعدي المبنية أعلاه. ومن ناحية أخرى، فإن تنفيذها في خلفيات الأجهزة التقليدية (القائمة) يتطلب إضافة كل من الأجهزة والبرمجيات الخاصة.

8.8 الارتباط اللاحق - قبل التصوير أو بعده

تتكون المعالجة التقليدية بعد الارتباط من عملية التعليم والإزالة، وهي تستغرق وقتاً طويلاً وغالباً ما تتم يدوياً. وبما أن هذه العملية تتم على بيانات متكاملة ومترابطة، فإن فقدان البيانات الناجم عن التعليم يمكن أن يكون هاماً جداً، ولا سيما عندما يتطلب الأمر تعليم فتحات زمنية بأكملها وخطوط أساس بأكملها و/أو هوائيات بأكملها. وهذا يختلف عن تعليم ترددات متوسطة (IF) قائمة على الهوائي أو الإزالة حيث يشمل التعليم مجموعات فرعية صغيرة، مما يفضي بطبيعته إلى نسبة أصغر من فقدان البيانات إجمالاً.

ومن شأن معالجة البيانات المترابطة (المتكاملة) على الخط أو خارج الخط تمكين إدراج التعليم والإزالة المؤتمتين، حيث يمكن إجراء المزيد من المعالجة الإحصائية أو الفضائية الفرعية الأكثر تطوراً (انظر البند 1.6.8) لإزالة مكونة التداخل دون فقدان الكثير من البيانات المترابطة بها.

وبالفعل، تم تنفيذ هوائي مرجعي في مرحلة ما بعد الارتباط لإزالة الإشارة من مصدر محدد جيداً باستخدام علاقات الإغلاق المتاحة.

وتستخدم أدوات الصفائف تقنيات الوقف الهامشي وتعويض التأخير أثناء الرصدات للحفاظ على المعدل الهامشي لموقع الرصد المركزي عند الصفر أثناء الرصدات. ونتيجة لذلك فإن مكونات التداخل المستقرة (الأرضية) والساتلية في البيانات تتمايز فيما بينها عن طريق التهميش بأسرع مما يحدث في المصادر الفلكية، أي بمعدل الوقف الهامشي. وهذه الحركة (النسبية) المتميزة تسمح بالاستبانة خارج الخط وإزالة مصادر التداخل المستقرة من كل من البيانات المترابطة ومستوي الصورة دون التسبب في فقدان البيانات. وثمة شفرة طبقت أولاً في التليسكوب الراديوي العملاق بالموجات المترية (GMRT) مدججة الآن في نظام معالجة الصور الفلكية (AIPS).

9.8 التنفيذ في التليسكوبات

إن عملية استقاء البيانات من مرصد الفلك الراديوي تتطور للتعامل مع البيئة التكنولوجية المتغيرة بسرعة. وتحدث عمليات تحويل الإشارات من التماثلية إلى الرقمية الآن في أبكر وقت ممكن في مخطط معالجة البيانات، مما يسمح بالمعالجة الرقمية في غالبية حلقات سلسلة البيانات. ومن شأن زيادة القدرات أن تسمح بمعالجة بيانات في عرض نطاق أكبر بقدر أعلى من استبانة الزمن وقدر أعلى من استبانة التردد ($> \text{kHz}$).

إن العديد من الأجزاء الخلفية الحالية لا تسمح بتنفيذ التخفيف في المراحل الأولى من سلسلة معالجة البيانات دون إدخال تعديلات (شديدة) في المعدات الحاسوبية. وعلى النقيض من ذلك، فإن ترابط الأجزاء الخلفية والبرمجيات من الجيل الجديد يسهل هذه المخططات في مراحل مختلفة من المعالجة.

وبما أن كل طريقة تخفيف يتطلب تشغيلها عتبة محددة من نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR)، فإن إزالة معظم التداخل يتطلب تطبيقاً يشتمل على طبقات من الطرائق لاستغلال التكامل التدريجي للبيانات ونسبة INR المتزايدة. وبينما ليس هنالك من طريقة يمكن بها إزالة التداخل دون عتبة الضوضاء التي تصادفها، فإن خطوات التخفيف اللاحقة قد تزيل بقايا التداخل المخفف، فضلاً عن التداخل الضعيف الذي لا يظهر إلا بعد التكامل.

ويتوقف تنفيذ الهوائيات المساعدة لأدوات الصفائف على إمكانية دمج خرجها في نظام المعالجة، (وعلى الأخص) في جهاز الترابط. وتتعامل الهوائيات المرجعية الموجهة بشكل عام مع مصادر تداخل معينة وهي أقل فعالية في بيئة معقدة.

ويسهم التدخل البشري في عملية تخفيف التداخل بدور هام في العمليات على صعيد الواقع العملي. وهكذا قد يكون من الممكن تفضيل المعالجة المباشرة على الخط، في الوقت الفعلي والقابلة للتكيف مع مجموعة متنوعة من توقعات التداخل، على الاستخدام التقييدي للهوائيات المرجعية و/أو الترشيح المكاني للمرسلات المعروفة والثابتة. ومن المرجح أن يكون هذا هو الحال إلى أن يمكن الاستعانة بوسيلة تحكم ما تتمتع بدكاء اصطناعي لتوجيهه وإملاء مخطط تخفيف التداخل.

ومقاييس التداخل أقل عرضة لتداخل التردد الراديوي. إذ من شأن توقيف الحواف وإزالة الترابط بتعويض التأخير أن يوفر كبت التداخل بشكل طبيعي في خطوط الأساس الأطول. ومع ذلك، ما زال التداخل القوي يزيد من ضوضاء النظام، وما زال يؤثر على المعايرة ومجالات الرؤية المعقدة في محطة ما. ويمكن أن تقوم محطات القياس VLBI وشبكات الاستشعار الموزعة بتنفيذ التخفيف في كل محطة بعينها للحد من تأثير التداخل المحلي على النظام برمته.

وحرصاً على معايرة نظام ما بشكل صحيح، يتطلب الأمر مسك دفاتر على نحو دقيق لجميع البيانات المتأثرة من أجل الحصول على الأوزان الصحيحة من أجل إجراءات المعايرة الذاتية وعمليات التنظيف والتصوير اللاحقة.

ويتعين على تطبيقات التخفيف المقبلة أن تنظر في طرائق أكثر تطوراً من مجرد خوارزميات تعليم التداخل (التفرطح أو غيرها) والإزالة، الشائعة عموماً في هذا الوقت. ومن شأن استخدام الطرائق الإحصائية التي تستعمل مقادير عزم أعلى أن يفتح إمكانية إزالة مكونات التداخل دون التأثير على باقي البيانات، وهناك طرائق تسمح باستعادة البيانات جزئياً مما يقلل من فقدانها. وقد يصبح الترشيح التكميلي لنظم تمديد الطيف ممكناً عندما تُعرف مخططات الإبراق الرقمية الخاصة بها.

10.8 الخلاصة

لقد تم بنجاح استخدام معالجة البيانات "على الخط" و"خارج الخط" على حد سواء في التخفيف من بيئة التداخل في مرصد الفلك الراديوي. وعلى الرغم من أن هناك مجموعة متنوعة ومتزايدة من خيارات التخفيف الناجحة، فإن اختيار الطريقة المناسبة يتوقف كثيراً على خصائص التداخل الراديوي ونمط التليسكوب الراديوي ونوع الرصد. وعلى وجه الخصوص، قد يكون من المفضل استخدام معالجة البيانات على الخط في الوقت الفعلي في بيئة متغيرة التداخل بينما قد يكون من المفضل اتخاذ تدابير خاصة باستخدام هوائيات مرجعية وترشيح مكاني لمصادر تداخل معروفة وثابتة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن غياب المشاركة البشرية في عملية التخفيف قد تجعل المعالجة الأوتوماتية على الخط خياراً جذاباً.

وليس هنالك من طريقة عمومية للتخفيف من التداخل في البيانات الفلكية. ويتوقف الكبت الفعال للتداخل على نسبة التداخل إلى الضوضاء وخصائصه الزمنية والطيفية. وليس من الممكن دوماً إجراء تقييم كمي للطريقة المستخدمة وذلك لأن خوارزميات التخفيف هي عموماً عمليات غير خطية يمكن أن تؤثر على خصائص الضوضاء والمعايرة. ومجموع البيانات المفقودة الناتج عن استخدام طريقة معينة هو عامل مرشد في تقييم الطريقة المثلى.

وقد يحتاج الأمر إلى تطبيق طرائق متعددة من أجل التعامل مع بيئة تداخل راديوي أعم. ومع ذلك، فإن إزالة التداخل في كل خطوة من خطوات التخفيف من شأنها أن تغير خصائص البيانات، كما أن الأثر التراكمي لتخفيف التداخل ليس خطياً وإنما هو مجموع ما يمكن القيام به عملياً.

إن تكلفة المعدات الحاسوبية ورقمنة البيانات تنخفض بسرعة مما يتيح الفرص لتنفيذ وأتمتة خوارزميات تخفيف التداخل. وهذا يسمح بالمزيد من عروض النطاق الترددي ويوفر استبانة أعلى من حيث الزمن واستبانة أعلى من حيث الطيف فيما يتعلق بالرصدات الفلكية. ومع ذلك، ونتيجة للكميات الكبيرة المتزايدة من البيانات، سيكون من الضروري العمل على إدخال أنابيب مؤتمتة لخفض البيانات وما يرتبط بها من خوارزميات التخفيف الأوتوماتي.

وتصل إلى الأسواق الآن تكنولوجيات جديدة في مجال الاتصالات والبيث، والكثير منها في شكل أجهزة متنقلة غير مرخصة. وبما أنه من المستحيل السيطرة على مواقعها المتغيرة باستمرار، فإنها سوف تؤثر بسرعة على عمليات المرصد. وهناك حاجة إلى

بحوث خوارزمية لإزالة هذه الإشارات من البيانات الفلكية. وعلى وجه الخصوص، تمثل أجهزة تمديد الطيف (النطاق الواسع جداً) مشكلة بالنسبة للخدمات المنفصلة وذلك لأن مخططات التشكيل الرقمي الخاصة بها تمتد عبر حدود توزيعات الطيف. وتشير التقديرات الحالية إلى أن عدد الأجهزة المرسلية التي يستخدمها كل شخص سوف تزداد زيادة هائلة وسوف يعتمد الكثير من هذه الأجهزة على النفاذ الدينامي إلى الطيف.

وتحدد مساحة الاستكشاف في متناول خدمة الفلك الراديوي إلى درجة كبيرة بحكم الخصائص التقنية لنظام الرصد وبحكم عوامل تقييدية مثل بيئة التداخل. وبينما تُنصب تليسكوبات الجيل الجديد في أسلم المواقع الممكنة، فإن المرافق القائمة لا بد لها من أن تتعايش مع الظروف المحلية. ورغبةً في منع التداخل الراديوي من أن يصبح العامل المقيّد للمرافق القائمة، لا بد من إيلاء إدارة الطيف أولوية عالية.

الفصل 9

مناطق الصمت الراديوي

1.9 مقدمة

يتناول هذا الفصل تعريف منطقة الصمت الراديوي (RQZ) والمسائل الرئيسية في تحديد واحدة منها والحفاظ عليها. وثمة وصف أكمل وأمثلة عديدة لذلك في التقرير ITU-R RA.2259 - خصائص مناطق الصمت الراديوي.

1.1.9 التعريف والمتطلبات العامة لمنطقة صمت راديوي

بما أن رصدات الفلك الراديوي من سطح الأرض حساسة جوهرياً للتداخل الراديوي من مصادر من صنع الإنسان، سواء عن قصد أم غير قصد، فقد قررت بعض الإدارات تحديد مناطق صمت راديوي. وتعرف منطقة الصمت الراديوي هنا بأنها أي منطقة جغرافية معترف بها يتم ضمنها تعديل إجراءات إدارة الطيف المعتادة للغرض المحدد الرامي إلى تخفيض أو تجنب التداخل في التليسكوبات الراديوية، وذلك من أجل تحسين البيئة التي تتم فيها الرصدات.

وهناك عدد من الإجراءات المختلفة التي يمكن اتخاذها، وقد تنطبق هذه الإجراءات على بعض نطاقات التردد المحددة و/أو على بعض الفترات المحددة من الزمن و/أو على مختلف أصناف مصادر التداخل. وقد تكون الضوابط تقنية و/أو جغرافية و/أو تنظيمية. ومن ثم سيتم تطبيق تعاريف وطرائق إدارة مختلفة لمناطق الصمت الراديوي بالنسبة لمختلف التليسكوبات الراديوية، تبعاً للمتطلبات الخاصة بكل منها.

وتقتصر معظم القيود التي فرضت في مناطق الصمت الراديوي على المرسلات الثابتة للأرض وليس على الإرسالات في الهواء أو المحمولة على متن السواتل. والسبب في ذلك هو أن التداخل الذي ينشأ في المصادر المتحركة، ولا سيما الطيران، عادةً ما يكون لمدة قصيرة، حيث يتم تحديد التداخل بسهولة بينما يزول مصدر التداخل بالذات عادةً حالما يمكن استباتته. وليس هنالك من منطقة صمت راديوي تقيد الإرسالات الساتلية. ويحدد التقرير ITU-R RA.2259 طائفة واسعة من الضوابط المستخدمة ويقدم أمثلة عن مجموعة شتى من مناطق الصمت الراديوي حول العالم.

ومن المهم التأكيد على أن منطقة الصمت الراديوي لا تعني غياب الإرسالات الراديوية كلياً. وسيكون من الضروري دوماً التعايش مع طائفة من الأجهزة التي هي من صنع الإنسان. ويمكن أن تشمل منطقة الصمت الراديوي على خيارات لإبلاغ المستخدمين الآخرين وللتفاوض بشأن التخفيف من التداخل. ولذا فإن منطقة الصمت الراديوي هي عبارة عن منطقة مانعة تسمح بتنفيذ آليات لحماية رصدات الفلك الراديوي من التداخل الضار من الترددات الراديوية، من خلال استراتيجيات تخفيف فعالة وتنظيم مرسلات الترددات الراديوية.

2.1.9 دور التنظيم

تدار الضوابط التنظيمية للتداخل الراديوي المحلي على الصعيد الوطني من جانب هيئات التنظيم الحكومية. ومن العناصر الأساسية في التنظيم الوطني وضع خطة طيف للترددات الراديوية تحدد توزيع نطاقات التردد على الخدمات، بما في ذلك توزيع بعض النطاقات لخدمة الفلك الراديوي. وتستند هذه الخطط الوطنية للطياف على لوائح الراديو لدى الاتحاد الدولي للاتصالات بقدر ما يلزم لتجنب التداخل الضار بين مختلف البلدان.

وبالنسبة لمناطق الصمت الراديوي، قد تختار هيئات التنظيم الوطنية تنفيذ طائفة متنوعة من الضوابط على النحو المبين في التقرير ITU-R RA.2259، والمساعدة في حل مشاكل التداخل الضار التي تنشأ في حال عدم اتباع اللوائح.

وفي حال التداخل بين مختلف الإدارات الوطنية، هنالك لدى الاتحاد الدولي للاتصالات إجراءات للمساعدة في حل المشاكل. ومن غير المرجح أن يكون لذلك صلة بمناطق الصمت الراديوي.

2.9 الاعتبارات التي تراعى في تحديد منطقة صمت راديوي

1.2.9 الاعتبارات الجغرافية

إلى جانب اختيار مواقع محطات الفلك الراديوي بعيدة عن المناطق المكتظة بالسكان قدر الإمكان، من المفيد وضعها في مناطق توفر مستوى لا بأس به من الحجب بفضل التضاريس الطبيعية. وقد رأى بعض المراسد فائدة في إحاطة تليسكوباتها الراديوية بغابات من الأشجار الصنوبرية التي يمكنها، بفضل محتوى الرطوبة في أوراقها الإبرية، أن توفر حماية إضافية من التداخل الوارد من الأفق، لا سيما في ترددات تفوق بضع وحدات GHz. وتمثل المراسد الواقعة على قمم الجبال والتي لها خطوط طويلة جداً من خط البصر تحدياً من نوع خاص في مجال تنسيق منطقة صمت راديوي.

وثمة نموذج من مناطق الصمت الراديوي لا يسمح بأي مراسلات على الإطلاق ضمن منطقة الصمت، وربما عبر مدى تردد معين يتعلق بتشغيل تليسكوب راديوي. وثمة نموذج آخر يسمح فيه بالمراسلات طالما أن سوية الإشارة الواردة في محطة الفلك الراديوي لا تتجاوز عتبة تداخل محددة، ومرة أخرى عبر مدى تردد معين. وقد تكون مناطق الصمت الأخرى مزيجاً من النموذجين، فيه "حلقة داخلية" لا يسمح فيها بأي مراسلات و"حلقة خارجية" يجب فيها لأي مرسل أن يفي بمعايير تداخل محددة. وتعمل بعض مناطق الصمت الراديوي عبر كامل الطيف الراديوي.

ويعزى بعض أهم مصادر التداخل في خدمة الفلك الراديوي إلى الطائرات. ومن ثم ينبغي النظر في إمكانية إنشاء منطقة وطنية يحظر فيها الطيران فوق مرصد ما. ومن شأن ذلك أن يقلل من مصادر التداخل المحمولة جواً ولكنه لا يقضي عليها، لأن الأفق الراديوي لطائرة تحلق على ارتفاع منتظم قد يقارب 400 كيلومتر.

2.2.9 مدى الترددات

لا بد من الربط بشكل واضح بين مدى ترددات التشغيل في منطقة صمت راديوي وحماية تشغيل الأدوات الفلكية داخل تلك المنطقة. ويتعين أن يقتصر الضبط على الترددات الضرورية لضمان حماية تشغيل الأدوات الفلكية، الحالية والمخطط لها. ومع ذلك، ونظراً لعروض النطاقات الترددية الواسعة للمستقبلات الراديوية الحديثة والرغبة في متابعة تحول دوبلر للإشارات الطيفية إلى تردد أدنى في الكون الواسع، فإن ذلك يستتبع بالضرورة أمداء تردد عريضة. وربما تغطي منطقة الصمت الراديوي أمداء التردد التي يستخدمها العديد من نظم الاتصالات الراديوية الأخرى.

3.2.9 أثر التداخل على رصدات الفلك الراديوي

يتفاوت أثر التداخل على رصدات الفلك الراديوي تفاوتاً كبيراً، من زيادة بسيطة في سويات الضوضاء التي يمكن تخفيفها إلى سويات يمكن أن تتلف المستقبلات في تليسكوب راديوي. ولتتمكن تشغيل خدمة الفلك الراديوي ينبغي ألا يكون التداخل شديداً جداً بحيث يدفع مضخمات المستقبلات إلى حالة اللاخطية. ولا يزال التداخل الراديوي، الموجود في سويات منخفضة بما يمكن من إجراء رصدات الفلك الراديوي، يتطلب شكلاً ما من أشكال التخفيف. وأهم مزايا مناطق الصمت الراديوي هي سويات التداخل المنخفضة المتأصلة التي لا تقتصر على حماية مستقبلات الفلك الراديوي فحسب وإنما تسمح أيضاً بأبسط وأسهل أشكال التخفيف. وثمة مناقشة أشمل في الفصلين 6 و8 لأثر التداخل في رصدات الفلك الراديوي.

3.9 البيئة الكهرومغناطيسية

هنالك أنواع شتى من مصادر التداخل في رصدات الفلك الراديوي، وقد يتطلب كل منها نمطاً مختلفاً من أنماط التحكم. ويمكن في معظم الحالات معالجة فرادى مسائل التداخل الناشئة عن مراسلات وحيدة في إطار عمليات إدارة الطيف الراهنة. ومع ذلك، ونظراً لتزايد نشر الاتصالات المتنقلة وغيرها من الأجهزة الإلكترونية التي تبث إشارات مقصودة أو غير مقصودة، فإن سوية الضوضاء الخلفية ترتفع بتزايد عدد هذه الأجهزة. ولا بد من برنامج لقياس سوية الضوضاء الخلفية وتغيراتها على نحو منهجي مرور الزمن، وذلك لاستبانة المشاكل قبل أن تظهر من خلال التسبب في خسائر كبيرة في البيانات وزمن الرصد.

1.3.9 المشعّات المتعمّدة

المشعّات المتعمّدة هي تلك النظم والأجهزة التي تنتج انبعاثات ترددات راديوية لغرض الاتصال أو الاستشعار، أي أن بث القدرة الراديوية متأصل في تشغيلها. وبصفة عامة، هذا يعني أن نطاق التردد وعرض النطاق وسوية القدرة المرسله ومخطط التشكيل وغير ذلك من المعلمات التشغيلية معروفة أو يمكن تقديرها بقدر من الدقة. ويجري تشغيل المشعّات المتعمّدة أيضاً، بشكل عام، في نطاقات التردد الضيقة نسبةً إلى المشعّات غير المتعمّدة ومستقبلات خدمة الفلك الراديوي، وكلاهما يغطي نطاقات واسعة.

ويحدد قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد عدداً كبيراً من الخدمات الراديوية تشمل نظم الأرض (الخدمة المتنقلة للطيران، والملاحة الراديوية للطيران، وخدمة الهواة، والخدمة الإذاعية، والخدمة الثابتة، والخدمة المتنقلة البرية، والخدمة المتنقلة البحرية، والملاحة الراديوية البحرية، ومساعِدات الأرصاد الجوية، والتحديد الراديوي للمواقع، والملاحة الراديوية، والترددات المعيارية، والزمن) والنظم الساتلية (الخدمة الساتلية لاستكشاف الأرض، والخدمة الساتلية الثابتة، والخدمة ما بين السواتل، وسواتل الأرصاد الجوية، والخدمة الساتلية المتنقلة، والعمليات الفضائية، وأبحاث الفضاء).

والأجهزة الراديوية المرخصة هي الأجهزة التي أذنت هيئة التنظيم الوطنية بتشغيلها. وقد تكون مرخصة على أساس إفرادي، وفي هذه الحالة تكون الهيئة على علم بالموقع (أو منطقة التشغيل) والتردد والقدرة وعرض النطاق والتشكيل وارتفاع الهوائي ومخطط الإشعاع، وغير ذلك من معالم المحطة. وهذا يسمح لمنطقة الصمت الراديوي بقدر من التحكم من خلال تقييد أو تحديد أنماط معينة من الرسائل، من خلال نطاق التردد أو سوية القدرة مثلاً. ولدى العديد من الإدارات أيضاً خيار لترخيص الطيف، حيث يكون للمستخدمين الحق في نطاق تردد معين في منطقة جغرافية معينة، وربما لفترة معينة من الزمن. ويمكن للمستخدمين، بموجب تراخيص الطيف، نشر رسائل راديوية ضمن نطاق التردد المحدد والمساحة الجغرافية حسب مشيقتهم. وهذا يزيد من صعوبة السيطرة على منطقة الصمت الراديوي مما هو الحال بالنسبة للأجهزة المرخصة بشكل إفرادي المذكورة أعلاه، ما لم تتضمن شروط ترخيص الطيف تحديداً حدود منطقة الصمت الراديوي.

أما الأجهزة المرخصة (أو غير المرخصة) بحسب الصنف فهي الأجهزة التي يجري تشغيلها دون اتفاق ترخيص معين بين المستعمل والهيئة التنظيمية. وهي تقتصر على نطاقات تردد محددة، وتكون الأجهزة محدودة من حيث القدرة وعرض النطاق وغير ذلك من المعالم من جانب هيئة التنظيم الوطنية. وهي منخفضة الطاقة عموماً وغالباً ما تكون متنقلة. ومن الأمثلة على ذلك الهواتف اللاسلكية، وشبكة واي فاي، وعلامات تحديد الهوية بواسطة التردد الراديوي، وفتح باب السيارة بلا مفتاح. وهي بصفة عامة أجهزة من الفئة الاستهلاكية أو أجهزة تستخدمها دوائر الصناعة في عمليات نشر كبيرة. والتحكم في أجهزة الإرسال المرخصة بحسب الصنف من أجل منطقة صمت راديوي أصعب مما هو بالنسبة للأجهزة المرخصة، ذلك لأن موقع التشغيل وغير ذلك من المعالم غير معلوم من جانب هيئة التنظيم الوطنية.

وقد تسبب أيضاً المرسلات الراديوية المحمولة جواً بتداخل في مستقبلات الفلك الراديوي كما تقدم ذكره.

2.3.9 المشعّات غير المتعمّدة

تتسبب المشعّات غير المتعمّدة في ضوضاء راديوية بمثابة ناتج ثانوي لوظيفتها الرئيسية. ويكون ذلك عموماً في كثافة طيفية أخفض قدرة مما هي في المشعّات المتعمّدة، ولكن عبر نطاقات تردد أوسع. ولا تتميز قدرة الترددات الراديوية المنبعثة تميزاً جيداً من حيث سوية القدرة أو التردد أو الخصائص الإحصائية، ولكنها عموماً عبارة عن مزيج من ضوضاء الخلفية مع إحصاءات غوسية وضوضاء نبض من سويات أعلى ولكن باحتمالات أقل.

وينطوي استخدام المعدات الصناعية والاستهلاكية على احتمال إشعاع التداخل الراديوي. ومع فرادى الأجهزة قد تنتج سويات من التداخل لا تتجاوز المعايير المحددة، فإن إجمالي الانبعاثات قد يكون قوياً بما يكفي لخلق مشكلة تداخل للمرصد الراديوية. ومن المرجح أن يكون لهذا التداخل طيف عريض النطاق شبيه بالضوضاء تتراكم فوقه إشارات نطاق ضيق متفاوتة من حيث الزمن.

ومن شأن نظم الإشعاع في المركبات وغيرها من المحركات (من مراوح وماسحات ومدافئ وما إليها) أن تنتج أيضاً ضوضاء ترددات راديوية. وتنخفض هذه الضوضاء عموماً بتزايد التردد، ومن ثم فإن النطاقات دون حوالي 1 GHz هي الأكثر تأثراً. ولدى الكثير من المركبات اليوم نظم إدارة محركات محوسبة، وهي مصادر تداخل إضافية محتملة.

وقد يتولد التداخل الراديوي من خطوط الطاقة بتأثير الشرر، ومن الخطوط التي يكون توترها في حدود 70 كيلو فولط فما فوق بتأثير التفريغ الإكليلي. وقد نُظر، في الآونة الأخيرة، في استخدام شبكات توزيع الطاقة كوسيلة لتوفير خدمات الاتصالات.

وتستخدم نظم الاتصالات عبر خطوط الطاقة (PLT) إشارات تردد يصل إلى 200 MHz مرسلة على خطوط رئيسية لتوزيع التيار الكهربائي. وتنطوي إشارات PLT المرسلة على هذه الخطوط على إمكانية التسبب في تداخل في خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها خدمة الفلك الراديوي. ونظراً لآثار الغلاف الأيونوسفيري على انتشار الموجات الديكامترية (HF) وتراكم الإشعاع من خطوط الطاقة، فإن تشغيل مودمات هذه الخطوط، حتى عندما تكون بعيدة عن مرصد الفلك الراديوي، قد يسبب تداخلاً ضاراً برصدات الفلك الراديوي.

والأجهزة الصناعية والعلمية والطبية (ISM) هي الأجهزة التي تستخدم قدرة الترددات الراديوية لأغراض خلاف الاتصالات. ومن الأمثلة على ذلك أفران الموجات الصغرية وأجهزة الاستحراق الطبي وأدوات اللحام التي تعمل بالتردد الراديوي. ولأغراض مناطق الصمت الراديوي، فإن هذه الأجهزة مماثلة للأجهزة المرخصة بحسب الصنف وغالباً ما تتقاسم نفس نطاقات التردد.

3.3.9 انتشار إشارات التداخل

لدى تقييم احتمالات التداخل من المصادر المذكورة أعلاه في موقع خدمة فلك راديوي، من الضروري التنبؤ بانتشار إشارة التداخل الراديوي.

ومن الضروري أن نميز بين التنبؤ بالانتشار لتصميم نظام راديوي والتنبؤ بالانتشار لتحليل التداخل. ويجب أن يأخذ تصميم النظام في الحسبان الحد الأقصى (أو قرب الحد الأقصى) من الخسارة على مسير بين المرسل والمستقبل لضمان استقبال سوية كافية من القدرة. أما تحليل التداخل فيجب أن يحسب الحد الأدنى (أو قرب الحد الأدنى) من الخسارة على مسير بين المرسل والمستقبل الضحية لتقييم سوية القدرة القصوى التي يحتمل استقبالها. وينبغي مراعاة هذا التمييز لدى استخدام توصيات لجنة الدراسات 3 للقطاع ITU-R أو الطرائق الأخرى للتنبؤ بالانتشار.

وآليات الانتشار الرئيسية التي تؤثر على سوية التداخل من مصدر تداخل ما في مستقبل تليسكوب راديوي هي خسارة الفضاء الحر والانعراج فوق التضاريس أو أي عوائق أخرى والتوهين الناجم عن غازات الغلاف الجوي و/أو الهواطل والجريان والانتشار أو الانعكاس عن الشهب والطائرات المحلقة.

4.9 طرائق تحديد منطقة صمت راديوي

هناك طائفة من الطرائق يمكن تنفيذها لتحديد منطقة صمت راديوي. ويمكن من باب التيسير تصنيف هذه الطرائق إلى طرائق جانب المستقبل وطرائق جانب المرسل. ويمكن أن تستخدم عدة طرائق معاً، ويتوقف اختيار الطريقة إلى حد كبير على التردد والموقع ونمط الرصد المطلوب والاستخدام الراهن للأرض وعوامل أخرى.

1.4.9 طرائق جانب المستقبل

رغبةً في تحقيق أفضل بيئة للترددات الراديوية التي تجرى فيها رصدات الفلك الراديوي تعتمد مرصد الفلك الراديوي إلى الاستفادة من العوامل الجغرافية وأثرها على انتشار إشارات التردد الراديوي. ومن شأن خيار حصيف لهذه العوامل أن يوفر منهجية لتلبية متطلبات تحديد منطقة صمت راديوي.

ومن خصائص طبيعة انتشار التردد الراديوي هو أن قدرة التداخل تتناقص بتزايد المسافة من المرسلات. ولذلك فإن النهج الأساسي الأول هو اختيار موقع جغرافي بعيد بما فيه الكفاية عن المراكز السكانية وحركة المرور. وهذا وضع أمثل لمرافق رئيسية جديدة ولكنه قد لا يكون عملياً لجميع مرافق التليسكوبات. وغالباً ما تكون مواقع قمم الجبال مفيدة نظراً لبعدها، فضلاً عن أنها توفر مساراً أقصر عبر الغلاف الجوي، وهو أمر مفيد بشكل خاص في الترددات الأعلى.

ويجب، حيثما أمكن، استخدام الحجب الطبيعي للموقع. وعلى النقيض من موقع في قمة جبل كما ذكر آنفاً، فإن هذا النهج يعطي الأفضلية للمواقع في الوديان التي تحيط بها التلال أو الجبال، ويتم اختيار هذه المواقع بصفة خاصة لرصدات التردد المنخفض.

ومع ذلك فإن عدم وجود مسير خط بصر مباشر بين مصادر التداخل ومنطقة الصمت الراديوي لا يضمن الصمت الراديوي التام، ذلك لأن الإشارات ستصل عبر مسيرات انعراج فوق التضاريس أو عن طريق الانعكاسات من منشآت كبيرة. وفي الترددات المنخفضة بصفة خاصة (أقل من حوالي 1 GHz)، فقد يوفر حجب الموقع فائدة هامة. وينبغي، كلما أمكن ذلك، تقدير أثر الانعراج بالنسبة لمدى التردد موضع الاهتمام باستخدام المعرفة التفصيلية عن التضاريس المحلية. ومع ذلك، وفي الأحوال التي قد توفر فيها التضاريس في حد ذاتها حماية كافية، قد ينتفي ذلك بمجرد إقامة منشأة عاكسة وحيدة، من قبيل عنفة هوائية، على رأس تلة مجاورة.

2.4.9 طرائق جانب المرسل - إدارة منطقة صمت راديوي

إن المكون الرئيسي في إدارة منطقة صمت راديوي هو التحكم في مشعّات من المحتمل أن تتضمن إشارات تداخل في منطقة الصمت الراديوي، والعمل في الوقت ذاته على ضمان توفير الاتصالات وغيرها من الخدمات لفئات صغيرة من السكان داخل منطقة الصمت الراديوي. ويتعين عند تحديد المنطقة إيلاء الاعتبار إلى متطلبات الأدوات المخصصة لها في ذلك الوقت وإلى أي قدرات إضافية وأدوات قد يكون من المزمع أن تضاف أثناء عمر المنطقة الافتراضي.

وثمة حاجة إضافية لعمليات بيروقراطية مناسبة في إدارة منطقة الصمت الراديوي على امتداد عقود من الزمن، وذلك للتعامل مع أي طلبات لأغراض التنمية المجتمعية والصناعية والعمليات الطبيعية الأخرى لإدارة الأراضي. وعلاوة على ذلك، وفي إطار تعريف المنطقة، ينبغي ألا يغرب عن البال إمكانية تشغيل أدوات وقدرات رصد جديدة كلياً.

1.2.4.9 الضوابط التشريعية والتنظيمية

يمكن للتشريعات أن توفر إطاراً تنظيمياً للتحكم في مصادر التداخل ضمن منطقة الصمت الراديوي. وهذا يشمل تنظيم المرسلات الراديوية المرخصة وغير المرخصة (أو المرخصة بحسب الصنف) وغيرها من الأنشطة التي قد تسبب تداخلاً.

ويحدد العديد من مناطق الصمت الراديوي مساحات تقييد وتبليغ حول الموقع. والمنطقة المقيدة هي منطقة تكون فيها الأجهزة الراديوية مقيدة. وقد يقتصر ذلك على مرسلات ضمن نطاق أو نطاقات تردد محددة. وقد تكون إدارة المنطقة المقيدة من خلال الجهات التنظيمية لنشاط الترخيص.

ومنطقة التبليغ هي منطقة يجب أن يتم في داخلها تبليغ الهيئة التنظيمية أو مشغّل التليسكوب بأي منشآت راديوية مقترحة (في نطاقات تردد معينة). ثم تبدأ عملية التبليغ هذه فترة تفاوض يقيم فيها مشغّل التليسكوب أثر المرسل الراديوي المقترح على رصدات الفلك الراديوي ويسعى إلى إيجاد حل مناسب لكلا الطرفين. وتكون مساحة التبليغ عموماً أكبر بكثير من المساحة المقيدة.

وبصفة عامة، لا يمكن تطبيق هذه النظم إلا على الأجهزة الراديوية المرخصة، وهي ذات قيمة محدودة في التحكم في الأجهزة الراديوية غير المرخصة أو المشعّات غير المتعمدة. بيد أن المشعّات غير المتعمدة لا تخضع عموماً للقواعد التنظيمية الوطنية للطيح ويمكن التحكم فيها بموجب تشريعات محلية أضيق.

ومن الضروري أن نلاحظ أن استخدام مناطق التبليغ والتقييد ينطوي على إدارة دينامية تعاونية مستمرة لمنطقة الصمت الراديوي على مدى العمر الافتراضي لمركز الفلك الراديوي. كما يعني ذلك أيضاً أن تحديد مناطق الصمت الراديوي ينبغي أن يوفر أكبر عدد ممكن من الخيارات (من حيث نطاقات التردد، مثلاً) للسماح في وقت لاحق بتوسيع قدرات التليسكوب الراديوي.

ويمكن أيضاً توسيع مجال الرقابة التنظيمية، في مناطق جغرافية محدودة، لتغطية الأجهزة الراديوية غير المرخصة أو المشعّات غير المتعمدة. وبما أن أنماط الأجهزة هذه منخفضة الطاقة عموماً، فإن الحدود الجغرافية ليست قيدياً في كثير من الأحيان. ويمكن، في المنطقة المجاورة مباشرة لموقع التليسكوب، التحكم في النفاذ المادي إليها للتأكد من عدم إدخال أي مرسلات إلى الموقع.

ويجوز أيضاً للهيئة التنظيمية الوطنية أو هيئة حكومية ملائمة تنفيذ تشريعات للتحكم في أصناف معينة من الأنشطة، من قبيل الصناعات الثقيلة أو التحويلية مثلاً، في مناطق داخل منطقة الصمت الراديوي.

ويبين الجدول 1 أمثلة لعدد من مختلف مناطق الصمت الراديوي الوطنية وطرائق التحكم أو التنظيم التي تستخدمها. وفي كثير من الحالات تنطبق الطرائق المذكورة في الجدول على أمداء تردد محدودة متعلقة بتشغيل الأدوات المتوخى حمايتها.

الجدول 1.9

التحكم في مختلف مناطق الصمت الراديوي الوطنية

منطقة الصمت الراديوي/البلد	التحكم في المرسلات الراديوية المرخصة	التحكم في الأجهزة الراديوية المرخصة بحسب الصنف	ضوابط الطائرات	التحكم في المشعات غير المتعمدة
LMT/المكسيك	نصف قطر 20 كم - لا اتصالات راديوية أخرى			
NRQZ/الولايات المتحدة	مساحة 34 000 كم مربع - التنسيق مطلوب من المرسلات الثابتة			ضوابط على المعدات الإلكترونية ضمن 10 أميال
ALMA/شيلي	لا مرسلات ضمن 30 كم؛ تنسيق ضمن 120 كم			
Arecibo/بورتوريكو	تقييدات ضمن 4 كم؛ تنسيق من أجل بورتوريكو والجزر المجاورة	تقييدات ضمن 4 كم	منطقة عدم طيران فوق التليسكوب	تقييدات ضمن 4 كم
مواقع شتى/أستراليا	مناطق تبليغ من أجل التنسيق بما يصل إلى 250 كم		منطقة عدم طيران فوق التليسكوبات	
MRO/أستراليا	خطة نطاق تردد - خدمة فلك راديوي أولية ضمن 70 كم؛ منطقة تنسيق حتى 260 كم	تراخيص بحسب الصنف - لا تداخل مسموح به ضمن 70 كم	منطقة عدم طيران فوق الموقع	بروتوكول من أجل المعدات الإلكترونية التي تستخدمها خدمة الفلك الراديوي ضمن 10 كم
IRAM/إسبانيا	تقييدات على المرسلات حتى نصف قطر 5 كم؛ تنسيق حتى نصف قطر 10 كم			فاصل أدنى 1 كم لأي صناعة وسكة حديد وخطوط كهرباء عالية الفلطية
Itapetinga/البرازيل	منطقة بقطر 4 كم دون نشاط حضري جديد	منطقة بقطر 4 كم دون نشاط حضري جديد		منطقة بقطر 4 كم دون نشاط حضري جديد
AGAA/جنوب إفريقيا	لا إرسالات في منطقة 140 كم مربع، خدمات أساسية فقط في منطقة حتى 123 408 كم مربع		مساحة نواة 140 كم مربع قيد الرقابة حتى ارتفاع 18 500 متر	
Pushchino/الاتحاد الروسي	منطقة بقطر 2 كم دون نشاط حضري جديد	رقابة ضمن حدود 5 كم (بلدة بوشكينو)		تحكم في سوية التداخلات الممكنة
Dominion RAO/كندا	ترخيص صارم حتى 200 كم	لا شيء ضمن خط البصر وتقييدات ضمن 4 كم، أيهما أطول	كان ثمة منطقة عدم طيران ولكن أجلها انتهى	لا نشاط حضري جديد ضمن خط البصر، وتقييد حتى 4 كم، أيهما أطول
FAST/الصين	لا مرسلات ضمن 5 كم؛ تنسيق ضمن نصف قطر 75 كم			

2.2.4.9 التقنيات البديلة وتصميم الشبكات

قد تختار الهيئة التنظيمية الوطنية أو مشغل التليسكوب توفير تقنيات بديلة للتقنيات التي تتسبب في سويات ضارة من التداخل. على سبيل المثال، قد يكون توفير تلفزيون كبلي عبر كبل من الألياف البصرية بديلاً مناسباً للبلث. كما يمكن استبدال شبكة راديوية متنقلة بشبكة أخرى في نطاق تردد أكثر ملاءمة.

5.9 الآثار المترتبة على إنشاء منطقة صمت راديوي

1.5.9 الحفاظ على مناطق الصمت الراديوي

تتطلب مناطق الصمت الراديوي جهداً كبيراً للحفاظ عليها بعد إنشائها. ويكاد يقع العبء كله على مشغل مرفق الفلك الراديوي.

وأحد الأنشطة التي يجب القيام بها هي المراقبة الروتينية للبيئة الراديوية، بما في ذلك جميع المعدات المزمع تركيبها في الموقع. وغالباً ما يجري هذا النشاط باستخدام محطات رقابة مستقلة بذاتها ومرافق اختبار منفصلة عموماً عن التليسكوب الراديوي في حد ذاته.

وثمة نشاط آخر هو استبانة مصادر التداخل الراديوي التي تظهر في بيانات التليسكوب، ولكنها قد لا تكون قوية بما فيه الكفاية لكي تكشفها محطة (محطات) الرقابة. وقد يكون تحليل هذه الحالات صعباً للغاية إذ قد لا يكون عرض النطاق الترددي وتتبع دوبلر وزمن التكامل ومخطط هوائي التليسكوب مناسبة لاستبانة التردد على وجه الدقة أو تغاير الزمن أو موقع مصدر التداخل. وعلاوة على ذلك، فإن بعض التداخل لا يصبح واضحاً إلا بعد فترة طويلة من إجراء الرصدات، عندما يمكن معاملة كامل مجموعة البيانات معاملة تامة لأول مرة. وفي أي حال، وحالما يستبان التداخل الراديوي، يجب اتخاذ الإجراءات اللازمة لتخفيف مصدر التداخل أو إزالته.

وتقييم معظم المرصد مناطق عازلة للتداخل الراديوي ضمن موقع المرصد، إلى جانب فرض قيود أشد على المعدات التي يحتمل أن تتسبب في التداخل كلما قلّت المسافة إلى معدات خدمة الفلك الراديوي. ويتعين على الموظفين المسؤولين عن منطقة الصمت الراديوي العمل على تثقيف الموظفين والزوار، وأن يكونوا على استعداد لإنفاذ القواعد المحلية. وينبغي، من الناحية المثالية، مراعاة الاعتبارات ذات الصلة بمناطق التداخل حتى قبل بناء المرصد.

ويتعين أيضاً على موظفي منطقة الصمت الراديوي معالجة حالات التداخل التي تنشأ من مصادر خارجة عن أراضي موقع المرصد. وقد تكون الرسائل غير المرخصة التي تتطلب خلاف ذلك رخصة تشغيل أسهل الأحوال للتعامل في إطار التنظيم الوطني. أما الحالة الأكثر صعوبة التي تنشأ في إدارة منطقة صمت راديوي فهي التداخل من الأجهزة غير المرخصة الكائنة خارج أراضي موقع المرصد. وما فتئت تزداد صعوبة التعامل مع هذه الحالات داخل مناطق الصمت الراديوي القائمة. وليس من حل ميسور في متناول اليد.

وهناك عبء كبير في مناطق الصمت الراديوي الكبيرة يتمثل في معالجة طلبات الترخيص لرسلات جديدة داخل منطقة الصمت الراديوي. وقد تكون بعض مناطق الصمت الراديوي سهلة الإدارة، عندما تمنح ببساطة الرسائل داخل منطقة الصمت الراديوي. ويمكن أن تنشئ مناطق الصمت الأخرى عتبات تداخل ضار، وفي هذه الحالة يجب تحليل مقترحات الترخيص بعناية لمعرفة ما إذا كانت الإشارة المرسله سوف تتجاوز عتبات التداخل المقررة في المرصد أم لا.

وأخيراً، يجب ألا تقلل المرصد من شأن الحاجة إلى التثقيف والتوعية العامة لكي توضح الحاجة إلى منطقة الصمت الراديوي، وتجعل مستخدمي الطيف على بينة من التزاماتهم بموجب قواعد منطقة الصمت الراديوي.

2.5.9 الاعتبارات على المدى الطويل

كثيراً ما صممت مناطق الصمت الراديوي على أساس تليسكوبات معينة وضعت في الاعتبار. وكان من أكثر التطورات اللاحقة المعتادة لتليسكوب ما هي العمل على زيادة فائدته لترددات أعلى من خلال الارتقاء به. وثمة اتجاه برز في الآونة الأخيرة

نحو تجميع التليسكوبات في مواقع يمكن فيها أن تتحقق أغراضها على نحو كافٍ، وتستفيد في الوقت ذاته من الوفورات في البنية التحتية المنشأة وفي التنظيم، فضلاً عن تقاسم النفاذ إلى الطاقة الكهربائية والاتصالات والطرق.

ولا غرابة أن يكون هذا بدوره مصحوباً بزيادة في مدى الترددات التي يتعين حمايتها من أجل الأدوات المقامة في موقع ما. وتبعاً لذلك، من المستحسن تصميم المعلمات من أجل منطقة صمت راديوي ما على أوسع قدر ممكن تسمح به الظروف.

وحالما يتم الاتفاق على منطقة صمت راديوي ما، فإن المطلوب هو أن تبقى كذلك لفترة طويلة من الزمن. وهذا يشير إلى أن من الضروري، عند تصميم منطقة الصمت الراديوي، أن يؤخذ تماماً بعين الاعتبار الأثر الاقتصادي والأثر المحتمل على توزيع السكان في المستقبل وعلى التنمية في المنطقة قيد النظر.

وأخيراً، لا مفر من أن يفضي استمرار وتيرة التطور التقني في المجتمع إلى ابتكارات جديدة تؤدي إلى تغيرات في بيئة التوافق الكهرومغناطيسي حول منطقة صمت راديوي ما. وبينما من المستحيل التنبؤ بهذا الاتجاه فإنه يشير مرة أخرى إلى ضرورة تصميم منطقة الصمت الراديوي بحيث تكون واسعة وقوية إلى أقصى حد ممكن.

الفصل 10

عمليات الاستطلاع خارج الأرض باستخدام رصدات بترددات راديوية

1.10 مقدمة

ثمة ركيزة أساسية لمفهوم مكاننا في الكون وهي معرفة ما إذا كانت الأرض هي الكوكب الوحيد الذي يدعم حياة ذكية. وإذا كانت الحياة الذكية على الأرض وحدها حقاً فهي عندئذ إما واقعة خارقة للعادة أو نتيجة فريدة لتطور الكون. ومن ناحية أخرى، إذا لم تكن الأرض سوى واحدة من العديد من المجموعات الذكية التي تشغل مجرتنا، عندئذ قد تكون الحياة على الأرض جزءاً من مجموعة من التنوع التطوري الأكبر، وربما ليست فريدة من نوعها في تطورها وحضارتها. والمشكلة هي معرفة ما إذا كانت الحياة على الأرض وحيدة أم لا.

ويعتقد بعض العلماء أن الحياة مشتركة في مجرتنا، وأنها ربما تطورت إلى أشكال متقدمة تمتلك قدرة على الاتصالات مماثلة لقدرتنا أو متفوقة عليها. وبالطبع، فإن تفاصيل محطات الإرسال - من حيث الترددات والتشكيلات والاستقطابات والمواقع - التي تستخدمها حضارات خارج كوكب الأرض، إن وجدت، ليست معروفة. وسعيًا لالتقاط إشارات من هذه المحطات، يجب على العلماء سبر أغوار الكون بواسطة أكثر معدات الاستقبال حساسية، والعمل بعناية وعلى نطاق واسع على تقصي أي إشارات ذات مغزى في الطيف الراديوي تبثها حضارات أخرى.

وأول مخطط لبث إشارات راديوية نحو الفضاء يعزى إلى العمل الذي قام به Tesla في عام 1899. وقد وصل حتى الآن إرسال خاص من إشارات ترميز برامج تلفزيونية أمريكية في عام 1939 إلى ألف نجم على الأقل. وحدثت أكثر المحاولات طموحاً لتزويد الحضارات الأخرى المحتملة بتفاصيل عن الحياة على الأرض في عام 1974، من خلال إرسال بواسطة تليسكوب راديوي قطره 305 أمتار في أريسيبو، بورتوريكو، يصف نظامنا الشمسي وتكوين حمضنا النووي DNA وجنسنا البشري.

وكانا Morrison و Cocconi [1959] أول من أشارا إلى إمكانية استقبال إشارات راديوية من حضارات خارج كوكب الأرض. وقام Drake [1961] بأول تقصي بالموجات الصغيرة (مشروع Ozma) باستخدام تليسكوب راديوي قطره 25 متراً لرصد نجمين يبعدان مسافة اثنتي عشرة سنة ضوئية. ومنذ ذلك الحين، أجرى علماء من عدة بلدان أكثر من 99 عملية تقصي موثقة مختلفة [Tarter, 2001]. وهيمن العلماء الروس في هذا المجال للعقد الأول من السنين. وكان أول كتاب روسي بُحث فيه مشكلات الاستطلاع خارج الأرض كنبه I.S. Shklovsky في عام 1962. وقد تُرجم الكتاب إلى العديد من اللغات وكان له أثر كبير على تطوير العمل في مجال الاستطلاع خارج الأرض في الاتحاد السوفياتي (الاتحاد الروسي حالياً). واقترح Kardashev [1963] إمكانية استكشاف مجتمعات أكثر منا تقدماً، لعلها أتقنت تقنية الاتصالات الراديوية وقادرة على إنتاج قدرة بأكثر من 26^{10} واط لنقل إشارات نطاق عريض متناحية مستمرة. وقد أجري العديد من التقصيات في هذا الصدد [Troitsky et al., 1971]. ومكنت خطوات التقدم في تكنولوجيا الحاسوب والاتصالات من القيام بعمليات تقصي أشمل وأكثر حساسية. وأسفرت بعض الجهود عن أحداث لا يمكن تفسيرها، من ذلك مثلاً عدة إشارات مثيرة للتساؤل سُجلت بين عامي 1986 و1989 أثناء برنامج سبر القناة الكبرى خارج الأرض (META) باستخدام تليسكوب راديوي في جامعة هارفارد، الولايات المتحدة الأمريكية [Sagan and Horowitz, 1993]. وينبغي تكرار الرصدات مؤخراً بقدر أفضل بكثير من الحساسية [Lazio et al., 2002] انتماء هذه الإشارات إلى صنف من الإشارات التكنولوجية من خارج كوكب الأرض. وليس هناك، في الوقت الحاضر، أي دليل مقنع على إشارات من حضارات خارج كوكب الأرض. وبالنسبة لمعظم هذه الفترة، أجريت عمليات التقصي بقدر غير كافٍ من الحساسية، ولم تشمل سوى جزء صغير جداً من الترددات الممكنة ومخططات التشكيل والاتجاهات.

وقد توفرت معلومات أساسية إضافية بشأن الاستطلاع خارج الأرض على يد Oliver [1987]، و Bates [1988]، و Drake و Sobel [1992]. وبفضل ظهور تكنولوجيا الحاسوب ومعالجة الإشارات الرقمية الرخيصة نسبياً في العقدين الماضيين، بدأت عمليات بحث أكثر شمولاً. وفي عام 1992 أطلقت وكالة NASA عملية المسح عالي الاستبانة بالموجات الصغرية (HRMS)، التي استخدمت بعض أكبر التليسكوبات الراديوية على الأرض ومعدات استقبال راديوي حساسة جديدة. وعلى الرغم من إلغاء مشروع NASA في عام 1993، واصل المعهد الأمريكي لاستطلاع خارج الأرض الجزء من "البحث المستهدف" عالي الحساسية من عملية المسح HRMS باسم مشروع Phoenix.

وعمد معهد استطلاع خارج الأرض وجامعة كاليفورنيا - بيركلي إلى بناء صيف تليسكوب Allen (ATA) يستهدف كدافع رئيسي إجراء رصدات استطلاع متواصلة خارج الأرض. وتبلغ مساحة تغطية صيف ATA ما يعادل مكافئ قطره 40 متراً. ويتمتع الصيف بحرارة ضوئية نظام تبلغ 40 K وعرض نطاق تردد يغطي كامل المدى من 0,5 GHz إلى 11,4 GHz. وهو يولد حزمًا متعددة ضمن مجال رؤية قدره 3° (عند 1 GHz) بما يسمح برصدات استطلاع خارج الأرض ورصدات فلك راديوي أخرى طوال الوقت. ويسمح صيف ATA القابل للتسديد تماماً بفترات تكامل أطول مما كان يستخدم في رصدات الاستطلاع خارج الأرض سابقاً. ومن شأن خطوات التقدم في تكنولوجيا الحاسوب ومعالجة الإشارات الرقمية أيضاً تحسين الحساسية الجوهرية لنظم استقبال استطلاع خارج الأرض.

ويفيد الصيف ATA أيضاً بمثابة نموذج أولي لتليسكوب أكبر من ذلك بكثير، وهو صيف الكيلومتر المربع (SKA). وهذا الأخير هو الآن في مرحلة التصميم والنموذج الأولي، وهو قيد التطوير من قبل اتحاد دولي من الجامعات ومعاهد البحوث. وإذا تم الحصول على تمويل دولي، سوف يكون للصيف SKA منطقة تغطية أكبر بمقدار 45 dB من الصيف ATA وأكبر بمقدار 13 dB من تليسكوب أريسيبو البالغ قطره 305 أمتار. ويمكن أن تشكل معظم التصميم قيد النظر حزمًا متعددة مما يتيح إمكانية إجراء رصدات استطلاع خارج الأرض طوال الوقت. وإذ يحظى الصيف SKA بدعم نظم أقوى لمعالجة الإشارات، فإنه سوف يسمح ببحث ما يعادل تكنولوجيا راديوية للأرض بمسافة تصل إلى 1 000 سنة ضوئية.

وتتوقف إمكانية تقصي أي إشارات موجات صغرية إلى حد كبير على وجود بيئة صمت راديوي في المواقع التي تجري فيها عمليات البحث. ولذلك، ينبغي حماية هذه المواقع إلى أقصى حد ممكن من التداخل الراديوي الذي هو من صنع الإنسان. ومع أن التكنولوجيا الحديثة قادرة على توفير بعض التمييز إزاء الإشارات التي هي من صنع الإنسان، فقد يتبين أنها غير كافية إزاء سرعة تزايد استخدام الطيف الراديوي في طائفة واسعة متنوعة من خدمات الاتصالات ووظائفها. وبمرور الزمن، سوف ينخفض تبعاً لذلك احتمال نجاح عمليات التقصي.

2.10 قابلية الكشف عن الاشارات في عمليات الاستطلاع خارج الأرض

إذا افترضنا أن ثمة إشارات تصل إلى الأرض من حضارات من خارج كوكبنا، فإن قدرتنا على كشفها تتوقف على عدة عوامل:

- شدة الإشارات الواصلة إلى الأرض؛
- منطقة التغطية وكفاءة الإضاءة في هوائي الكشف؛
- مرونة الحساسية والتردد في نظام الاستقبال؛
- القدرة على تسديد الهوائي في اتجاه الإشارات؛
- القدرة على تمييز الإشارة الواردة من الضوضاء بسبب مكونات نظام الاستقبال والظواهر الطبيعية في المجرة والتداخل الذي هو من صنع الإنسان.

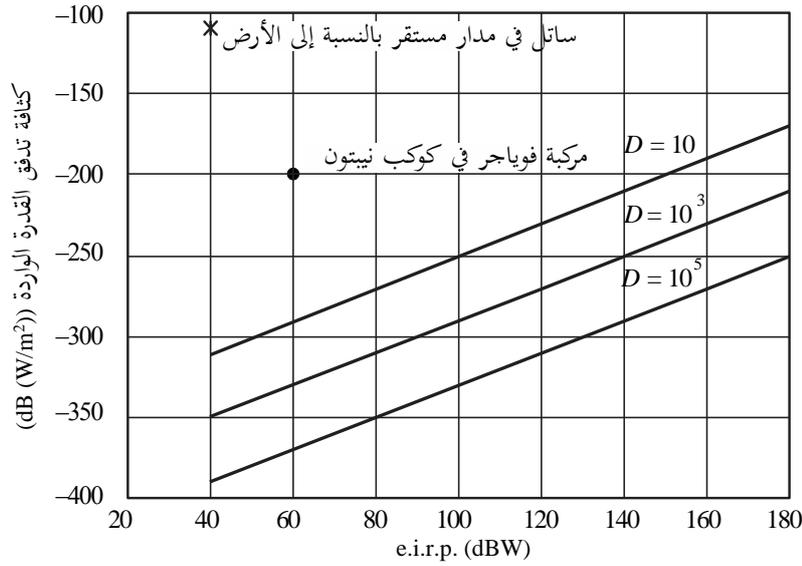
واستراتيجيات تسديد الهوائي واختيار وقت تكامل البحث والمعلومات الأخرى في النظام هي عناصر هامة في تصميم البحث لاستطلاع الاشارات خارج الأرض. وتبذل الجهود الآن لتطوير نظم حساسة تغطي طائفة تردد واسعة وقادرة على استهداف نجوم متعددة في آن واحد ومسح السماء (وخاصة مستوي المجرة) وتصوير الزوايا الصلبة 2π فوراً. وسوف يتحدد أداء هذه النظم الجديدة في نهاية المطاف إلى حد كبير بحكم بيئة التداخل.

3.10 شدة الإشارة

تتوقف شدة إشارة ما من خارج الكوكب عند سطح الأرض على القدرة المرسلَة وخصائص مسير الانتشار. وكثافة تدفق الإشارة التي يتعين كشفها غير معروفة. ومع ذلك، لا بد من أن تكون المسافة التي يتعين أن تقطعها الإشارة شاسعة للغاية ومن المتوقع أن تكون الشدة عند الأرض منخفضة جداً. ولذلك فإن إمكانية الكشف ستكون محدودة بحكم الحساسية الإجمالية لنظام الرصد. ويبين الشكل 1.10، بالنسبة لعدة مسافات مفترضة للمرسل، كثافة تدفق القدرة للإشارة الواردة إلى الأرض بوصفها دالة لقدرة المرسل.

الشكل 1.10

كثافة تدفق القدرة الواردة كدالة لقدرة المشعة المكافئة المتاحة



D : المسافة، بالسنوات الضوئية (سنة ضوئية = $9,46 \times 10^{15}$ متر)

*: من مدار الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض

●: من مركبة فوياجر في كوكب نبتون

Radio-Astro_101

وبالنسبة لنظام رصد موجود على سطح الأرض، يؤثر الغلاف الجوي على الإشارات الراديوية عند بعض الترددات. ومن شأن المطر أن يقلل من الحساسية عند ترددات فوق 10 GHz، ولكن الرصدات عموماً ليست حساسة من حيث الزمن ويمكن استخدام ترددات أخفض نسبياً في الأحوال الجوية المعاكسة. وفي ترددات أقل من حوالي 30 MHz يتقيد الاستقبال جراء الأيونوسفير، وفي ترددات فوق حوالي 20 GHz تتوهن الإشارات الواردة بسبب الجزيئات في الغلاف الجوي (انظر الفصل 3). ويتوقف تأثير الإشارات على موقع المرصد. فبالنسبة لمرصد واقع خارج الأرض، على سطح القمر مثلاً، لن تتأثر الإشارات بفعل الغلاف الجوي ومن ثم يمكن النفاذ إلى الطيف الراديوي بأكمله (انظر الفصل 7).

4.10 حساسية نظم الاستقبال

إن اعتبارات حساسية نظم الاستقبال لعمليات الاستطلاع خارج الأرض مماثلة للاعتبارات التي نوقشت في الفصول السابقة بالنسبة لرصدات الفلك الراديوي. وبالنسبة لكسب هوائي معين، تتوقف حساسية نظام الاستقبال على حرارة ضوضاء النظام وعرض النطاق الآني المختار وزمن التكامل المستغرق في قياس مفرد.

وتحدد حرارة ضوضاء النظام بحكم خصائص المعدات بالإضافة إلى الضوضاء التي يتلقاها الهوائي. ويتضمن هذا الأخير مساهمات من الكون والغلاف الجوي الأرضي والإشعاع من الأرض نفسها الوارد عبر الفصوص الجانبية للهوائي. وتحدد أول مساهمة من الانبعاثات الراديوية من مجرتنا ومن المصادر خارج المجرة (مجرات أخرى، أجرام شبه نجمية) والخلفية الكونية من الموجات الصغيرة (K 2,7). وتكون هذه المساهمة عالية عند ترددات منخفضة ولكنها تتناقص بارتفاع التردد. ومن ناحية أخرى، تزداد الضوضاء التي يسهم بها الغلاف الجوي زيادة ملحوظة عند ترددات فوق حوالي 20 GHz، ويرجع ذلك أساساً إلى جزيئات الماء H₂O والأكسجين O₂.

وفي إشارة متواصلة، تزداد نسبة الإشارة إلى الضوضاء S/N بمقدار الجذر التربيعي لزمن التكامل. والزمن الفعال للتكامل محدود بحكم مدة الإشارة واستقرار ترددها والزمن المتاح للرصد.

ويشمل تردد الإشارة الواردة تحول دوبلر الذي يتوقف على السرعة النسبية بين المرسل (وقت الإرسال) ونظام الاستقبال في الأرض. ويتغير هذا التحول بتغير الزمن، حتى لو كان يعزى إلى مجرد تغير يومي بينما تدور الأرض حول محورها وتغير سنوي تبعاً لدوران الأرض حول الشمس. وتؤدي هذه التحركات إلى تحول في التردد يختلف باختلاف اتجاه الإشارة الواردة. ومع ذلك، سيكون من الصعب تحديد اختلافات سرعة الإرسال، التي تحدث مثلاً إذا كان المرسل يقع على كوكب يدور حول نجم، قبل الكشف عن إشارة ما. وفي ضوء هذه الاعتبارات، يتوقف التحسن في نسبة S/N الناتج عن زيادة زمن التكامل على قدرة تتبع الإشارة المتأثرة بتحول دوبلر. ومن شأن التقصير في التبع الذي يفرض على تحول الإشارة عن قنوات التردد في نظام الكشف أن يقلل من المكاسب المحققة من فترة تكامل أطول.

ويتوقف الزمن الإجمالي المطلوب لمشروع استطلاع على عدد تسديدات الهوائي وعدد مواضع التردد المختلفة في كل اتجاه وزمن التكامل لكل رصدة. وبالنسبة لبرنامج محدد من حيث الاتجاهات والترددات، يحدد إجمالي الزمن المتاح زمن التكامل لكل رصدة، ومن ثم حساسية الاستطلاع أيضاً. ومن شأن تطوير الصيغيات المتعددة الحزم مثل ATA و SKA، وفيها حزمة أو أكثر مكرسة لرصدات الاستطلاع خارج الأرض، أن تسمح بأزمنة تكامل أطول وزيادة في الحساسية.

1.4.10 قدرة الإشارة الدنيا القابلة للكشف

بالنسبة لإشارة تبقى في نفس قناة التردد في نظام استطلاع خلال زمن التكامل، يعطى الحد الأدنى لقدرة الإشارة القابلة للكشف من المستقبل، P_{min} ، على افتراض أن نسبة S/N تساوي الوحدة، بموجب العلاقة [NASA, 1973]:

$$(1.10) \quad P_{min} = 10 \log \left[\frac{k T}{t} \left(1 + (1 + Bt)^{0.5} \right) \right] \quad \text{dBW}$$

حيث:

k : ثابت Boltzmann

T : حرارة ضوضاء النظام (K)

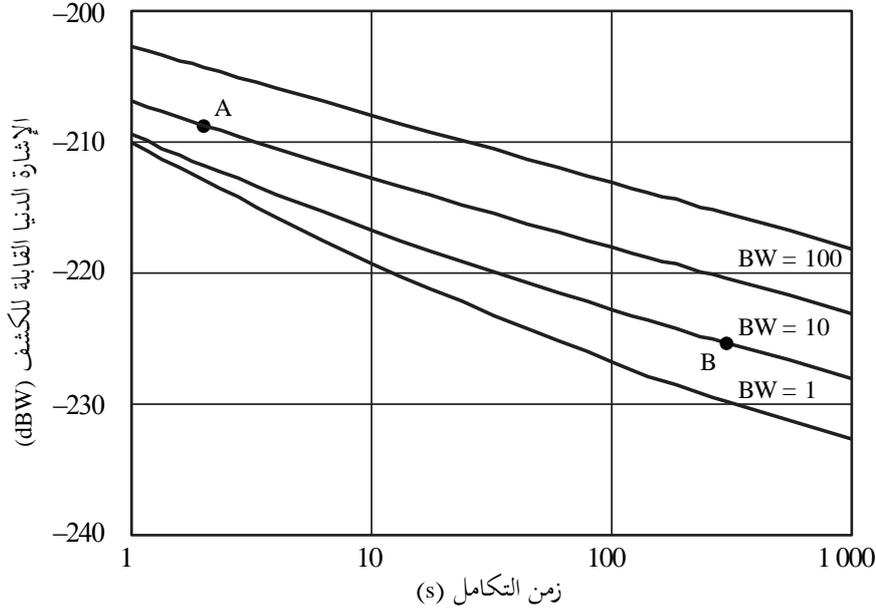
B : عرض نطاق قناة التردد (Hz)

t : زمن التكامل (s).

ويبين الشكل 2.10 الحد الأدنى من قدرة الإشارة القابلة للكشف، P_{min} ، كدالة لزمن التكامل، لعدة عروض نطاق. وتمثل النقطتان A و B في الشكل مستقبلي كشف ممكنين لهما الخصائص المدرجة في أسفل الشكل.

الشكل 2.10

قدرة الإشارة الدنيا القابلة للكشف لمثاليين من النظم



حرارة ضوضاء نظام قدرها K 30

BW: عرض النطاق (Hz)

المثال A، نظام مسح السماء: BW = 10 Hz، زمن التكامل = 2 s

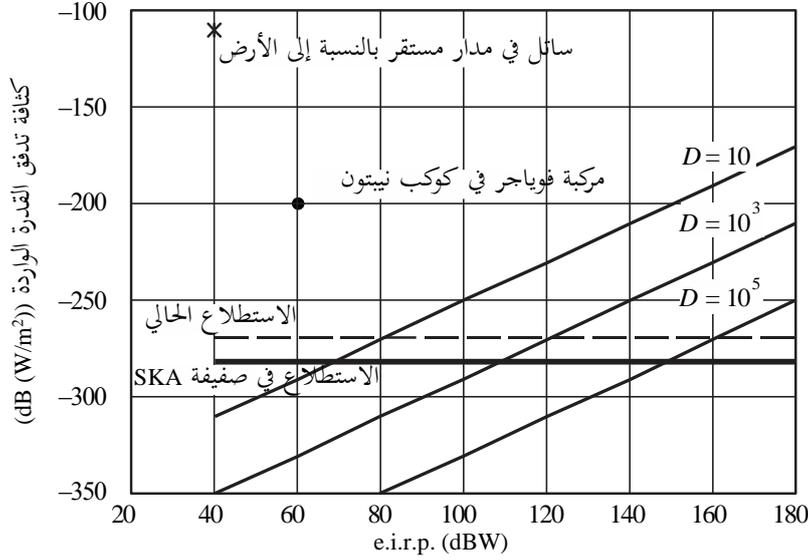
المثال B، نظام بحث هادف: BW = 1 Hz، زمن التكامل = 1000 s

Radio-Astro_102

ويوضح الشكل 3.10 العلاقة بين كثافة تدفق القدرة الواردة من أجل الشروط المفترضة في الشكل 1.10، لبرنامج استطلاع خارج الأرض حالي (خط أفقي رفيع) وبرنامج استطلاع خارج الأرض مقبل في صيف SKA (خط أفقي غليظ). ويستخدم برنامج استطلاع خارج الأرض الحالي، مشروع Phoenix، هوائي قطره 300 متر وكفاءة بنسبة 70% يشير إلى فتحة الإضاءة الفعالة بمقدار 225 متراً، وحرارة ضوضاء نظام قدرها K 40، وعرض نطاق قناة بمقدار 1 Hz، وزمن تكامل قدره 300 ثانية. ويفترض برنامج استطلاع خارج الأرض المقبل في صيف SKA معلمات الرصد نفسها، ولكن بزيادة مساحة التغطية بمقدار 13 dB. وهذا تقدير متحفظ للحساسية إذ من المرجح أن تكون أزمدة التكامل 1000 ثانية أو أكثر. والتجميعات من القدرة المشعة المكافئة المتناحية والمسافة التي تؤدي إلى كثافات تدفق قابلة للكشف هي تلك الواقعة فوق الخططين الأفقيين لكل من مثال النظام المناسب.

الشكل 3.10

المقدرة على كشف الإشارة لمرسل مفترض لقدرة مشعة مكافئة متناهية



الحساسية: الاستطلاع الحالي: مشروع نظام Phoenix، هوائي 300 متر، عرض نطاق
 1 Hz، زمن تكامل 300 s

- D : المسافة، بالسنوات الضوئية (سنة ضوئية = 9.46×10^{15} متر)
 * من مدار السائل المستقر بالنسبة إلى الأرض
 • من مركبة فوياجر في كوكب نبتون

Radio-Astro_103

وعندما لا يكون عرض نطاق قناة التردد محدوداً بحكم انزياح تردد الإشارة، يتم الحصول على أعلى درجة من الحساسية باستخدام عرض نطاق يطابق العرض الطيفي للإشارة الواردة. بيد أن هذا العرض الطيفي غير معروف مقدماً. فإذا لم يكن في المستقبل سوى قناة تردد وحيدة، ثمة مشكلة مرتبطة وهي أن تخفيض عرض نطاق القناة يزيد من الوقت اللازم للبحث عن مدى تردد معين. مثال ذلك، أن البحث في مدى من 1 إلى 2 GHz بواسطة مستقبل ذي قناة واحدة له عرض نطاق 1 Hz وزمن تكامل 10 ثوانٍ يستغرق 317 عاماً. ولهذا السبب تجري عمليات الاستطلاع الشاملة الآن باستخدام مستقبلات، تُعرف باسم مقاييس طيفية، توفر إمكانية تقسيم نطاق تردد واسع إلى العديد من القنوات الضيقة النطاق. وأصبحت الآن مقاييس طيف ذات 10⁹ قناة مجدية اقتصادياً.

5.10 اتجاه تسديد الهوائي

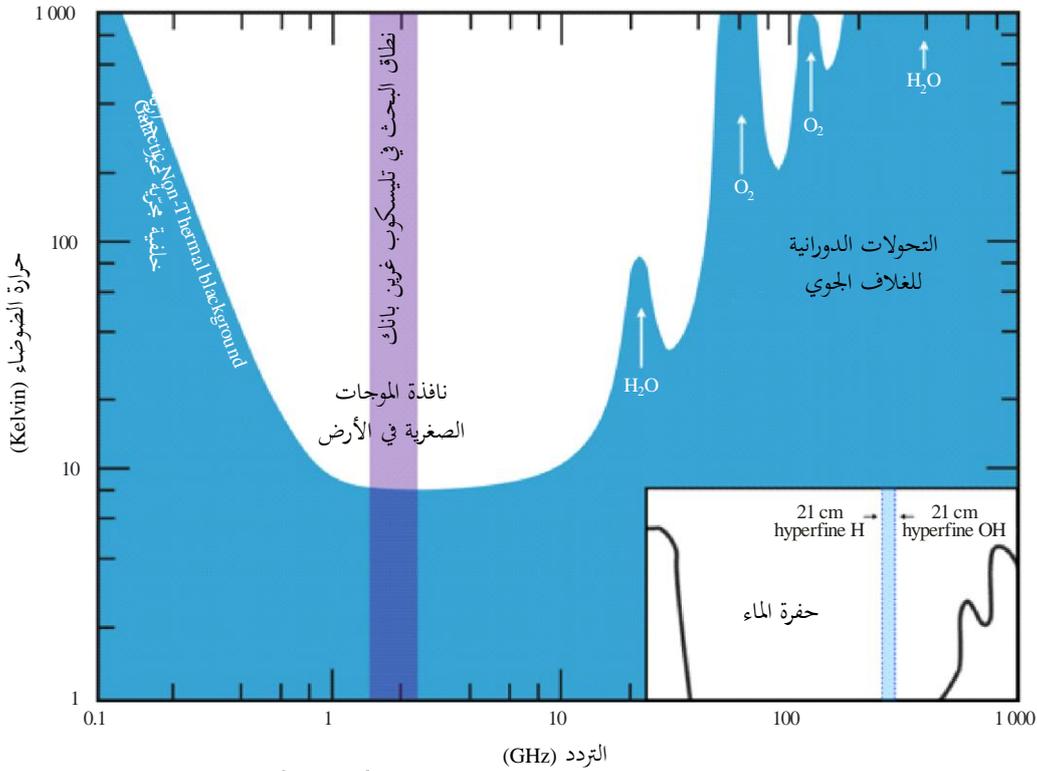
تُعتبر الهوائيات ذات مناطق التغطية الواسعة (أي عالية الكسب) مرغوبة من أجل زيادة حساسية الاستطلاع، وبالمقابل تعزيز احتمال الاستطلاع. ومع ذلك، وبالنسبة لهوائيات وحيدة، تؤدي الزيادة في مساحة التغطية عادةً إلى انخفاض في عرض حزمة الهوائي، ومن ثم يجب زيادة عدد مواضع التسديد اللازمة للاستطلاع في منطقة معينة من السماء. وهذا يعني، بالنسبة لزمن تكامل معين، ضرورة زيادة الزمن الإجمالي للاستطلاع. ويمكن التغلب على هذه المشكلة بزيادة مساحة التغطية باستخدام هوائيات إضافية.

واستراتيجية تسديد الهوائي سمة أساسية من سمات الاستطلاع خارج الأرض. وهناك بديلان: إما عمليات الاستطلاع الهادفة أو المسوح السماوية عامة. وفي عملية استطلاع هادفة، تسدد الهوائيات نحو النجوم المختارة. وهناك ما يقرب من ألف نجم مشابه للشمس ضمن مسافة 100 سنة ضوئية من الأرض. ومن شأن رصد الإشارات في الوقت الفعلي أن يمكن التحقق من استطلاع ممكن بواسطة هوائي كاشف أو أداة دعم أخرى. وينبغي أن تحتفي أي إشارة واردة من تكنولوجيا خارج كوكب الأرض تدور حول نجم مستهدف عندما يسدد الهوائي بعيداً عن الهدف، وأن تعود عند استعادة الهدف. وبما أنه يمكن قضاء فترة طويلة في تسديد كل هدف، يمكن استطلاع مجال خرج الإشارات من حيث الزمن- التردد بواسطة مطياف لكل من إشارات الموجات المستمرة (CW) والإشارات النابضة. بل يمكن أن يمتد البحث إلى أنماط منساقعة من حيث التردد.

وقد وفرت مسوحات الكواكب خارج الشمس أهدافاً جديدة لعمليات الاستطلاع خارج الأرض (Siemion 2013). وبالإضافة إلى ذلك، مكنت تقنيات معالجة الإشارات الرقمية التي ما فتئت تتحسن من إجراء عمليات بحث بعرض نطاق أوسع بكثير، تتسم باستبانة طيفية أدق. ويبين الشكل 4.10 المدى الطيفي لعملية استطلاع إشارات نطاق ضيق ($> 5 \text{ Hz}$) موجّهة نحو كواكب مكتشفة.

الشكل 4.10

شدة الخلفية الراديوية إزاء منحني التردد



يبين الرسم البياني المساهمات الخارجية في حرارة نظام الاستقبال ويشير إلى الأمداء من أجل استطلاع خارج الأرض. ويتسم مدى التردد 1 إلى 10 GHz على السواء بإرسال مجزئي منخفض ومساهمات غلاف جوي أرضي في حرارة النظام. ويبين الرسم أيضاً مدى استطلاع الكواكب في تليسكوب كيبلر في غرين بانك بعرض نطاق 0,8 GHz. الشكل مقتبس من (2013) A. Siemion.

Radio-Astro_104

وتتطلب مسوحات السماء العمومية عبر أبعاد كبيرة من الفضاء المزيد من الوقت، كما أن الوقت المستغرق في كل اتجاه محدود أكثر. ويمكن وضع استراتيجيات مسح محددة للتمييز بين الإشارات المرتبطة بالأجرام السماوية والإشارات المرتبطة بالمرسلات في المدارات أو القائمة على الأرض.

ويفضي تهجين هذين المفهومين إلى نظام في كل الاتجاهات يستخدم العديد من العناصر الصغيرة لمنطقة التغطية الخاصة به ويجمع مخرجاتها لاستهداف جميع الحزم الممكنة المرئية في السماء في آن واحد. ويكون لهذا الصيف الراديوي حساسية محدودة ما لم يكن عدد العناصر كبيراً جداً، وهذا يفرض تحديات حوسبية هائلة لا يمكن بعدُ تحمل تكلفتها.

6.10 إستبانة الإشارة ورفض التداخل

يفترض معظم الباحثين أن الإشارات من حضارة من خارج الأرض ستكون ضيقة النطاق، 1 Hz مثلاً، وربما تتغير من حيث الشدة بمرور الزمن. وثمة مشكلة أساسية تواجه الكشف عن إشارات من هذا القبيل وهي القدرة على البت في أن الإشارة ليست نتيجة ضوضاء طبيعية أو من صنع الإنسان.

وبالنسبة لضوضاء عشوائية طبيعية، فإن الاحتمالات المتعلقة بالاتساع مفهومة جيداً. وقد يكون احتمال أن تتجاوز ذروة الضوضاء عتبة إشارة الكشف محدوداً، ومع ذلك فإن هذه الذروة سوف تسجل بمثابة كشف من خارج الأرض. ويتوقف معدل هذه الإشارات المكتشفة الكاذبة على سوية العتبة المعتمدة، ويمكن حسابه لحالة ضوضاء غوسية (بيضاء). ومن شأن رفع العتبة من أجل خفض معدل الانذارات الكاذبة أن يقلل من حساسية المستقبل. ومن المفيد استخدام عدة هوائيات تعمل معاً لخفض معدل الكشف الكاذب. وعندما تفصل ما بين هذه الهوائيات مسافات كبيرة ينفك اقتران التداخل من الأرض وينخفض بشدة.

وتحتل الإشارات التي هي من صنع الإنسان جزءاً كبيراً من الطيف الراديوي، لا سيما في الترددات المنخفضة نسبياً. وينبغي أن تتضمن استراتيجيات الاستطلاع القدرة على تصنيف هذه الإشارات، ورفضها كإشارات مرشحة ممكنة. ويمكن أن يستند الرفض إلى معرفة مسبقة بالإشارات التي يحتمل أن تؤثر في مرصد ما، أو إلى قياسات أجريت في المرصد. ويعتبر النجاح في استبعاد هذه الإشارات المتداخلة من قاعدة البيانات المستخدمة لمزيد من التحليل المفصل بمثابة مكونة رئيسية في إمكانية القيام بعملية استطلاع ناجحة.

ومن شأن تزايد استخدام الطيف الراديوي من جانب خدمات الاتصالات الراديوية وغيرها من الخدمات أن يجعل عمليات الاستطلاع المقبلة خارج الأرض أكثر صعوبة. وعلى وجه الخصوص، فإن التزايد المتسارع في عدد السواتل في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض يمنع على نحو متزايد إمكانية استطلاع منطقة في السماء في اتجاهات قريبة من المدار في العديد من الترددات. ومن الجدير بالملاحظة، من وجهة نظر الاستطلاع خارج الأرض، أن كل الإرسالات الراديوية التي هي من صنع الإنسان، سواء المصرح لها أم لا، تمثل احتمال تداخل ترددات راديوية. ونظراً للطلبات المتزايدة على الطيف الراديوي، من الواضح أن عمليات الاستطلاع خارج الأرض ينبغي أن تجرى في أقرب وقت ممكن للحد من مشكلة التداخل الراديوي.

7.10 النطاقات المرشحة التي يتعين استطلاعها

لا يمكن أن يكون هناك أي معرفة مسبقة بالتردد وغيره من خصائص الإشارات التي قد يتم الكشف عن ورودها من حضارات خارج الأرض، ولا يمكن واقعياً تغطية الطيف الراديوي بأكمله، أو حتى ذلك الجزء المتاح للمراصد على سطح الأرض. ولذلك، لا بد من انتقاء نطاقات تردد مقيدة على أساس تخمينات محسوبة.

ويناقش التقرير 1-700 (دوسلدورف، 1990)، الصادر عن اللجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) السابقة، الأساس المنطقي لاختيار نطاقات تردد معينة لعمليات الاستطلاع. وهناك جانب مشترك للعديد من النطاقات المقترحة وهو وجود علاقة تربطها مع ترددات الظواهر التي تحدث بشكل طبيعي. والافتراض الأساسي هو أن الحضارات خارج كوكب الأرض قد تختار البث في ترددات مشتركة في جميع أنحاء المجرة، أو أنها تبث في تردد بعض مضاعفات هذه الترددات المشتركة، على أساس أن الحضارات الأخرى ستكون أيضاً على بينة من هذه الترددات وأنها تحطط نظم الاستقبال لديها وفقاً لذلك. وهكذا، فإن النطاقات مرتبطة بترددات في خطوط طيفية معروفة مرتبطة بأكثر ذرات وجزئيات الهيدروجين الذري (HI) وفترة بين النجوم في تردد 1420 MHz ، وجذر الهيدروكسيل (OH) في ترددات 1612 و 1665 و 1667 و 1720 MHz ، والفورمالديهايد (H_2CO) في تردد 4830 MHz . وقد مال الاعتقاد في المنطقة بين خطي الهيدروجين والهيدروكسيل، وتسمى "حفرة الماء"، بأن أشكال الحياة القائمة على الماء قد تنظر

في أهمية هذه المنطقة الطيفية. بل اقترح وجود نطاق يحتوي على خط طيفي من 203 GHz من أحف الذرات الاصطناعية، وهي ذرة بوزيترونيوم

وهناك عدة نطاقات موزعة لخدمة الفلك الراديوي محمية من الانبعاثات التي هي من صنع الانسان، على غرار العديد من النطاقات الموزعة للاستشعار المنفعل. وبما أنها محمية من التداخل وتحتوي في كثير من الحالات على خطوط طيفية تحدث على نطاق واسع في شتى أنحاء المجرة، فإن هذه النطاقات مرشحة جيداً للاستخدام في برنامج الاستطلاع خارج الأرض.

وهناك العديد من وجهات النظر بشأن اختيار النطاقات. ومع ذلك، ولأنه ليس هنالك من معرفة مسبقة بخصائص أو حتى بوجود الإشارات من خارج الأرض، ينبغي أن تغطي البحوث الشاملة أوسع مدى ممكناً من الترددات.

المراجع

- BATES, D. [1988] Radio searches for extraterrestrial civilizations. *Quarterly J. of the Royal Astronom. Soc.*, Vol. 29, p. 307-311.
- COCCONI, G. and MORRISON, P. [1959] Searching for interstellar communications. *Nature*, 184, p. 844-846.
- DRAKE, F. D. [1961] Project Ozma. *Physics Today*, Vol. 14, p. 40-46.
- DRAKE, F. D. and SOBEL, D. [1992] *Is anyone out there?: The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*. Delacorte Press, New York, United States of America.
- KARDASHEV, N. S. [1964] Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Soviet Astronomy*, AJ, **8**, p. 217-221.
- LAZIO, T. J. W., TARTER, J. C. and BACKUS, P. R. [July 2002] The META Candidates Were Not Transmissions From Intrinsically Steady Sources. *Astronomical J.*, Vol. 124, p. 560-564.
- NASA [July 1973] Project Cyclops. Ames Research Center, Moffett Field, California, United States of America, Report CR 114445, Revised Edition, p. 243.
- OLIVER, B. M. [1987] The windows of SETI: frequency and time in the search for extraterrestrial intelligence. *The Planetary Report*, Vol. VII, **6**, p. 23-25.
- SAGAN, C. and HOROWITZ, P. [September 1993] Five Years Of Project META: An All-Sky Narrowband Radio Search For Extraterrestrial Signals. *Astrophysical J.*, Vol. 415, **218**, p. 218-235.
- TARTER, J. C. [2001] The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI). *Annual Rev. of Astronom. and Astrophys.*, Vol. 39, p. 511-548.
- TROITSKY, V. S., STARODUBTSEV, A. M., GERSHTEIN, L. L. and RAKHLIN, V. L. [1971] The experience of the search for monochromatic radio emission from stars in the vicinity of the Sun at a frequency of 927 mc/s. *Astronomicheskii Zhurnal*, Vol. 48, p. 645-647.
- SIEMION, A. P. V, DEMOREST, P., KORPELA, E. MADDALENA, R., WERTHIMER, D., COBB, J., HOWARD, A.W., LANGSTON, G., LEBOFKY, M, MARCY, G.W., TARTER, J., A 1.1-1.9 GHz SETI Survey of the Kepler Field. I. A Search for Narrow-band Emission from Select Targets, *Astrophysical J.*, Vol. 767, p. 94.
- SHKLOVSKII, I. S. and SAGAN, C. [1966] *Intelligent life in the Universe*, Holden-Day, Inc.

الفصل 11

الفلك الراداري على الأرض

1.11 مقدمة

لا تختلف متطلبات الفلك الراداري عن متطلبات الفلك الراديوي، وهي الوصول إلى النطاقات الخالية من التداخل في الطيف الراديوي. ويختلف الفلك الراداري عن الفلك الراديوي في أنه خدمة نشطة، ترسل وتستقبل على السواء. وهو يختلف أيضاً من حيث أن هناك ثلاثة مواقع إرسال فقط نشطة حالياً في الميدان، واحد في بورتوريكو، وآخر في كاليفورنيا، وثالث في شبه جزيرة القمر، وهي تعمل في أربعة نطاقات بين 430 MHz و 8 GHz (انظر الجدول 1.11). وبما أن استقبال صدى رادار يمكن أن يكون إما عن طريق الهوائي المرسل أو الهوائي المساعد، فهناك ما يقرب من ضعف عدد المواقع المستقبلية النشطة كمواقع إرسال. وكل هوائيات الإرسال والاستقبال المستخدمة حالياً تُستخدم أيضاً لرصدات الفلك الراديوي أو لاتصالات المركبات الفضائية المنفصلة. وقد تجدد الاهتمام بالرصدات الرادارية في الإكليل الشمسي ومناقشات نظام الإرسال للعمل بالاقتران مع صيف التليسكوبات الراديوية المنخفض التردد (LOFAR) المخطط له. ولم يتم انتقاء أي تردد ولكن ربما يكون في نطاق 15 MHz إلى 50 MHz.

ويشمل الفلك الراداري استخدام نظم رادارات قائمة على الأرض الهدف منها:

- دراسة خصائص انعكاس الأطوال الموجية الراديوية وحجم ودوران متجهات الأجسام الصلبة الكبيرة والصغيرة في النظام الشمسي؛
- قياس تحولات دوبلر وتأخرات الزمن لاستخلاص السرعات والمسافات لتحديد المعالم المدارية، وخاصة بالنسبة للأجرام السماوية بالقرب من كوكب الأرض والتي قد تشكل خطراً في المستقبل على الأرض؛
- دراسة الوسط ما بين الكواكب والإكليل الشمسي عن طريق آثارهما في الإشارات الرادارية المنتشرة عبر هذا الوسط ودراسة الانعكاسات الرادارية من الإكليل الشمسي.

والتخصصات ذات الصلة، التي لها متطلبات مماثلة لتخصص الفلك الراداري، هي دراسات الأيونوسفير والغلاف الجوي المحيطين بالأرض باستخدام رادارات بعثة وستراتوسفيرية وشهابية غير متماسكة.

وكانت بداية الفلك الراداري الرسمية في عام 1946 عند اكتشاف أول أصداء من القمر، ولكن البداية الحقيقية له كتخصص فرعي من علم الفلك كانت في عام 1961 عند اكتشاف أصداء من كوكب الزهرة. وجاء بعد فترة وجيزة اكتشاف أصداء من كواكب أرضية أخرى، مثل عطارد والمريخ. وتضمنت نجاحات هذه السنوات الأولى تحديد فترات دوران كوكبي الزهرة وعطارد وشكلت عامل تحسن بمقدار مائة في معرفتنا بالوحدة فلكية. وشهدت هذه السنوات أيضاً تركيزاً كبيراً على تطوير تقنيات الرصد وأدوات القياس. وثمة وصف للرصدات المبكرة وتطوير الأجهزة يمكن الاطلاع عليه لدى Evans و Hagfors [1968]، وهناك سرد لبداية تاريخ الفلك الراداري يمكن الاطلاع عليه لدى Butrica [1996].

وشهد العقد الثاني من تاريخ الفلك الراداري ابتداء من أوائل السبعينيات زيادة كبيرة في حساسية النظم المستخدمة، حيث تم تركيب رادار بتردد 2,38 GHz على تليسكوب أريسيبو الذي أصبح قطره آنذاك 305 أمتار، وأدخلت تحسينات على النظام بتردد 8.5 GHz على تليسكوب NASA/JPL Goldstone بقطر 64 متراً آنذاك. وفي الوقت نفسه، توقفت نظم الرادارات الكوكبية في Jodrell Bank في المملكة المتحدة و Haystack في الولايات المتحدة، مما ترك هوائيين في الولايات المتحدة الأمريكية وهوائيين في الاتحاد السوفيتي (جمهورية أوكرانيا الآن)، بوصفهما موقعي الإرسال الوحيدين في مجال الفلك الراداري الكوكبي. وما زال الحال كذلك حتى يومنا هذا، كما هو مبين في الجدول 1.11.

وفي الأعوام العشرين ما بين 1972 و1992، قدم علم الفلك الراداري الكثير من المساهمات في معرفتنا بالنظام الشمسي (انظر Ostro [2002] لاستعراض لهذا الموضوع). فقد تبين أن الجزيئات في حلقات زحل بحجم سنتيمتر أو أكبر، واكتشفت خصائص انتشار غير عادية من أقمار غاليليو الجليدية لكوكب المشتري، وتم تصوير 40% من سطح كوكب الزهرة باستبانة 2 كم، واكتشفت ترسبات جليدية في قطبي عطارد، وتم قياس خصائص انعكاس الطول الموجي الراديوي لعشرات الأحزمة الرئيسية والأجرام بالقرب من الأرض بالإضافة إلى العديد من المذنبات، وتم الحصول على صور عالية الاستبانة لتأخير دوبلر لجرمين يقتربان من الأرض. وفي مجال الأجهزة، أُخذ بعملية قياس التداخل بالرادار لحل الغموض بين الشمال والجنوب الكامن في تصوير تأخير دوبلر، كما طُورت نظم ثنائية السكون، وخاصة بين هوائي Goldstone (المرسل) والصفيف الواسع جداً VLA (المستقبل) في نيو مكسيكو، واستخدمت مخططات طول الترميز شبه اللاهائية للتغلب على مشكلة فرط الانتشار عند تصوير أهداف سريعة الدوران.

وفي منتصف التسعينيات تم تغيير عدسات تليسكوب أريسيبو لاستخدام نظام العاكس الفرعي المكافئي (الغريغوري) المزدوج لتصحيح الانحراف الكروي في التليسكوب. وتم أيضاً بناء حاجز بارتفاع 15 متراً فوق الأرض حول محيط العاكس الرئيسي بقطر 305 أمتار لحماية المستقبلات من الإشعاع على الأرض. وأدت هذه التعديلات إلى زيادة هامة في حساسية التليسكوب عند ترددات فوق 1.0 GHz وإلى انخفاض في حرارة النظام. وعندما تقترن هذه التحسينات بمضاعفة قدرة المرسل في النطاق S حتى 1 ميغاواط فإنها تؤدي إلى زيادة في حساسية نظام الرادار أريسيبو في النطاق S بعامل قدره 10 في السمات وبعامل أكثر من 20 في أقصى زاوية سمّت التليسكوب وقدرها 20°. وفي الوقت نفسه تقريباً أسهم تحسين الكليسترونات في تحسين طفيف في حساسية نظام رادار Goldstone في النطاق X. وقد توقف العمل في المرسل الراداري الكوكبي في النطاق S في عام 2001.

وعلى مدى السنوات القليلة الماضية تم استخدام نظم Goldstone وArecibo المرتقاة على نطاق واسع لدراسات كل من الأجرام القريبة من الأرض (NEAs) والأجرام في الحزام الرئيسي، مما أدى إلى اكتشاف الأجرام الإثنية القريبة من الأرض. وقد استخدم Arecibo لدراسة أسطح Titan وIapetus، وهما من أقمار زحل، ولتصوير حلقات هذا الكوكب. وقد تم الحصول على استبانة صور أعلى لترسبات الجليد في قطبي عطارد، وأجريت رصدات لقياس الارتفاع في المناطق القطبية للقمر وجرت دراسة الترسيبات السطحية على كوكب الزهرة عن طريق تحليل خصائص استقطاب الصدى المنعكس.

الجدول 1.11
مرافق الفلك الراداري

هوائيات الاستقبال المساعدة الرئيسية		النظم الرادارية						
نمط الهوائي	الموقع	حرارة النظام (K)	كسب الهوائي	نمط وقدرة المرسل (kW)	التردد (GHz)	خط الطول شرقاً	خط العرض	الموقع
		55	61	النبض 150 متوسط ذروة 2 500	0,430	-66° 45'	18° 21'	(1)Arecibo بورتوريكو
مكافئ 100 متر مكافئان 70 متراً و 34 متراً VLBA (مكافئيات 10 × 25 متراً)	Green Bank، فرجينيا الغربية، الولايات المتحدة Goldstone، كاليفورنيا، الولايات المتحدة St. Croix إلى هاواي، الولايات المتحدة	26	73,4	موجة مستمرة 1 000	2,380	-66° 45'	18° 21'	(1)Arecibo بورتوريكو
VLBA (مكافئيات 27 × 25 متراً) مكافئ 100 متر	Socorro، نيو مكسيكو، الولايات المتحدة Green Bank، فرجينيا الغربية(2)، الولايات المتحدة	14	73	موجة مستمرة 470	8,560	-116° 51'	35° 23'	Goldstone، كاليفورنيا، الولايات المتحدة
مكافئ 100 متر مكافئ 32 متراً	Effelsberg، ألمانيا Medicina، إيطاليا	45	69	موجة مستمرة 150	5,01	33° 11'	45° 11'	Evpatoria، شبه جزيرة القرم، أوكرانيا

(1) يستطيع تليسكوب Arecibo أن يسدد حتى 20 من الوضع الرأسي. المعلومات هي لتسديد سمطي.

(2) من المرتقب الاستخدام على نطاق واسع.

2.11 مسائل الحساسية

لتحقيق أهداف الفلك الراداري، وهي دراسة الأجرام الكبيرة والصغيرة في نظامنا الشمسي، يحتاج الأمر إلى هوائيات كبيرة، ومرسلات عالية القدرة ومضخمات طرف أمامي منخفضة الضوضاء جداً. وهذه الحاجة تملئها تبعية معكوس القوة الرابعة لشدة الإشارة بتزايد المسافة. وبالنسبة لهوائي له كسب أمامي G ، مجهز بمرسل موجة مستمرة CW، وله قدرة PT (باستثناء نظام أريسيبو بتردد 430 MHz فإن جميع مرسلات رادارات الكواكب مستمرة الموجة CW، إذ تتوقف الحساسية الإجمالية بالنسبة لكل الأجرام قيد الدراسة تقريباً على متوسط القدرة المرسل)، تعطى القدرة P التي يستقبلها هوائي ما له مساحة تغطية فعالة A بعد الانعكاس من هدف له مقطع عرضي σ على مسافة R من الرادار بالعلاقة:

$$(1.11) \quad P = \frac{P_T G \sigma A}{(4\pi R^2)^2}$$

وإذا استخدم نفس الهوائي، كما هو الحال عادةً، لكل من الإرسال والاستقبال في الطول الموجي λ ، عندئذ:

$$(2.11) \quad P = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

وتتوقف الحساسية الكلية لنظام الرادار على نسبة قدرة الإشارة الواردة إلى تقلبات جذر متوسط تربيع قدرة الضوضاء الناجمة عن مساهمات الضوضاء المضافة من السماء (خلفية الموجات الصغيرة وفي ترددات منخفضة نسبياً الإشعاع غير الحراري من مجرتنا) والغلاف الجوي والإشعاع الأرضي ومضخمات الطرف الأمامي، وبطبيعة الحال التداخل. وتتميز جملة قدرات الضوضاء هذه عادةً بجرارة نظام T_s ترتبط بقدرة الضوضاء P_N بالعلاقة $P_N = k T_s B$ ، حيث k هي ثابت بولتزمان و B هي عرض نطاق التردد ذي الصلة، توسيع دوبلر عادةً. ويعطى جذر متوسط تربيع تقلبات الضوضاء بالتعبير $P_N (\tau B)^{-1/2}$ حيث τ هي زمن التكامل. وبغض النظر عن خصائص الهدف والثوابت الأخرى، تكون الحساسية:

$$(3.11) \quad \propto \frac{P_T G A}{T_s} (\tau/B)^{1/2}$$

أو، في حالة استخدام نفس الهوائي للإرسال والاستقبال:

$$(4.11) \quad \propto \frac{P_T G^2 \lambda^2}{T_s} (\tau/B)^{1/2}$$

وهكذا، فإن متطلبات الفلك الراداري مشابهة جداً لمتطلبات الفلك الراديوي (هوائيات كبيرة ومضخمات أمامية منخفضة الضوضاء وعدم وجود إشارات تداخل) إلى جانب مرسلات عالية القدرة جداً. وبما أن الكسب G متناسب عكساً مع λ^2 ، فإن المعادلتين (1.11) و (2.11) تعنيان أنه كلما ارتفع التردد ارتفعت الحساسية.

3.11 الأساليب التشغيلية والمتطلبات من عرض النطاق

تستخدم الأشكال الموجية المستمرة والتشكيلية على السواء في الفلك الراداري حيث يتوقف الاختيار على طبيعة الجرم المستهدف والأهداف المتوخاة من التجربة. وفي تجارب الموجات المستمرة، حيث ترسل إشارة أحادية اللون، تكون الإشارة المنعكسة هي توسيع دوبلر بسبب السرعة الزاوية الدورانية للجرم المستهدف Ω rad/s حيث يعطى التوسيع بالعلاقة:

$$(5.11) \quad \Delta v = \frac{4a\Omega v_0}{c} \sin \theta$$

حيث:

 a : نصف قطر الجرم v_0 : التردد المرسل c : سرعة الضوء θ : الزاوية بين محور الدوران وخط البصر من الرادار.

ويتم عموماً إرسال موجة مستقطبة دائرياً، وتوفر أطيف الإشارة المنعكسة في اتجاهي الاستقطاب الدائري الوارد معلومات عن البياض الراداري وحشونة سطح قياس الطول الموجي وفترة الدوران، وما إلى ذلك. ولئن كان من الممكن التحول في تردد الإشارة المرسله كل بضع ثوان لتحسين قابلية الكشف عن الإشارة الواردة، فإن مجموع عروض النطاق المستخدمة للإرسال والاستقبال في حالة الموجة المستمرة نادراً ما يتجاوز بضع عشرات كيلو هرتز.

ويستخدم التصوير ثنائي الأبعاد (تأخير دوبلر) لرسم خصائص انعكاس الطول الموجي الراديوي عبر أسطح الكواكب الأرضية والأجرام السماوية، وربما المذنبات في المستقبل. ويمكن تحقيق التشكيل الضروري للإشارة المرسله بواسطة التشكيل النبضي. وقد تم تبييض بعض النظم الأولى ولكن جميع النظم الأخيرة تستخدم الموجة المستمرة، ذلك لأن الحساسية تتوقف عادةً على متوسط القدرة المرسله، ومن الأيسر والأرخص الحصول على متوسط القدرات العالية باستخدام مرسلات الموجات المستمرة. ولذلك، تعتمد النظم الحديثة إلى تشكيل طور إشارة موجة مستمرة باستخدام تشكيل طور ثنائي يقوم على شفرات تسجيل زحزحة بطول أقصى متكررة. ومن شأن خصائص وظائف الارتباط الذاتي لهذه الشفرات أن تجعلها مثالية لتطبيقات الرادار الكوكبية. وفي الوقت الحاضر، تكون أقصر فترة أساسية في الاستخدام الروتيني لتبديل الطور بين الحالتين المتباعدتين بمقدار 180° هي $0,1 \mu s$ ، ما يقابل مدى استبانة بمقدار 15 متراً. وعرض نطاق المستقبل اللازم عند استخدام فترة تبديل بمقدار $0,1 \mu s$ هو ما يقرب من 20 MHz، ويحدد عرض النطاق هذا متطلبات الفلك الراداري الحالية. وبإمكان تحول دوبلر بسبب الحركة النسبية للجرم المستهدف والأرض أن يعوض نطاق المستقبل نسبة إلى تردد المرسل بما يصل إلى عدة ميغاهرتز. وبالطبع، من شأن تداخل قوي مباشرة خارج حواف هذا النطاق أن يسبب قدراً هاماً من الانحطاط في أداء المستقبل.

4.11 مرافق الفلك الراداري

يتطلب الفلك الراداري، بوصفه خدمة نشطة لها متطلبات صارمة من حيث النطاقات الحالية من التداخل في الطيف الراديوي، نفس متطلبات الفلك الراديوي، ولكن دون النفاذ إلى النطاقات المحمية. وكانت الترددات المختارة حتى اليوم مرهونة باعتبارات من قبيل توفر الكليستونات العالية القدرة أو، كما هو الحال في مرصد Goldstone بتردد 8,5 GHz، بالحاجة إلى مرسلات عالية القدرة لأغراض أخرى من قبيل اتصالات المركبات الفضائية.

ويبين الجدول 1.11 النظم المستخدمة حالياً في مجال الفلك الراداري الكوكبي. وأكثر نظامين حساسية هما نظام 8,5 GHz في هوائي قطره 70 متراً في شبكة الفضاء السحيق لوكالة NASA في Goldstone، كاليفورنيا، ونظام 2,4 GHz في هوائي قطره 305 أمتار في تليسكوب أريسيبو الراديوي/الراداري في بورتوريكو، الذي يديره معهد ستانفورد للبحوث (SRI) الدولية ورابطة جامعات بحوث الفضاء (USRA) وجامعة المتروبول (UMET)، بموجب اتفاق تعاوني مع مؤسسة العلوم الوطنية (NSF) في الولايات المتحدة، بدعم من وكالة NASA للبرنامج الكوكبي.

المراجع

- BUTRICA, A. J. [1996] *To See the Unseen: A History of Planetary Radar Astronomy*. NASA SP-4218, NASA History Office.
- EVANS, J. V. and HAGFORS, T., Ed. [1968] *Radar Astronomy*, McGraw-Hill.
- OSTRO S. J. [2002] *Planetary radar astronomy*. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Vol. 12, p. 295-327, Academic Press.

التذييل 1

جدول نطاقات التردد الموزعة إلى الفلك الراديوي

العمود 1: يعطي حدود التردد للنطاقات.

العمود 2: يشير إلى ما إذا كان التوزيع أولياً (P) أو ثانوياً (s). ويشير إلى نطاقات الخدمات المنفصلة بالمختصر (Pas)؛ وفي هذه النطاقات تحظر كل الإرسالات، مع بعض الاستثناءات الوطنية. ويجري تقاسم توزيعات أخرى مع خدمات (إرسال) نشطة.

العمود 3: يشير إلى الحالات التي يقتصر فيها التوزيع على بعض الأقاليم، ولكنه لا يعطي تفاصيل كاملة عن جميع الاستثناءات الوطنية، وما إلى ذلك. للحصول على تفاصيل كاملة ينبغي الرجوع إلى الطبعة الأخيرة من لوائح الراديو. ويشار أيضاً إلى بعض أهم الخطوط الطيفية.

يلاحظ، مع ذلك، أن ثمة أكثر من 10 000 خط معروف (انظر البند 1.4.2) وفوق 40 GHz هناك العديد من الخطوط في كل النطاقات.

تعليقات (3)	الوضع (2)	مدى التردد (MHz) (1)
	P	13,41-13,36
	P (Pas)	25,67-25,55
	s	38,25-37,50
الإقليم 2	P	74,60-73,00
الإقليم 1، وأستراليا، والهند	P	153,00-150,05
الصين (الرقم 250.5 من لوائح الراديو)	s	235,00-225,00
خط ديوتيريوم	P	328,60-322,00
	P	410,00-406,10
الصين والمنطقة الإذاعية الإفريقية	P	608,00-606,00
الإقليم 2، والصين، والهند، والمنطقة الإذاعية الإفريقية الإقليمان 1 (ما عدا المنطقة الإذاعية الإفريقية) و3	P s	614,00-608,00
خط الهيدروجين	P (Pas)	1 427,00-1 400,00
خط OH	P	1 613,80-1 610,60
خطوط OH	P	1 670,00-1 660,00
خط OH	s	1 722,20-1 718,80
	s	2 690,00-2 655,00
	P (Pas)	2 700,00-2 690,00
خط H ₂ CO؛ 4 825-4 835 MHz و 4 950-4 990 MHz على أساس أولي في الأرجنتين وأستراليا وكندا (الرقم 443.5 من لوائح الراديو)	s	4 990,00-4 800,00
	P	5 000,00-4 990,00

تعليقات (3)	الوضع (2)	مدى التردد (MHz) (1)
	P	10,68-10,60
	P (Pas)	10,70-10,68
H ₂ CO خطوط	s	14,50-14,47
	P (Pas)	15,40-15,35
H ₂ O خطوط	P	22,50-22,21
NH ₃ خطوط	P (Pas)	24,00-23,60
	P (Pas)	31,50-31,30
منفصلة (Pas) في الإقليم 2	P	31,80-31,50
SiO خطوط	P	43,50-42,50
CS خط	P	49,04-48,94
	P	77,50-76,00
	s	79,00-77,50
	P	86,00-79,00
SiO خطوط	P (Pas)	92,00-86,00
N ₂ H ⁺ خط	P	94,00-92,00
	s	94,10-94,00
CS خط	P	100,00-94,10
	P (Pas)	102,00-100,00
	P	109,50-102,00
CO خطوط	P (Pas)	111,80-109,50
CO خط	P	114,25-111,80
CO خط	P (Pas)	116,00-114,25
	s	130,00-123,00
كوريا (GHZ130-128، خطوط SiO) الرقم 562D.5 من لوائح الراديو	P	
	P	134,00-130,00
		136,00-134,00
CS خط	P	148,50-136,00
	P (Pas)	151,50-148,50
	P	158,50-151,50
	P (Pas)	167,00-164,00
كوريا الرقم 562D.5 من لوائح الراديو	P	171,60, -171,00 172,80-172,20 174,00-173,30
H ₂ O خط	P (Pas)	185,00-182,00
	P (Pas)	209,00-200,00
CO خطوط	P	226,00-209,00
CO خط	P (Pas)	231,50-226,00
CS خطوط	P	248,00-241,00
	s	250,00-248,00
	P (Pas)	252,00-250,00
HCO ⁺ ، HCN خطوط	P	275,00-252,00

وبالإضافة إلى التوزيعات، يحث الرقم 149.5 من لوائح الراديو الإدارات على اتخاذ جميع الخطوات العملية الممكنة لحماية خدمة الفلك الراديوي من التداخل الضار في النطاقات التالية:

،GHz 109,5-102	،MHz 4 990-4 950	،kHz 13 410-13 360
،GHz 114,25-111,8	،MHz 5 000-4 990	،kHz 25 670-25 550
،GHz 128,59-128,33	،MHz 6 675,2-6 650	،kHz 38,25-37,5
،GHz 129,49-129,23	،GHz 10,68-10,6	،MHz 74,6-73 في الإقليمين 1 و3،
،GHz 134-130	،GHz 14,5-14,47	،MHz 153-150,05 في الإقليم 1،
،GHz 148,5-136	،GHz 22,21-22,01	،MHz 328,6-322
،GHz 158,5-151,5	،GHz 22,5-22,21	،MHz 410-406,1
،GHz 168,93-168,59	،GHz 22,86-22,81	،MHz 614-608 في الإقليمين 1 و3،
،GHz 171,45-171,11	،GHz 23,12-23,07	،MHz 1 400-1 330
،GHz 172,65-172,31	،GHz 31,3-31,2	،MHz 1 613,8-1 610,6
،GHz 173,85-173,52	،GHz 31,8-31,5 في الإقليمين 1 و3،	،MHz 1 670-1 660
،GHz 196,15-195,75	،GHz 36,5-36,43	،MHz 1 722,2-1 718,8
،GHz 226-209	،GHz 43,5-42,5	،MHz 2 690-2 655
،GHz 250-241	،GHz 49,04-48,94	،MHz 3 267-3 260
GHz 275-252	،GHz 86-76	،MHz 3 339-3 332
	،GHz 94-92	،MHz 3 352,5-3 345,8
	،GHz 100-94,1	،MHz 4 835-4 825

في الترددات فوق GHz 275، ليس هنالك من توزيعات لنطاقات قطاع الاتصالات الراديوية. ومع ذلك، وافق المؤتمر WRC-2012 على توفير ما يلي من خلال الرقم 565.5 من لوائح الراديو:

565.5 تحدد نطاقات التردد التالية في المدى GHz 1 000-275 لاستعمال الإدارات لأغراض تطبيقات الخدمات المنفصلة:

- خدمة الفلك الراديوي: GHz 323-275 و GHz 371-327 و GHz 424-388 و GHz 442-426 و GHz 510-453 و GHz 711-623 و GHz 909-795 و GHz 945-926؛

- خدمة استكشاف الأرض الساتلية (المنفصلة) وخدمة الأبحاث الفضائية (المنفصلة): GHz 286-275 و GHz 306-296 و GHz 313-356 و GHz 361-365 و GHz 369-392 و GHz 397-399 و GHz 409-411 و GHz 416-434 و GHz 439-467 و GHz 477-502 و GHz 523-527 و GHz 538-581 و GHz 611-630 و GHz 634-654 و GHz 657-692 و GHz 713-718 و GHz 729-733 و GHz 750-754 و GHz 771-776 و GHz 823-846 و GHz 850-854 و GHz 857-862 و GHz 866-882 و GHz 905-928 و GHz 951-956 و GHz 968-973 و GHz 985-990.

ولا يحول استعمال المدى GHz 1 000-275 من جانب الخدمات المنفصلة دون استعمال هذا المدى من جانب الخدمات النشيطة. وتحث الإدارات التي ترغب في إتاحة الترددات في المدى GHz 1 000-275 لأغراض تطبيقات الخدمات النشيطة على اتخاذ كل التدابير الممكنة عملياً لحماية هذه الخدمات المنفصلة من التداخلات الضارة، إلى حين وضع جدول توزيعات نطاقات التردد في المدى الترددي GHz 1 000-275 المذكور أعلاه.

ويجوز للخدمات النشيطة والمنفصلة على السواء أن تستخدم جميع الترددات في المدى GHz 3 000-1 000. (WRC-12)

التذييل 2

تسجيل محطات الفلك الراديوي

من المهم أن تعتمد الإدارات التي تشغل محطات فلك راديوي إلى تسجيلها لدى مكتب الاتصالات الراديوية (BR) في الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

ويوفر هذا التسجيل عدداً من المزايا:

- الحماية من التداخل في نفس القناة، عندما تجرى الرصدات في نطاقات متقاسمة موزعة لخدمة الفلك الراديوي على أساس أولي، وخاصة عندما تكون الحماية عبر الحدود ذات أهمية.
- ينص العديد من الحواشي في لوائح الراديو على توفير الحماية لمحطات الفلك الراديوي من الانبعاثات غير المطلوبة من السواتل. وكمثال على ذلك، تنص حاشية الرقم 511A.5 من لوائح الراديو على ما يلي:
"... ومن أجل حماية خدمة علم الفلك الراديوي في النطاق GHz 15,4-15,35، يجب على كثافة تدفق القدرة التراكمية التي تشعها في النطاق GHz 15,4-15,35 جميع المحطات الفضائية التابعة لأي وصلة تغذية (فضاء-أرض) من نظام ساتلي غير مستقر بالنسبة إلى الأرض في الخدمة المتنقلة الساتلية، عامل في النطاق GHz 15,63-15,43، ألا تتجاوز القيمة 156- dB(W/m²) في عرض نطاق قدره 50 MHz، في أي موقع للرصد تابع لعلم الفلك الراديوي أثناء أكثر من 2% من الوقت."

وعند فحص نظام ساتلي للتحقق من امتثاله لحاشية من هذا القبيل، فإن مكتب الاتصالات الراديوية لا ينظر إلا في محطات الفلك الراديوي التي تم تسجيلها. ويوفر التسجيل ما يلي:

- السماح لأن تؤخذ محطة فلك راديوي في الاعتبار من قبل من يخطط لإقامة مرسلات جديدة في جوارها. ويتسم التسجيل الدولي بأهمية خاصة عندما تكون المحطة قريبة من الحدود الوطنية، وقد يكون التنسيق الثنائي أو المتعدد الأطراف ضرورياً أو مرغوباً فيه.
- تحديد أولوية زمنية للمحطة المسجلة. وعندما تكون محطات الفلك الراديوي مسجلة، يجوز لها، عندما ترصد في بعض النطاقات (مثلاً، GHz 15,4-15,35)، المطالبة بالحماية من الانبعاثات غير المطلوبة من نظم ساتلية مسجلة للتشغيل في نطاقات مجاورة أو قريبة في موعد لاحق.

ويجب أن يتم تسجيل محطات الفلك الراديوي من خلال هيئة الاتصالات المعنية في الإدارات الوطنية. وخصائص محطة الفلك الراديوي التي يجب تزويدها وارداً في الملحق 2، من التذييل 4 من لوائح الراديو.

ويمكن أن يطرأ تعديل في أجزاء من لوائح الراديو، بما في ذلك المعلومات المطلوبة لتسجيل محطة فلك راديوي، في كل مؤتمر عالمي للاتصالات. فقد أضاف المؤتمر WRC-03 مثلاً عدة معلومات جديدة إلى المعلومات المطلوبة لتسجيل محطة فلك راديوي (مثل زاوية الارتفاع الدنيا التي يمكن لتليسكوب راديوي أن يرصد فيها، وهو أمر ضروري لحساب مجموع كثافة تدفق القدرة لمحطات فضائية في نظام ساتلي في مدار غير مستقر بالنسبة إلى الأرض، على النحو المشار إليه في الحاشية رقم 511A.5 من لوائح الراديو). وينبغي استشارة أحدث إصدار من لوائح الراديو قبل تسجيل أي محطة معينة.

ومعظم محطات الفلك الراديوي ترصد عبر أمداء من الطيف أوسع من النطاقات المخصصة لخدمة الفلك الراديوي. ولدى تسجيل محطات الفلك الراديوي، ينبغي توخي الحذر في تقسيم نطاقات تردد الرصد إلى الأجزاء المخصصة لخدمة الفلك الراديوي على أساس أولي وإلى الأجزاء التي ليست كذلك، لأن حماية المحطة لا تنطبق إلا على النطاقات الموزعة لخدمة الفلك الراديوي على أساس أولي. مثال ذلك، إذا كانت محطة ما تشغل مستقبلاً يغطي المدى 15-16 GHz، ينبغي تسجيل المحطة في ثلاثة نطاقات تردد:

- GHz 15,35-15,00 حيث لا تنطبق أي حماية؛

- GHz 15,40-15,35 حيث تنطبق الحاشية 511A.5 من لوائح الراديو،

- GHz 16,00-15,40 حيث لا تنطبق أي حماية.

فإذا تم تسجيل النطاق GHz 16,00-15,00 ككيان واحد، لن تقدم أي حماية لأي جزء منه. وقد يبقى تسجيل نطاقات الطيف التي لا تتمتع بالحماية مفيداً لأغراض التخطيط والتنسيق.

التذييل 3

الوحدات المستخدمة في علم الفلك الراديوي

يستخدم علماء الفلك الراديوي عدداً من الوحدات والمواصفات التي تختلف عن تلك المستخدمة في معظم الخدمات الأخرى. والغرض من هذا التذييل هو توفير مقابلة بين المصطلحات التي يستخدمها علماء الفلك الراديوي والمصطلحات التي تستخدم في الخدمات الأخرى، وخاصة فيما يتعلق بشدة الإشارة وكسب الهوائي.

شدة الإشارة

يقدّر علماء الفلك الراديوي شدة الإشارة بوحدات Jansky (المختصر Jy). وترجع تسمية الوحدة إلى كارل جانسكي، مكتشف الإشارات الراديوية الكونية. و Jy هي وحدة قدرة لكل وحدة مساحة لكل وحدة عرض نطاق (أي كثافة تدفق القدرة الطيفية):

$$1 \text{ Jy} \equiv 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz})$$

وهناك عدة عوامل تدفع علماء الفلك الراديوي إلى التعبير عن شدة الإشارة بوحدة Jy:

- إشارات الفلك الراديوي ضعيفة جداً، وبالتالي من المناسب استخدام قيمة Jy الصغيرة جداً.
- يستخدم علماء الفلك الراديوي مجموعة متنوعة من الهوائيات تغطي مساحات مختلفة. ولتتمكن من مقارنة شدة الإشارات المقيسة بين هوائيات مختلفة، تعبر وحدة Jy عن شدة الإشارة في وحدة مساحة للسطح الذي يغطيه الهوائي. وبفضل توليف وحدة المساحة ووحدة عرض النطاق، تسمح وحدة Jy بمقارنة شدة الإشارة المقيسة مباشرةً بين مختلف التليسكوبات الراديوية.
- ينتمي العديد من إشارات الفلك الراديوي إلى النطاق العريض (من قبيل الانبعاث الحراري من غاز دافئ)، وتتوقف القدرة الواردة على مجموع عرض نطاق المستقبل. ووحدة Jy تأخذ ذلك في الحسبان بالتعبير عن شدة الإشارة على أساس وحدة عرض النطاق.

ويعبر العديد من خدمات الاتصالات الراديوية عن شدة الإشارة من حيث القدرة فقط. وثمة وحدة مشتركة هي dBm، أو ديسيبل فوق 1 ميغاواط. و dBm هي وحدة لوغاريتمية، وهو مفيدة بفضل اتساع مدى مضاعفات القيم في شدة الإشارة التي يمكن التعبير عنها من الإشارات الراديوية للأرض، لا سيما أنه يمكن استخدام dBm للتعبير عن كل من القدرة المرسل والمستقبل، وهو ما يمكن أن يمتد فوق ما يزيد على 200 dB أو أكثر. وعلى سبيل المقارنة، فإن شدة الإشارة في الفلك الراديوي لا تتغير فوق مدى واسع إلى هذا الحد - والمصدر بقيمة 1 Jy شديد جداً، وتفاوت حساسية التليسكوب الراديوي عموماً نزولاً حتى سوية ميكروجانسكي (μJy)، أو مجرد مدى مجموعه حوالي 60 dB.

ولئن كانت وحدة Jy (كثافة تدفق القدرة الطيفية) ووحدة dBm (القدرة) وحدتين مختلفتين، فإنه يمكن مقارنتهما على أساس بعض الافتراضات الاسمية. يتم تحويل وحدة Jy إلى قدرة من خلال عملية الضرب بعرض نطاق المستقبل ومساحة تغطية الهوائي الفعالة. ويقارن الجدول التالي الوحدتين بافتراض عرض نطاق له صلة ببعض إشارات الأرض المشتركة، وبافتراض أن مساحة تغطية الهوائي تقابل مساحة التغطية المتاحة، $\lambda^2/4\pi$:

$$\text{القدرة (بوحدتي ميغاواط)} = \text{كثافة تدفق القدرة الطيفية (بوحدتي Jy)} * 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz}) * 1000 \text{ mW/W}$$

$$\text{عرض النطاق (Hz)} * [\text{طول الموجة (أمتار)}]^2 \div 4\pi$$

$$\text{القدرة (dBm)} = 10 * \log_{10} [\text{القدرة (mW)}]$$

أمثلة لشدة إشارات واردة بوحدة dBm مقابل إشارة بمقدار Jy 1 واردة بواسطة هوائي متناح
عبر عرض نطاق محدد، لعدد من الإشارات الشائعة

نمط الإشارة	عرض النطاق	التردد/طول الموجة	Jy 1 المقابل dBm
برية متنقلة	kHz 12,5	m 0,67/MHz 450	dBm 204- = Jy 1
GSM	kHz 200	m 0,17/MHz 1 800	dBm 204- = Jy 1
DVB-T	MHz 8	m 0,6/MHz 500	dBm 176- = Jy 1
LTE	MHz 10	m 0,11/MHz 2 655	dBm 190- = Jy 1
Wi-Fi	MHz 40	m 0,06/MHz 5 300	dBm 190- = Jy 1

ولوضع هذه الأرقام في منظورها الصحيح، يلاحظ أن حساسية هاتف محمول باليد في النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) هي -111 dBm (بحسب مواصفات GSM)، ومن ثم فإن إشارة Jy 1 هي 93 dB دون سوية حساسية GSM، في حين أن إشارة بشدة 1 μJy تكون بمقدار حوالي 153 dB دون حد حساسية GSM. ويمكن لتليسكوب راديوي أن يكون أكثر حساسية بأكثر من 15 مرتبة من مستقبل GSM.

وقد يجد عالم الفلك الراديوي الذي يسعى إلى تحويل شدة إشارة ما للأرض إلى ما يعادلها بوحدة Jy في بعض الأحيان أن شدة الإشارة معبر عنها بوحدة ميكروفولط لكل متر (μV/m)، أو ما يعادلها بوحدة ديسيل، $12 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$. وهذا هو مجرد قياس لاتساع المجال الكهربائي (E)، ويمكن استخدام قانون Ohm لتحويل E إلى قدرة مكافئة: $P(\text{W/m}^2) = E^2/Z_0$ ، حيث $Z_0 = 377 \Omega$ هي معاوقة الفضاء الحر. وغالباً ما يصادف اتساع المجال الكهربائي (بدلاً من القدرة) في مجال الملاءمة الكهرمغناطيسية EMC، في قواعد الأجهزة غير المرخصة لدى هيئة الاتصالات الفيدرالية الأمريكية، على سبيل المثال. وبالاستعانة بقدر من حساب الجبر، يُشتق التحويلان التاليان:

$$P(\text{mW}) = 1,9 \times 10^{-8} * [E(\mu\text{V/m})]^2 * [f(\text{MHz})]^{-2}$$

$$P(\text{dBm}) = -77,2 + E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] - 20 * \log_{10}[f(\text{MHz})]$$

ويلاحظ هذا التحويل أيضاً في التقرير ITU-R RA.2131 الذي تدرج فيه عتبات الحماية لرصدات خدمة الفلك الراديوي من حيث مكافئاتها في المجال الكهربائي.

الهوائيات

من الشائع أن يعتمد علماء الفلك الراديوي إلى تحويل كثافة تدفق القدرة أو كثافة تدفق القدرة الطيفية (وكلتاها مقياس لكثافة القدرة أو كثافة القدرة الطيفية إزاء وحدة مساحة) إلى قدرة كلية. ولذا فإن المساحة الفعالة التي يغطيها الهوائي هي تعبير عن أداء الهوائي أكثر فائدة من كسب الهوائي. ومساحة تغطية الهوائي الفعالة A_e هي توليف مساحة التغطية الهندسية A_g (إذا كانت معرّفة) وكفاءة الفتحة η_a : $A_e = \eta_a A_g$. وثمة تعبير شائع لكسب هوائي الفلك الراديوي وهو الارتفاع في حرارة المستقبل (بوحدة Kelvin) ويعزى إلى تجمع القدرة في استقطاب وحيد من مصدر من كثافة تدفق إجمالي (F) بمقدار Jy 1. ويشار إلى هذا بأنه كسب الهوائي (G) بوحدة K/Jy. وللتحويل بين A_e و G تستخدم العلاقة:

$$\frac{1}{2} F A_e = k_B \Delta T_K$$

$$A_e (\text{m}^2) = \frac{2 k_B \Delta T_K}{10^{-26} F_{Jy}} = 2760 G (\text{K/Jy})$$

12 يلاحظ أن $\text{dB}(\mu\text{V/m}) = 20 * \log_{10}(\mu\text{V/m})$ ، وليس $10 * \log_{10}(\mu\text{V/m})$ ، لأنها قيمة مجال كهربائي وليست قيمة قدرة.

حيث k_B هي ثابت بولتزمان.

وتحدد خدمات الاتصالات الراديوية عموماً أداء الهوائي الأساسي بتعبير مختلف عن كسب الهوائي: وهو الكمية التي تزيد (أو تنقص) بها شدة الإشارة عند خرج هوائي نسبةً إلى شدة الإشارة التي كان يمكن الحصول عليها في خرج هوائي مرجعي قياسي، على افتراض أن الإشارة كانت على طول الحزمة الرئيسية للهوائي المرجعي. وأكثر الهوائيات المرجعية شيوعاً هو الهوائي المتناحي. ومساحة التغطية الفعالة A_e في هوائي متناح هي $\lambda^2/4\pi = 7162/[f(\text{MHz})]^2$ ، ولذلك فإن مساحة التغطية الفعالة لهوائي ما له كسب خطي قدره G (بالنسبة لهوائي متناح) هي $A_e = G(\text{isotropic}) * 7162/[f(\text{MHz})]^2$. ومن خلال مساواة مساحة فعالة تقوم على أساس G (K/Jy) مع مساحة فعالة تقوم على أساس كسب خطي نسبة إلى هوائي متناح نجد:

$$G(\text{isotropic}) \frac{7162}{f_{\text{MHz}}^2} = 2760 G(\text{K/Jy})$$

$$G(\text{isotropic}) = 0,4 f_{\text{MHz}}^2 G(\text{K/Jy})$$

وفي وحدات لوغاريتمية:

$$G(\text{dBi}) = -4 + 20\log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 10\log_{10}[G(\text{K/Jy})]$$

وبالعكس:

$$G(\text{K/Jy}) = 2,5 f_{\text{MHz}}^{-2} 10^{G(\text{dBi})/10}$$

يقدم الجدول التالي بعض الأمثلة عن كسب الهوائي، محسوباً بكلتا الوحدتين:

الهوائي	التردد (MHz)	G (K/Jy)	الكسب (dBi)	A_e (m ²)
محطة قاعدية خلوية	1 800	$5 \cdot 10^{-2,5}$	15	0,07
مرصد Medicina، إيطاليا	1 400	0,12	50	331
مرصد Arecibo، بورتوريكو	1 400	11	69	30,360

التذييل 4

الاستعمالات العملية لمقياس dB

الديسيبل (dB) هو وحدة لوغاريتمية تشير إلى نسبة كمية مادية (قدرة أو شدة عادةً) إلى سوية مرجعية محددة أو ضمنية. والنسبة بوحدة دييسيبل هي عشرة أضعاف اللوغاريتم لقاعدة 10 لنسبة كميتين من كميات القدرة (تعريف IEEE). والديسيبل هو عُشر وحدة bel، وهي وحدة نادراً ما تستخدم، وقد سميت تكريماً لألكسندر غراهام بيل.

وتستخدم وحدة دييسيبل لمجموعة واسعة متنوعة من القياسات في العلوم والهندسة، وأبرزها في الصوتيات والإلكترونيات ونظرية التحكم. وفي مجال الإلكترونيات، غالباً ما يعبر عن كسب المضخمات وتوهين الإشارات ونسب الإشارة إلى الضوضاء بوحدة دييسيبل. وينطوي الديسيبل على عدد من المزايا، مثل القدرة على تمثيل ميسور لأعداد كبيرة جداً أو صغيرة جداً، وإمكانية إجراء عمليات ضرب للنسب بمجرد الإضافة والطرح.

(يستند ما تقدم إلى مقال مستفيض في ويكيبيديا يمكن الرجوع إليه، لاستخدام وحدتي dBm و dBW مثلاً، وهما نسبتان بوحدي ميليوات وواط).

استخدام وحدة dB من أجل دقة بنسبة 1%

أغلبنا على علم بمقياس الديسيبل اللوغاريتمي:

عامل	dB
1 000/1	30-
100/1	20-
10/1	10-
1	0
10	10
100	20
1 000	30
وهكذا.	

ولكن قلة منا تعلم أن 11 dB هي $\pi 4$ و 14 dB هو عامل 25، وكلاهما دقيق حتى 1%.

وثمة زوج من المصادفات الرقمية، $3 \text{ dB} \approx 2$ و $5 \text{ dB} \approx \pi$ ، يعطيان الجدول التالي، بدقة حتى 1%.

خطأ	dB	عامل
0	0	1
0,7%	1	1,25
0,9%	2	$2/\pi$
-0,2%	3	2
0,5%	4	2,5
0,7%	5	π
-0,5%	6	4
0,2%	7	5
0,4%	8	π^2
-0,7%	9	8
0	10	10
0,2%	11	4π
0,95%	12	16
-0,2%	13	20
0,5%	14	25
		وهكذا.

وهذا الجدول الذي يسهل استظهاره يسمح بإجراء حسابات سريعة، صالحة حتى 1%.

مقاييس لوغاريتمية أخرى

يستخدمُ النيبر (neper)، وهو وحدة نسبة لوغاريتمية بديلة، اللوغاريتم الطبيعي (الأساس e).

وليس الديسيبل والنبيير من أوائل المقاييس اللوغاريتمية. فقد استخدم علماء الفلك "مقادير" منذ أقدم العصور لتحديد أصغر فرق في سطوع النجوم يمكن تمييزه بسهولة بالعين المجردة. وقد تم تعريف هذا في العصر الحديث بحيث يقابل فارق +5 مقادير انخفاضاً في السطوع بمعامل 100. وبالتالي، +1 مقدار هو بالضبط -4 dB.

التذييل 5

قائمة المختصرات

من تماثلي إلى رقمي (Analogue-to-Digital)	A/D
نظام معالجة الصور الفلكية (Astronomical Image Processing System)	AIPS
الصفيف المليميترى/دون المليميترى الكبير في أتاكاما (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)	ALMA
إلغاء الضوضاء التكيفي (Adaptive Noise Cancellation)	ANC
تليسكوب القطب الجنوبي دون المليميترى والمرصد النائي (Antarctic Sub-millimetre Telescope and Remote Observatory)	ASTRO
صفيف تليسكوبات ألين (Allen Telescope Array)	ATA
رابطة بيركلي-إيلينوي-ماريلاند (Berkeley-Illinois-Maryland Association)	BIMA
وكالة الشبكات الفيدرالية (ألمانيا) (Bundesnetzagentur)	BNetzA
النطاق العريض عبر شبكة الكهرباء (Broadband over Powerlines)	BPL
إبراق بزحزحة الطور ثنائي الحالة (Binary Phase-Shift Keying)	BPSK
مكتب الاتصالات الراديوية (Radiocommunication Bureau)	BR
الخدمة الإذاعية الساتلية (Broadcasting Satellite Service)	BSS
مركز البحوث الفلكية الفيزيائية في القطب الجنوبي (Center for Astrophysical Research in Antarctica)	CARA
الصفيف المركب للبحوث في علم الفلك بالموجات المليميترية (Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy)	CARMA
اللجنة الاستشارية الدولية للراديو (the International Consultative Committee on Radio)	CCIR
لجنة تنسيق المفردات (the Coordinating Committee for Vocabulary)	CCV
اللجنة الدولية الخاصة بالتداخل الراديوي (the International Special Committee on Radio Interference)	CISPR
خلفية الموجات الصغرية الكونية (the Cosmic Microwave Background)	CMB
قذف الكتلة الإكليلية (Coronal Mass Ejection)	CME
لجنة الترددات الراديوية في الأكاديمية الوطنية للعلوم (the Committee on Radio Frequencies of the National Academy of Sciences)	CORF
لجنة الأبحاث الفضائية (the Committee on Space Research)	COSPAR
الاجتماع التحضيري للمؤتمر (Conference Preparatory Meeting)	CPM
اللجنة المعنية بترددات الفلك الراديوي (the Committee on Radio Astronomy Frequencies)	CRAF
الإطار المرجعي السماوي (the Celestial Reference Frame)	CRF

التصوير الطبقي المحوسب (Computed Tomography)	CT
موجة مستمرة (Continuous Wave)	CW
ديسيبل (Decibel)	dB
الحمض النووي الصبغي (Deoxyribonucleic Acid)	DNA
الإذاعة الفيديوية الرقمية - للأرض (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)	DVB-T
خدمة استكشاف الأرض الساتلية (Earth Exploration-Satellite Service)	EESS
القدرة المشعة الفعالة المتناحية أو القدرة المشعة المكافئة المتناحية (Effective Isotropic Radiated Power or Equivalent Isotropic Radiated Power)	e.i.r.p.
التوافق الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Compatibility)	EMC
معلمة توجه الأرض (Earth Orientation Parameter)	EOP
كثافة تدفق القدرة المكافئة (Equivalent Power Flux Density)	epfd
وكالة الفضاء الأوروبية (European Space Agency)	ESA
الاتحاد الأوروبي (European Union)	EU
ترانزستور بتأثير المجال (Field Effect Transistor)	FET
تحويل فورييه السريع (Fast Fourier Transform)	FFT
صفييف المستوي البؤري (Focal plane array)	FPA
الخدمة الثابتة الساتلية (Fixed Satellite Service)	FSS
تحويل فورييه قبل المضاعفة (Fourier Transform before multiplication)	FX
ترانزستورات زرنيخات الغاليوم بتأثير المجال (Gallium Arsenide Field Effect Transistors)	GaAs FET
تليسكوب غرين بانك (Green Bank Telescope)	GBT
جيجاهرتز (= 1 000 000 000 Hertz)	GHz
تليسكوب راديوي عملاق بالموجات المترية (Giant Metrewave Radio Telescope)	GMRT
إبراق بأدنى زحزحة بمرشاح غوسي (Gaussian-filtered Minimum Shift Keying)	GMSK
النظام العالمي للملاحة الساتلية (Global Navigation Satellite System)	GNSS
النظام العالمي لتحديد المواقع (Global Positioning System)	GPS
النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (Global System for Mobile Communications)	GSM
مدار مستقر بالنسبة إلى الأرض (Geo-Stationary Orbit)	GSO
هيدروجين حيادي (Neutral Hydrogen)	HI
هيدروجين مؤين (Ionised Hydrogen)	HII
ترانزستور تنقلية إلكترونية عالية (High Electron Mobility Transistor)	HEMT
تردد عال (High Frequency)	HF
الاتحاد الفلكي الدولي (the International Astronomical Union)	IAU

المجلس الدولي للاتحادات العلمية (the International Council of Scientific Unions)	ICSU
معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين (the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.)	IEEE
التردد المتوسط (Intermediate Frequency)	IF
نسبة التداخل إلى الضوضاء (Interference to Noise Ratio)	INR
معهد الفضاء والعلوم الفلكية (the Institute of Space and Astronautical Science)	ISAS
[الأغراض] الصناعية والعلمية والطبية (Industrial, Scientific and Medical)	ISM
الاتحاد الدولي للاتصالات (International Telecommunication Union)	ITU
قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد (the Radiocommunication Sector of the ITU)	ITU-R
قطاع تقييس الاتصالات في الاتحاد (the Telecommunication Standardization Sector of the ITU)	ITU-T
اللجنة المشتركة بين الاتحادات والمعنية بتخصيص الترددات لعلم الفلك الراديوي وعلوم الفضاء (the Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science)	IUCAF
الخدمة الدولية لقياس التداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) للجيوديسياء والفلك (International VLBI Service for Geodesy and Astronomy)	IVS
الوكالة اليابانية لاستكشاف الفضاء (Japan Aerospace Exploration Agency)	JAXA
مختبر الدفع النفاث (Jet Propulsion Laboratory)	JPL
جانسكي (Jansky (= $1 \times 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz} = -260 \text{ dB(W/m}^2/\text{Hz)})$)	Jy
كيلوهرتز (KiloHertz (= 1 000 Hertz))	kHz
شبكة منطقة محلية (Local Area Network)	LAN
مدار أرضي منخفض (Low Earth Orbit)	LEO
صفييف منخفض التردد (Low Frequency Array)	LOFAR
خط البصر (Line of Sight)	LoS
تطور في المدى البعيد (Long Term Evolution)	LTE
ميغا هرتز (MegaHertz (= 1 000 000 Hertz))	MHz
معهد ماكس بلانك لعلوم الفلك الراديوي (Max Planck Institut für Radioastronomie)	MPIfR
الخدمة المتنقلة الساتلية (Mobile Satellite Service)	MSS
صفييف ميركسون عريض المجال (Murchison Widefield Array)	MWA
الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (National Aeronautics and Space Administration)	NASA
شبكة تقصي التغير في تكوين الغلاف الجوي (Network for Detection of Atmospheric Composition Change)	NDACC
جرم سماوي قريب من الأرض (Near Earth Asteroid)	NEA

جسم قريب من الأرض (Near Earth Object)	NEO
بالقرب من الأشعة تحت الحمراء (Near Infrared)	NIR
المركز الفلكي الراديوي الوطني (National Radio Astronomy Observatory)	NRAO
المجلس الوطني للبحوث (National Research Council)	NRC
مؤسسة العلوم الوطنية (الولايات المتحدة) (National Science Foundation (USA))	NSF
خارج النطاق (Out-of-Band)	OoB
المركز الراديوي في وادي أوينز (Owens Valley Radio Observatory)	OVRO
بارثانية (parsec(=3.09x10 ¹⁶ m = 3.26 light year))	pc
التصوير الطبقي بالبث لشركة بوزيترون (Positron Emission Tomography)	PET
كثافة تدفق القدرة (Power Flux Density)	pdf
الاتصالات عبر شبكة الكهرباء (Power Line Communications)	PLC
الاتصالات عبر شبكة الكهرباء (Power Line Telecommunications)	PLT
الإبراق بزحزة الطور (Phase-Shift Keying)	PSK
جمعية الاتصالات الراديوية (Radiocommunication Assembly)	RA
اللجنة المعنية بترددات علم الفلك الراديوي في منطقة آسيا والمحيط الهادئ (the Radio Astronomy Frequency Committee in the Asia-Pacific Region)	RAFCAP
الفريق الاستشاري للاتصالات الراديوية (the Radiocommunication Advisory Group)	RAG
خدمة الفلك الراديوي (Radio Astronomy Service)	RAS
التردد الراديوي (Radio Frequency)	RF
التداخل في الترددات الراديوية (Radio Frequency Interference)	RFI
خدمة التحديد الراديوي للمواقع (Radiolocation service)	RLS
جذر متوسط التربيع (Root Mean Square)	rms
خدمة الملاحة الراديوية الساتلية (Radionavigation Satellite Service)	RNSS
منطقة صمت راديوي (Radio Quiet Zone)	RQZ
لوائح الراديو (Radio Regulations)	RR
لجنة لوائح الراديو (the Radio Regulations Board)	RRB
اللجنة الخاصة المعنية بدراسة المسائل التنظيمية والإجرائية (the Special Committee for Regulatory and Procedural Matters)	SCRPM
البحث عن المعلومات من خارج الأرض (the Search for ExtraTerrestrial Intelligence)	SETI
الفريق المعني بتنسيق الترددات الفضائية (Space Frequency Coordination Group)	SFCG
لجنة دراسات (Study Group)	SG
موصل فائق-عازل-موصل فائق (Superconductor Insulator Superconductor)	SIS

صيف كيلومتر مربع (<i>Square Kilometer Array</i>)	SKA
صيف دون ملليمتر (<i>the Submillimeter Array</i>)	SMA
نسبة الإشارة إلى الضوضاء (<i>Signal to Noise Ratio (=S/N)</i>)	SNR
بقايا تفجر جرم سماوي (<i>Supernova Remnant</i>)	SNR
خدمة العمليات الفضائية (<i>Space Operation Service</i>)	SOS
كثافة تدفق القدرة الطيفية (<i>Spectral Power Flux Density</i>)	spfd
معهد ستانفورد للبحوث (<i>Stanford Research Institute</i>)	SRI
خدمة البحوث الفضائية (<i>Space Research Service</i>)	SRS
تيراهرتز (<i>TeraHertz (= 1 000 000 000 000 Hertz)</i>)	THz
الإطار المرجعي الأرضي (<i>the Terrestrial Reference Frame</i>)	TRF
تردد موجات ديسيمترية (<i>Ultra High Frequency</i>)	UHF
جامعة المتروبول (<i>Universidad Metropolitana</i>)	UMET
الاتحاد الدولي للعلوم الراديوية (<i>the International Union of Radio Science</i>)	URSI
رابطة جامعات بحوث الفضاء (<i>Universities Space Research Association</i>)	USRA
نطاق عريض جداً (<i>Ultra-Wide Band</i>)	UWB
تردد موجات مترية (<i>Very High Frequency</i>)	VHF
صيف واسع جداً (<i>Very Large Array</i>)	VLA
صيف خط أساس طويل جداً (<i>Very Long Baseline Array</i>)	VLBA
قياس تداخل ذي خط أساس طويل جداً (<i>Very Long Baseline Interferometry</i>)	VLBI
برنامج مرصد الفضاء بقياس تداخل ذي خط أساس طويل جداً (<i>VLBI Space Observatory Programme</i>)	VSOP
المؤتمر الإداري العالمي للراديو (<i>World Administrative Radio Conference</i>)	WARC
دقة لاسلكية عالية (<i>Wireless Fidelity</i>)	WiFi
مسبار ويلكنسون لتباين المناحي بالموجات الصغيرة (<i>Wilkinson Microwave Anisotropy Probe</i>)	WMAP
فريق عمل (<i>Working Party</i>)	WP
المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية (<i>World Radiocommunications Conference</i>)	WRC
التليسكوب الراديوي الصناعي في ويستربورك (<i>the Westerbork Synthesis Radio Telescope</i>)	WSRT

ISBN 978-92-61-14486-9

SAP id



طبع في سويسرا
جنيف، 2015

إصدار الصور: ATCA David Smyth

الاتحاد الدولي للاتصالات
شعبة المبيعات والتسويق

Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Fax: +41 22 730 5194

Tel.: +41 22 730 6141

E-mail: sales@itu.int

Web: www.itu.int/publications