كتيّب بشأن
اتصالات الأبحاث الفضائية

طبعة 2014
مكتب الاتصالات الراديوية

كتيب بشأن
اتصالات الأبحاث الفضائية

طبعة عام 2014

مكتب الاتصالات الراديوية

تمهيد

قام بإعداد الكتيّب بشأن اتصالات الأبحاث الفضائية خبراء من فرقة العمل 7B التابعة للجنة الدراسات 7 (خدمات العلوم) بقطاع الاتصالات الراديوية. وكانت الطبعة الأصلية قد أُعدّت برئاسة السيدة ش. تايلور (الولايات المتحدة الأمريكية)، رئيسة فرقة العمل 7B. وتضمّ هذه الطبعة الأخيرة، التي أُعدّت برئاسة السيد ب. كوفمان (الولايات المتحدة الأمريكية)، رئيس فرقة العمل 7B، معلومات عن الاستخدامات والتطوّرات التكنولوجية التي تحققت في مجال اتصالات الأبحاث الفضائية فضلاً عن التغيرات التي طرأت على توصيات وتقارير قطاع الاتصالات الراديوية منذ أن تم نشر الكتيّب لأول مرة في عام 2002.

ولا يُقصد بهذا الكتيب أن يكون كتاباً مرجعياً بشأن الأبحاث الفضائية، لكنه معنيّ بشكل أساسي بجوانب خدمة الأبحاث الفضائية ذات الصلة بإدارة استعمال الطيف الراديوي من أجل التقليل إلى الحد الأدنى من التداخل بين خدمات الاتصالات الراديوية حين يتعلق الأمر بخدمة الأبحاث الفضائية. ففي أربعة فصول، يُطلع الكتيّب القراء على أسس خدمة الأبحاث الفضائية. ويغطي مجالات مثل وظائف نظام الأبحاث الفضائية وعمليات التنفيذ التقنية، ونطاقات التردد المفضّلة، ومسائل ترتبط بتقاسم الطيف الراديوي مع خدمات أخرى. ويورد المرفق 1 توصيات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة بالأبحاث الفضائية تمثل مراجع إضافية.

آمل أن يكون هذا الكتيّب مفيداً لمديري الطيف ومهندسي الاتصالات الراديوية.

فرانسوا رانسي

مدير مكتب الاتصالات الراديوية

تقديم

شكّل إطلاق القمر سبوتنيك الأول (Sputnik-1) في 4 أكتوبر 1957، وهو أول جسم اصطناعي يدور حول الأرض، إعلاناً ببدء عصر الفضاء. وأدّت الحاجة إلى التواصل مع المركبات الفضائية إلى نشوء خدمة راديوية تُعرف بخدمة الأبحاث الفضائية. وفي الوقت الحاضر، تُجري الوكالات والإدارات الفضائية في جميع أنحاء العالم مهمات تتعلق بالأبحاث الفضائية. وقد عُرّفت خدمة الأبحاث الفضائية في لوائح الراديو للاتحاد على أنها "خدمة اتصالات راديوية تستخدم فيها مركبات فضائية أو أجسام فضائية أخرى لغايات البحث العلمي أو التكنولوجي".

وأُنشئت لجنة الدراسات 7 (خدمات العلوم) التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية من خلال عملية إعادة تنظيم جرت في عام 1990 أثناء انعقاد الجمعية العامة للجنة الاستشارية الدولية للراديو (CCIR) في دوسلدورف. ويرتبط الكثير من الأنشطة في لجنة الدراسات 7 بتطوير استخدام الطيف الراديوي لتحقيق أهداف علمية.

وتتألف لجنة الدراسات 7 حالياً من عدد من فرق العمل التي تعالج المسائل التقنية المتصلة باختصاصات محددة ترد تحت مظلة خدمات العلوم. وتمثل الأبحاث الفضائية وتطبيقاتها اختصاص فرقة العمل 7B وتتضمن دراسات تتناول وصلات الاتصالات اللازمة لدعم عمليات المهمات الفضائية حتى أقصى حدود النظام الشمسي وأبعد من ذلك.

وخلال العقود الأربعة الأخيرة، تم تحقيق تطورات هائلة في العديد من الاختصاصات العلمية والتقنية التي عادت بالفائدة على البشرية وعمقت معرفتنا بالفضاء الذي نعيش فيه وفهمنا له. ومن بين الإنجازات المحقّقة استكشاف الكواكب بالمركبات الفضائية الآلية (الروبوتية) وحتى فيما بعد حدود نظامنا الشمسي، وعمليات الاستكشاف المأهولة للقمر، وإنشاء وتشغيل محطة MIR الفضائية، وتأمين الاتصالات الفضائية المعززة بواسطة سواتل ترحيل البيانات. وتشمل المشاريع الحالية إقامة محطة فضائية دولية والتخطيط لاستكشاف مأهول لكوكب المرّيخ.

وأفضت التحسينات والإنجازات المتواصلة في مجال الأبحاث الفضائية إلى نشوء أنشطة ومتطلبات جديدة وموسّعة، وإلى الحاجة إلى زيادة سعة اتصالات الأبحاث الفضائية وموثوقيتها. وأضحت البيئات المدارية والطيفية التي توفر الأساس لجميع الاتصالات الفضائية مكتظة بشكل متزايد بالخدمات والأنظمة الجديدة. ويعتبر الفهم الأساسي لأنظمة الفضاء الراديوية واحتياجاتها ضرورياً للتمكين من تقاسم تلك الموارد المحدودة وتلبية متطلبات الزمن الحالي والسنوات المقبلة أيضاً.

وفيما كان وضع التوصيات وسيبقى مجال التركيز الرئيسي لأنشطة لجنة الدراسات، فقد أصبح واضحاً أن الخبراء الذين يعملون على هذه المسائل في لجنة الدراسات لديهم الكثير من المعلومات الأساسية لتقديمها إلى زملائهم ومعاونيهم العلميين الذين يعتمدون على بيانات الأبحاث الفضائية لإيجاد حل للمسائل العلمية الأساسية وتطوير المعرفة البشرية بأكملها ببيئة الفضاء وأصل الكون. وبالتالي تقرّر إعداد هذا الكتيّب ونشره لكي يتسنى لجميع مستعملي هذه المعايير التوصّل إلى فهم أنظمة اتصالات الأبحاث الفضائية فهماً كاملاً من أجل تحسين تصميم تلك الأدوات القوية وتطبيقها.

وقد أُعد هذا الكتيّب لتزويد القارئ بفهم عام لخدمة الأبحاث الفضائية. ويوفر الكتيّب بعض المعلومات الأساسية التي تتعلق بالمتطلبات التقنية والطيفية اللازمة لدعم الكثير من برامج الأبحاث الفضائية ومهماتها وأنشطتها المختلفة. وقد وُضع الكتيب أساساً للمدراء الحكوميين وأعضاء لجان الدراسات بقطاع الاتصالات الراديوية وموظفي الوكالات المعنية بمسائل إدارة الطيف. كما يسهم هذا الكتيب في تنوير أفراد الجمهور الثانوي وتحديداً طلاب الجامعات والمجموعات الأخرى من الأشخاص المهتمين باكتساب فهم لبعض جوانب الاتصالات في خدمة الأبحاث الفضائية.

وإني كرئيس للجنة الدراسات 7، يشرفني ويسعدني أن أقدم هذا الكتيّب إلى مجتمع مستعملي معايير الأبحاث الفضائية، وإنني على يقين من أنهم سيجدونه أداة مرجعية لا تقدر بثمن في أعمالهم.

وما كان لهذا الكتيّب أن يكتمل بدون المساهمات المقدمة من إدارات كثيرة تشارك في لجنة الدراسات 7. ومع ذلك فإن عمل المقررين بشأن مختلف أجزاء الكتيّب تعتبر بارزة، ولا بد من التوجّه بالشكر الخاص إلى السيدة ش. تايلور (رئيسة فرقة العمل 7B، الولايات المتحدة الأمريكية)، والسيد ف. مينز (نائب رئيس لجنة الدراسات 7، فرنسا) والسيد ر. جاكوبسن (نائب رئيس لجنة الدراسات 7، أستراليا) والسيدة س. كيمورا (اليابان)، والسادة ر. أندروز، و د. باثكير، و ب. يونس (الولايات المتحدة الأمريكية). وأود أن أعرب أيضاً عن الامتنان الخاص إلى السيد أ. نالباندیان من مكتب الاتصالات الراديوية الذي قام بدور محوري في وضع هذا الكتيّب.

ر.م. تايلر

رئيسة لجنة الدراسات 7

تقديم الطبعة الثانية

لقد طرأت تغييرات كثيرة على اتصالات الأبحاث الفضائية منذ أن نُشر الكتيّب بشأن اتصالات الأبحاث الفضائية للمرة الأولى. وأثناء هذه الفترة، أصبحت محطة الفضاء الدولية تامة التشغيل وأضحى لدى عدد أكبر من الإدارات برامج فضائية ناشطة. وثمة مشاركة متنامية لعدد كبير من وكالات الفضاء في الاستكشاف الآلي للقمر والمرّيخ بهدف التمكن في نهاية المطاف من إرسال البشر إلى المرّيخ لأغراض الاستكشاف والاكتشاف.

وأصبح الوصول إلى الفضاء من أجل البحث العلمي أكثر سهولة من خلال تكنولوجيات جديدة من قبيل السواتل الصغيرة والمتناهية الصغر التي نظراً لانخفاض تكاليفها وضآلة أحجامها أدت إلى الحد بشكل كبير من الحواجز التي تقف في وجه تطوير السواتل وإطلاقها.

وتمشياً مع الزيادات الحاصلة في أنشطة الأبحاث الفضائية، برزت الحاجة إلى معدلات أعلى للبيانات لاستيعاب مهمات أكثر تعقيداً. وقد ارتقى تزايد هذا النشاط والتوسع في بيانات المهمات بتقاسم الطيف إلى جانب هام من جوانب اتصالات الأبحاث الفضائية. فقد تحسن تقاسم الطيف من خلال عدد من التقنيات من قبيل استخدام أساليب تشكيل أعلى رتبة تحسّن من كفاءة عرض النطاق واستعمال ترددات أعلى، مما يحسن الاتجاهية.

وهناك تطور بارز آخر في اتصالات الأبحاث الفضائية يتمثل في تزايد الاهتمام بالطيف واستخدامه ضمن النطاق البصري.

ولا تزال هذه الطبعة المحدّثة للكتيّب توفر معلومات أساسية تتعلق بالاحتياجات التقنية والطيفية اللازمة لدعم الكثير من برامج ومهمات وأنشطة الأبحاث الفضائية المختلفة. ومن المتوخى أن يسهم هذا الكتيّب في فهم بعض جوانب الاتصالات المتعلقة بخدمة الأبحاث الفضائية.

ولقد أمكن إنجاز مراجعة هذا الكتيّب بفضل المساهمات التي قدمتها إدارات كثيرة تشارك في لجنة الدراسات 7. ومع ذلك ثمة أشخاص يستحقون الإشادة لما قدموه من مساهمات بارزة وهم: السيد ب. كوفمان (رئيس فرقة العمل 7B، الولايات المتحدة الأمريكية)، والسيد ي. فاسيلو (وكالة الفضاء الأوروبية) والسيد ف. س. غالبريث (الولايات المتحدة الأمريكية)، والسيدة ب. دوميت (الولايات المتحدة الأمريكية)، والسادة ت. بيرمان، وج. فيلدهيك وس. كايالار وس. أسمر وف. مانشدي وت. فونديك (الولايات المتحدة الأمريكية). ولا بد من أن نخصّ بالشكر السيد ف. نوزدرين من مكتب الاتصالات الراديوية لما قام به من دور حاسم الأهمية في زيادة تطوير هذا الكتيب.

ف. مينز

رئيس لجنة الدراسات 7

جدول المحتويات

الصفحة

الفصل 1 – مقدمة لخدمة الأبحاث الفضائية 1

1.1 الأبحاث الفضائية – لمحة عامة 1

2.1 خصائص مهمات الأبحاث الفضائية 2

1.2.1 مدة مهمات الأبحاث العلمية 2

2.2.1 مدارات مهمات الأبحاث الفضائية 3

3.2.1 أنواع مهمات الأبحاث الفضائية 4

3.1 أنظمة الأبحاث الفضائية 5

1.3.1 القطاع الأرضي 5

2.3.1 القطاع الفضائي 7

الفصل 2 – وظائف الاتصال والتتبع في الأبحاث الفضائية وعمليات التنفيذ التقنية 11

1.2 الوظائف 11

1.1.2 إرسال الأوامر 11

2.1.2 إرسالات بيانات القياس عن بُعد الخاصة بالمركبة الفضائية 11

3.1.2 إرسالات بيانات القياس عن بُعد الخاصة بالمهمة 11

4.1.2 التتبع 11

5.1.2 علم الراديو 12

2.2 عمليات التنفيذ 12

1.2.2 متطلبات الموثوقية ومعدلات الخطأ في البتات وهوامش الوصلات 12

2.2.2 المتطلبات المتعلقة بمعدل البيانات وعرض النطاق 13

3.2.2 معدلات التحول (الذهاب والإياب) 13

4.2.2 تعدد الإرسال 14

5.2.2 تصحيح الأخطاء وتشفير الضوضاء شبه العشوائية 15

6.2.2 تقنيات التشكيل 16

7.2.2 الحيازة 16

8.2.2 تقنيات التتبع 16

الصفحة

الفصل 3 – الاعتبارات المتعلقة بنطاقات التردد الخاصة بمهمات الأبحاث الفضائية..... 19
1.3 الاعتبارات المتعلقة بالمهمات..... 19
2.3 الاعتبارات المتعلقة بالأجهزة 19
3.3 تأثيرات الانتشار والإشعاع..... 20
4.3 الاعتبارات المتعلقة بأداء الوصلات..... 21
5.3 توزيعات التردد في خدمة الأبحاث الفضائية 22
الفصل 4 – معايير الحماية لخدمة الأبحاث الفضائية والاعتبارات المتعلقة بتقاسم الترددات 23
1.4 الاعتبارات المتعلقة بتداخل خدمة الأبحاث الفضائية 23
2.4 معايير الحماية لخدمة الأبحاث الفضائية 24
3.4 الاعتبارات المتعلقة بالتقاسم في خدمة الأبحاث الفضائية 24
1.3.4 التداخل الناجم عن المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية..... 25
2.3.4 التداخل الذي تتعرض له المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية 26
3.3.4 التداخل الناجم عن المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية 26
4.3.4 التداخل الذي تتعرض له المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية 27
5.3.4 حدود البث غير المطلوب للاتحاد الدولي للاتصالات..... 27
المرفق 1 – توصيات وتقارير قطاع الاتصالات الراديوية المتصلة بخدمة الأبحاث الفضائية 29
المرفق 2 – جدول استعمالات خدمة الأبحاث الفضائية والحدود المقابلة لكثافة تدفق القدرة..... 33

الفصل 1

مقدمة لخدمة الأبحاث الفضائية

يتيح الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU) تحسين أنظمة الاتصالات واستخدامها الرشيد في جميع أنحاء العالم. ويسعى قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد (ITU-R) إلى تأمين الاستخدام الرشيد والمنصف والكفوء والاقتصادي للموارد الطبيعية المحدودة لطيف الترددات الراديوية والمدارات الساتلية، ويدرج إدارة خدمة الأبحاث الفضائية (SRS) باعتبارها واحدة من خدمات العلوم. وتستفيد خدمة الأبحاث الفضائية من توزيعات ترددات محددة كما هي واردة في لوائح الراديو للاتحاد (انظر المرفق 2). وتم صقل استخدام توزيعات التردد الخاصة بخدمة الأبحاث الفضائية بصورة أكبر في السلسلة SA من توصيات قطاع الاتصالات الراديوية (التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية) (انظر المرفق 1)، استناداً إلى الخصائص التقنية والإجراءات التشغيلية.

1.1 الأبحاث الفضائية – لمحة عامة

تتيح أنظمة خدمة الأبحاث الفضائية مجموعة متنوعة من الاختصاصات العلمية وبرامج التكنولوجيا التي تعود بالنفع على البشرية. وتوفر الاختصاصات العلمية معلومات تتعلق بالنظام الشمسي، وطبيعة الكون وتنظيمه، وأصل المادة ومصيرها، وتتضمن ما يلي:

- الفيزياء الشمسية–الأرضية؛
- فيزياء الفضاء؛
- البحوث المتعلقة بأنظمة الكواكب.

وتركز برامج التفاعل بين الأنظمة الشمسية والأرضية على دراسات تتعلق بالشمس والأنشطة الشمسية وتأثيرها على الأرض. وتُجرى الدراسات باستخدام شبكة من المركبات الفضائية العلمية الواقعة في مناطق كثيرة من الفضاء ما بين الكواكب، عادة بين الشمس والأرض، والمجهزة بصفيف من الأجهزة العلمية اللازمة لاستشعار الإشعاع الكهرمغنطيسي الشمسي وجزيئات البلازما والموجات وكشفها.

وتُكرّس بحوث الفيزياء الفضائية لدراسة القوانين الأساسية للفيزياء في نظامنا الشمسي وتزودنا بمعلومات تستخدم لتحسين تصميم المركبات الفضائية وأجهزة القياس الخاصة بها وقدراتها الملاحية.

وتتم دراسة الكواكب وأقمار الكواكب والكويكبات والمذنّبات لاكتساب معرفة بأصل نظامنا الشمسي وتطوره. وتزودنا المركبات الفضائية والمسابير ومركبات الهبوط على الكواكب بمعلومات واسعة عن الكواكب وأقمارها في نظامنا الشمسي.

وتركز برامج تكنولوجيا الأبحاث الفضائية على تطوير التكنولوجيات المتقدمة اللازمة لما يلي والتحقق منها في الفضاء:

- تصنيع وتجميع الهياكل الفضائية؛
- إنشاء الأنظمة الكهربائية/الميكانيكية؛
- دراسة سلوك الموائع وظواهر النقل؛
- اعتماد الروبوتيات لتجميع الهياكل وخدمة السواتل في المدار؛
- تقنيات المعالجة والتصنيع في الفضاء.

وبوجه خاص، فإن دراسة بيئة انعدام الجاذبية في الفضاء لأغراض علمية وتجارية تعمل على تطوير وتعزيز قدرة الإنسان على العيش في الفضاء والعمل فيه لفترات زمنية طويلة، وتعزز فهمنا لعلم المواد وعلوم الطب البيولوجي.

وتشمل الأنواع المختلفة من أنظمة الأبحاث الفضائية المستخدمة في دعم البحوث العلمية والتكنولوجية في كل من المناطق القريبة من الأرض ومناطق الفضاء السحيق مهمات مأهولة (مثل عمليات الاستكشاف البشرية، ونقل أفراد الطواقم والموظفين إلى المراكز العلمية، وإجراء التجارب والبحوث انطلاقاً من مواقع في الفضاء) ومهمات غير مأهولة (مثل استخدام المركبات الفضائية الروبوتية لجمع العيّنات المادية، وإمداد المركبات الفضائية البحثية أو خدمتها، واستخدام المركبات الفضائية لجمع بيانات الاستشعار والرصد)، وشبكات الاتصالات على سطح الأرض، وشبكات الاتصالات في المدار المتزامن مع الأرض أو ما بعده. ويُشار إلى المهمات البحثية الفضائية الموجّهة نحو أهداف تبعد أكثر من 2×10^6 km عن الأرض بأنها مهمات 'الفضاء السحيق'. في المقابل، يشار عادة إلى المهمات التي تبعد عن الأرض أقل من 2×10^6 km بأنها مهمات قريبة من الأرض. وبسبب متطلباتها الفريدة، وضعت أحكام طيفية خاصة لأنظمة الفضاء السحيق للسماح لها بالتواصل بنجاح عبر المسافات البعيدة المطلوبة. ولأسباب تتعلق بالكتلة والحجم والتكاليف، يُستخدم الطيف نفسه والمعدات ذاتها في جميع مراحل مهمات الفضاء السحيق.

وتتضمن مراحل مهمات الأبحاث الفضائية عمليات التدقيق قبل الإطلاق، وعمليات الإطلاق، وعمليات النقل، والعمليات في المدار، وكما هو الحال في المهمات المأهولة والمهمات الآلية (الروبوتية)، عمليات العودة إلى الأرض والهبوط. ويتطلب نجاح كل مرحلة أنظمة اتصالات وتتبّع متخصصة. وتَستخدم عمليات الإطلاق أنظمة دقيقة لتحديد المدى والتحكم والتدمير أثناء المرحلة الحساسة للإطلاق ومن أجل عمليات الطوارئ. وتحتاج عمليات النقل إلى بيانات التحكم والقياس عن بُعد والتتبع لضمان وصول المركبة الفضائية إلى مدارها الصحيح. وغالباً ما تتطلب العمليات في المدار الاتصال من الفضاء إلى الفضاء بين المركبات الفضائية المتعاونة فضلاً عن الاتصال مع الأرض، إما بشكل مباشر أو عن طريق سواتل اتصالات متزامنة مع الأرض يشار إليها بسواتل ترحيل البيانات. وبالنسبة للمهمات المأهولة، تتضمن وظائف الاتصالات البيانات الصوتية والفيديوية فضلاً عن بيانات التحكم والقياس عن بُعد والتتبع. أما بالنسبة للمهمات الآلية (الروبوتية)، فقد تكون البيانات الفيديوية ضرورية بالإضافة إلى بيانات التحكم والقياس عن بُعد والتتبّع. وفي حالة المهمات الخاصة بالكواكب، قد تكون الاتصالات بين المركبة الفضائية في المدار والمركبات على السطح ضرورية بالإضافة إلى الاتصالات بين المركبة الفضائية الخاصة بالكوكب وبين الأرض.

2.1 خصائص مهمات الأبحاث الفضائية

1.2.1 مدة مهمات الأبحاث العلمية

تشمل مدة مهمة الأبحاث الفضائية مدة الرحلة (الوقت الممتد من عملية الإطلاق وحتى الوصول إلى الوجهة النهائية) والمدة الفعلية للمهمة (الوقت اللازم لإجراء التجارب وحيازة البيانات وإنجاز أهداف المهمة). وفيما يتعلق بمهمات جلب العينات والرحلات المأهولة، تشمل مدة المهمة أيضاً مدة رحلة العودة إلى الأرض. وفي كثير من الحالات، تظل المركبة الفضائية فعّالة حتى مدة تتجاوز عمرها التصميمي وتستمر في تزويد أوساط الأبحاث الفضائية بالمعلومات القيّمة.

وبالنسبة لمعظم الرحلات في الفضاء القريب من الأرض، تشكل مدة الرحلة عموماً جزءاً صغيراً من المدة الإجمالية للرحلة. وقد تتراوح المدة الفعلية للمهمات الآلية (الروبوتية) القريبة من الأرض من بضعة أشهر إلى عدة سنوات. وتعتبر سواتل ترحيل البيانات والمحطات الفضائية بمثابة الاستثناء، حيث تتطلب عمراً تشغيلياً يتراوح بين 10 سنوات و15 سنة. أما بالنسبة للمهمات المأهولة في المناطق المدارية والقمرية، فقد تتراوح المدة الفعلية للرحلة بين بضعة أيام وعدة أشهر.

وقد تشكل مدة الرحلة في الفضاء السحيق جزءاً كبيراً من المدة الإجمالية للمهمة. فالبعثة إلى كوكب زحل على سبيل المثال، الذي يبعد حوالي $1{,}58 \times 10^9$ km، قد تستغرق 6-7 سنوات. وأثناء الرحلة يتم استجواب المركبة الفضائية بشكل منتظم بشأن وضعها ووضع حمولتها النافعة. وتستغرق مهمات الفضاء السحيق العادية وقتاً فعلياً يبلغ عموماً بضع سنوات. أما فترات الرحلات الروبوتية والمأهولة إلى الكويكبات أو المريخ أو الأجرام السماوية الأخرى فتقاس بالأشهر والسنوات.

2.2.1 مدارات مهمات الأبحاث الفضائية

تجري أنشطة الأبحاث الفضائية باستخدام عدة أنواع من المدارات الساتلية. ويستند نوع المدار الذي يقع عليه الاختيار وخصائصه إلى متطلبات مهمة الأبحاث الفضائية وتحقيقها للأداء الأمثل. وتُستخدم المدارات الدائرية على نطاق واسع في معظم مهمات الأبحاث الفضائية. وتتميز هذه المدارات بتطابق ارتفاع الأوج والحضيض، أي أن ارتفاع المركبة الفضائية يكون ثابتاً بالنسبة إلى سطح الأرض أو الكوكب التي تدور في فلكه. وفيما يتعلق برحلات الأبحاث الفضائية التي تدور حول الأرض، تكون المدارات عموماً مائلة على المستوى الاستوائي وتتراوح ارتفاعاتها بين 300 و1 000 km. ونظراً لقرب هذه المدارات من الأرض فقد سُميت "المدارات الأرضية المنخفضة" (LEO).

والمدارات القطبية هي مدارات دائرية يبلغ ميلها قرابة 90 درجة. وتستخدم هذه المدارات في مهمات الأبحاث الفضائية التي تتطلب تغطية كل نقطة على سطح الأرض. ويمكن تحقيق الاتصالات المباشرة بين ساتل في مدار قطبي ومحطة أرضية واقعة في المناطق القطبية على كل مدار من مدارات الساتل.

وتقتضي المدارات المتزامنة مع الشمس أن يظل مستوى مدار الساتل ثابتاً تقريباً بالنسبة إلى الشمس. ويبلغ الميل المداري عادة قرابة 98 درجة. وهذه المدارات مناسبة بوجه خاص لعمليات رصد الشمس ورصد الأرض وبعض مهمات التنبؤ بالأحوال الجوية.

وتتميز المدارات الإهليلجية بارتفاع قليل للحضيض وارتفاع كبير للأوج. وتوفر هذه المدارات، لا سيّما المدارات الشديدة الإهليلجية، منصة للاعتيان (أخذ العيّنات) عند ارتفاعات عالية ومنخفضة وتعتبر مناسبة للكثير من مهمات الرصد العلمية. وتتمثل الميزة الأساسية لهذا النوع من المدارات في ارتفاع النسبة المئوية للوقت الذي يكون فيه السائل مرئياً من المحطة الأرضية التابعة لشبكته. ومع ذلك فإن شدة الإشارة قد تتفاوت إلى حد كبير وفقاً لتغير المدى بين الساتل والمحطة الأرضية.

ويشكل المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GSO) حلقة مميزة حول خط استواء الأرض عند ارتفاع قدره 35 786 km. ويكون لدى السواتل في هذا المدار دورة مدارية تساوي مدة دوران الأرض. وبالتالي يتوفر للساتل في هذا المدار رؤية ثابتة لثلث الأرض تقريباً ويمكنه الحفاظ على اتصال مستمر مع محطة أرضية تقع ضمن مجال رؤية الساتل. وتستخدم خدمة الأبحاث الفضائية المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض لتحديد مواقع سواتل ترحيل البيانات (DRS) من أجل إتاحة الاتصال المستمر مع مركبة فضائية في المدار الأرضي المنخفض.

ويمكن الاطلاع على معلومات عن الموقع المداري لسواتل ترحيل البيانات في خدمة الأبحاث الفضائية في التوصيتين التاليتين الصادرتين عن قطاع الاتصالات الراديوية:

- التوصية ITU-R SA.1275 – المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات الواجب حمايتها من إرسالات أنظمة الخدمة الثابتة العاملة في النطاق 200 2-290 2 MHz
- التوصية ITU-R SA.1276 – المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات الواجب حمايتها من أنظمة الخدمة الثابتة العاملة في النطاق 27,5-25,25 GHz

أما المدارات الهلالية فهي مدارات تدور حول نقطة توازن بين جرمين سماويين. ويقع المدار في سطح متعامد مع السطح الذي يحتوي على خط البصر بين الجرمين. وتشكل نقطتا لاغرانج L1 وL2، اللتان تقع كل منهما على بعد نحو 1,5 مليون كيلومتر من أحد جانبي الأرض وعلى محور الشمس/الأرض، مثالين على نقاط التوازن التي تُستخدم حولها المدارات الهلالية لمهمات الأبحاث الفضائية.

وعموماً تكون مدارات القمر ومدارات الكواكب دائرية بطبيعتها ومعدة لتيسير إجراء التجارب وقياسات الاستشعار اللازمة لتحقيق أهداف المهمات. وقد قامت مدارات القمر بدور مدار الالتقاء للرحلات المأهولة إلى سطح القمر. كما أن مدارات الكواكب تعمل كمدارات لسواتل الترحيل حول جرم كوكبي. وتتطلب الكثير من المهمات نشر مسبار أو مركبة سطحية للهبوط على سطح الكوكب وحيازة بيانات عن البيئة والمحيط المباشر. ونظراً للقيود المفروضة على استهلاك الطاقة، فهي غير قادرة على إرسال تلك

البيانات مباشرة إلى الأرض عبر مسافات شاسعة، ولذلك تقوم تلك المركبات الفضائية المحلية بإرسالها إلى مركبة فضائية في المدار التي تنقل بدورها المعلومات إلى محطة الاستقبال على الأرض.

3.2.1 أنواع مهمات الأبحاث الفضائية

تتطلب الرحلات التي يلزم فيها نقل البضائع أو الموظفين، مثل رحلات سيوز Soyuz وبروغرس Progress الخاصة بوكالة الفضاء الاتحادية الروسية ومركبة النقل الآلي التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية ومركبة النقل H-II التابعة للوكالة اليابانية لاستكشاف الفضاء، خدمات اتصالات مع المحطات الأرضية، إما بصورة مباشرة أو عن طريق أنظمة ساتلية لترحيل البيانات، ومع مركبات تدور في مدار مشترك من أجل عمليات الالتقاء/الالتحام. وتُرسل الأوامر وبيانات القياس عن بُعد وبيانات التتبّع عبر وصلات الاتصالات. ولدى المركبات المزوّدة بطواقم متطلبات سمعية وفيديوية إضافية.

وتحتاج المهمات التي تطير على مركبات تدور بشكل دائم، من قبيل محطة الفضاء الدولية، إلى خدمات اتصالات مع المركبات التي تدور في نفس المدار ومع الأرض. وأسوةً بمركبات النقل، يكون لدى المنصات الدائمة الدوران متطلبات تتعلق بالتحكم والقياس عن بُعد والتتبع إلى جانب احتياجات إضافية من الصوت والفيديو التي يمكن تلبيتها عن طريق وصلات مباشرة مع شبكات المحطات الأرضية أو عن طريق وصلات غير مباشرة عبر الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات.

ويعتبر النشاط خارج المركبة (EVA) بمثابة رحلة خارج المحطة القاعدة، سواء في المدار (السير في الفضاء) أو على سطح كوكب. فأنظمة الاتصالات المستخدمة لنشاط خارج المركبة توفر بيانات منخفضة المعدل بين رائد الفضاء والمحطة القاعدة. والواقع الذي يُحتّم دمج أنظمة الاتصالات في البذلة الفضائية يحدّ كثيراً من الأبعاد المادية واستهلاك الطاقة لنظام اتصالات النشاط خارج المركبة. وتشمل الأنشطة النموذجية المنجزة خلال نشاط خارج المركبة بناء السواتل والمركبات الفضائية الأخرى وصيانتها وإصلاحها. وتُجرى الأنشطة خارج المركبة عموماً على بعد 100 m من المركبة الفضائية التي تدور في المدار. أما الأنشطة خارج المركبة التي يتم إجراؤها انطلاقاً من محطات القاعدة الكوكبية على سطح القمر والمرّيخ والأجرام السماوية الأخرى فتتطلب عمليات تُنفّذ على مسافات تصل إلى عشرات الكيلومترات.

وتقوم مهمات استكشاف القمر والكواكب بإجراء تحقيقات علمية وهندسية من خلال استخدام المركبات الفضائية المدارية أو المسابير أو العربات السطحية ومحطات القاعدة على سطح جرم سماوي لتكون بمثابة نقاط اتصال للاستكشافات المأهولة والروبوتية الطويلة. وتتطلب مهمات استكشاف القمر والكواكب إجراء اتصالات من الأرض وإليها، إلى جانب الاتصالات المحلية على سطح الكوكب.

وتتيح المهمات الفضائية لقياس التداخل بخط أساسي طويل جداً (VLBI) إجراء تجارب لتحقيق استبانة زاويّة لمصادر راديوية مرصودة يتعذر تحقيقها باتباع أساليب راديوية أو بصرية أخرى. ويكون اتساع وطور إشارات المصدر الراديوي المستقبلة في محطتين أو أكثر من محطات VLBI مترابطين تبادلياً من أجل استخلاص المعلومات المفصلة عن الموقع وبنية المصدر. وتستخدم المهمات الفضائية VLBI محطة فضائية واحدة على الأقل لتحقيق مستويات لخطوط الرصد الأساسية أكبر من أي خط أساس على الأرض. ويجب أن تنقل البيانات التي تجمعها محطات VLBI الفضائية من محطات الفضاء إلى المحطة الأرضية في الوقت الفعلي باستخدام معدلات بيانات تصل إلى 8 Gbit/s. ولا بد أيضاً من وجود وصلة نقل فضاء–أرض للقيام بتحويل (إزاحة) متسق لتردد معياري قائم على الأرض عن طريق وصلة راديوية أرض–فضاء لنقل الطور. وتعتبر وصلة العودة هذه ضرورية لمعايرة أخطاء الطور الحاصلة في الوصلة أرض–فضاء. وقد تكون الوصلة فضاء–أرض مكرّسة لعملية نقل الطور أو قد تستخدم بشكل متزامن لنقل البيانات من المركبة الفضائية.

وتوفر مهمات سواتل ترحيل البيانات اتصالاً مستمراً بين مركبة الفضاء التي تدور في مدار أرضي منخفض ومحطة أرضية واحدة، ويمكنها أن تدعم مركبة فضائية متعددة المستعملين بصورة متزامنة مع متطلبات منخفضة إلى عالية جداً من البيانات. ويمكن لنظام مؤلف من ثلاثة سواتل لترحيل البيانات بتباعد زاوي قدره 120 درجة أن يؤمّن نظرياً تغطية بنسبة 100 في المائة لمركبة المدار الأرضي المنخفض. ومن شأن عوامل من قبيل التكلفة واختيار المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات والموقع الجغرافي للمحطات الأرضية

التابعة لسواتل ترحيل البيانات أن تجعل تنفيذ مثل هذه الكوكبة النموذجية الساتلية لترحيل البيانات أمرا صعباً. وبوجه عام، تنشر على الأرجح كوكبة مكونة من ساتلين لترحيل البيانات ويُتوقع حدوث بعض الخسارة في تغطية المركبة الفضائية. فحين تدخل المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض منطقة ظل الأرض التي يشار إليها باسم "منطقة الاستبعاد"، تفقد هذه المركبة الاتصال مع ساتلي ترحيل البيانات وبالتالي مع المحطة الأرضية لساتل ترحيل البيانات. أما بالنسبة للمركبة الفضائية التي تدور في مدارات إهليلجية أو تتطلب ارتفاعات عالية، فإن المدى الزاوي الذي يمكن خلاله توجيه هوائي ساتل ترحيل البيانات وتسديده يحد من التغطية بشكل أكبر. وتقدم التوصية ITU-R SA.1018 المزيد من المعلومات عن مكونات مهمات سواتل ترحيل البيانات.

وتسهم مهمات الفضاء السحيق في تعميق معرفتنا بالنظام الشمسي والفضاء بوجه عام على مسافات تتجاوز 2×10^6 km من الأرض. وتميز المسافات البعيدة جداً مهمات الفضاء السحيق حيث إن بعض المهمات الحالية توجد على بعد يفوق 17 مليار كيلومتر من الأرض. وهذه المسافات الهائلة تفرض استخدام أجهزة اتصالات متطورة للغاية وتكنولوجيا وتقنيات تشفير متقدمة من أجل تحقيق إقامة وصلات اتصالات راديوية موثوقة عبر هذه المسافات الشاسعة.

3.1 أنظمة الأبحاث الفضائية

1.3.1 القطاع الأرضي

تخضع مواقع المحطات الأرضية لاعتبارات سياسية واقتصادية، وكذلك للمتطلبات اللازمة لمهمة أبحاث فضائية معينة. وتشكل المحطات الأرضية جزءاً من شبكة عالمية من محطات الاتصالات والتتبع وتعمل جنباً إلى جنب مع مرافق المعالجة والتبديل ومراكز التحكم لتشكيل شبكة الأبحاث الفضائية. وتتأمن عموماً الاتصالات وتوجيه البيانات بين مرافق الشبكة بواسطة أنظمة الاتصالات الأرضية والأنظمة الساتلية الثابتة.

وتكون الهوائيات المستخدمة للمحطات الأرضية للأبحاث الفضائية القريبة من الأرض بصورة رئيسية عبارة عن عاكسات مكافئية بأقطار تتراوح بين 6 و30 m . كما تستخدم هوائيات ياغي والهوائيات اللولبية والصفائف وهوائيات الحزمة المروحية لدعم عمليات التتبع. وعند تحديد الحجم المناسب لهوائي المحطة الأرضية ونوعه تؤخذ في الاعتبار عوامل من قبيل متطلبات المهمة، وقدرات المركبة الفضائية، والخصائص المدارية، وتردد التشغيل، وتنقلية هوائي المحطة الأرضية تمكّن من تحقيق الدقة في التسديد. ويجب أن يكون عرض حزمة الهوائي كافياً للسماح بأي عدم يقين زاوي في التسديد. وتقدم التوصية ITU-R SA.1414 تفاصيل عن المحطات الأرضية لسواتل ترحيل البيانات وهوائياتها.

وتتميز هوائيات المحطات الأرضية لمهمات الفضاء السحيق بقطر كبير جداً للهوائيات (35-70 m)، وأجهزة إرسال عالية القدرة، وأجهزة استقبال حساسة للغاية، وجميعها ضروري لتوفير اتصالات موثوقة عبر المسافات الهائلة التي تميز مهمات الفضاء السحيق. ويكون الحد الأقصى لكسب هوائي المحطة الأرضية لمهمات الفضاء السحيق محدوداً بحجم الهوائي ودقة اقتراب سطح الهوائي من سطح مجسم مكافئي فعلي. وثمة عوامل مثل دقة التصنيع، والتأثيرات الحرارية، وصلابة هياكل الدعم، والتشوه السطحي الناجم عن الجاذبية، والرياح، وزوايا الارتفاع المتنوعة تؤثر جميعها في دقة السطح. وقد أدى الحجم الكبير والتكاليف الباهظة المرتبطة ببناء هوائيات المحطات الأرضية لمهمات الفضاء السحيق إلى نشر عدد قليل فقط من هوائيات المحطات الأرضية هذه في جميع أنحاء العالم. ويقدم الملحق 1 للتوصية ITU-R SA.1014 خصائص أكثر تفصيلا عن المحطات الأرضية لمهمات الفضاء السحيق. ومن المحتمل أن تستخدم في المستقبل أنظمة تعمل على ترددات حول 283 THz لاتصالات الفضاء السحيق نظراً إلى ما تتسم به من كسب أعلى بكثير وعرض حزمة منخفض يمكن تحقيقهما باستخدام هوائيات أصغر حجماً. وتقدم التوصية ITU-R SA.1742 تفاصيل تتعلق بالخصائص التقنية والتشغيلية للأنظمة المتوقعة.

ويمكن الاطلاع على مخطط معمّم لإشعاع هوائي المحطة الأرضية لأبحاث الفضاء في التوصية ITU-R SA.509. وترد أساليب التنبؤ بمخططات إشعاع الهوائيات الكبيرة في التوصية ITU-R SA.1345، في حين تقدم التوصية ITU-R SA.1811 المخططات التي ينبغي استخدامها لتحليل التوافق في النطاقين 32 و37 GHz.

وتكون أصغر إشارة يمكن أن يكشفها جهاز استقبال الأبحاث الفضائية محدودة بسبب الضوضاء المحيطة المتولدة في جهاز الاستقبال والأخرى الناجمة عن مصادر خارجية. وفيما يتعلق بعمليات الفضاء السحيق، فإن القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) المحدودة لجهاز إرسال المحطة الفضائية إلى جانب مسافات الانتشار الطويلة للغاية تؤدي إلى إشارات ضعيفة جداً في محطة استقبال المحطة الأرضية. ولذلك يجب إبقاء الضوضاء في أجهزة استقبال المحطة الأرضية عند أدنى حد ممكن للسماح بإمكانية كشف الإشارات الضعيفة جداً والتقليل إلى أدنى حد من متطلبات قدرة جهاز إرسال المركبة الفضائية. وبالنسبة للعمليات الفضائية القريبة من الأرض، يتم التحكم بقدرة الإرسال والقدرة e.i.r.p. بحيث تتوافق مع مستويات كثافة تدفق القدرة (pfd) التي تنص عليها لوائح الراديو للاتحاد وتقتضي وجود أجهزة استقبال منخفضة الضوضاء.

وتسهم ضوضاء الخلفية التي يلتقطها الهوائي إسهاماً كبيراً في ضوضاء النظام الإجمالية. وهذه الضوضاء هي دالة في تردد التشغيل وزاوية ارتفاع الهوائي والأحوال الجوية والإشعاع الحراري الأرضي في الفصوص الجانبية والخلفية للهوائي. وعند الترددات التي تقل عن 1 GHz، تزداد ضوضاء السماء الناجمة عن المجرّة والانفجارات الشمسية مع انخفاض التردد. وعند الترددات التي تزيد على 1 GHz، تكون ضوضاء المجرة منخفضة فيما تبدأ ضوضاء السماء الناجمة بشكل رئيسي عن الغلاف الجوي للأرض بالازدياد. أما الضوضاء الناجمة عن المطر فتصبح ملحوظة قرب التردد 4 GHz وتزداد مع التردد حتى تبلغ قيمتها 100 K أو أكثر قرب التردد 15 GHz.

ويمكن الاطلاع على درجات الحرارة النمطية لضوضاء النظام في الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات في الجداول الواردة في الملحق 1 للتوصية ITU-R SA.1414، ولأنظمة خدمة الأبحاث الفضائية في الفضاء السحيق في التوصية ITU-R SA.1014. وترد في الجدولين 1 و2 درجات الحرارة النمطية لضوضاء أجهزة استقبال المحطات الأرضية المستخدمة في دعم عمليات الفضاء القريب من الأرض والفضاء السحيق.

الجدول 1

درجات الحرارة النمطية لضوضاء أجهزة استقبال المحطات الأرضية للمهمات القريبة من الأرض

نطاق التردد		درجة حرارة الضوضاء (K)
2~	GHz	150
11-10	GHz	160
15-13	GHz	300
26-18	GHz	200
38-37	GHz	200

الجدول 2

درجات الحرارة النمطية لضوضاء أجهزة استقبال المحطات الأرضية لمهمات الفضاء السحيق

التردد		درجة حرارة الضوضاء (K)	G/T (dB/K)
2 300-2 290	MHz	21-16	51
8 450- 8 400	MHz	27-23	60,4
13,25-12,75	GHz	29-25	62
32,3-31,8	GHz	61-52	66,4

ولا تطرح قدرة أجهزة إرسال المحطات الأرضية واستقرارها مشاكل تقنية خطيرة. وتعتمد قدرة الإرسال والقدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) على عدد من العوامل من قبيل تردد التشغيل وحجم الهوائي ومعدلات البيانات وخصائص نظام استقبال المركبة الفضائية.

فبالنسبة للعمليات القريبة من الأرض، تستخدم قدرات مشعة مكافئة متناحية عالية تصل إلى 60 dBW في قنوات الاتصالات ذات المتطلبات من البيانات بمعدلات عالية جداً، وعمليات الطوارئ والرحلات إلى القمر. وبالنسبة لمعظم مهمات الفضاء السحيق، تلزم قدرة مشعة مكافئة متناحية مرتفعة تصل إلى 110 dBW. أما القدرة المشعة المكافئة المتناحية للمحطات الأرضية باتجاه الأفق فهي مقيدة وفقاً للمادة **21** من لوائح الراديو. ويتعين وضع تقييدات إضافية على أساس كل حالة على حدة للامتثال لمتطلبات وإجراءات التنسيق المتعلقة بالمحطات الأرضية.

2.3.1 القطاع الفضائي

ينبغي لأنظمة المركبات الفضائية أن تتعامل مع التقييدات المتعلقة بالحجم والوزن والقدرة وتوافر العناصر المؤهلة لظروف الفضاء. كما يتعين على أنظمة المركبات الفضائية أن تعمل بكفاءة وبدرجة عالية من الموثوقية في بيئات الفضاء المتطرفة وأحياناً المعادية. فقد يكون الفشل كارثياً أو غير قابل للتصحيح بوجه عام. وبالرغم من التقدم الكبير الذي أُحرز في الاتصالات الفضائية، فإن تطوير معدات جديدة مؤهلة لظروف الفضاء من أجل تأمين المزيد من السعة وأنظمة اتصالات أكثر كفاءة عند نطاقات الترددات العالية ما زال جارياً وقد يستغرق تحقيقه الكثير من السنوات.

وتعتبر بيئة المدار الأرضي المنخفض (LEO) منصة أساسية للابتكارات والبحوث الجارية في مجال تكنولوجيا اتصالات الفضاء. فالنماذج الأولية للمعدات تحمل على مركبة فضائية اختبارية وغالباً ما يتم دمجها في تجارب الاتصالات والتتبع للمهمات القريبة من الأرض ومهمات الفضاء السحيق لأغراض الاختبار والتقييم. وتعتمد أنظمة الاتصالات والتتبع الاختبارية التي نجحت في تلبية معايير التأهيل لظروف الفضاء من أجل استخدامها في مهمات الأبحاث الفضائية المستقبلية. وتعتبر الهوائيات وأجهزة الاستقبال العنصرين الأساسيين لنظام اتصالات المركبات الفضائية.

وتعتبر الهوائيات شاملة الاتجاهات ضرورية لجميع مهمات الأبحاث الفضائية إما باعتبارها هوائيات أساسية للمركبات الفضائية أو للحفاظ على الاتصال مع المركبة الفضائية بغض النظر عن الوضعية. وتتسم الهوائيات شاملة الاتجاهات بحزم عريضة تؤمن تغطية مستمرة بزاوية واسعة وتقلل إلى الحد الأدنى من شروط استقرار المركبة الفضائية والتحكم في وضعيتها. وتستخدم بعض المهمات الهوائيات شاملة الاتجاهات كهوائيات أساسية للمركبة الفضائية بينما لا تستخدمها مهمات أخرى إلا لعمليات الإطلاق والطوارئ وكهوائيات ذات معدلات منخفضة للبيانات. وقد يؤدي الافتقار إلى الاتجاهية إلى مشاكل حادة تتعلق بتعدد المسير حين تتواصل مركبة فضائية في مدار أرضي منخفض مع ساتل ترحيل البيانات عبر هوائي شامل الاتجاهات. ومشاكل تعدد المسير، التي تنعدم عملياً مع الهوائيات الاتجاهية، تُزال إلى حد كبير من خلال استعمال إشارة مشكّلة بشفرة ضوضاء شبه عشوائية.

وتستخدم أيضاً صفائف الهوائيات المطاوَرة الإلكترونية في مهمات الأبحاث الفضائية لتوفير كسب هوائي أعلى من ذلك الذي توفره الهوائيات شاملة الاتجاهات، إضافة إلى القدرة على التوجيه والتسديد في الاتجاه المرغوب بطريقة إلكترونية. ويُفضل في الكثير من تجارب الأبحاث الفضائية استعمال الهوائيات القابلة للتوجيه إلكترونياً على تلك الموجّهة ميكانيكياً، وذلك لأنها تتفادى تعطّل حزم البرمجيات العلمية وأنظمة القياس الموجودة على المتن والتي تكون حساسة للعمليات العطالية. وتستخدم المركبات الفضائية في المدار الأرضي المنخفض كلاً من الصفائف المطاورة المتعددة الأوجه التي تستعمل تعويض الطور لتسديد حزمة في الاتجاه المطلوب، والصفائف الكروية أو نصف الكروية القابلة للتوجيه التي تستفيد من نشوء تجمعات العناصر للتوجيه عن طريق التبديل بين العناصر.

وتستخدم سواتل ترحيل البيانات صفائف هوائيات مطاوَرة لتأمين دعم النفاذ المتعدد إلى مركبة فضائية في المدار الأرضي المنخفض بمتطلبات من البيانات بمعدلات متدنية إلى متوسطة في نطاق التردد 2 GHz. وفي أسلوب الإرسال، تتشكل حزمة هوائي واحدة على ساتل ترحيل البيانات يتم تسديدها وتوجيهها بواسطة مزحزحات الطور في كل عنصر من عناصر الإرسال. وفي أسلوب الاستقبال، يستقبل ساتل ترحيل البيانات الإشارات المتعددة للمركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض ويرسلها نحو محطة أرضية

مركزية حيث يُزال تعدد إرسالها ويتم توجيهها نحو معدات تشكيل الحزم. وهناك يتم تثقيل طور واتساع الإشارات وتجمع خطياً لتأليف حزمة لكل مركبة فضائية في المدار الأرضي المنخفض. ويتحقق تسديد الحزم عن طريق حساب قيم تثقيل كل إشارة من إشارات صفيف هوائي الاستقبال الواردة من ساتل ترحيل البيانات.

وتعتبر الهوائيات الاتجاهية القابلة للتوجيه والعالية الكسب ضرورية للمركبات الفضائية الأكبر حجماً والأكثر متانة التي تتطلب بيانات بمعدلات متوسطة إلى مرتفعة وللمركبات الفضائية التي تحتاج إلى الاتصالات من مسافات بعيدة. وتَستخدم سواتل ترحيل البيانات هوائيات مكافئية عاكسة لدعم الاتصالات أرض–فضاء وفضاء–أرض. وإلى جانب التقييدات المتعلقة بالحجم والوزن، يكون عمل هوائيات المركبات الفضائية مقيداً أيضاً بالتحكم بوضعية المركبة الفضائية، والدقة والقدرة على التوجيه بالدرجة المطلوبة من الدقة. وتعتبر الهوائيات ضرورية للمركبات الفضائية للحفاظ على دقة السطح ضمن الدرجات التي يسمح بها تصميمها بالرغم من تدرجات درجات الحرارة الناجمة عن الإشعاع الشمسي. كما تعتبر معظم هوائيات المركبات الفضائية ضرورية لتوفير وظائف الإرسال والاستقبال المتزامنة وكذلك لتوفير الاتصالات في مختلف نطاقات التردد والقيام في الوقت نفسه بالتوجيه الدقيق للهوائي وتتبع مركبة فضائية في المدار الأرضي المنخفض كما هو الحال بالنسبة لعمليات سواتل ترحيل البيانات. ويُستخدم نظام تغذية معقد ومجموعة قيادة محورانية (gimbal) متحكم بها لإنجاز هذه العمليات الحساسة. ويصمم نظام التغذية لتحقيق الكسب الأمثل للهوائي على المدى المتوقع للعمليات. وتقوم مجموعة القيادة المحورانية بتوجيه الهوائي آلياً في الاتجاه المطلوب. وفي الأوضاع التي تتطلب حسابات التداخل والتي لا توجد لها مخططات للهوائي الاتجاهي عالي الكسب للمركبة الفضائية، يمكن استخدام المخطط التالي المرجعي لإشعاع الهوائي، المعتمد في التوصية ITU-R S.672، لتمثيل الذروة الغلافية في الفصوص الجانبية للهوائي.

$G(\varphi) = G_m - 3(\varphi/\varphi_0)^2$	من أجل	$\varphi_0 \le \varphi \le 2{,}58\ \varphi_0$
$G(\varphi) = G_m - 20$	من أجل	$2.58\ \varphi_0 < \varphi \le 6{,}32\ \varphi_0$
$G(\varphi) = G_m - 25 \log(\varphi/\varphi_0)$	من أجل	$6{,}32\ \varphi_0 < \varphi \le \varphi_1$
$G(\varphi) = 0$	من أجل	$\varphi_1 < \varphi$

حيث:

$G(\varphi)$: الكسب عند الزاويةφ من المحور (dBi)

G_m: الكسب الأقصى في الفص الرئيسي (dBi)

φ_0: نصف عرض الحزمة عند –3 dB = $0{,}5\sqrt{27000/(10^{G_m/10})}$ درجة

φ_1: قيمة φ حين تكون $G(\varphi)$ في المعادلة الثالثة مساوية 0 dBi = $\varphi_0 10^{G_m/25}$ درجة.

وعموماً لا تستخدم أجهزة الاستقبال المنخفضة الضوضاء على المركبة الفضائية للتقليل إلى أدنى حد من حجم ووزن نظام الاتصالات والتتبع. وتستخدم أجهزة إرسال قوية في المحطات الأرضية للتعويض عن تدني حساسية جهاز استقبال المركبة الفضائية. وبما أن معظم هوائيات المركبات الفضائية تلتقط إرسال المحطة الأرضية بإزاء ضوضاء خلفية قدرها 290 K (درجة حرارة سطح الأرض)، فلا توجد مزايا لأجهزة استقبال ذات درجات حرارة أقل بكثير. هذه العوامل، إلى جانب التكلفة ومدى التعقيد والموثوقية، تتوقف عليها درجة حرارة الضوضاء اللازمة لجهاز استقبال مركبة فضائية معينة. ويمكن الاطلاع على درجات الحرارة التشغيلية النمطية لضوضاء أجهزة استقبال سواتل ترحيل البيانات في الجداول الواردة في الملحق 1 للتوصية ITU-R SA.1414، وبالنسبة لمستقبِلات المركبات الفضائية لأبحاث الفضاء السحيق في التوصية ITU-R SA.1014. وترد في الجدولين 3 و4 درجات الحرارة التشغيلية النمطية لضوضاء أجهزة استقبال المركبات الفضائية المستخدمة في المهمات القريبة من الأرض ومهمات الفضاء السحيق.

الجدول 3

درجات الحرارة النمطية لضوضاء جهاز استقبال مركبة فضائية للمهمات القريبة من الأرض

نطاق التردد		درجة حرارة الضوضاء (K)
500-100	MHz	900-700
1 000-500	MHz	700-600
10-1	GHz	800-600
20-10	GHz	1 200-800
20 <	GHz	1 500-1 200

الجدول 4

درجات الحرارة النمطية لضوضاء جهاز استقبال مركبة فضائية لمهمات الفضاء السحيق

نطاق التردد		درجة حرارة الضوضاء (K)
2 120-2 110	MHz	200
7 190-7 145	MHz	330
17,1-16,6	GHz	910
34,7-34,2	GHz	2 000

وقد أظهر تطور واستخدام أجهزة الإرسال القائمة على أشباه الموصلات (الحالة الصلبة) أنها تناسب بطبيعتها الكثير من تطبيقات الأبحاث الفضائية العريضة النطاق. فحجمها الصغير ومتطلباتها للجهد المنخفض ومعالجتها لمشكلات نقل الحرارة تؤدي إلى وزن إجمالي لجهاز الإرسال يقل بشكل كبير عن نظيره القائم على الأنابيب المفرغة، علماً بأن الأنابيب المفرغة، مثل أنابيب الموجات المتنقلة، لا تزال تُستخدم في المهمات ذات المتطلبات العالية من القدرة وفي العمليات التي تتم في نطاقات الترددات الأعلى. فالقيود التي تفرضها تكنولوجيا الإرسال على قدرة جهاز الإرسال هي أقل من القيود التي تفرضها القدرة الكهربائية التي يمكن التزود بها من المركبة الفضائية للفضاء السحيق.

وتعمل الحدود المتعلقة بكثافة تدفق القدرة عند سطح الأرض والمنصوص عليها في لوائح الراديو على الحد من القدرات القصوى لجهاز إرسال المركبة الفضائية والقدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) في نطاقات معينة. وفي هذه الحالات، تستخدم مهمات الأبحاث الفضائية تقنيات التشكيل بتمديد الطيف للحفاظ على أداء الوصلات والامتثال لحدود كثافة تدفق القدرة المتفق عليها دولياً.

وترد في الجداول الواردة في الملحق 1 للتوصية ITU-R SA.1414 نطاقات قدرة جهاز الإرسال في الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات. وتتراوح قدرة إرسال المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية القريبة من الأرض من 2 إلى 10 W، بينما تتراوح قدرة الإرسال للمركبات الفضائية للفضاء السحيق بين 5 و10 W.

ويتوخى في المستقبل وضع أنظمة تعمل على ترددات أعلى من 200 THz لكل من الوصلات فضاء–فضاء للمهمات القريبة من الأرض والوصلات فضاء–أرض لمهمات الفضاء السحيق. ومع أن هذه الأنظمة من الهوائيات عالية الاتجاهية، لكنها نتيجة لذلك تتطلب دقة بالغة في تسديد الهوائي. ولا تتناول لوائح الراديو هذه الأنظمة حيث إن تعريف الموجات الراديوية تنتهي صلاحيته اعتباطياً عند التردد 3 THz. ومع ذلك، يسمح للجان الدراسات بقطاع الاتصالات الراديوية بإجراء دراسات ووضع توصيات بشأن استخدام هذه الترددات.

الفصل 2

وظائف الاتصال والتتبع في الأبحاث الفضائية وعمليات التنفيذ التقنية

تُعتبر الوظائف الثلاث الأساسية للمركبات الفضائية التي ترد مناقشتها أدناه، وهي التحكم والقياس عن بُعد والتتبع، وظائف خاصة بعمليات الفضاء. وتستخدم مهمات الأبحاث الفضائية النطاقات الموزعة عليها لتأمين وظائف العمليات الفضائية فضلاً عن بيانات القياس عن بُعد الخاصة بالمهمة ضمن نظام راديوي واحد. ويسمح ذلك بزيادة في كفاءة استعمال الطيف الراديوي، فضلاً عن تخفيف متطلبات المركبة الفضائية من القدرة والحيز المخصص للمكونات والوزن. ويلي المقدمة المقتضبة للوظائف بحث في كيفية تنفيذ أنظمة الاتصالات والتتبع في الأبحاث الفضائية. ويمكن الاطلاع على المزيد من المناقشات التقنية المتعلقة بالفضاء السحيق في التوصية ITU-R SA.1014.

1.2 الوظائف

1.1.2 إرسال الأوامر

تقوم الأوامر بتوجيه المركبة الفضائية والتحكم بها وتفعيل مختلف الوظائف المتعلقة بالمهمة أو تعديل عمليات المركبة الفضائية أو حمولتها النافعة ومواجهة حالات الشذوذ التشغيلية. ففي عمليات الإطلاق، تُسجل معظم الأوامر وتُنقل بواسطة برنامج التتابع المحمول على متن المركبة. وتُرسل الأوامر الموجهة من الأرض إلى الفضاء لتنفيذها في الوقت الفعلي أو قد تُخزن من أجل برمجة تتابعها لاحقاً. وغالباً ما ترسل الأوامر الهامة على مرحلتين، فيعمل الأمر الأول على تشكيل العملية المزمع القيام بها فيما يقوم الأمر الثاني بتنفيذ العملية. ويرتهن إجراء العملية بتلقي كلا الأمرين في المجموعة المؤلفة من مرحلتين بنجاح.

2.1.2 إرسالات بيانات القياس عن بُعد الخاصة بالمركبة الفضائية

يقدم النظام الفرعي للقياس عن بُعد في المركبة الفضائية معلومات عن وضع أنظمة المركبة الفضائية وحمولتها النافعة، ويزود محطة أرضية معينة بالبيانات المقيسة الصادرة عن أجهزة قياس المركبة الفضائية. كما يبين هذا النظام وضع استقبال الأوامر وتنفيذها. ويمكن تخزين بيانات القياس عن بُعد من أجل إرسالها في وقت لاحق أو قد يلزم إرسالها في الوقت الفعلي كما هو الحال في عمليات الإطلاق والطوارئ.

3.1.2 إرسالات بيانات القياس عن بُعد الخاصة بالمهمة

يتولى النظام الفرعي للقياس عن بُعد الخاص بالمهمة إرسال البيانات العلمية والهندسية التي تم تجميعها أثناء التجارب إلى الأرض، ونتائج الاستشعار النشيط والمنفعل، والبيانات الحاسوبية التي تولّدها المركبة الفضائية والحمولات النافعة مثل المسابير ومركبات الهبوط. وتتطلب كذلك المهمات المأهولة النظام الفرعي للقياس عن بُعد لإرسال بيانات الصوت والفيديو.

4.1.2 التتبع

يعتبر التتبع مطلباً أساسياً لأي مهمة من مهمات الأبحاث الفضائية. فبالإضافة إلى توفير المعلومات الضرورية لتحديد موقع المركبة الفضائية وسرعتها، يعتبر التتبع ضرورياً أيضاً لتقييم أداء الإطلاق والأداء في المدار، وتصويبات المسار، وتحديد التوقيت الدقيق للمناورات الهامة من قبيل إطلاق صواريخ الكبح والتنبؤ برؤية المركبة الفضائية وزوايا تسديد الهوائي التي تتطلبها المركبة الفضائية والمحطات الأرضية.

5.1.2 علم الراديو

يمثل علم الراديو مجالاً هاماً من مجالات التحقيقات العلمية بشأن مهمات الفضاء السحيق، ويستخدم أنظمة الاتصالات والتتبع في المركبة الفضائية بمثابة أجهزة علمية. فعندما تنتقل الإشارات الراديوية من المركبة الفضائية وإليها في الفضاء السحيق، فإنها تجتاز مجموعة واسعة من الوسائط ويمكن أن تشكل مصدراً غنياً للمعلومات المتعلقة بالفضاء الذي تنتشر فيه من خلال تأثير هذه الوسائط على مختلف معلمات الإشارات.

وتقوم تقنيات علم الراديو أيضاً بقياس تأثيرات القوى التي تؤثر في المركبة الفضائية وتظهر على شكل زحزحة دوبلرية. وتستخدم المعلمات المقيسة مثل الاتساع والطور والتردد والمحتوى الطيفي والاستقطاب وسرعة الزمرة في توفير معلومات للدراسات التي تتناول مختلف الظواهر الجيوفيزيائية. ومن بين هذه الظواهر: الغلاف الجوي للكواكب، والحلقات الكوكبية، وسطوح الكواكب، وجاذبية الكوكب وبنيته الداخلية، وتقصّي جوانب نظريات النسبية العامة والفيزياء الأساسية المتصلة بالجاذبية. وتعتبر قياسات علم الراديو من بين القياسات الأكثر تطلباً من حيث الدقة والصحة والثبات وتقنيات الرصد، وغالباً ما تضع معايير جديدة للأداء تؤدي إلى تحسين تقنيات الاتصالات في الفضاء السحيق التي تعود بالنفع على المستعملين الآخرين.

2.2 عمليات التنفيذ

1.2.2 متطلبات الموثوقية ومعدلات الخطأ في البتات وهوامش الوصلات

يتسم النظام الفرعي للتحكم بأهمية قصوى بالنسبة لسلامة ونجاح أي مهمة من مهمات الأبحاث الفضائية ويجب أن يعمل بدرجة عالية من الموثوقية في ظل جميع ظروف الإرسال السيئة من قبيل الطقس الرديء أو التداخل الراديوي. وفيما يتعلق بمهمات الفضاء السحيق، يشكل وقت الانتشار الذي تستغرقه الإشارة لكي تعبر المسافة الهائلة بين المركبة الفضائية والمحطة الأرضية اعتباراً إضافياً يؤثر في موثوقية وصلة التحكم. فأي تأجيل في التعرف على أمر خاطئ أو تكراره قد يؤدي إلى كارثة وإلى فشل ذريع تتحمل كلفته الباهظة المهمة بأكملها.

وعموماً تكون الحاجة إلى الموثوقية في الأنظمة الفرعية للقياس عن بُعد والتتبع أقل من تلك الخاصة بالأنظمة الفرعية للتحكم، وذلك لأن البيانات المفقودة أو أخطاء البيانات يمكن استيعابها في عمليات إعادة البث من دون أن يؤثر ذلك كثيراً على سلامة المهمة أو نجاحها. ومع ذلك، فأثناء بعض أحداث المهمات الهامة، يكون لموثوقية الأنظمة الفرعية للقياس عن بُعد والتتبع نفس القدر من الأهمية الذي تتسم به وصلة التحكم. وتتطلب المهمات المأهولة بيانات طبية حيوية، وقنوات سمعية واضحة لا يشوبها التقطّع، وحداً أدنى من المتطلبات الفيديوية، مما يسفر عن اعتبارات إضافية تتعلق بالموثوقية.

وقد تم تحديد شرط الموثوقية المتعلقة بوصلات الأبحاث الفضائية أثناء عمليات أو أحداث المهمات الهامة بنسبة 99,99 في المائة. وقد أسفر ذلك عن المتطلبات التالية:

- وصلة أرض–فضاء وفضاء–أرض لا تتأثر بالأحوال الجوية؛
- مستويات مرتفعة من القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) للمحطة الأرضية للتعويض عن انخفاض الكسب في الهوائيات شاملة الاتجاهات التي يستخدمها الكثير من المركبات الفضائية، وخاصة أثناء الإطلاق، ومراحل الحقن المداري، وعمليات الطوارئ؛
- معدل خطأ في البتات (BER) أقل من 1×10^{-5} (أقل من 1×10^{-6} بالنسبة لأوامر ساتل ترحيل البيانات)؛
- تشفير للأوامر لضمان رفض كافٍ للأوامر الخاطئة الناجمة عن رشقات الأخطاء أو الخبو أو الإشارات الهامشية؛
- عرض نطاق كافٍ لتأمين جميع المعلومات الضرورية.

وللقيود المتعلقة بالوزن والحدود المفروضة على قدرة المركبة الفضائية وأنواع الهوائيات المستخدمة في المركبة الفضائية أثر كبير على مقدرات أنظمة الاتصالات والتتبع والقياس عن بُعد في المركبة الفضائية وبالتالي على هوامش وصلات النظام. وتشكل مسافات الإرسال الطويلة عاملاً إضافياً لمهمات الفضاء السحيق. وتتراوح قيمة هوامش الوصلات في خدمة الأبحاث الفضائية بين 2 و6 dB. وترد في التقرير ITU-R SA.2183 المنهجية المفضلة لحساب أداء الوصلة في خدمة الأبحاث الفضائية. وترد في التوصية ITU-R SA.1742 متطلبات الوصلات وطرائق الحساب المتصلة بعمليات الإرسال في الفضاء السحيق عند التردد 283 THz. وترد في التوصية ITU-R SA.1805 متطلبات مماثلة للوصلات فضاء–فضاء في خدمة الأبحاث الفضائية عند الترددين 354 THz و366 THz.

2.2.2 المتطلبات المتعلقة بمعدل البيانات وعرض النطاق

تعتبر المتطلبات المتعلقة بمعدلات البيانات في مختلف قنوات اتصالات المركبة الفضائية من العوامل الأساسية اللازمة لتحديد عروض النطاق المناسبة. وتعتمد معدلات بيانات القياس عن بُعد الخاصة بالمهمة على أنواع مهمات الأبحاث الفضائية، ومدى تطور المركبة الفضائية وسعة تخزين البيانات في المركبة الفضائية وساعات الاتصال المتوفرة بين المركبة الفضائية والمحطة الأرضية. وتتطلب المهمات المأهولة اتصالات سمعية وفيديوية لضمان نجاح المهمة وسلامة روّاد الفضاء. وتعتبر وصلات التغذية في سواتل ترحيل البيانات بمثابة وصلات مركبة تتكون بتعدد إرسال وصلات المركبة الفضائية المستفيدة في المدار الأرضي المنخفض إلى جانب جهاز القياس عن بُعد لساتل ترحيل البيانات وقنوات تحديد المدى والإشارة الإرشادية.

ويعتبر قياس المدى محط انشغال كبير بالنسبة للعمليات القريبة من الأرض وعمليات الفضاء السحيق لكنه أكثر تطلباً بالنسبة لمهمات الفضاء السحيق. وغالباً ما تشكل الاعتبارات المتعلقة بدقة تحديد المدى عوامل هامة في تحديد عرض النطاق الإجمالي للوصلة الخاصة بمهمات الفضاء السحيق.

وحين يقتضي دعم أهداف مهمة واحدة وجود مركبتين فضائيتين أو أكثر ، فقد يصادف في بعض الأحيان أن أكثر من مركبة فضائية واحدة خاصة بالمهمة تقع ضمن عرض حزمة الهوائي المشترك للمحطة الأرضية وتتطلب اتصالات متزامنة. وبالتالي فإن هذا الشرط التشغيلي يتطلب أن يكون عرض نطاق المحطة الأرضية كافياً لاستيعاب إشارات عدة مركبات فضائية.

ويمكن الاطلاع على متطلبات عرض النطاق الخاص بمهمة الأبحاث الفضائية في التوصيات التالية لقطاع الاتصالات الراديوية:

- التوصية ITU-R SA.364 – الترددات وعروض النطاق المفضلة للسواتل المأهولة وغير المأهولة لخدمة الأبحاث الفضائية بالقرب من الأرض
- التوصية ITU-R SA.1015 – متطلبات عرض النطاق لأغراض البحث في الفضاء السحيق
- التوصية ITU-R SA.1019 – نطاقات الترددات المفضلة واتجاهات الإرسال للأنظمة الساتلية لترحيل البيانات
- التوصية ITU-R SA.1344 – نطاقات التردد وعروض النطاق المفضلة لإرسال بيانات القياس التداخلي الفضائي ذي خط الأساس الطويل جداً (VBLI).

3.2.2 معدلات التحول (الذهاب والإياب)

يرتبط تردد الإرسال في المركبة الفضائية في الغالب بشكل متماسك بتردد الموجة الحاملة التي يتلقاها من محطة أرضية، أو من ساتل ترحيل البيانات في حالة عمليات سواتل الترحيل. وتستند هذه العلاقة بين الترددات إلى مضاعَفٍ محدد يعرف باسم 'معدل التحول (الذهاب والإياب)' الذي يطبق في المركبة الفضائية.

$$\text{تردد الإرسال} = \text{تردد الاستقبال} \times \text{معدل التحول}$$

وتتوقف معدلات التحول في خدمة الأبحاث الفضائية على نطاق الترددات المستعمل كما هو مبين في الجدول 5.

الجدول 5

معدلات التحول في خدمة الأبحاث الفضائية

نطاق التردد (GHz/GHz)	معدل التحول (وصلة هابطة/وصلة صاعدة)
2/2	221/240
7/8	749/880
13/15	1469/1600
34/32	3599/3328 3599/3344 3599/3360

4.2.2 تعدد الإرسال

تستخدم خدمة الأبحاث الفضائية كلاً من تعدد الإرسال بتقسيم الزمن (TDM) وتعدد الإرسال بتقسيم التردد (FDM). ويُستخدم تعدد الإرسال بتقسيم الزمن في مهمات الفضاء السحيق لوضع حزم البيانات الرقمية الصادرة عن مختلف أجهزة القياس على متن المركبة الفضائية في تدفق بيانات واحد. يعمل هذا النهج على تيسير إرسال بيانات المصدر بطريقة موحدة وآلية. ويُستخدم تعدد الإرسال بتقسيم الزمن في عمليات سواتل ترحيل البيانات لترحيل الأوامر إلى مركبة فضائية متعددة النفاذ وتوفير قنوات منفصلة بين المحطات الأرضية والمركبة الفضائية.

ويُستخدم تعدد الإرسال بتقسيم التردد (FDM) في عمليات سواتل ترحيل البيانات. ويتم ذلك بتكييف بيانات التحكم وإضافتها بشكل غير متزامن إلى شفرة الضوضاء شبه العشوائية لقناة التحكم باستخدام المقياس modulo-2 (تستخدم المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض شفرة الضوضاء شبه العشوائية لقناة التحكم من أجل حيازة الإشارات). بعد ذلك تُستخدم هذه الشفرة ومعها البيانات للقيام بتشكيل ثنائي الطور للموجة الحاملة المتوسطة التردد لقناة التحكم. وإذا كان تحديد المدى مطلوباً، تقوم شفرة الضوضاء شبه العشوائية الطويلة بتشكيل ثنائي الطور للموجة الحاملة المتوسطة التردد لقناة تحديد المدى. ومن ثم تُضمّ قناة تحديد المدى إلى قناة التحكم بعملية تربيع لطور التردد الراديوي. بعد ذلك يخضع خرج التردد المتوسط لوحدة التشكيل رباعية الطور إلى عمليات تسوية وإزاحة تردد وتضخيم وينقل إلى مجموعة دمج التردد الراديوي حيث تتشكل بصورة منفعلة إشارة الوصلة الأمامية المركبة مع الإشارات الواردة من مركبة فضائية أخرى في المدار الأرضي المنخفض ومن قناة التحكم الأمامية لساتل ترحيل البيانات ومن معلومات النغمة الدليلية. وأخيراً تُسيّر هذه الوصلة المركّبة نحو هوائي الإرسال الذي يقع الاختيار عليه لإرسالها إلى ساتل ترحيل البيانات حيث تزاح الإشارة المستقبَلة إلى نطاق الترددات المتوسطة وتضخّم وترشّح ويُزال تعدّد إرسالها. أما الإشارات التي تُرسل إلى مركبة فضائية مختلفة في المدار الأرضي المنخفض فتزاح إلى التردد المناسب وتضخّم وتُرسل بواسطة الهوائي المناسب إلى المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض. وغالباً ما تُزاح قناة التحكم الأمامية لساتل ترحيل البيانات والنغمة الدليلية ويرسلا إلى النظام الفرعي للعمليات الفضائية المتعلقة بساتل ترحيل البيانات.

وتكون عمليات العودة مماثلة لعمليات الوصلة الأمامية باستثناء أن تدفق الإشارات يكون معكوساً. فالإشارات الواردة من المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض يتم استقبالها بواسطة هوائي ساتل ترحيل البيانات ثم تُضخم ويخفّض ترددها إلى تردد متوسط وترسل إلى مجموعة معالج العودة حيث يُعدّد إرسالها مع إشارات مستقبَلة من مركبة فضائية أخرى في المدار الأرضي المنخفض، وإشارات القياس عن بُعد لساتل ترحيل البيانات والنغمة الدليلية لوصلة العودة. ويتم رفع تردد إشارة وصلة العودة المركبة هذه وتضخم وتُرسل إلى الأرض بواسطة هوائي وصلة التغذية لساتل ترحيل البيانات. أما الإشارات الواردة من مركبة فضائية في المدار الأرضي المنخفض لديها قنوات عودة بمعدل بيانات مرتفع جداً فلا يُعدّد إرسالها مع إشارات استقبال أخرى. ويتم توجيه هذه الإشارات نحو مُعالج عودة مخصص منفصل حيث يجري رفع ترددها وتضخيمها لتشكل إشارة وصلة عودة مخصصة ترسل إلى محطة الاستقبال الأرضية.

5.2.2 تصحيح الأخطاء وتشفير الضوضاء شبه العشوائية

تستخدم تقنيات تشفير تصحيح الأخطاء في الغالب من أجل تحسين معدل الخطأ في البتات (BER) في وصلات الاتصالات الخاصة بالأبحاث الفضائية، ولأن هذه التقنيات تُدخل حشواً زائداً عن الحاجة في الرسالة قبل الإرسال، فإنها تحتاج إلى زيادة في عرض نطاق الإشارة. ويمكن خفض قدرة إرسال الإشارة لأن هذا النوع من التشفير يسمح بتصويب الأخطاء في الإرسال. وفيما يتعلق بالمركبات الفضائية المحدودة القدرة، ثمة مزايا تنجم عن استخدام عدد قليل من عمليات تشفير الخطأ لضمان هوامش أكبر للأنظمة.

ويمكن استخدام شفرات تصحيح الخطأ لتصحيح أخطاء بتات وحيدة أو رشقات من الأخطاء. ولا بد من إيجاد توازن بين كفاءة تصحيح الخطأ بالنسبة لتأثير خطأ معين وبين الكلفة و/أو تأخير الوقت اللازم لتنفيذه المادي. وتتمثل الشفرة الأساسية لتصحيح الخطأ التي تستخدمها خدمة الأبحاث الفضائية في شفرة تلافيفية شفافة بمعدل 1/2، وطول لا يتعدى 7، تناسب القنوات التي تسودها الضوضاء الغوسية. ويعمل التشفير التلافيفي في المركبة الفضائية وفكّ التشفير التتابعي في المطراف الأرضي على تحسين الأداء الإجمالي للنظام بمعزل عن تقنيات التشكيل. وعادة ما تتم إضافة تشفير ريد–سولومون لخفض احتمال الخطأ بدلاً من تخفيض النسبة E_b/N_0. وتعتبر شفرة ريد–سولومون التي تستخدم في الكثير من مهمات الفضاء السحيق شفرة قوية لتصحيح رشقات الأخطاء التي تتميز بمعدل خطأ متدنٍ للغاية يصعب الكشف عنه. ويمكن استعمال هذه الشفرة وحدها، وبذلك توفر تصحيحاً أمامياً ممتازاً في قناة ضوضاء رشقية، أو يمكن سلسلتها مع شفرات تلافيفية بحيث تكون الشفرة التلافيفية هي الشفرة الداخلية وشفرة ريد–سولومون هي الشفرة الخارجية. كما يمكن استخدام هذه التشكيلة مع التشذير. فتعمل وحدة التشذير الموضوعة بين شفرة ريد–سولومون (الخارجية) والشفرة التلافيفية (الداخلية) على تجزئة أي رشقة تظهر في الخرج التلافيفي الذي تم فك تشفيره.

ويعتبر نظام شفرة الضوضاء شبه العشوائية نظاماً متكاملاً يمكنه تقديم وظائف متزامنة مثل نقل البيانات وتحديد المدى في شكل موجة متكاملة وحيدة لديها استخدامات في الكثير من المهمات القريبة من الأرض ومهمات الفضاء السحيق. ويؤمن نظام شفرة الضوضاء شبه العشوائية المناعة ضد إشارات التداخل الناجمة عن تعدد المسير حتى في الارتفاعات المنخفضة جداً التي تواجه أثناء مرحلة الإطلاق الأولية لمهمة المركبة الفضائية. فيتم رفض مصادر التداخل ضيق النطاق بواسطة مستقبِل التتبّع الذي يعمل بشفرة ضوضاء شبه عشوائية فيما يتم رفض التداخل والضوضاء عريضي النطاق عندما يقوم مستقبِل تتبع الطور بإزالة تشكيل إشارة ضيقة النطاق. وتتمثل إحدى الفوائد الأخرى لأنظمة شفرة الضوضاء شبه العشوائية في أن تشكيل الضوضاء شبه العشوائية ينشر قدرة جهاز الأرسال فوق عرض نطاق أكبر ويحافظ على كثافة تدفق القدرة على سطح الأرض عند المستويات المنصوص عليها في لوائح الراديو للاتحاد أو أدنى منها.

وتُستخدم أنظمة شفرة الضوضاء شبه العشوائية في دعم اتصالات سواتل ترحيل البيانات لأنها تسمح بالتعرف الإيجابي لهوية عدد كبير من مركبات الفضاء وتعدّد الإرسال فيها عبر قناة عادية. ويسمح التنسيق بين مكتبات شفرة الضوضاء شبه العشوائية بإمكانية التشغيل البيني بين الوكالات ويتجنب التداخل المتبادل. وهناك نوعان من شفرة الضوضاء شبه العشوائية يستخدمان في تحديد مكتبات الشفرة، وهما الشفرات الذهبية (شفرات قصيرة) وشفرات الطول الأقصى (شفرات طويلة). والشفرات الذهبية هي صنف من الشفرات يتسم بخصائص ذات ترابط متبادل منخفض. وتكون فيه الشفرات قصيرة للسماح بحيازة سريعة للإشارات. وتستخدم الشفرات الذهبية في قناة التحكم بالوصلة الأمامية وفي إرسالات المركبات الفضائية التي تتطلب وصلة عودة غير متماسكة. أما شفرات الطول الأقصى فهي أطول بكثير من الشفرات الذهبية وتستعمل في توفير حلول جيدة لمشاكل الإبهام في المدى.

وتوفر شفرات PN المتزامنة الأمامية والعائدة قياسات دقيقة للمدى (إرسال وإجابة متسقان) عن طريق مقارنة الأطوار النسبية لمولدات إرسال واستقبال شفرة الضوضاء شبه العشوائية عند المطراف الأرضي. وبإمكان النظام أن يوفر تعويضاً دوبلرياً لوصلات سواتل ترحيل البيانات من المحطة الأرضية إلى المركبة الفضائية ومن جديد إلى المحطة الأرضية. ومن شأن ذلك أن يضمن عدم تعرض أي إسهام دوبلري ناجم عن حركة ساتل ترحيل البيانات للانحطاط أو المساس بالأداء الإجمالي للنظام.

6.2.2 تقنيات التشكيل

مع أن تقنيات التشكيل التماثلي لا تزال تستخدم في بعض مهمات الأبحاث الفضائية، بيد أن الزيادة السريعة في استخدام التقنيات الرقمية لتشكيل الطور يتوقع أن تحل تماماً في المستقبل محل الأنظمة التماثلية. فمهمات الفضاء السحيق، التي تتطلب أن تكون بيانات القياس عن بُعد بمعدل بتات أقل من 4 kbit/s، تستعمل التشكيل الثنائي الطور لموجة حاملة فرعية مربعة باعتماد القياس عن بُعد بمعدل بيانات منخفض وتشكيل لاحق لطور الموجة الحاملة. وينتج عن مؤشّر التشكيل المناسب موجة حاملة متبقية تُستخدم في تتبع الإشارة المستقبَلة. ومن شأن استخدام هذه التقنية أن يبقي قدرة البيانات إلى حد كبير خارج عرض نطاق عروة تتبع الموجة الحاملة لجهاز الاستقبال، ويحافظ على بساطة تصميم المركبة الفضائية ويضمن موثوقية وصلة الاتصالات وأداءها الأمثل.

وتستخدم الأنظمة القريبة من الأرض والأنظمة الساتلية لترحيل البيانات أنواعاً مختلفة من تشكيل الطور. وعموماً تستخدم المهمات القريبة من الأرض التشكيل الاثنيني بزحزحة الطور (BPSK) لقناة بيانات واحدة أو التشكيل التربيعي بزحزحة الطور (QPSK) لقناتين منفصلتين، وتشكيل الإبراق بأدنى زحزحة بمرشاح غوسي (GMSK) أو التشكيل 8PSK لعمليات الإرسال التي تتسم بالكفاءة في استخدام عرض النطاق. وقد أثبتت الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات، حيثما توافرت، بأنها تمثل نظام الاتصالات المثالي للمهمات القريبة من الأرض. وتستخدم الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات نظام تمديد الضوضاء شبه العشوائية بالإضافة إلى التشكيل التربيعي بزحزحة الطور (QPSK) غير المتوازن. أما الأنظمة التي تعمل على ترددات أعلى من 200 THz فتعتمد على تقنيات تشكيل مواقع النبضات (PPM) التي تتيح الكشف المباشر للإشارة المرسلة وتلغي الحاجة إلى أجهزة استقبال متسقة.

7.2.2 الحيازة

الحيازة هي إنشاء وصلة اتصالات بين مركبة فضائية ومحطة أرضية تسمح بتدفق غير متقطع للبيانات بين المركبة الفضائية والمحطة الأرضية. وتعتبر الحيازة بالنسبة لمهمات الفضاء السحيق ومهمات سواتل ترحيل البيانات والمهمات المأهولة القريبة من الأرض والمهمات التي تُنجز في الوقت الفعلي عنصراً أساسياً في تتابع أحداث الاتصالات.

وتتطلب معظم اتصالات الأبحاث الفضائية عمليات متسقة لتوفير بيانات تتبع هامة للمركبة الفضائية. ومن أجل هذه العمليات، لا بد أولاً من حيازة وصلة أمامية من محطة أرضية إلى مركبة فضائية قبل حيازة وصلة العودة وما يلي ذلك من تدفق للبيانات بين المركبة الفضائية والمحطة الأرضية. ويتيح ذلك المجال لتردد الموجة الحاملة لوصلة العودة في المركبة الفضائية وشفرة (مدى) الضوضاء شبه العشوائية أن يكونا مترابطين بشكل متسق ومُحكمَيْن على إشارة الوصلة الأمامية الواردة من المحطة الأرضية. وتتسم عمليات سواتل ترحيل البيانات بتعقيدات إضافية تتمثل في ضرورة توجيه إشارات الوصلة الأمامية ووصلة العودة عبر سواتل ترحيل البيانات.

أما العمليات غير المتسقة فلا تتطلب حيازة لتردد الموجة الحاملة والشفرة في الوصلة الأمامية قبل إطلاق إشارة العودة. فالمركبة الفضائية ترسل في اتجاه محطة الاستقبال الأرضية قدرة مشعة مكافئة متناحية (e.i.r.p.) متوافقة مع معدل البيانات الخاص بها. ومن شأن المعرفة المسبقة بتردد المذبذب المحلي للمركبة الفضائية أن يسمح للمحطة الأرضية (أو لساتل ترحيل البيانات) بالبحث عن الإشارة الواردة وحيازتها والإحكام عليها. ويستند أسلوب دوبلر أحادي الاتجاه إلى التردد المستقبَل ودرجة التفاوت المسموح بها لتردد المذبذب المحلي للمركبة الفضائية.

وعموماً يكون طول مدة تتابع الحيازة قصيراً، في حدود 5-10 s. ومع ذلك فإنه أثناء حدوث حالات التداخل التي قد تسبب فقدان الإشارة أو خروج الموجة الحاملة للإشارة عن إحكام عروة تتبع الموجة الحاملة، يُحتمل أن تمر بضع دقائق قبل أن تتم إعادة حيازة الإشارة.

8.2.2 تقنيات التتبع

يُستخدم التتبّع الراداري أثناء عمليات الإطلاق. فبدلاً من الاعتماد على الأصداء الضعيفة، صُمّم الكثير من المركبات الفضائية لحمل منارات راديوية أو أجهزة إرسال–استجابة من أجل عمليات التتبّع. وعادة ما يعمل التوهين الجوي على الحد من عمليات التتبّع الراداري إلى ما دون 6 GHz.

ويوفر التتبّع المتسق وغير المتسق للمدى ومعدل المدى دقة في التتبع تفوق ما توفره شبكات الرادارات الأرضية. ويتم تحديد المدى أو المسافة بقياس مدة الرحلة الكاملة (ذهاب وإياب) للإشارة الراديوية من محطة أرضية إلى مركبة فضائية والعودة ثانية إلى المحطة الأرضية. ويتم تحديد معدل المدى أو السرعة بقياس زحزحة دوبلر في تردد الإشارة. وفي العمليات غير المتسقة، يقوم المذبذب المحلي للمركبة الفضائية بتوليد وإرسال تردد موجة حاملة مرجعية معروفة من محطة الاستقبال الأرضية. ويقوم مستخلص دوبلر في المحطة الأرضية بمقارنة تردد الإشارة المستقبَلة مع تردد مرجعي مولّد محلياً من أجل تحديد قيم زحزحة دوبلر.

وتسمح العمليات المتسقة بقياسات المدى باتجاهين وقياسات دوبلر. فالمحطة الأرضية تبث تردد الموجة الحاملة بعد تشكيلها بواسطة شفرة معينة لتحديد المدى. وتستقبل المركبة الفضائية هذه الموجة وتُحكم طورها على تردد الإشارة المستقبَلة، ثم تولد موجة حاملة مُرسلة متسقة مع الإشارة المستقبَلة. ويرتكز هذا التردد المتّسق على نسبة التحول التي تحددها إدارة أو شبكة الفضاء. وتولد المركبة الفضائية شفرة لتحديد المدى متزامنة مع شفرة تحديد المدى المستقبلة تستخدم لتشكيل تردد الإرسال. وتقوم المحطة الأرضية باستقبال وإحكام الطور على الإشارة الواردة ومقارنتها بالتردد المرجعي الصادر عن المحطة الأرضية لتحديد قياسات دوبلر. وتقوم المحطة الأرضية بتحديد قياسات المدى من خلال قياس المدة الفاصلة بين لحظة إرسال العناصر في شفرة تحديد المدى الأمامية ولحظة استقبال نفس العناصر ثانية في المحطة الأرضية.

وتستخدم أنظمة قياس التداخل بخط أساسي طويل جداً (VLBI) بشكل رئيسي في الأبحاث الفلكية والجيوديسية. وتدعم أنظمة القياس VLBI عمليات الملاحة في مهمات الفضاء السحيق من خلال تحقيق منظومة إحداثيات مرجعية سماوية وأرضية. ويحدد فهرس المصادر الراديوية الواقعة خارج المجرة منظومة الإحداثيات السماوية، فيما تحدد جداول إحداثيات المحطات والنماذج الجيوديسية منظومة الإحداثيات الأرضية، علماً بأن جداول اتجاه الأرض (الحيدان والتأرجح والتوقيت العالمي UT1 والحركة القطبية) تربط هاتين المنظومتين معاً. ويوفر نظام القياس VLBI وسيلة لتقدير المعلمات التي تحدد منظومات الإحداثيات المرجعية من خلال قياس دقيق للفرق في زمن وصول الإشارات الصادرة عن مصادر راديوية واقعة خارج المجرة وتستقبلها محطتان أرضيتان تفصل بينهما مسافة كبيرة جداً. فيمكن مثلاً باستخدام عدة قياسات كهذه تحديد مواقع المحطات الأرضية بدرجة من الدقة النسبية تصل إلى 1 cm. وتُستخدم الترددات القريبة من 2 و8 و32 GHz لوضع منظومة الإحداثيات المرجعية لنظام القياس VLBI.

وتعتمد دقة الملاحة في المركبة الفضائية على المعرفة الدقيقة بالمعلمات التي تحدد منظومة الإحداثيات الملاحية. فعلى سبيل المثال، قد يؤدي خطأ قدره 3 m في موقع المحطة الأرضية المفترض إلى نشوء خطأ قدره 700 km في الموقع المحسوب لمركبة فضائية تدور حول كوكب زُحل. وبالإضافة إلى وضع منظومة الإحداثيات المرجعية، تُستخدم أيضاً تقنية قائمة على القياس VLBI، تعرف بالمدى التفاضلي أحادي الاتجاه (DOR)، للقياس المباشر للموضع الزاوي للمركبة الفضائية. وتعتبر قياسات الموضع الزاوي تكملة طبيعية لقياسات المدى في خط البصر وقياسات دوبلر. وتقوم محطتان أرضيتان أو أكثر برصد إشارة المركبة الفضائية ومصدر راديوي خارج المجرة مجاور زاوياً يتم اختياره من الفهرس السماوي بالتناوب. ومن خلال القياس الدقيق لوقت التأخر الخاص بكل مصدر، ومعرفة معلمات منظومة الإحداثيات المرجعية، يمكن تحديد الموضع الزاوي للمركبة الفضائية بالنسبة إلى المصادر السماوية.

ويقتضي تحديد المدى إرسال ترددين أو أكثر لتوليد إشارة ذات عرض نطاق يكفي لقياس تأخر الزمرة (أي نغمة تحديد المدى أو ببساطة النغمة). وتقع نغمتا التردد الكبرى والصغرى في مدى من الترددات يتراوح بين kHz وMHz. وتستخدم النغمات الجانبية لحل مشاكل الإبهام. وفي عمليات الفضاء السحيق، تُستخدم أنظمة تحديد المدى بشبه الضوضاء وميقاتيات يقع مداها في نطاق MHz. ويتطلب نظام القياس VLBI في المركبة الفضائية تباعداً بين النغمات يتراوح بين 1/5500 و1/400 من تردد الموجة الحاملة الرئيسية للمركبة الفضائية للتمكن من قياس التأخر بشكل دقيق. ويؤدي ذلك في العمليات التي تتم في النطاق 8 GHz إلى نشوء نغمات تتراوح بين 1,5 MHz و20 MHz.

ويؤمن نظام الإرسال–الاستجابة لتحديد المدى من اتجاهين (BRTS) الخاص بسواتل ترحيل البيانات تحديداً دقيقاً للمعلمات المدارية باستخدام أنظمة إرسال–استجابة ثابتة تقع في مناطق مختلفة من الأرض وفي كل ساتل من سواتل ترحيل البيانات. ويحدد أسلوب التثليث هذا قياسات المسافة إلى ساتل ترحيل البيانات وموقع ساتل ترحيل البيانات بالنسبة لموقعين معروفين ويوفر بيانات التتبع اللازمة للتحديد الدقيق للتقويم الفلكي لكل ساتل موجود في المدار من سواتل ترحيل البيانات.

الفصل 3

الاعتبارات المتعلقة بنطاقات التردد الخاصة بمهمات الأبحاث الفضائية

تشمل العوامل التي تؤثر في مدى ملاءمة ترددات معينة لمهمات الأبحاث الفضائية متطلبات المهمات، وتوافر الأجهزة والتكلفة، وتأثيرات الانتشار والإشعاع، وأداء الوصلات، وتوزيعات التردد القائمة. وتُستخدم متطلبات المهمات الآخذة في التطور وتأثيراتها المادية في تحديد متطلبات التوزيعات الجديدة لترددات الأبحاث الفضائية.

1.3 الاعتبارات المتعلقة بالمهمات

تتطلب مهمات الأبحاث الفضائية أنماطاً مختلفة من البيانات لدعم وظائف التحكم والقياس عن بُعد والتتبّع. وتعتبر بيانات الصوت والفيديو في الوقت الفعلي ضرورية للمهمات المأهولة. ويُعدد إرسال هذه المتطلبات عادة في تردد موجة حاملة وحيدة لتحقيق الكفاءة في استخدام الطيف.

وتسمح توزيعات الترددات العالية عموماً بتوزيعات لعروض نطاق أوسع بسمح دعم متطلبات بيانات بمعدلات أعلى واتصالات فيديوية واستخدام مخططات تشفير أكثر تعقيداً من أجل خفض معدلات الخطأ وتخفيف التعرض للتداخل بشكل فعّال.

ويمكن أن يعاد استعمال الترددات إذا كان الانحراف الزاوي للمركبة الفضائية واسعاً بدرجة كافية. ومع ذلك، تحتاج المركبات الفضائية إلى ترددات مختلفة إذا كانت خصائصها المدارية ومتطلبات الإرسال الخاصة بها على نحو قد يؤدي إلى تعرضها للتداخل.

وتتطلب الدقة في التتبع أن تكون الترددات لإشارات التتبّع أرض–فضاء وفضاء–أرض مترابطة بشكل متسق بواسطة نسبة تحول (ذهاب وإياب) مناسبة. ويتحقق هذا الشرط عن طريق التأكد من أن مدى التباعد بين تردد الوصلة الأمامية وتردد وصلة العودة يتراوح بين 6 و10 في المائة من التردد الأعلى.

وتعتمد نطاقات التردد المخصصة للاستشعار النشط والمنفعل على المعلومات الخاصة التي يتم الحصول عليها فيما يتعلق بخصائص الجسم وبيئة الفضاء، أو على الظاهرة المعينة التي تجري دراستها في الفضاء. وتكون نطاقات التردد التي يقع الاختيار عليها هي تلك التي يحدد علم الفيزياء بأنها الترددات النطاقات المثلى للتحقيقات العلمية. وبدورها فإن عروض النطاقات هي التي تحدد الاستبانة والدقة اللتين يمكن الحصول عليهما.

وتتطلب مهمات الفضاء السحيق إجراء اتصالات عبر مسافات طويلة للغاية ينتج عنها إشارات ضعيفة جداً في أجهزة الاستقبال. وبالتالي فإن حساسية أجهزة الاستقبال الخاصة بمهمات الفضاء السحيق تجعلها عرضة بدرجة كبيرة للتداخل الناجم عن البث غير المطلوب. وعليه، فمن أجل تفادي التداخل المحتمل، ينبغي أن لا توزع الترددات المخصصة لأبحاث الفضاء السحيق على أنشطة الأبحاث الفضائية القريبة من الأرض. ويستثنى من ذلك المهمات التي تجري بين الكواكب والتي يجب أن تعمل في مسارات تشمل كلاً من مسافات الفضاء القريب من الأرض ومسافات الفضاء السحيق، من قبيل مهمات الاستكشاف البشري للكواكب والمهمات التي تقتضي جلب عيّنات من الكواكب إلى الأرض. فهذه المهمات تعمل على النحو الأفضل في توزيعات التردد الخاصة بالأبحاث الفضائية والواقعة بين 37 و40 GHz.

2.3 الاعتبارات المتعلقة بالأجهزة

تؤثر العوامل المتعلقة بالأجهزة التي تعتمد على التردد بشكل مباشر على أداء الوصلة، مثل كسب الهوائي والكفاءة ودقة التسديد، أو لا تؤثر بشكل مباشر على أداء الوصلة ومع ذلك يجب أخذها في الاعتبار لدى اختيار الترددات. وفيما يتعلق بعمليات الإرسال والاستقبال المتزامنة التي تتضمن هوائيات وحيدة، ينبغي فصل النطاقات المتزاوجة من الأرض إلى الفضاء ومن الفضاء إلى الأرض بنسبة 6-7 في المائة من التردد العالي للمهمات القريبة من الأرض وبنسبة 8-20 في المائة من التردد العالي لمهمات الفضاء السحيق.

ويكون حجم هوائي المركبة الفضائية محدوداً بسبب اعتبارات تتعلق بالحيز والوزن، ومدى تطور تكنولوجيا الهوائيات الكبيرة القابلة للنشر، ومقدرة الساتل على توجيه الهوائي بالدقة المطلوبة. ويعتبر نطاق الترددات من 100 MHz إلى 1 GHz مناسباً للمركبات الفضائية التي تكون مخططات هوائياتها عريضة أو شاملة الاتجاهات وتتطلب عرض نطاق ضيق وللمحطات الأرضية البسيطة التي تخلو من المرافق اللازمة لتتبع الهوائيات. أما في المدى 1-10 GHz، فإن هوائيات المركبات الفضائية تتميز بكسب يتوافق مع متطلبات ثبات الارتفاع وتوجيه الحزمة. كما يمكن تلبية الشروط المتعلقة بالسطح ودقة التوجيه اللازمة للمحطات الأرضية الكبيرة ضمن هذا النطاق الذي يناسب أيضاً أنظمة التتبع الدقيق والاتصالات عريضة النطاق.

وقد يشكل توافر المعدات المؤهلة للعمل في الفضاء عاملاً مقيّداً في استخدام الترددات العالية. وقد تم حالياً تطوير معدات لأبحاث الفضاء بلغت مرحلة كافية من النضج لكي تعمل عند توزيعات التردد 2 GHz و8/7 GHz التي تعتبر أساسية لتأمين وصلات تتحمل ظروف الأحوال الجوية. كما تعتبر هذه المعدات جذّابة ومتوفرة بسهولة للمهمات/المشاريع الصغيرة التي تتطلب بيانات بمعدلات منخفضة وتواجه ضغوطاً في الميزانية. أما المعدات الخاصة بتوزيعات الترددات 34/32/27 GHz التي توفر ميزة عروض النطاق الأوسع للمركبات الفضائية القريبة من الأرض وتلك الخاصة بالفضاء السحيق فهي آخذة بالتطور والاكتمال.

وعادة ما تكون هوائيات المحطات الأرضية المتعلقة بمهمات الفضاء السحيق عبارة عن هوائيات مكافئية كبيرة قابلة للتوجيه ومكلفة للغاية ولذلك لا يتم إنشاؤها إلا نادراً. ونتيجة لذلك، لا يتوفر لمهمات الفضاء السحيق سوى مجموعة صغيرة من الهوائيات الكبيرة ذات القطر الثابت.

3.3 تأثيرات الانتشار والإشعاع

يجب على وصلات الاتصالات القائمة بين المحطات الأرضية وسواتل الأبحاث الفضائية أن تمر عبر الغلاف الجوي للأرض حيث يؤثر الامتصاص وتهاطل الأمطار والانتثار على انتشار الإشارات الراديوية ويحد من استخدام عدد من نطاقات التردد. فالهواطل، ولا سيّما الأمطار، تتسبب في امتصاص وانتثار الموجات الراديوية الأمر الذي قد ينتج عنه توهين شديد للإشارات. وبالنسبة لجميع معدلات هطول المطر، تتزايد شدة التوهين بسرعة حتى 100 GHz تقريباً، وبعد ذلك لا يرتفع معدل التوهين بشكل ملحوظ كدالّة في التردد. وبالنسبة للبلدان التي تقع في مناطق تشهد معدلات أمطار مرتفعة، يعتبر اختيار الترددات المناسبة حاسم الأهمية إذ ما أرادت هذه البلدان أن تحافظ على جودة أداء عالية في ظل ظروف الطقس السيئة.

ويعود الامتصاص الجزيئي بالدرجة الأولى إلى بخار الماء والأكسجين في الجو. وفي حالة انعدام بخار الماء، يمكن للغازات النزرة أن تسهم أيضاً في إحداث توهين كبير عند الترددات التي تزيد على حوالي 70 GHz. ويتميز بخار الماء بخطوط امتصاص تتمركز عند الترددات 22,235 GHz و183,3 GHz وحوالي 325 GHz. أما الأكسجين فيتميز بسلسلة من خطوط الامتصاص تمتد من 53,5 إلى 65,2 GHz إضافة إلى خط منعزل يتمركز حول التردد 118,74 GHz. وقد يكون من المستصوب في المستقبل استخدام محطات ترحيل مستقرة بالنسبة إلى الأرض تعمل عند ترددات كتيمة نسبياً لإرسالات الإشارات الراديوية عبر الغلاف الجوي للأرض، مما يحد من التداخل الذي تسببه المحطات الأرضية في محطات الترحيل والمركبة الفضائية.

وتعتبر درجة حرارة ضوضاء السماء كما يلتقطها هوائي المحطة الأرضية دالّة في التردد وزاوية ارتفاع الهوائي والأحوال الجوية. فعند الترددات التي تزيد على 4 GHz تقريباً، يمكن أن تسبب الهواطل زيادة في ضوضاء السماء التي تكون في العادة أكبر بعدة مرات من درجة حرارة ضوضاء جهاز الاستقبال. أما درجة حرارة ضوضاء السماء التي تلتقطها المركبة الفضائية فتحددها بصورة أساسية الأجرام السماوية كالأقمار والكواكب التي تؤمن الخلفية لمعظم مهمات الأبحاث الفضائية. فالشمس، التي تبلغ درجة حرارة إشعاع الجسم الأسود الخاص بها 6000 K، تعمل على زيادة درجة حرارة ضوضاء النظام إلى حد كبير وبالتالي يتم تجنب الإرسالات التي تتطلب أن يكون هوائي الاستقبال موجهاً نحو نقطة على الشمس أو على مقربة منها. وتتراوح درجات حرارة إشعاع الجسم الأسود الخاص بالقمر والكواكب من حوالي 50-700 K (تساوي للأرض 290 K). وفيما يتعلق بالكثير من المهمات القريبة من الأرض، تكون الأرض عموماً ضمن الفص الرئيسي لهوائي المركبة الفضائية أو هوائي ساتل ترحيل البيانات وتسهم في درجة الحرارة الكلية لنظام الاستقبال. أما درجة حرارة ضوضاء النظام لمركبة فضائية نموذجية فتتراوح بين 600 و500 1 K.

وعند الترددات التي تقل عن 100 MHz، لا تؤخذ في الاعتبار عموماً الخيارات الطيفية المتعلقة بالأبحاث الفضائية لأن التأثيرات الأيونوسفيرية والضوضاء الكونية والاصطناعية تخفّف من استعمال الترددات في هذا النطاق. وفي النطاق الذي يتراوح بين 100 MHz و1 GHz، يكون الامتصاص الجوي متدنياً وتأثير الطقس على انتشار الإشارة ضعيفاً جداً. ومع ذلك تكون ضوضاء الخلفية مرتفعة نسبياً وتتزايد على أساس $1/f^2$، وبالتالي فإن استخدام أجهزة الاستقبال المنخفضة الضوضاء لا يوفر تحسناً كبيراً في الأداء ضمن هذا النطاق. وفي مدى الترددات الممتد من 1 إلى 10 GHz فإن تأثيرات الطقس تكون ضئيلة جداً وخاصة عند الحد الأدنى للنطاق مما يسمح باتصالات لا تعتمد أساساً على ظروف الطقس. وتكون كل من ضوضاء المجرّة والضوضاء الجوية متدنية مما يسمح باستخدام أجهزة استقبال منخفضة الضوضاء. أما عند الترددات التي تزيد على 10 GHz وتصل إلى 275 GHz، فإن انتشار الإشارات عبر الغلاف الجوي يكون معرضاً لتوهين كبير ينجم بصورة أساسية عن الهواطل والامتصاص الغازي. ويمكن أن يكون لهذين الظرفين تأثير كبير على مسيرات الاتصالات من الأرض إلى الفضاء.

وبما أن مهمات الفضاء السحيق تعمل عبر مسافات شاسعة، فإن معايرة تأثيرات الجسيمات المشحونة على سرعة الانتشار تتطلب الاستعمال المتزامن لترددات متسقة في نطاقين أو أكثر من نطاقات الترددات المتباعدة. وتعتمد الملاحة الدقيقة على تحديد موضع المركبة الفضائية وسرعتها بواسطة قياسات الطور وقياسات تأخر الزمرة للإشارات المستقبَلة. وتؤثر سرعة الانتشار في هذه القياسات التي تكون دالّة في وجود جسيمات مشحونة على امتداد مسير الإرسال. ويتباين تأثير هذه الجسيمات تبايناً عكسياً مع مربع التردد وبالتالي يُفضّل استعمال ترددات أعلى لأغراض الملاحة. وتتطلب الدقة اللازمة لقياس تأخر الزمرة استخداماً متزامناً للوصلات عند نطاقي تردد متباعدين على الأقل، ويُفضل أن لا يكون الاختلاف بين ترديهما أربعة أضعاف على الأقل. ويكون تأخر الزمرة بين الوصلات مختلفاً علماً بأنه يمكن استخدام هذا الفرق في حساب تصحيح مناسب للتأخر في كل وصلة.

وفيما يتعلق بالأنظمة التي تعمل على ترددات تفوق 200 THz عبر مسير جوي، فإن الاعتبارات الأولية هي الانتثار والانكسار والاضطرابات الجوية. وقد تؤدي هذه التأثيرات إلى توهين كلي للإشارة و/أو إلى خفض اتساق صدر الموجة و/أو إلى تغييرات في اتجاه الإشارة المرسلة.

ويمكن الاطلاع على مزيد من المعلومات بشأن تأثيرات الانتشار عبر الغلاف الجوي للأرض على الموجات الراديوية وكذلك على الإشارات التي تزيد ترددها على 20 THz في سلسلة التوصيات ITU-R P بشأن انتشار الموجات الراديوية.

4.3 الاعتبارات المتعلقة بأداء الوصلات

تعتبر موثوقية الوصلة شرطاً هاماً لنجاح المهمة. وتقتضي العمليات الحرجة كالإطلاق وعمليات الطوارئ حين يتعذر ضمان توجيه المركبة الفضائية وجود وصلات موثوقة إلى حد كبير. وتتسم الموثوقية بأهمية قصوى في جميع الاعتبارات المتعلقة بالمهمات المأهولة. وتوفر توزيعات الترددات للأبحاث الفضائية في النطاق 2 GHz وصلة موثوقة لمهمات الأبحاث الفضائية لا ترتهن بظروف الطقس وتُستخدم لتنفيذ هذه الوظائف الحاسمة الأهمية.

ويعتمد تحديد نطاقات التردد التي توفر الأداء الأفضل لوصلات اتصالات الأبحاث الفضائية ووصلات التتبع على مراعاة تأثير معلمات الانتشار القائمة على التردد وخصائص التجهيزات في تحليل أداء الوصلة. وهناك مؤشر ملائم على أداء الوصلة يتمثل في النسبة بين قدرة الإشارة المستقبَلة وبين نسبة الكثافة الطيفية لقدرة الضوضاء P_r/N_0. وتسهم المنحنيات الإعلامية المستمدة من تحليلات أداء الوصلات في تحديد نطاقات التردد التي توفر الأداء الأمثل لأوضاع المهمة المقترحة. وتعمل الافتراضات المختلفة بشأن مسافة الاتصال وخصائص الهوائي وقدرة جهاز الإرسال على تغيير القيم المطلقة للنسبة P_r/N_0 دون أن تغير شكل المنحنيات. ويعرّف نطاق التردد المفضّل بأنه النطاق الذي يوفر أعلى قيمة للنسبة P_r/N_0 المتعلقة بنظام معين وبمجموعة من ظروف الانتشار.

5.3 توزيعات التردد في خدمة الأبحاث الفضائية

استُحدثت توزيعات نطاقات التردد المتعلقة بالأبحاث الفضائية أثناء الدورة العادية للمؤتمر الإداري للراديو التي انعقدت عام 1959 في جنيف، حين وضعت توزيعات مؤقتة لعمليات الإرسال بين الأرض وأقمار الأرض الاصطناعية في النطاقين 136-137 MHz و290 2-300 2 MHz. وفي عام 1963، قام المؤتمر الإداري الاستثنائي للراديو بتحصين هذين التوزيعين لأبحاث الفضاء وجعلهما أساسيين ومعادلين لخدمات أخرى وحصريين في الإقليم 2 للاتحاد. ومنذ ذلك الوقت، استدعت التطورات الحاصلة في تكنولوجيا الأبحاث الفضائية والاتصالات والطلب على تلبية المتطلبات المتزايدة للبيانات توزيع نطاقات إضافية تفي بالاحتياجات المتنامية لخدمة الأبحاث الفضائية.

ويمكن الاطلاع على نطاقات التردد المفضلة لخدمة الأبحاث الفضائية في التوصيات والتقارير التالية لقطاع الاتصالات الراديوية:

- التوصية ITU-R SA.363 – أنظمة التشغيل الفضائي. الترددات وعروض النطاق ومعايير الحماية.
- التوصية ITU-R SA.364 – الترددات وعروض النطاق المفضلة للسواتل المأهولة وغير المأهولة لخدمة الأبحاث الفضائية بالقرب من الأرض.
- التوصية ITU-R SA.1019 – نطاقات الترددات المفضلة واتجاهات البث بالأنظمة الساتلية لترحيل البيانات.
- التوصية ITU-R SA.1344 – نطاقات التردد وعروض النطاقات المفضلة لإرسال بيانات القياس التداخلي الفضائي ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI).
- التوصية ITU-R SA.1863 – الاتصالات الراديوية المستعملة لأغراض الطوارئ في الرحلات الفضائية المأهولة.
- التقرير ITU-R SA.2177 – اختيار نطاقات التردد في المدى 1-120 GHz من أجل أبحاث الفضاء السحيق.

ويقدم الملحق 2 جدولاً شاملاً لاستخدامات خدمة الأبحاث الفضائية والحدود المقابلة لكثافة تدفق القدرة (pfd).

الفصل 4

معايير الحماية لخدمة الأبحاث الفضائية والاعتبارات المتعلقة بتقاسم الترددات

يعتبر تقاسم الترددات بين خدمة الأبحاث الفضائية والخدمات الأخرى ضرورياً حين تُوزع النطاقات بشكل مشترك على خدمات متعددة. ويمكن التخفيف من التداخل بين الأنظمة استناداً إلى شروط التقاسم التي توضع نتيجة تحليل يُنجز لكلتا الخدمتين. وقد حددت معايير الحماية لخدمة الأبحاث الفضائية من أجل تيسير تحليل التداخل عندما تكون البيانات الخاصة بنظام معين غير متاحة.

1.4 الاعتبارات المتعلقة بتداخل خدمة الأبحاث الفضائية

قد لا يؤدي التداخل الذي تتعرض له مهمات الأبحاث الفضائية إلى خفض البيانات أو انقطاعها أو فقدانها بصورة نهائية فحسب، وإنما يؤدي أيضاً إلى فقدان القدرة على الملاحة والتحكم في المركبة الفضائية. ويحدث ذلك حين تضيع الأوامر الموجهة أثناء مراحل هامة من المهمة وحين تتعرض القياسات الهامة عن بُعد في الوقت الفعلي للانقطاع. وقد يتسبب التداخل الذي تتعرض له قناة تحديد المدى بحدوث أخطاء في ملاحة المركبة الفضائية. أما التداخل الذي تتعرض له التجارب الراديوية العلمية، حتى ولو كان متدنياً بقدر مستوى الضوضاء الطيفية، فقد يضر بالبيانات العلمية لأن التداخل يعمل على تغيير الإشارة الفعلية التي يجري استقصاؤها. وإذا أمكن الكشف عن التداخل، يمكن عادة تجاهل البيانات العلمية المتضررة. ومع ذلك فإن أسوأ حالة هي تلك التي لا يمكن فيها الكشف عن التداخل بسبب استخدام البيانات العلمية التالفة في الدراسات وكأنها استخرجت من حالات لم تتعرض للتداخل.

وبما أن جميع مهمات الأبحاث الفضائية تتقاسم المجموعة ذاتها من الترددات الراديوية وعروض النطاقات التي وزعها الاتحاد الدولي للاتصالات، فقد يحدث أحياناً أن تتعرض إحدى المهمات إلى تداخل ناجم عن مهمات أخرى. وقد يحدث التداخل حين تتلقى المركبة الفضائية المتضررة إشارة مسبّبة للتداخل من مركبة فضائية تابعة لمهمة أبحاث فضائية أخرى أقرب إلى الأرض، أو حين تكون مركبة فضائية التابعة لمهمة مختلفة واقعة ضمن نطاق عرض الحزمة الخاصة بمحطة إرسال/استقبال أرضية أو بنظام ترحيل من الفضاء إلى الفضاء. فالديناميات المدارية لتشكيلة التداخل هي التي تفرض فترة التداخل ومستواه. فإن كانت مركبة فضائية واحدة أو اثنتان على مقربة من المحطة الأرضية المتضررة، تكون فترة التداخل قصيرة نسبياً. ومع ذلك، وفي الحالة التي تكون فيها المركبتان الفضائيتان بعيدتين نسبياً، كما هو الحال في مهمات الفضاء السحيق، فقد يستمر التداخل طيلة فترة الإرسال.

ومن المعدات الأكثر عرضة للتداخل عروة تتبع الموجة الحاملة ومضخم الميزر الأولي المستخدم في مهمات الفضاء السحيق والكثير من مهمات الفضاء القريبة من الأرض. وتستخدم العرى محكمة الطور بشكل كبير في أنظمة اتصالات الأبحاث الفضائية. وقد يحتوي جهاز استقبال نمطي على العديد من العرى المتزامنة المحكمة الطور التي أعدَّ كل منها للإحكام على مكون إشارة معين وتتبعه. ويحتمل أن يؤدي وجود إشارة قوية مسبّبة للتداخل إلى فقدان إحكام عروة أو أكثر على الإشارة المرجوة مما يسبب قطع الاتصالات. كما أن هذا التداخل قد يسبب مشكلات كبيرة لأجهزة الاستقبال التي يتعين عليها استعادة أو إعادة توليد ترددات الموجة الحاملة من الإشارات المستقبَلة. وقد يكون التداخل لحظياً وناجماً عن مسح الإشارة المسببة للتداخل لكامل عرض نطاق العروة، أو قد يستمر لدقائق. وحين يؤدي التداخل إلى فقدان الإحكام على الموجة الحاملة، فإن إعادة حيازة الإشارة المطلوبة واستعادة الإحكام عليها يستغرق في هذا التصور عدة دقائق. وقد تستغرق عملية فقدان الإحكام والاستعادة اللاحقة للإشارة المطلوبة مدة أطول من مدة التداخل. وقد ينجم عن التداخل أثناء مرور مهمة قريبة من الأرض فوق محطة أرضية إلى فقدان جزء كبير من عملية المرور.

وقد تؤدي إشارة قوية مسببة للتداخل إلى إحكام جهاز الاستقبال على إشارة التداخل بدلاً من الإشارة المطلوبة. وتؤدي مستويات التداخل ذات القدرة الضعيفة إلى المتوسطة، سواء كانت ثابتة أم ماسحة، إلى زيادة الخطأ في الطور السكوني وارتعاش طور عروة تتبع الموجة الحاملة.

وتعود الحساسية الرئيسية لمضخم الميزر الأولي للتداخل إلى إشارات قوية ذات تردد يقع في نطاق تمرير الميزر أو قرب ترددات الشاغرة. وتؤثر إشارات التداخل القوية في تشغيل الميزر من خلال تشبّع المضخم الأولي ودفع إحدى مكوناته أو أكثر باتجاه مناطق التشغيل غير الخطية. ويؤدي ذلك إلى انضغاط في الكسب وتوليد لتوافقيات وإشارات هامشية ونواتج تشكيل بيني.

ويمثل احتمال حدوث تداخل ضار ناجم عن البث غير المطلوب قضية تؤثر في جميع الخدمات. ويعتبر البث الهامشي أحد أشكال التداخل الضار المحتمل الذي قد يمثل إحدى المسائل التي تثير قلقاً خاصاً بالنسبة لأجهزة البث المحمولة في الفضاء. وينسب البث الهامشي إلى توافقيات الإشارة المتولدة عن تأثيرات عمليات التشكيل البيني في جهاز الإرسال. وهو من المسائل التي تثير قلقاً خاصاً نظراً للأجزاء الكبيرة من الطيف التي يمكن أن تتأثر بعمليات البث هذه واستحالة ضبط جهاز الإرسال أو إجراء تعديلات عليه بعد إطلاق المركبة الفضائية.

ومن العواقب المترتبة على استخدام أجهزة استقبال حساسة في المركبة الفضائية، وخاصة تلك المستخدمة في الفضاء السحيق، احتمال تعرضها لأي نوع من أنواع التداخل سواء كان متولداً داخل النطاقات الموزعة على الأبحاث الفضائية أو خارجها. فقد يتسبب المرسل في نطاق تردد مجاور لنطاقات التردد الموزعة على الأبحاث الفضائية بمستويات من التداخل في نطاق الأبحاث الفضائية تتجاوز معايير الحماية. ويمكن استعمال النطاقات الحارسة والترشيح عند حافة النطاق للإشارة المرسلة والمستقبَلة من أجل الحد من التداخل الناجم عن عمليات البث خارج النطاق. ومع ذلك لا توجد عادة أحكام في لوائح الراديو للاتحاد تنص على أمور تتعلق بالنطاقات الحارسة.

2.4 معايير الحماية لخدمة الأبحاث الفضائية

إن معايير الحماية للأبحاث الفضائية موثّقة بشكل جيد في التوصيات التالية لقطاع الاتصالات الراديوية:

- التوصية ITU-R SA.363 – أنظمة التشغيل الفضائي. الترددات وعروض النطاق ومعايير الحماية
- التوصية ITU-R SA.609 – معايير الحماية لوصلات الاتصالات بسواتل الأبحاث المأهولة وغير المأهولة القريبة من الأرض
- التوصية ITU-R SA.1155 – معايير الحماية الخاصة بتشغيل الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات
- التوصية ITU-R SA.1157 – معايير الحماية بشأن أبحاث الفضاء السحيق
- التوصية ITU-R SA.1396 – معايير الحماية في خدمة الأبحاث الفضائية العاملة في النطاقين 37-38 و40-40,5 GHz
- التوصية ITU-R SA.1743 – الحد الأقصى المسموح به من الانحطاط في وصلات الاتصالات الراديوية في الأبحاث الفضائية وخدمات العمليات الفضائية الناجم عن التداخل من الإرسالات والإشعاعات من مصادر راديوية أخرى

ويمكن التشاور بشأن هذه التوصيات في أي دراسة تتناول التداخل/التقاسم.

3.4 الاعتبارات المتعلقة بالتقاسم في خدمة الأبحاث الفضائية

يتسم التقاسم بين خدمة الأبحاث الفضائية والخدمات الأخرى بالتعقيد لأسباب عديدة. والسبب الرئيسي في ذلك هو الطبيعة الدينامية التي تتسم بها بيئة التداخل. فحركة المركبة الفضائية بالنسبة إلى المركبات الفضائية الأخرى وإلى سطح الأرض تؤدي إلى عوامل دائمة التغير مثل اقتران الهوائي ومستويات القدرة المستقبَلة. وتفاوت الحركات النسبية والتغيرات المترتبة على ذلك في وصلات الاتصالات من الكبيرة إلى الصغيرة وقد يكون لها تأثير كبير على مستوى التداخل ومدته واحتمال حدوثه.

ثانياً، تتباين خصائص نظام الاتصالات القريبة من الأرض واتصالات الفضاء السحيق تبايناً كبيراً وتعتمد على عدد من العوامل من قبيل متطلبات المهمة والخصائص المدارية والتطور التقني للمركبة الفضائية والضغوط المتعلقة بالميزانية.

ففيما يتعلق بالمهمات القريبة من الأرض، يشكل توزيع وتركيز أجهزة الإرسال الأرضية عاملاً هاماً في الاعتبارات المتعلقة بالتداخل، رهناً بارتفاع المركبة الفضائية والخصائص المدارية، وقد يكون لهما تأثير ملحوظ جداً في بيئة التقاسم. وتتمثل نتيجة هذه الاعتبارات في أن عمليات تحديد التداخل والتقاسم التي تشترك فيها مهمات الأبحاث الفضائية القريبة من الأرض تستند في العادة إلى تحليلات إحصائية تأخذ في الحسبان ديناميات المركبة الفضائية المتحركة. وحالياً تستخدم أوساط خدمة الأبحاث الفضائية برامج حاسوبية متطورة قادرة على التعامل مع تعدد المتغيرات وخصائص الاتصالات بغية إجراء تقدير دقيق لإمكانية تقاسم نطاقات التردد مع خدمات أخرى.

وتتناول التوصية ITU-R SA.1016 الجدوى من تقاسم الترددات بين محطات أبحاث الفضاء السحيق والمحطات التابعة لخدمات أخرى.

وهناك عدد من توصيات قطاع الاتصالات الراديوية التي تحدد سيناريو التقاسم بالقرب من التردد 2 GHz. فالتوصية ITU-R SA.1273 تضع الحدود القصوى لكثافة تدفق القدرة في النطاق 200 2-290 2 MHz الناتجة عند سطح الأرض بواسطة عمليات البث من محطة فضائية تعمل في الاتجاه فضاء–أرض، بما في ذلك الوصلات بين المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض وسواتل ترحيل البيانات. وتوصي التوصية المصاحبة ITU-R SA.1274 بوجود مستوى لكثافة قدرة التداخل المجمعة من أجل حماية وصلات المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض وسواتل ترحيل البيانات. وترد في التوصية ITU-R SA.1154 الأحكام المتعلقة بتقاسم نطاقات الترددات 2 GHz بين وصلات المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض وسواتل ترحيل البيانات والأنظمة المتنقلة. أما التوصية ITU-R F.1248 فتعين الحدود العملية للقدرة المشعة المكافئة المتناحية والكثافة الطيفية المشعة من محطات الخدمة الثابتة باتجاه سواتل ترحيل البيانات، في حين تحدد التوصية ITU-R SA.1275 المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات الواجب حمايتها من عمليات بث الخدمة الثابتة في هذا النطاق.

وفي النطاق 27,5-25,25 GHz، لا يُحتمل حدوث تداخل ناجم عن مركبة فضائية للأبحاث الفضائية في المدار الأرضي المنخفض في سواتل الخدمة الثابتة الساتلية في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GSO-FSS) لأن القدرة المشعة المكافئة المتناحية الصادرة عن المركبة الفضائية لأبحاث الفضاء تكون أدنى بكثير من تلك الخاصة بالمحطات الأرضية للخدمة الثابتة الساتلية. ويكون التداخل الذي تسببه الخدمة الثابتة الساتلية في ساتل ترحيل البيانات ممكناً. وحين يقوم ساتل ترحيل البيانات بتتبع مركبة فضائية، يؤدي الاقتران بين هوائي ساتل ترحيل البيانات وهوائي المحطات الأرضية للخدمة الثابتة الساتلية إلى نشوء تداخل ضار في جهاز استقبال ساتل ترحيل البيانات. ومع أن حزم الهوائيات تكون ضيقة نسبياً عند هذا التردد، فإن التداخل الذي قد يحدث مع المحطات الأرضية الموجودة على حافة الأرض كما يلتقطه ساتل ترحيل البيانات قد يستغرق فترة زمنية طويلة نسبياً. وتقدم التوصية ITU-R F.1249 الحدود العملية للقدرة المشعة المكافئة المتناحية والكثافة الطيفية التي تشعها محطات الخدمة الثابتة باتجاه سواتل ترحيل البيانات. وتحدد التوصية ITU-R SA.1276 المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات الواجب حمايتها من التداخل.

وتتناول التوصية ITU-R SA.1862 المبادئ التوجيهية للاستخدام الكفوء للنطاق 27,0-25,5 GHz، في حين تتناول التوصية ITU-R SA.1626 جدوى التقاسم في النطاق 15,0-14,8 GHz. وتتناول التوصية ITU-R SA.1810 المبادئ التوجيهية لسواتل استكشاف الأرض العاملة في النطاق 025 8-400 8 MHz، فيما تتناول التوصية ITU-R SA.1629 مسألة تقاسم وصلات التحكم في النطاق 257-262 MHz.

1.3.4 التداخل الناجم عن المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية

يمثل التداخل الذي تسببه المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية في مركبة فضائية تدور في مدار غير مستقر بالنسبة إلى الأرض حالة دينامية تتوقف على خصائص تتغير مع الوقت. وتشمل هذه الخصائص الوقت الذي تبقى فيه المركبة الفضائية المتضررة داخل حزمة هوائي المحطة الأرضية، وخصائص التوجيه في محطة الاستقبال الأرضية أثناء تتبعها للمركبة الفضائية للأبحاث الفضائية وتواصلها معها، وكذلك خصائص توجيه هوائي المركبة الفضائية في الحالة التي تستخدم فيها المركبة الفضائية المتضررة هوائيات اتجاهية. وهناك عوامل من قبيل تردد التشغيل ونوع الهوائي وحجمه وعرض حزمته وما إلى ذلك، تشكل اعتبارات إضافية تستخدم في تحديد مدة ومستوى قدرة التداخل الذي يتعرض له جهاز استقبال المركبة الفضائية المتضررة.

ويخضع التداخل الذي تسببه المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية في المحطات الأرضية الثابتة والمتنقلة للأحكام الواردة في لوائح الراديو. فتحدد المادة **9** الإجراء المتبع للتنسيق مع الإدارات الأخرى أو الحصول على موافقة منها، وتتناول المادة **21** تقاسم الخدمات الأرضية والفضائية لنطاقات تردد تزيد على GHz 1. ويعرض التذييل **7** الأسلوب المتبع في تحديد منطقة التنسيق حول محطة أرضية في نطاقات التردد الواقعة بين MHz 100 وGHz 105 التي يتم تقاسمها بين خدمات الاتصالات الراديوية الفضائية والأرضية.

ويعمل التباعد المناسب على المدار المستقر بالنسبة إلى لأرض وعروض حزم الهوائي الضيقة واتجاهات التسديد على التخفيف من حدة التداخل بين وصلات سواتل ترحيل البيانات من الأرض إلى الفضاء والسواتل الأخرى المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ويقدم التذييل **8** للوائح الراديو طريقة الحساب المتبعة للبت بشأن ما إذا كان التنسيق لازماً بين الشبكات الساتلية المستقرة بالنسبة إلى الأرض التي تتقاسم عرض النطاق نفسه. وتحدد المادة **21** من لوائح الراديو القيود المفروضة على مستويات القدرة المشعة المكافئة المتناحية للمحطات الأرضية، بما في ذلك تلك المستخدمة في الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات، التي توفر الحماية للأنظمة الثابتة والمتنقلة.

2.3.4 التداخل الذي تتعرض له المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية

قد لا تتعرض المركبة الفضائية التي تعمل في مدار أرضي منخفض عموماً لأي تداخل من سواتل المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض في الخدمة الساتلية الثابتة أو المتنقلة بسبب قصر المسافة بين المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية ومحطتها الأرضية قياساً بالمسافة الكبيرة بين المحطة الأرضية للأبحاث الفضائية وساتل المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، وبسبب ارتفاع القدرة المشعة المكافئة المتناحية للمحطة الأرضية للأبحاث الفضائية واتجاهية جميع الهوائيات المتضمنة. ومع ذلك يُحتمل أن تتلقى المحطة الأرضية للأبحاث الفضائية تداخلاً من أنظمة ساتلية في المدار غير المستقر بالنسبة إلى الأرض في الخدمات الساتلية الثابتة والمتنقلة. بيد أن المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية العاملة في مدار أرضي متوسط أو أعلى والتي تكون أقرب إلى سواتل المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض قد تتعرض إلى تداخل غير مقبول من سواتل الخدمة الساتلية الثابتة أو المتنقلة. وقد يشكل عدد سواتل الإرسال وقربها مصدر تداخل بالنسبة لمركبة استقبال فضائية في الأبحاث الفضائية.

وفيما يتعلق بالمركبة الفضائية للأبحاث الفضائية التي تعمل في مدار يتجاوز المدار المتزامن مع الأرض أو في الفضاء السحيق، لا يتوقع حدوث تداخل من سواتل الخدمات الساتلية الثابتة أو المتنقلة.

وتتناول المادتان **9** و**21** من لوائح الراديو التحكم بالتداخل الذي تسببه المحطات الأرضية في المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية. واحتمال حدوث تداخل من الأنظمة الثابتة موجود فعلاً. ومع مراعاة ديناميات وضع التداخل، ونشر الأنظمة الثابتة، والقيود المتعلقة بالتسديد المنطبقة على محطات الإرسال الأرضية، يتعين أن يكون مستوى التداخل بحده الأدنى. وقد يكون للزيادة في استخدام أنظمة الخدمة الثابتة للتطبيقات من نقطة إلى عدة نقاط تأثير كبير على التقاسم مع خدمة الأبحاث الفضائية.

3.3.4 التداخل الناجم عن المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية

يتم التحكم عموماً بالتداخل الذي تتعرض له المحطات الأرضية من خلال وضع حدود مناسبة لكثافة تدفق القدرة تنطبق على المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية. وترد حدود كثافة تدفق القدرة هذه في المادة **21** من لوائح الراديو. ولا توجد حدود لكثافة تدفق القدرة في نطاقات التردد MHz 138-137 وMHz 143,65-143,6 وMHz 401-400,15. وتستخدم المركبة الفضائية للأبحاث الفضائية هوائيات شاملة الاتجاهات لإرسال الإشارات إلى هوائيات محطات الاستقبال الأرضية التي تكون كبيرة نسبياً وذات كسب أعلى من كسب الهوائيات المستخدمة في الخدمات الثابتة والمتنقلة. ويؤدي كلّ من الكسب التفاضلي للهوائيات ذات الصلة وقرب هوائيات الإرسال والاستقبال في الخدمة الثابتة/المتنقلة من بعضها البعض على التقليل إلى الحد الأدنى من التداخل المحتمل الذي قد يحدث أثناء عمليات الإرسال المتعلقة بالأبحاث الفضائية وتحديداً عند حافة الأرض.

ويجري إلى حد كبير التقليل من مستوى ومدة أي تداخل تتعرض له المحطات الأرضية للخدمة الساتلية للأرصاد الجوية عن طريق استخدام هذه المحطات لهوائيات كبيرة، ومتطلبات التتبع الخاصة بها، والنشر المكاني لكل من المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية والمحطات الأرضية الساتلية للأرصاد الجوية.

وبسبب اقتران الفصوص الجانبية للهوائيات، لا يتوقع أن تسبب الوصلات فضاء–أرض لساتل ترحيل البيانات تداخلاً في وصلات نظام الخدمة الثابتة الساتلية في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GSO-FSS). فسواتل GSO-FSS الموجودة في نقاط مقابلة قطرياً لسواتل ترحيل البيانات لن تتعرض لأي تداخل ضار بسبب المسافة والعوامل المتعلقة باقتران الهوائيات. وستؤدي عوامل من قبيل الحزم الضيقة للهوائي واقتران الهوائي، وقرب الساتل المتنقل من محطة الإرسال الأرضية الخاصة به، والديناميات المدارية لحالة التداخل، إلى حدوث القليل من التداخل الضار أو عدم حدوثه في السواتل المتنقلة من جراء الوصلات فضاء–أرض لسواتل ترحيل البيانات.

ويتم التخفيف من حدة التداخل الذي تسببه الوصلات فضاء–أرض لساتل ترحيل البيانات في المحطات الأرضية للخدمة الثابتة الساتلية من خلال عوامل مثل التباعد المكاني المناسب واقتران الفصوص الجانبية لهوائيات المحطات الأرضية الكبيرة والاستقطاب. ويتبع التنسيق، إذا لزم الأمر، الأسلوب المنصوص عليه في التذييل **8** للوائح الراديو. كما أن الديناميات المرتبطة بمتطلبات المحطات الأرضية المتنقلة الساتلية من أجل تتبع المركبة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض تعمل على التخفيف من حدة التداخل الناجم عن عمليات الإرسال من الفضاء إلى الأرض لساتل ترحيل البيانات.

4.3.4 التداخل الذي تتعرض له المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية

يخضع التداخل الذي تسببه عمليات الخدمة المتنقلة الساتلية في المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية في النطاق 137-138 MHz للتنسيق بموجب المادة **9** من لوائح الراديو. فعند الترددات التي تقل عن 1 GHz قد يُستخدم النشر المناسب وحجب المواقع لحماية مواقع المحطات الأرضية للأبحاث الفضائية والتقليل إلى الحد الأدنى من الحاجة إلى التنسيق مع أجهزة البث الثابتة والمتنقلة. وتنطبق المادة **21** من لوائح الراديو على الترددات التي تزيد على 1 GHz. وترد في التذييل **7** للوائح الراديو طريقة تحديد منطقة التنسيق حول محطة أرضية في نطاقات الترددات الواقعة بين 100 MHz و105 GHz والمتقاسمة بين خدمات الاتصالات الراديوية الفضائية والأرضية.

وقد يشكل التداخل الناجم عن السواتل المتنقلة في مدار أرضي منخفض مصدراً للتداخل في الوصلات فضاء–أرض لسواتل ترحيل البيانات بسبب قربها الشديد من سطح الأرض وكثافة أنظمتها وعدد الأنظمة التي يُحتمل أن تعمل داخل النطاق. وثمة احتمال لحدوث تداخل من المحطات الثابتة والمتنقلة إذا ما تم تجاوز معايير الحماية المتعلقة بالمحطات الأرضية لسواتل ترحيل البيانات الواردة في التوصية ITU-R SA.1155. وقد يكون التنسيق ضرورياً في هذه الحالات كما ورد في التذييل **7** للوائح الراديو.

5.3.4 حدود البث غير المطلوب للاتحاد الدولي للاتصالات

يحدد قطاع الاتصالات الراديوية عمليات البث غير المطلوب في منطقتين منفصلتين. فالمنطقة الواقعة خارج عرض النطاق اللازم تدعى المنطقة خارج النطاق؛ أما المنطقة الأبعد فهي منطقة البث الهامشي. وتحدد التوصية ITU-R SM.1539 المنطقة الحدودية. وعموماً تبلغ الحدود نسبة 250 في المائة من عرض النطاق اللازم، مع وجود بعض الاستثناءات.

وتنص المادة رقم **8.3** من لوائح الراديو على أنه فيما يتعلق بالبث خارج النطاق، يتعين على محطات الإرسال أن تقوم إلى أقصى حد ممكن بتلبية أحدث توصية من توصيات قطاع الاتصالات الراديوية. ويتم تعريف قناع البث خارج النطاق للخدمات الفضائية في الملحق 5 من التوصية ITU-R SM.1541. ومع ذلك لا يوجد لدى الاتحاد حالياً قناع للبث خارج النطاق ينطبق على الخدمات الفضائية التي تستعمل الوصلات فضاء–فضاء.

وتنص المادة **7.3** من لوائح الراديو على أنه يتعين على محطات الإرسال أن تمتثل للمستويات القصوى المسموح بها لقدرة البث الهامشي المحددة في التذييل **3** للوائح الراديو. ويبين الجدول II من التذييل **3** للوائح الراديو أنه فيما يتعلق بالخدمات الفضائية، يبلغ التوهين الذروي في منطقة البث الهامشية $43 + 10 \log P$ أو 60 dBc، أيهما أقل صرامة. وتعرّف P على أنها القدرة (بالواط) التي يتم تزويد خط إرسال الهوائي بها.

المرفق 1

توصيات وتقارير قطاع الاتصالات الراديوية المتصلة بخدمة الأبحاث الفضائية

توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

SA.363	أنظمة التشغيل الفضائي. الترددات وعروض النطاق ومعايير الحماية
SA.364	الترددات وعروض النطاقات المفضلة لسواتل البحث المأهولة وغير المأهولة القريبة من الأرض
SA.509	مخطط إشعاع الهوائي المرجعي لمحطة أرضية في خدمة البحث الفضائي من أجل الاستعمال في حسابات التداخل، بما في ذلك إجراءات التنسيق من أجل ترددات تحت 30 GHz
SA.510	إمكانية تقاسم الترددات بين خدمة البحث الفضائي والخدمات الأخرى في النطاقات بالقرب من 14 و15 GHz التداخل المحتمل من أنظمة ساتلية لترحيل المعطيات
SA.609	معايير الحماية لوصلات الاتصالات بسواتل البحث المأهولة أو غير المأهولة القريبة من الأرض
SA.1014	متطلبات الاتصالات لمركبات أبحاث الفضاء السحيق المأهولة وغير المأهولة
SA.1015	متطلبات عرض النطاق لأغراض البحث في الفضاء السحيق
SA.1016	البحث في الفضاء السحيق: اعتبارات متعلقة بالتقاسم
SA.1018	نظام مرجعي افتراضي للأنظمة التي تتضمن سواتل ترحيل للبيانات بالمدار المستقر بالنسبة إلى الأرض والمركبات الفضائية بالمدارات الأرضية المنخفضة
SA.1019	نطاقات الترددات المفضلة واتجاهات البث بالأنظمة الساتلية لترحيل البيانات
SA.1154	أحكام خاصة بحماية خدمات الأبحاث الفضائية (SR) والعمليات الفضائية (SO) وخدمة استكشاف الأرض الساتلية (EES) وبتسهيل التقاسم مع الخدمة المتنقلة في النطاقين 025 2-110 2 MHz و200 2-290 2 MHz
SA.1155	معايير الحماية الخاصة بتشغيل الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات
SA.1157	معايير الحماية بشأن أبحاث الفضاء السحيق
SA.1274	معايير الشبكات الساتلية لترحيل البيانات لتسهيل التقاسم مع الأنظمة في الخدمة الثابتة في النطاقين 025 2-110 2 MHz و200 2-290 2 MHz
SA.1275	المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات الواجب حمايتها من إرسالات أنظمة الخدمة الثابتة العاملة في النطاق 200 2-290 2 MHz
SA.1276	المواقع المدارية لسواتل ترحيل البيانات الواجب حمايتها من إرسالات أنظمة الخدمة الثابتة العاملة في النطاق 25,25-27,5 GHz

SA.1344	نطاقات التردد وعروض النطاقات المفضلة لإرسال بيانات القياس التداخلي الفضائي ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) ضمن توزيعات خدمة البحوث الفضائية (SRS) القائمة
SA.1345	طرائق التنبؤ بمخططات الإشعاع للهوائيات الكبيرة المستعملة في البحوث الفضائية وعلم الفلك الراديوي
SA.1396	معايير الحماية في خدمة الأبحاث الفضائية العاملة في النطاقين 37-38 و40-40,5 GHz
SA.1414	خصائص الأنظمة الساتلية لترحيل البيانات
SA.1415	التقاسم بين أنظمة الخدمة ما بين السواتل في نطاق الترددات 25,25-27,5 GHz
RS.1449	جدوى التقاسم بين الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) (فضاء–أرض) وخدمتي استكشاف الأرض الساتلية (المنفعلة) والأبحاث الفضائية (المنفعلة) في النطاق 18,6-18,8 GHz
SA.1626	جدوى التقاسم بين خدمة الأبحاث الفضائية (فضاء–أرض) والخدمتين الثابتة والمتنقلة في النطاق 14,8-15,35 GHz
SA.1629	التقاسم بين وصلات التحكم في خدمتي الأبحاث الفضائية والعمليات الفضائية وبين الخدمات الثابتة والمتنقلة والمتنقلة الساتلية في نطاق التردد 257-262 MHz
SA.1742	الخصائص التقنية والتشغيلية للأنظمة الكوكبية وأنظمة الفضاء السحيق والتي تعمل في الاتجاه فضاء-أرض حوالي 283 THz
SA.1743	الحد الأقصى المسموح به من الانحطاط في وصلات الاتصالات الراديوية في الأبحاث الفضائية وخدمات العمليات الفضائية الناجم عن التداخل من الإرسالات والإشعاعات من مصادر راديوية أخرى
SA.1805	الخصائص التقنية والتشغيلية لأنظمة الاتصالات فضاء-فضاء العاملة حوالي 354 و366 THz
SA.1810	خطوط توجيهية لتصميم الأنظمة الساتلية لاستكشاف الأرض في النطاق 025 8-400 8 MHz
SA.1811	مخططات هوائي مرجعي بفتحة كبيرة لمحطات أرضية بخدمة الأبحاث الفضائية للاستخدام في تحليلات المواءمة التي تفترض عدداً كبيراً من مداخل التداخل الموزعة في النطاقين 31,8-32,3 GHz و37,0-38,0 GHz
SA.1862	مبادئ توجيهية من أجل استعمال خدمة استكشاف الأرض الساتلية (فضاء-أرض) وخدمة الأبحاث الفضائية (فضاء-أرض) للنطاق 25,5-27,0 GHz بكفاءة
SA.1863	الاتصالات الراديوية المستعملة لأغراض الطوارئ في الرحلات الفضائية المأهولة
SA.1882	الخصائص التقنية والتشغيلية لأنظمة خدمة الأبحاث الفضائية (أرض-فضاء) للاستعمال في النطاق 22,55-23,15 GHz

تقارير قطاع الاتصالات الراديوية

SA.2065	حماية الوصلة الفضائية للقياس عن بُعد بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI)
SA.2066	وسائل حساب الخصائص الإحصائية للرؤية في سواتل المدار المنخفض
SA.2067	استعمال النطاق GHz 14,0-13,75 لخدمة البحوث الفضائية والخدمة الثابتة الساتلية
SA.2098	نماذج الكسب الرياضية لهوائيات المحطة الأرضية في خدمة بحوث الفضاء من أجل تحليل التوافق باستخدام عدد كبير من مصادر التداخل الموزعة
SA.2132	خصائص الاتصالات ومتطلباتها في أنظمة القياس بالتداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI) الفضائية
SA.2162	شروط التشارك بين وصلات النشاط خارج المركبة (EVA) لخدمة الأبحاث الفضائية ووصلات الخدمة الثابتة والمتنقلة في النطاق بين 410 و420 MHz
SA.2166	أمثلة على مخططات إشعاع هوائيات كبيرة تستخدم في البحوث الفضائية وعلم الفلك الراديوي
SA.2167	العوامل المؤثرة في اختيار نطاقات الترددات لوصلات اتصالات خدمة الأبحاث الفضائية في الفضاء السحيق (فضاء–أرض)
SA.2177	اختيار نطاقات الترددات في المدى GHz 120-1 من أجل أبحاث الفضاء السحيق
SA.2183	أساليب حساب جودة أداء الوصلات في خدمة الأبحاث الفضائية
SA.2190	دراسة عن المواءمة بين الخدمة المتنقلة (للطيران) وخدمة الأبحاث الفضائية (فضاء–أرض) في النطاق GHz 38-37
SA.2191	متطلبات الطيف للمهام المستقبلية لخدمة الأبحاث الفضائية العاملة في مدى ترددات أدنى من التوزيع الجديد المحتمل للخدمة في النطاق GHz 23,15-22,55
SA.2192	المواءمة بين خدمة الأبحاث الفضائية (أرض–فضاء) والأنظمة العاملة من سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض إلى سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض في خدمة ما بين السواتل في نطاق التردد GHz 23,55-22,55
SA.2193	التوافق بين خدمة الأبحاث الفضائية (أرض–فضاء) وأنظمة الخدمتين الثابتة والمتنقلة وخدمة ما بين السواتل في النطاق GHz 23,15-22,55

المرفق 2

جدول استعمالات خدمة الأبحاث الفضائية والحدود المقابلة لكثافة تدفق القدرة

التردد			SRS = خدمة الأبحاث الفضائية s-E = فضاء–أرض E-s = أرض–فضاء s-s = فضاء–أفضاء ds = فضاء سحيق	حدود كثافة تدفق القدرة لزوايا الوصول (θ) فوق المستوى الأفقي (dBW/m^2)[1]			عرض النطاق المرجعي
				$0^o \le \theta \le 5^o$	$5^o < \theta \le 25^o$	$25^o < \theta \le 90^o$	
2 502-2 501	kHz		SRS				
5 005-5 003	kHz		SRS				
10 005-10 003	kHz		SRS				
15 010-15 005	kHz		SRS				
18 068-18 052	kHz		SRS				
19 995-19 990	kHz		SRS				
25 010-25 005	kHz		SRS				
30,01-30,005	MHz		SRS				
40,02-39,986	MHz		SRS				
41,015-40,98	MHz		SRS				
138-137	MHz		s-E				
143,6-138	MHz		s-E				
143,65-143,6	MHz		s-E				
144-143,65	MHz		s-E				
401-400,15	MHz		s-E				
420-410	MHz		s-s				
1 300-1 215	MHz		استشعار نشط				
2 110-2 025	MHz		E-s. s-s	–154	–154 + 0,5 (θ - 5)	–144	4 kHz
2 120-2 110	MHz		ds, E-s				
2 290-2 200	MHz		s-E, s-s	–154	–154 + 0,5 (θ - 5)	–144	4 kHz
2 300-2 290	MHz		ds, s-E	–154	–154 + 0,5 (θ - 5)	–144	4 kHz
3 300-3 100	MHz		استشعار نشط				
5 570-5 250	MHz		SRS				
5 670-5 650	MHz		ds				
5 725-5 670	MHz		ds	–152	–152 + 0,5 (θ - 5)	–142	4 kHz
7 190-7 145	MHz		ds, E-s				
7 235-7 190	MHz		E-s				
8 450-8 400	MHz		ds, s-E	–150	–150 + 0,5 (θ - 5)	–140	4 kHz
8 500-8 450	MHz		s-E	–150	–150 + 0,5 (θ - 5)	–140	4 kHz
8 650-8 550	MHz		استشعار نشط				
9 800-9 300	MHz		استشعار نشط				
9 900-9 800	MHz		استشعار نشط				
13,25-12,75	GHz		ds, s-E				
13,4-13,25	GHz		استشعار نشط				

التردد		SRS = خدمة الأبحاث الفضائية s-E = فضاء–أرض E-s = أرض–فضاء s-s = فضاء–أفضاء ds = فضاء سحيق	حدود كثافة تدفق القدرة لزوايا الوصول (θ) فوق المستوى الأفقي (dBW/m^2)(1)			عرض النطاق المرجعي
			0º≤θ≤5º	5º<θ≤25º	25º<θ≤90˚	
14,3-13,4	GHz	استشعار نشط				
14,47-14,4	GHz	s-E				
15,35-14,5	GHz	SRS				
17,1-16,6	GHz	ds, E-s				
17,3-17,2	GHz	استشعار نشط				
23,55-22,55	GHz	s-s	–115	–115 + 0,5 (θ - 5)	-105	MHz 1
23,15-22,55	GHz	E-s				
27,5-25,25	GHz	s-s	–115	–115 + 0,5 (θ - 5)	–105	MHz 1
27-25,5	GHz	s-E	–115	–115 + 0,5 (θ - 5)	–105	MHz 1
31,3-31	GHz	SRS	–115	–115 + 0,5 (θ - 5)	–105	MHz 1
32,3-31,8	GHz	ds, s-E	–120	–120 + 0,75 (θ - 5)	–105	MHz 1
34,7-34,2	GHz	ds, E-s				
35,2-34,7	GHz	SRS	–115	–115 + 0,5 (θ - 5)	–105	MHz 1
36-35,5	GHz	استشعار نشط				
38-37	GHz	s-E, NGSO	–120	–120 + 0,75 (θ - 5)	–105	MHz 1
(2)38-37	GHz	ds, s-E, NGSO	–115	–115 + 0,5 (θ - 5)	–105	MHz 1
38-37	GHz	s-E, GSO	–125	–125 + (θ - 5)	–105	MHz 1
40,5-40	GHz	E-s				
66-65	GHz	SRS				
84-74	GHz	s-E				
94,1-94	GHz	استشعار نشط				

(1) الخلية الشاغرة تعني أن القيمة غير متاحة.

(2) بموجب الحاشية **10.16.21** للوائح الراديو للاتحاد، ينطبق هذا الحد المتساهل لكثافة تدفق القدرة على مراحل الإطلاق والمراحل التشغيلية القريبة من الأرض لمهمات الفضاء السحيق، التي تشكل جزءاً من أنظمة خدمة الأبحاث الفضائية في المدار غير المستقر بالنسبة إلى الأرض.

_____

ISBN 978-92-61-15196-6 SAP id 39434
9 789261 151966

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

طبع في سويسرا
جنيف، 2015
إصدار الصور: Shutterstock