

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R M.1849-3
(2023/02)

الجوانب التقنية والتشغيلية لرادارات
الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض

السلسلة M

الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة
الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة



تمهيد

يضع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني

جنيف، 2023

© ITU 2023

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصية ITU-R M.1849-3

الجوانب التقنية والتشغيلية لرادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض

(2023-2019-2015-2009)

مجال التطبيق

تتناول هذه التوصية الخصائص التقنية والتشغيلية لرادارات الأرصاد الجوية وتشرح النواتج المقدمة ذات الصلة وتسلسل الضوء على خواصها وتناقش تأثيرات التداخل على هذه الرادارات وتحدد المعايير ذات الصلة للحماية من هذا التداخل. ويقتصر هذا النص على رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض ولا يغطي رادارات رصد خصائص الرياح والمستخدم أيضاً لأغراض الأرصاد الجوية والتي تغطيها توصيات أخرى لقطاع الاتصالات الراديوية.

توصيات وتقارير قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية ITU-R F.699 - مخططات الإشعاع المرجعية لهوائيات نظام المرحلات الراديوية والتي يجب استعمالها في دراسات التنسيق وفي تقييم التداخل في مدى الترددات الذي يتراوح ما بين 100 MHz و 70 GHz تقريباً

التوصية ITU-R F.1245 - النموذج الرياضي لمخططات الإشعاع المتوسطة الخاصة بهوائيات الأنظمة اللاسلكية الثابتة في خط البصر بين نقاط ثابتة، والذي يجب استعماله في بعض دراسات التنسيق وفي تقييم التداخل في مدى الترددات الذي يتراوح ما بين 1 و 70 GHz تقريباً

التوصية ITU-R RS.1280 - اختيار خصائص إرسال جهاز الاستشعار النشط المحمول في الفضاء بهدف تخفيف مخاطر التداخلات التي تسببها رادارات الأرض العاملة في نطاقات الترددات من 1 إلى 10 GHz

التوصية ITU-R M.1461 - إجراءات تحديد احتمالات التداخل بين الرادارات العاملة في خدمة الاستدلال الراديوي وأنظمة الخدمات الأخرى

التوصية ITU-R M.1638 - الخصائص ومعايير الحماية المطبقة في دراسات التقاسم المتعلقة برادارات التحديد الراديوي للموقع (باستثناء رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض) وادارات الملاحة الراديوية للطيران العاملة في نطاقات التردد بين 250 و 850 MHz

التوصية ITU-R M.1652 - اختيار الترددات الدينامية (DFS) في أنظمة النفاذ اللاسلكي بما فيها الشبكات المحلية الراديوية لأغراض حماية خدمة الاستدلال الراديوي في النطاق 5 GHz

التوصية ITU-R M.1851 - نماذج رياضية لمخططات هوائيات أنظمة الرادارات في خدمة الاستدلال الراديوي يتعين استخدامها في الدراسة التحليلية للتداخل

التقرير ITU-R M.2136 - نتائج التحليل النظري والاختبار المتعلقة بتحديد المعايير ذات الصلة بحماية رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض من التداخل

مصطلحات أساسية

رادار، أرصاد جوية، حماية

المختصرات/الأسماء المختصرة

CASA: المركز التعاوني التكميلي لاستشعار الغلاف الجوي

(Centre for collaborative adaptive sensing of the atmosphere)

:CW	الموجة الحاملة (Carrier wave)
:FM	بالتشكيل الترددي (Frequency modulated)
:GC	الجلبة الأرضية (Ground clutter)
:I/N	نسبة التداخل إلى الضوضاء (Interference to noise ratio)
:pps	عدد النبضات في الثانية (Pulses per second)
:PRF	تردد تكرار النبضة (Pulse repetition frequency)
:RR	لوائح الراديو (Radio Regulations)
:S/N	نسبة الإشارة إلى الضوضاء (Signal to noise ratio)
:SAR	رادار الفتحة المركبة (Synthetic aperture radar)
:WTC	جلبة توربين الرياح (Wind turbine clutter)

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- (أ) أن خصائص الهوائي وانتشار الإشارة وكشف الأهداف وضرورة توفر عرض نطاق كبير للرادار لكي يؤدي وظائفه تكون أفضل ما تكون في بعض نطاقات التردد؛
- (ب) أن الخصائص التمثيلية والتقنية والتشغيلية لرادارات الأرصاد الجوية يتعين توفرها لتحديد جدوى إدخال أنماط جديدة من الأنظمة في نطاقات التردد التي تعمل فيها رادارات الأرصاد الجوية؛
- (ج) أن هذه الإجراءات والمنهجيات ضرورية لتحليل التوافق بين رادارات الأرصاد الجوية والخدمات الأخرى التي يوزع لها نطاق التردد؛
- (د) أن الخصائص التقنية والتشغيلية لرادارات الأرصاد الجوية محددة نوعاً ما مقارنة بأنماط الرادارات الأخرى وتستحق أن يخصص لها توصية منفصلة من توصيات قطاع الاتصالات الراديوية؛
- (هـ) أن رادارات الأرصاد الجوية تعمل عادةً في نطاقات التردد MHz 2 900-2 700 و MHz 5 725-5 250 و MHz 9 500-9 300؛
- (و) أن رادارات الأرصاد الجوية هي محطات الرصد الرئيسية المستخدمة في عمليات الأرصاد الجوية والرصد البيئي؛
- (ز) أن رادارات الأرصاد الجوية تلعب دوراً هاماً في إطلاق التحذيرات بشأن الأحوال الجوية الخطيرة الوشيكة مثل الفيضانات والأعاصير الدوامية والأعاصير التي يمكن أن تشكل خطراً على السكان وتلحق الضرر بالبنية التحتية الاقتصادية الاستراتيجية؛
- (ح) أن تطبيق معايير الحماية يحتاج إلى النظر في مراعاة الطبيعة الإحصائية للمعايير وعناصر المنهجية الأخرى من أجل إجراء دراسات التوافق (مثل مسح الهوائي وخسارة مسير الانتشار). ويمكن إدخال المزيد من التطورات التي تلحق بهذه الاعتبارات الإحصائية ضمن النسخ المقبلة لهذه التوصية، حسب الاقتضاء،

وإذ تدرك

- (أ) أن الرقم 423.5 من لوائح الراديو (RR) ينص على أنه يُرخص لرادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض والعاملة في نطاق التردد MHz 2 900-2 700 بأن تشغل على أساس المساواة مع محطات خدمة الملاحة الراديوية للطيران؛
- (ب) أن الرقم 452.5 من لوائح الراديو ينص على أنه يُرخص لرادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض والعاملة في نطاق التردد MHz 5 650-5 600 بأن تعمل على أساس المساواة مع محطات خدمة الملاحة الراديوية البحرية؛

(ج) أن الرقم **475B.5** من لوائح الراديو ينص على أن إدارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض والعاملة في نطاق التردد 300-9 500 MHz لها الأولوية على الاستعمالات الأخرى للتحديد الراديوي للموقع،

وإذ تلاحظ

(أ) أن التوصية ITU-R M.1461 تستعمل أيضاً كمبادئ توجيهية عند تحليل التوافق بين الرادارات والخدمات الأخرى التي يوزع لها نطاق التردد؛

(ب) أن معايير حماية الرادارات تعتمد على أنماط محددة من الإشارات المسببة للتداخل، مثل تلك الموصوفة في الملحق 1،

توصي

1 بأن تراعى الجوانب التقنية والتشغيلية لإدارات الأرصاد الجوية الموصوفة في الملحق 1 وكذلك الخصائص الواردة في الملحق 2 عند إجراء دراسات التقاسم؛

2 بأن تُستعمل معايير الحماية الإجمالية لإدارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض بنسبة تداخل إلى ضوضاء (*I/N*) قدرها -10 dB.

الملحق 1

الجوانب التقنية والتشغيلية لإدارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض

جدول المحتويات

الصفحة

1	مقدمة	4
2	نظرة عامة	5
1.2	معادلة الرادار لهدف وحيد	5
2.2	معادلة رادار الأرصاد الجوية	6
3	المبادئ العامة لإدارات الأرصاد الجوية	7
1.3	مثال على تشغيل رادار أرصاد جوية في نطاق التردد 2,9-2,7 GHz	7
2.3	المبدأ الخاص بقياس الرياح	11
3.3	مثال على تشغيل رادار أرصاد جوية في أجزاء من مدى التردد 10,5-8,5 GHz	12
4	مقارنة بين إدارات الأرصاد الجوية والرادارات الأخرى	12
1.4	الخصائص بالنسبة لمخططات الإرسال واستراتيجيات المسح	13
2.4	الخصائص المتعلقة بمعايرة الضوضاء	16
5	الأساليب التشغيلية لإدارات الأرصاد الجوية	17
1.5	أسلوب الجو الصافي	17
2.5	أسلوب هطول الأمطار	17

18	نواتج بيانات رادارات الأرصاد الجوية.....	6
18	1.6 نواتج البيانات الأساسية التقليدية لرادارات الأرصاد الجوية	
19	2.6 نواتج رادارات الأرصاد الجوية ثنائية الاستقطاب	
19	3.6 نواتج البيانات المشتقة	
20	7 مخطط إشعاع الهوائي وديناميات الهوائي	
20	1.7 حركة هوائي المسح ثلاثي الأبعاد.....	
20	2.7 الاستراتيجيات الأخرى لتحريك الهوائي	
20	3.7 مخططات إشعاع الهوائي.....	
21	8 تأثيرات التداخل والضوضاء الشمسية على رادارات الأرصاد الجوية.....	
21	1.8 أثر التداخل على أساليب التشغيل	
21	2.8 أثر التداخل على النواتج الأساسية	
23	3.8 الاشتقاق الرياضي لمعايير حماية رادارات الأرصاد الجوية	
23	4.8 أنماط التداخلات المحتملة	
33	5.8 استنتاجات بشأن معايير حماية رادارات الأرصاد الجوية	
33	9 أثر توربينات الرياح	
34	1.9 التقنيع	
34	2.9 الجلبة	
34	3.9 الطاقة المرتدة من الدوامات الهوائية العاتية	
34	4.9 أمثلة على جلبة توربينات الرياح	
36	5.9 تأثير جلبة توربينات الرياح على عمليات رادارات الأرصاد الجوية ودقة التنبؤات	
37	10 الاختبارات السابقة لأنظمة رادارات الأرصاد الجوية.....	
38	11 الاختبارات المستقبلية	
38	12 نماذج الانتشار	
38	13 الاتجاهات المستقبلية	
39	14 ملخص	

1 مقدمة

تستعمل رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض لأغراض الأرصاد الجوية التشغيلية والتنبؤ بالأحوال الجوية والبحوث الجوية والملاحة للطيران والملاحة البحرية، كما أنها تؤدي دوراً هاماً في عمليات الإنذار الفوري بالأحوال الجوية والمائية. وتعمل هذه الرادارات بصورة مستمرة على مدار الساعة. وتمثل شبكات رادارات الأرصاد الجوية خط الدفاع الأخير للكشف عن الأحوال الجوية التي يمكن أن تسبب في حالات فقدان الحياة وخسارة الممتلكات في حالات الفيضانات المحلية والعواصف الشديدة.

وتختلف نظرية العمل وكذلك النواتج المتحصل عليها بالنسبة لرادارات الأرصاد الجوية بشكل كبير عن تلك الخاصة بالرادارات الأخرى. ومن المهم فهم هذه الاختلافات عند تقييم التوافق بين هذه الرادارات والخدمات الأخرى التي يوزع لها نطاق التردد. وينتج عن الخصائص التشغيلية والتقنية لرادارات الأرصاد الجوية تأثيرات مختلفة من منظور التداخل المسموح به مقارنة بأنظمة الرادار الأخرى.

2 نظرة عامة

تستعمل رادارات الأرصاد الجوية في استشفاف الظروف الجوية لأغراض التنبؤات الروتينية والكشف عن الأحوال الجوية الخطيرة والرياح والأمطار الغزيرة وتقديرات هطول الأمطار والكشف عن ظروف تكوّن الجليد على سطح الطائرات وتحاشي الملاحة في الأحوال الجوية الخطيرة.

ويقوم بعض رادارات الأرصاد الجوية بإرسال نبضات مستقطبة أفقياً تقوم بقياس البعد الأفقي لأي سحابة (سحابات مائية وجليدية) وهطول الأمطار (ثلج، وكريات الجليد وحببيات البرد وجسيمات المطر).

وتقوم رادارات أخرى للأرصاد الجوية، يطلق عليها اسم رادارات قياس الاستقطاب، أو الرادارات ثنائية الاستقطاب، بإرسال نبضات في كلا الاستقطابين الأفقي والرأسي. وتوفر هذه الرادارات تحسينات كبيرة في تقدير معدلات سقوط المطر وتصنيف هطول الأمطار وجودة البيانات والكشف عن أخطار الأحوال الجوية مقارنة بالأنظمة غير الاستقطابية.

ولا تعد رادارات الأرصاد الجوية خدمة راديوية في حد ذاتها داخل قطاع الاتصالات الراديوية ولكنها تنتمي إلى خدمة التحديد الراديوي للموقع و/أو خدمة الملاحة الراديوية بلوائح الراديو. ويعتمد تحديد ما إذا كان المقصود هو التحديد الراديوي للموقع و/أو الملاحة الراديوية على الكيفية التي يستخدم بها الرادار المعني. حيث إن رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض والمستعملة في الأبحاث الجوية أو التنبؤ بالأحوال الجوية يتم تشغيلها في إطار خدمة التحديد الراديوي للموقع. في حين أن رادارات الأرصاد الجوية المحمولة في الجو على متن طائرات تجارية يتم تشغيلها في إطار خدمة الملاحة الراديوية. ويمكن لرادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض أن تعمل أيضاً في إطار خدمة الملاحة الراديوية، إذا استعملت على سبيل المثال في مراقبة الحركة الجوية لتسيير الطائرات بعيداً عن مناطق الظروف الجوية الخطيرة. ونتيجة لذلك، يمكن تشغيل رادارات الأرصاد الجوية في العديد من نطاقات التردد الموزعة للتحديد الراديوي للموقع والملاحة الراديوية طالما كان الاستعمال متسقاً مع تعريف الخدمة الراديوية. وتتضمن لوائح الراديو ثلاث إشارات محددة إلى رادارات الأرصاد الجوية في جدول توزيع الترددات. وترد الإشارات الثلاث في الحواشي المرتبطة بنطاقات التردد و MHz 2 900-2 700 (الرقم 423.5 من لوائح الراديو) و MHz 5 650-5 600 (الرقم 452.5 من لوائح الراديو) و MHz 9 500-9 300 (الرقم 475.5 من لوائح الراديو).

1.2 معادلة الرادار لهدف وحيد¹

لا تقوم رادارات الأرصاد الجوية بتتبع الأهداف النقطية. ومن ثم، يمكن تكييف معادلة الرادار لاستعمالها مع رادارات الأرصاد الجوية. وكمية القدرة المرتدة من المسح ثلاثي الأبعاد الذي يقوم به رادار الأرصاد الجوية تحدد ما إذا كان بالإمكان كشف الظاهرة. وتعتبر معادلة مدى الرادار عن العلاقة بين القدرة المرتدة من هدف ما وخصائص هذا الهدف وادار الإرسال.

ويتسم الهدف النقطي النمطي بالمتغيرات التالية في معادلة الرادار:

P_R : القدرة التي يستقبلها الرادار

P_T : قدرة إرسال الذروة للرادار

A_T : مساحة الهدف

¹ يمكن الرجوع إلى المعلومات الخاصة بالمعادلات الواردة في هذه الفقرات واشتقاقها في YAU, M. K. و ROGERS, R. R. [1 يناير 1989]، منهج مختصر في فيزياء السحب، الفصل 11.

R : المدى بين الهدف والرادار

G : كسب هوائي الإرسال.

وتتحد هذه المتغيرات مع بعضها لتكوين المعادلة العامة للرادار بالنسبة لهدف نقطي:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \cdot A_T$$

وتفترض المعادلة أعلاه إشعاع متناح وكذلك انتشار متناح للإشعاع. بيد أن معظم الأهداف لا تقوم بالانتشار المتناحي للإشعاع الساقط عليها ومن ثم، فإن المقطع العرضي للانتشار العكسي σ ، يعد ضرورياً:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \sigma$$

2.2 معادلة رادار الأرصاد الجوية

باشتقاق المعادلة لهدف نقطي وحيد، فإن الخطوة التالية تتمثل في صياغة المعادلة أعلاه بحيث يراعى فيها أهداف رادارات الأرصاد الجوية. فكل من قطرات المطر ورقائق الثلج ورذاذ السحب تشكل صنفاً هاماً من أصناف الأهداف بالنسبة للرادار، يعرف باسم الأهداف الموزعة.

وتقوم نبضة الرادار الساقطة بتكوين حجم الاستبانة المرسل لرادار الأرصاد الجوية من خلال الإضاءة المتأونة للحيز (الحجم) الذي يحتوي على جسيمات الظواهر الجوية. وتبين المعادلة أدناه القدرة المتوسطة المستقبلية من أهداف الظاهرة الجوية، حيث $\Sigma\sigma$ هي مجموعة المقاطع العرضية للانتشار العكسي بجميع الجسيمات الموجودة داخل حيز (حجم) الاستبانة.

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \left(\sum_n \sigma \right)$$

وحيث إن حجم حزمة الرادار يستمر في التمدد مع زيادة المدى، فإن حزمة الرادار تستمر في ضم المزيد والمزيد من الأهداف. والحجم المحدد لحزمة الرادار يعادل:

$$V = \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2}$$

حيث $h = c\tau$ عبارة عن طول النبضة و θ عرض نطاق الهوائي. ودمج المعادلة العامة للرادار مع حجم حزمة الرادار، تصبح القدرة المتوسطة المرتدة كالتالي:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2} \eta$$

حيث تشير η إلى معامل انعكاس الرادار لكل وحدة حجم. بيد أن المعادلة أعلاه تفترض أن كسب الهوائي منتظم في حدود 3 dB، وهذا مخالف للحقيقة. ويفرض مخطط إشعاع غوسي، فإن الحجم الفعال يتم تحديده بشكل أفضل عبر المخطط الإشعاعي للرادار ككل بدلاً من تحديده ضمن حدود 3 dB. وباستخدام مخطط إشعاع غوسي، تصبح القدرة المتوسطة المرتدة كالتالي:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \theta^2 \cdot h}{1024 \pi^2 \cdot \ln(2)} \cdot \frac{\eta}{r^2}$$

وبمراعاة أن الجسيمات الكروية الفردية صغيرة مقارنة بالطول الموجي للرادار، يمكن تمثيل المقطع العرضي للانتشار العكسي كالتالي $\sigma = 64 \pi^5 / \lambda^4 |K|^2 r_o^2$ ، حيث K هو معامل مركب للانكسار و r_o تمثل نصف قطر الكرة. وتعتبر جسيمات الظروف الجوية صغيرة بما يكفي لتطبيق قانون رالي للانتشار، وهو ما يعرف بانتشار رالي. وتعتبر قطرات المطر ورقائق الثلج من ضمن انتشارات رالي التي يمكن قياسها بتقريب دقيق عندما يكون الطول الموجي للرادار بين 5 و 10 cm، وهو بمثابة الطول الموجي الشائع لرادارات الأحوال الجوية. وعند طول موجي قدره 3 cm، يظل الانتشار التقريبي مفيداً وإن كان أقل دقة.

ولمجموعة من القطرات الكروية، التي تعد صغيرة مقارنة بالطول الموجي للرادار، فإن متوسط القدرة المرتدة يتغير إلى:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} (|K|)^2 \cdot \left(\sum_n r_o^6 \right)$$

حيث Σ هي مجموع أنصاف الأقطار الكروية لجميع انتشارات الأحوال الجوية. وبفرض أن $(D/2)^6$ تساوي r_o^6 ، فإن القدرة المتوسطة المرتدة يمكن إبرازها بدلالة أقطار القطرات للانتشار الكروية كالتالي:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \frac{\pi^5}{\lambda^2} K^2 \cdot \left(\sum_n D^6 \right)$$

لذا، فإنه بالنسبة للانتشار الكروية الأصغر كثيراً من الطول الموجي للرادار، فإن القدرة المتوسطة التي يستقبلها رادار الأحوال الجوية تتحدد من خلال خصائص الرادار، والمدى، ومعامل انعكاس الجسم المنتسب في الانتشار (الهدف) $(|K|^2)$ ، وقطر هذا الجسم (D^6) .

وفي النهاية، يمكن إدخال عامل انعكاسية الهدف، Z ، كالتالي: $Z = \Sigma_V D^6 = \int N(D) D^6 dD$ ، حيث Σ_V هو الجمع عبر وحدة حجم واحدة و $N(D) D^6$ هو عدد الأجسام المنتسبة في الانتشار (الأهداف) لكل وحدة حجم. والصيغة النهائية لمعادلة الرادار لرادارات الأحوال الجوية، بما في ذلك التصحيحات التي أدخلت من قبل مراعاة مخطط إشعاع غوسي، تكون كالتالي:

$$P_R = \frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln(2)} \left(\frac{P_T \cdot G^2 \theta^2 \tau}{\lambda^2} \right) \cdot \left[(|K|^2) \cdot \frac{Z}{r^2} \right]$$

3 المبادئ العامة لرادارات الأرصاد الجوية

تقوم رادارات الأرصاد الجوية في الأساس بإجراء نمطين من القياسات:

- قياسات الهواطل؛
- قياسات الرياح.

وتُجرى هذه القياسات على شبكات بيكسل تقوم بعرض خرائط لحالات الأرصاد الجوية المذكورة أعلاه.

1.3 مثال على تشغيل رادار أرصاد جوية في نطاق التردد 2,7-2,9 GHz

الرادار 1 المدرج بالجدول 1 بالملحق 2، عبارة عن نظام تمثيلي لرادارات الأرصاد الجوية التي تعمل على ترددات حول 2,8 GHz. ومنحنى الانعكاسية (Z) لهذا الرادار عند 0 dBZ يقطع مستوى ضوضاء المستقبل (-113 dBm) عند مدى يبلغ 200 km.

1.1.3 تقدير هطول الأمطار

تستعمل الرادارات التمثيلية التي تعمل بالقرب من 2,8 GHz العديد من صيغ الانعكاسية إزاء المدى ($Z-R$) والانعكاسية إزاء معدل سقوط المطر ($Z-S$) من أجل تقدير هطول الأمطار. وحسب الخوارزمية المحددة، يمكن لتأثير التداخل على المدى التشغيلي أن يختلف.

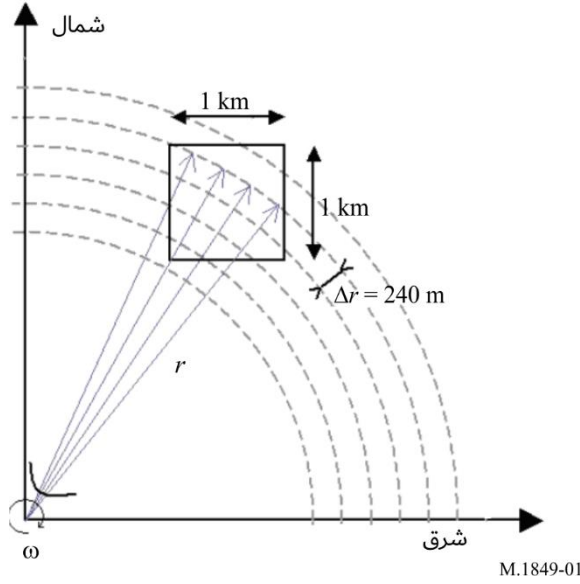
مثال على تشغيل رادار أرصاد جوية في نطاق التردد 5,6-5,65 GHz

نظيماً، تمتد تغطية الرادار لأكثر من 200 km، مقدمة استبانة لوحدة الصور (البيكسل) أبعادها 1 km × 1 km. وفي بعض الحالات، تُقدم شبكة أكثر تفصيلاً 250 m × 250 m بيكسل.

ولكل وحدة صورة (بيكسل)، تُحسب قياسات الرادار على جميع الاستجابات النبضية المقابلة لهذه الوحدة (البيكسل)، أي لكل زوج من النبضات ولكل بوابة من بوابات المدى ثم يتم إسقاط هذه القياسات مباشرة على شاشة ديكارتية (انظر الشكل 1).

الشكل 1

الإسقاط الديكارتي لزوج من النبضات وبوابة من بوابات المدى

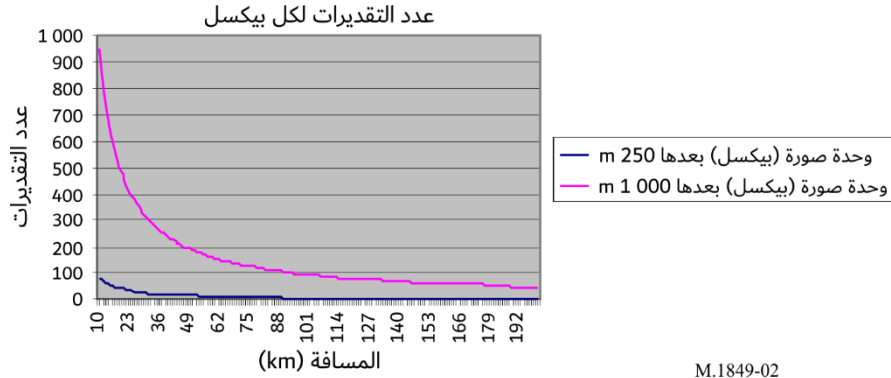


ونتيجة لذلك، يختلف عدد التقديرات لكل بيكسل باختلاف المسافة. وترتبط هذه الأعداد بتعدد تكرار النبضة (PRF) المتوسط وسرعة دوران الهوائي. وفي المتوسط، ومع سرعة نمطية لدوران الهوائي مقدارها 6 درجات/ثانية وتعدد PRF متوسط مقداره 333 Hz ومباعدة بوابة للمدى مقدارها 240 m، فإن هذا يؤدي إلى نحو 1 000 إلى 100 تقدير عند 10 و 100 km، على التوالي، لوحدة صورة (بيكسل) مساحتها 1 km².

ويقدم الشكل 2 عملية مبسطة لحساب التقديرات هذا مقابل المسافة لوحدي صورة (بيكسل) مقدارها 250 m × 250 m و 1 km × 1 km بما يؤكد أن قياسات الرادار تكون أكثر حساسية على المسافات الأكبر وكذلك مع البيكسلات الأصغر.

الشكل 2

تقديرات البيكسل مقابل المسافة



M.1849-02

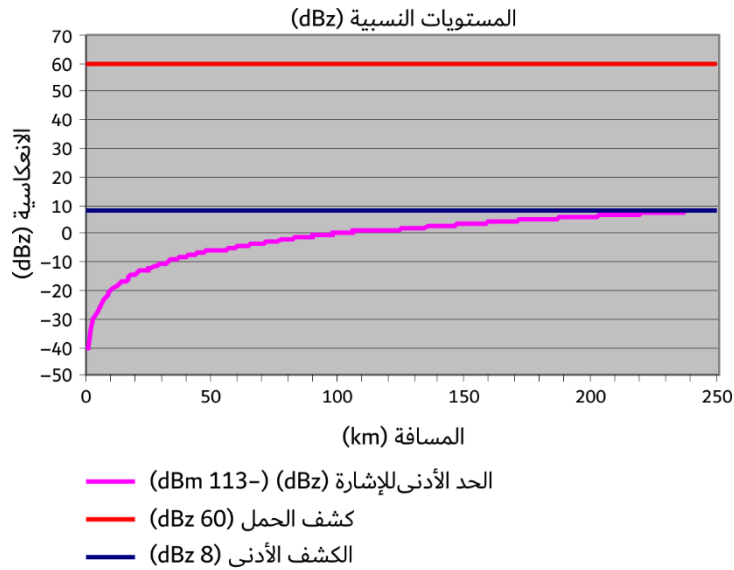
2.1.3 المبدأ الخاص بقياسات هطول الأمطار

تقوم رادارات الأحوال الجوية بقياسات هطول الأمطار التي يعبر عنها بالانعكاسية (dBZ). وترد أدناه المبادئ الخاصة بهذه القياسات، استناداً إلى مثال لتصميم رادار معين. وستعمل تصميمات الرادارات الأخرى بصورة مماثلة وإن كانت مستويات الإشارة تختلف باختلاف التصميم.

وقد تمت معايرة الرادارات التي تم نشرها في شبكة إحدى الإدارات بحيث تتطابق مع مستوى ضوضاء المستقبل (أي نحو -113 dBm) مع مستوى انعكاسية يبلغ 0 dBZ عند مدى 100 km. كما تم تثبيت مستوى الكشف الأدنى لخلية المطر عند 8 dBZ. ويعرض الشكل 3 المستويات النسبية (dBZ) للكشف الأدنى (8 dBZ) وخلية حمل كبيرة (60 dBZ) ومستوى يعادل ضوضاء المستقبل.

الشكل 3

المستويات النسبية للكشف الأدنى



M.1849-03

ويتحصل على العلاقة بين القدرة والانعكاسية من الصيغة التالية:

$$P = \frac{Cz}{r^2}$$

حيث:

P : القدرة (mW)

C : مقدار ثابت (حوالي 10^{-7} أو 70 dB)

Z : الانعكاسية

r : المسافة (km).

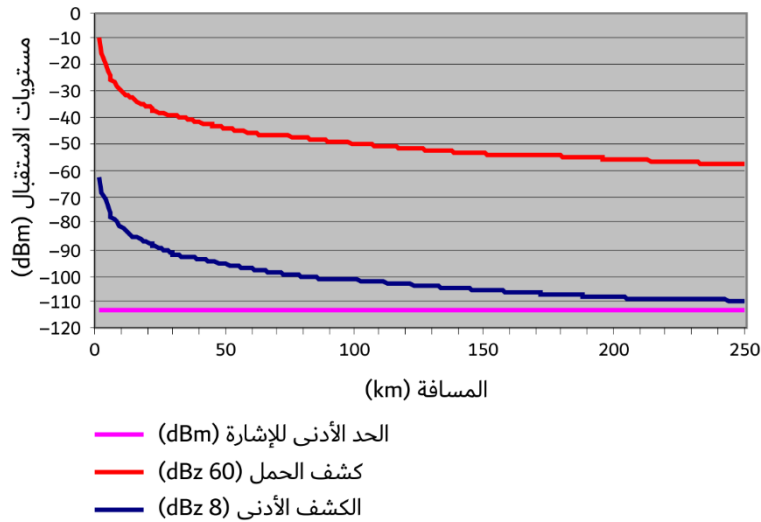
وينتج عن ذلك المعادلة التالية (dB):

$$\text{dBm} = \text{dBz} + C - 20 \log I$$

وعلى هذا الأساس، يعرض الشكل 4 مستويات الاستقبال المقابلة لمستويات الانعكاسية المعروضة في الشكل 3.

الشكل 4

مستويات الإشارة النسبية المقابلة لمستويات الانعكاسية والمسافة



M.1849-04

وفي النهاية، تُترجم أرقام الانعكاسية في مستويات معدلات سقوط الأمطار باستخدام المعادلة التالية (للأمطار النمطية):

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{z}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}$$

وتجدر الإشارة إلى أن معادلة الترجمة هذه تسري على معدل الأمطار النمطي ($a = 1,6$)، ولكن هناك معادلات أخرى محددة لأنماط الهواطل الأخرى (الأمطار المدارية والثلج والبرد، وما إلى ذلك)، حيث تتغير قيمة a حسب نمط هطول الأمطار.

ولخية صورة (بيكسل) معينة من شاشة الرادار، تُراعى أرقام الانعكاسية بالنسبة لكل تقدير (المقابلة لاستجابة نبضية معينة وبوابة مدى معينة) عند تحديد العناصر التالية:

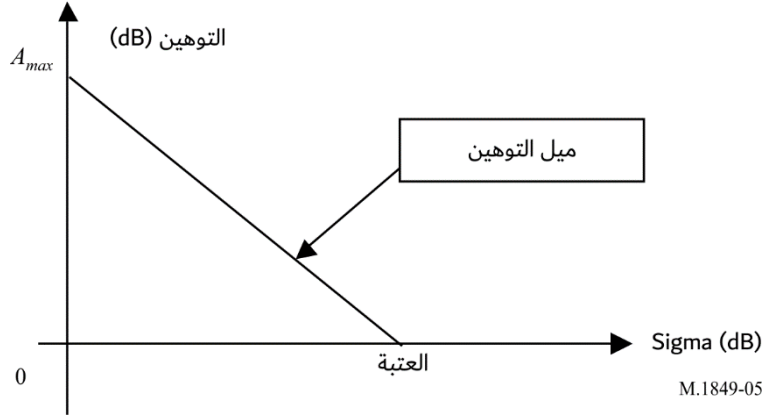
- متوسط الانعكاسية (dBz) عبر التقديرات بالكامل؛
- الانحراف المعياري.

وتتسم الاستجابة النبضية المرتدة من خلية المطر ببعض التغيرات وهو ما يستخدم لتمييزها عن الخلية، باستعمال الشكل الخاص بالانحراف المعياري.

وبالنسبة للرادارات التي تم نشرها في إحدى الإدارات، يتم بناءً على ذلك تصحيح قيم الانعكاسية باستعمال الخوارزمية التالية:

الشكل 5

ميل التوهين



إذا كانت $\sigma \geq \text{العتبة}$ $Z_{seef} = Z_{aeef} - \text{Slope} * (\sigma - \text{Threshold})$

وخلاف ذلك $Z_{seef} = Z_{aeef}$

σ : الانحراف المعياري (dB)

Z_{seef} : قيمة الانعكاسية قبل التصحيح

Z_{aeef} : قيمة الانعكاسية بعد التصحيح.

والميل هو ميل التوهين كما هو مبين في الشكل 5 أعلاه ويتحصل عليه بالمعادلة التالية:

$$\frac{A_{max}}{\text{العتبة}} = \text{الميل}$$

وفي التطبيقات التشغيلية، تُحدد قيمتا العتبة والميل على السواء للتأكد من عدم حدوث توهين تقريباً بالمرّة على إشارات الأرصاد الجوية (أقل من 5% فعلياً)، وهما ثابتان حالياً، استناداً إلى التجارب عند 20 dB بالنسبة للميل وفي حدود 2,3 - 2,7 dB لعتبة الانحراف المعياري (σ). وفي النهاية، تجدر الإشارة إلى أنه عندما يكون التوهين المحسوب أكبر من 25 dB، تُحدد قيمة الانعكاسية الناتجة بالصفر (0).

2.3 المبدأ الخاص بقياس الرياح

على النقيض من الانعكاسية (dBZ)، والتي هي بمثابة قياس لشدة الإشارة، تستند قياسات الرياح إلى كشف دوبلر يتم تنفيذه على طول الإشارة ومعدل طورها ويمكن إجراؤه بمجرد زيادة الإشارة المستقبلية عن مستوى الضوضاء (أي -113 dBm).

ولتفادي كشف الطور الذي يمكن أن يتسبب فيه اختلاف الضوضاء أو مصادر أخرى غير مصادر الأرصاد الجوية، يتم وضع عتبة قدرها 3 dB فوق مستوى الضوضاء (أي -110 dBm) بالنسبة لبعض الرادارات، في حين أن بعض رادارات الأرصاد الجوية الأخرى مجهزة بحيث تعالج نسب إشارة إلى ضوضاء (S/N) تصل من -3 dB إلى -6 dB.

وتجدر الإشارة أيضاً إلى أن هذه القياسات تجري في ظروف المطر والسماء الصافية على السواء. ففي ظروف المطر، تكون المستويات المستقبلية مماثلة لتلك الموصوفة في الشكل 2. بينما في حالة السماء الصافية، يمكن بسهولة إدراك أن مستويات الانعكاسية المقابلة منخفضة جداً وهو ما يحول دون إجراء قياسات الرياح على مسافات أكبر من 30 إلى 50 km تقريباً.

وبالنسبة لكل تقدير (يقابل استجابة نبضية وبوابة من بوابات المدى)، فإن قيم الطور والانعكاسية تعتبر بمثابة متجه لعنصر معين من عناصر الصورة (بيكسل معين) في الشاشة الشبكية للرادار، ويتحصل على متجه الرياح الناتج باعتباره تجميع لكل متجهات الإشارات. ويعني ذلك أن الطور الخاص بكل تقدير تتم موازنته مع وحدة الانعكاسية المقابلة وأن تقدير الإشارة الذي يمثل انعكاسية عالية (أي وحدة المتجه) بوسعه التحكم في قياس البيكسل.

وتستعمل قياسات الرياح لاشتقاق مجموعتين مختلفتين من خصائص الرياح:

- السرعة القطرية عبر الشاشة الشبكية للرادار، على غرار عرض هطول الأمطار؛
- عارض السمات الرأسي، يتم فيه إجراء تكامل لكل البيانات (الخاصة بجميع الارتفاعات) عند نصف قطر يتراوح بين بضعة كيلومترات أو بضع عشرات الكيلومترات وذلك لحساب المظهر الجانبي للرياح في اتجاه رأسي من الرادار.

3.3 مثال على تشغيل رادار أرصاد جوية في أجزاء من مدى التردد 10,5-8,5 GHz

يمكن لرادارات الأرصاد الجوية التي تعمل في أجزاء من مدى التردد 10,5-8,5 GHz (أي على طول موجي يتراوح بين 2,5 و 4 cm) الكشف عن جسيمات أصغر. وتستعمل رادارات الأرصاد الجوية تلك عادة في دراسات تطور السحب نظراً لقدرة على اكتشاف جسيمات الماء متناهية الصغر وكذلك الهواطل الخفيفة. وهذه الرادارات لها مدى نمطي يبلغ 30 km لأهداف الأحوال الجوية التي تبلغ انعكاسيتها 10 dBz وتعمل بمستويات قدرة منخفضة نسبياً (12 kW على سبيل المثال).

وتخضع شبكات الرادار التي تعمل في أجزاء من مدى التردد 10,5-8,5 GHz أيضاً للدراسة باعتبارها وسيلة مكتملة لأنظمة رادارات الأحوال الجوية القائمة من خلال الكشف عن مقدمات أحداث الأحوال الجوية.

"ومن عيوب استعمال الرادارات التي تعمل في أجزاء من مدى التردد 12-8 GHz في الكشف عن الأحوال الجوية، مقدار التوهين في الإشارة الذي يمكن أن يحدث في المطر. ويعد التوهين خطيراً إلى حد ما في ظروف المطر المتوسط إلى الكثيف، حيث يكون عامل الانعكاسية أكبر من 40 dBz. وطالما كان بمقدور الرادار الحصول على إشارة مكتشفة بعد التوهين، فإنه يمكن وقتها إجراء قياسات السرعة ويمكن تطبيق تقديرات معدلات التوهين لتصحيح قيم الانعكاسية. ويمكن لقياسات الاستقطاب المزدوج أن تكون ذات فعالية خاصة لتصحيح التوهين (على سبيل المثال، Lim and Chandrasekar، 2005)".

وبمجرد انخفاض الإشارة الموهنة لأقل من حساسية الرادار، يتعذر الحصول على قياسات السرعة. وفي حال عدم توفر قياسات السرعة، تصاب قدرة الرادار على كشف أخطار الأحوال الجوية بالخلل.

وسيتعين إجراء المزيد من الدراسات التحليلية والقياسات الميدانية من أجل التقدير الكمي لأثر التداخل المحلي على هذه الأنظمة ولتحديد مقدار مستويات النسبة تداخل إلى ضوضاء (I/N) اللازمة لحماية هذه الأنظمة.

4 مقارنة بين رادارات الأرصاد الجوية والرادارات الأخرى

تستعمل معظم الرادارات لكشف وتتبع أهداف نقطية تقع في حدود مدى الكشف للرادار. وبالمقارنة، فإن رادارات الأرصاد الجوية لا تركز على كشف الأهداف الفردية. فهي تقيس الجو بمجمله حول الرادار. والإشارة المرتدة من كل فدر من فدرات المدى عبر كل شعاع تجري معالجتها لتقديم قياس كامل للجو، وهو ما يُشار إليه عادة بمسح حجمي (ثلاثي الأبعاد). ولهذا السبب، لا يستعمل المصطلح "احتمال الكشف" (p_d) عند تحديد خصائص رادارات الأرصاد الجوية. وفي الواقع، يُعد غياب إشارة مرتدة معلومة مفيدة أيضاً بالنسبة لمستعمل البيانات حيث يشير إلى ظروف جوية صافية.

وكما يشير مصطلح المسح الحجمي، فإن الرادار يقوم بمسح الحجم الجوي لتوليد تمثيل كامل للظروف الجوية. ففي حين يقوم العديد من أنماط الرادارات بتتبع الأهداف الفردية للحصول على معلومات (السرعة، المقطع العرضي للهدف حيال الموجات الرادارية، وما إلى ذلك) من خصائص النبضات المرتدة، فإن خصائص النبضات المرتدة بالنسبة لرادارات الأرصاد الجوية هي التي توفر على

الأغلب كل المعلومات. فما لم يكن الجو صافٍ تماماً، فإن رادارات الأرصاد الجوية تستقبل وتعالج الإشارات المرتدة لجميع فدرات المدى تقريباً عبر شعاع ما من الأشعة.

وتشمل معايير التقييم التشغيلي لنظام رادار أحوال جوية نمطي:

- أ) الجوانب التقنية؛
- ب) أداء الإنذار؛
- ج) جودة ومصداقية النواتج المقدمة.

وتتضمن الجوانب التقنية عوامل مثل التغطية عند ارتفاعات محددة والاستبانة المكانية والزمنية والحساسية والتغطية الدوبلرية وتيسر الرادار. ويمكن النظر إلى أداء الإنذار على أنه إجراء موضوعي، ولكنه في الواقع يرتبط مباشرة بإمكانية الكشف. وتؤثر جودة ومصداقية النواتج المقدمة - الانعكاسية والسرعة القطرية المتوسطة وعرض الطيف - على قدرة القائم بالتنبؤ على تقديم تحذيرات بشأن الأحوال الجوية الخطيرة وكذلك تقديم التنبؤات الدقيقة في الوقت المناسب.

1.4 الخصائص بالنسبة لمخططات الإرسال واستراتيجيات المسح

لضمان معالجة مسح الحجم (عادة في غضون 15 دقيقة)، تستفيد رادارات الأرصاد الجوية من العديد من مخططات الإرسال المختلفة على ارتفاعات مختلفة، باستعمال مجموعة من عروض نبضات وتردد تكرار النبضة (PRF) وسرعات دوران مختلفة فيما يعرف "باستراتيجيات المسح". وللأسف لا توجد مخططات نموذجية، حيث إنها تختلف نتيجة لعدد من العوامل، مثل إمكانيات الرادار وبيئة الرادار بالنسبة لنواتج الأرصاد الجوية المطلوبة.

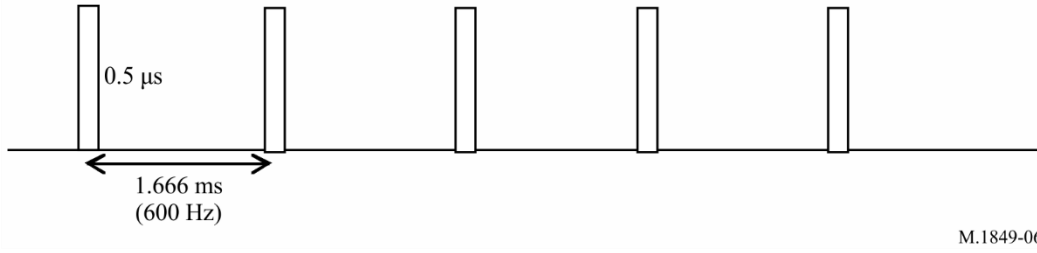
وقد تم التأكيد على ذلك عقب تساؤل عن رادارات الأرصاد الجوية العاملة في النطاق C والنطاق X في أوروبا والتي أظهرت مجموعات واسعة من معلمات مخططات الإرسال المختلفة:

- الارتفاع التشغيلي يتراوح من 0° إلى 90°.
- عرض النبضة يتراوح من 0,5 إلى 2,5 μ s (للرادارات التشغيلية). والرادارات الحالية مجهزة للعمل على عرض نبضة يتراوح بين 0,33 و 4,5 μ s للنبضات غير المنضغطة، في حين تستعمل بعض الرادارات ضغط النبضات لعرض نبضة يصل إلى 40 μ s ويتوقع أن يصل هذا العرض المنضغط إلى 100 μ s في المستقبل.
- تردد PRF يتراوح من 250 إلى 1 200 Hz (للرادارات التشغيلية). والرادارات الحالية مجهزة للعمل بتردد تكرار للنبضة يصل إلى 3 000 Hz.
- سرعة الدوران تتراوح من 1 إلى 6 دورة في الدقيقة.
- استعمال مخططات إرسال مختلفة في رادار معين بحيث تخلط بين عروض نبضات مختلفة وترددات PRF مختلفة وتحديدًا استعمال ترددات PRF ثابتة أو متخالفة أو مشدرة (أي ترددات PRF مختلفة خلال مخطط واحد).

وفيما يلي بعض الأمثلة لمخططات الإرسال المختلفة هذه:

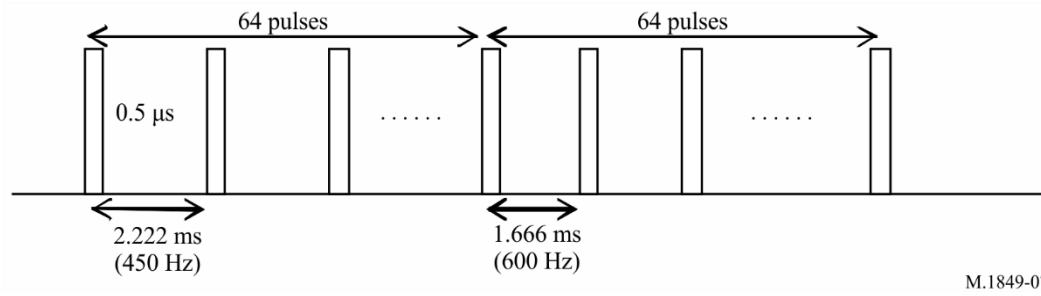
الشكل 6

تردد تكرار نبضة ثابت



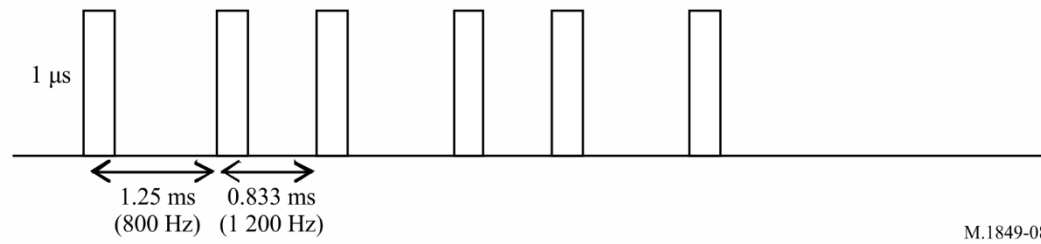
الشكل 7

تردد تكرار نبضة متخالف



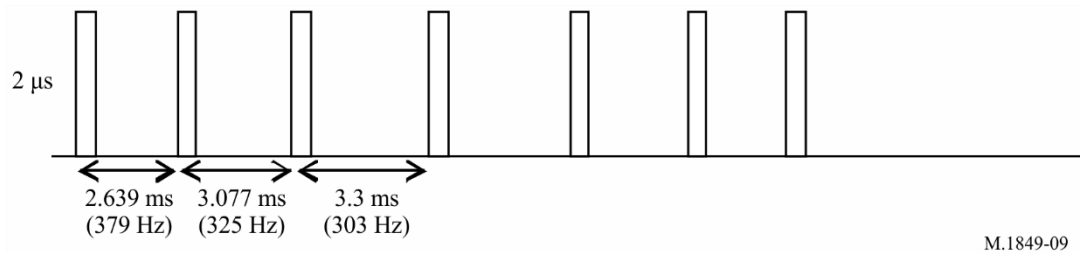
الشكل 8

تردد تكرار نبضة ثنائي التشدير (زمن ثنائي لتكرار النبضة)



الشكل 9

تردد تكرار النبضة (PRF) ثلاثي التشدير (زمن ثلاثي لتكرار النبضة (PRT))



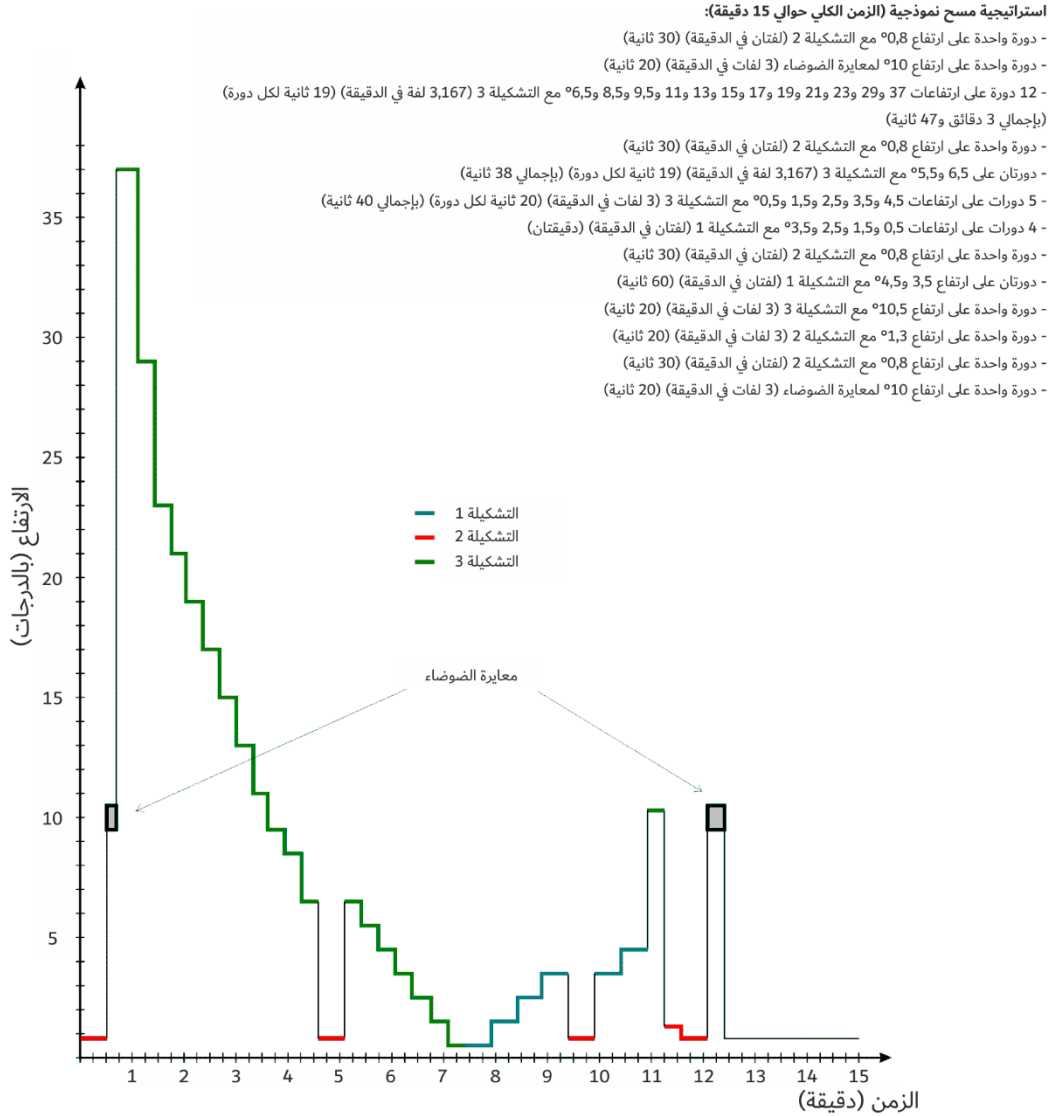
وتستعمل مخططات الإرسال هذه على عدد من الرادارات في استراتيجية المسح الخاصة بها والتي يتم خلالها إرسال مخطط إرسال واحد على ارتفاعات وسرعات دوران مختلفة.

ويجدر التأكيد على أنه من رادار لآخر، تختلف قيم التردد PRF وعرض النبضة المرتبطة بهذه الأمثلة من المخططات وذلك في حدود القيم المحددة أعلاه. كما أنه بالنسبة لأي مخطط معين، يمكن لعروض النبضات أن تختلف من نبضة لأخرى.

وفيما يلي مثال لاستراتيجية المسح هذه:

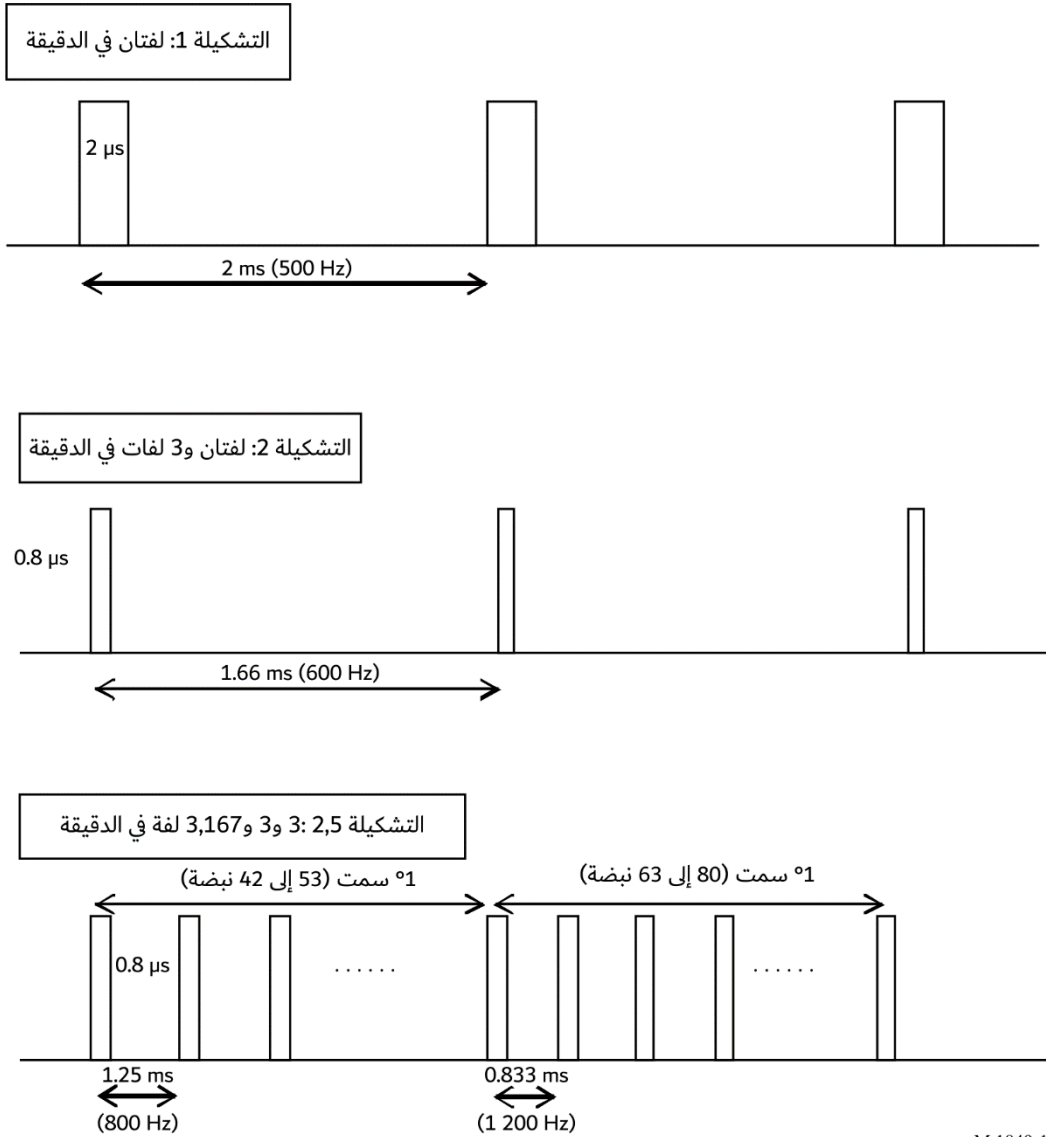
الشكل 10

استراتيجية مسح نموذجية لرادارات الأرصاد الجوية



الشكل 11

استراتيجية مسح نموذجية لرادارات الأرصاد الجوية



M.1849-11

2.4 الخصائص المتعلقة بمعايرة الضوضاء

بالنظر إلى ضعف الإشارة المرتدة إلى رادارات الأرصاد الجوية، يتحتم استخراج مستوى الضوضاء من الإشارة لتحقيق القياسات الأكثر دقة واسترجاع نواتج الأرصاد الجوية ذات الصلة.

وبالإشارة إلى مستوى الضوضاء بالحرف N ، والإشارة المفيدة (أي الإشارة المرتدة من الظواهر الجوية) بالحرف S ، يقوم رادار الأرصاد الجوية بإجراء العملية التالية:

1 لكل بوابة من بوابات المدى، يقوم الرادار بقياس الإشارة المرتدة، أي التي تقابل الإشارة المفيدة (S) والضوضاء (N)، أي $N + S$.

2 للحصول على الإشارة المفيدة (S)، يقوم الرادار بانتزاع مستوى الضوضاء N من الإشارة المرتدة $N + S$.

3 ويكون بمقدور الرادار بعد ذلك تحديد كل النواتج الخاصة بالأرصاد الجوية من الإشارة المفيدة S (dBm)، مثل هطول الأمطار (والذي يشتق من عامل الانعكاسية (dBz)) أو سرعة الرياح باستعمال التحليل الدوبلري.

وللحصول على نواتج أرصاد جوية أكثر دقة، يجب أن تكون الإشارة S دقيقة بقدر الإمكان مما يعني أن معايرة الضوضاء للرادار قضية على قدر كبير من الأهمية.

ومعايرة الضوضاء هذه، والتي تعرف أيضاً باسم "اختبار الصفر"، تجري بالتالي بشكل منتظم سواء أثناء أوقات الإرسال الاعتيادية للرادار (بالتخمين) أو أثناء فترات زمنية محددة (انظر مثال استراتيجية المسح أعلاه) يتم خلالها قياس الضوضاء.

وفي كثير من الحالات، تجرى قياسات الضوضاء هذه دون أي إرسال للرادار (يمكن أن يحدث ذلك تحديداً تأثيراً على تصميم بعض الأنظمة الراديوية التي تهدف إلى الكشف عن الإشارات الرادارية لتخفيف التداخل).

وفي كل الأحوال، من شأن التداخل المستقبلي أثناء معايرة فحص الضوضاء أن يتلف عملية جمع البيانات كلية، إلى أن تجري معايرة خالية من التداخل.

5 الأساليب التشغيلية لرادارات الأرصاد الجوية

يعمل رادار الأرصاد الجوية الدوبلري النمطي بالاختيار بين أسلوبين للمستعمل: أسلوب الجو الصافي وأسلوب هطول الأمطار. ويحتاج أسلوب الجو الصافي إلى اختياره يدوياً من جانب المستعمل. في حين يمكن اختيار أسلوب هطول الأمطار يدوياً في أي وقت أثناء التشغيل أو يمكن تشغيله أوتوماتياً عندما يكتشف رادار الأحوال الجوية شكلاً ما من أشكال هطول الأمطار (طبقاً لقيم محددة سلفاً ومنطقة التغطية الخاصة بالانعكاسية). وبوجه عام، تستفيد رادارات الأرصاد الجوية من الأسلوبين على السواء.

1.5 أسلوب الجو الصافي

يتيح أسلوب الجو الصافي لرادارات الأرصاد الجوية القدرة على كشف العلامات المبكرة لنشاط هطول الأمطار.

وهناك بعض المتغيرات في السرعة منخفضة المستوى وكثافة الهواء تسمح باكتشاف الهواطل المحتملة. ويستخدم الرادار سرعة مسح بطيئة بالاقتران مع تردد منخفض لتكرار النبضة (PRF) وذلك لتوظيف إمكانية ذات حساسية عالية. وتعد هذه الحساسية العالية نموذجية بالنسبة للتغيرات الخفيفة في الظروف الجوية على المدى الطويل. ويعتبر أسلوب الجو الصافي مفيداً على نحو خاص عندما يكون هناك نشاط حملي خفيف أو عدم وجود أي نشاط حملي بالمرّة داخل مدى إرسال الرادار وهو ملائم تماماً للكشف عن علامات تكون العواصف الرعدية أو الأنماط الأخرى للأحوال الجوية الخطيرة.

وتعود الحساسية العالية التي تتسم بها رادارات الأرصاد الجوية إلى مخطط مسح الحجم في أسلوب الجو الصافي. فعن طريق اختيار مخطط معين في أسلوب الجو الصافي؛ يكون بمقدور هوائي الرادار التوقف عن الدوران والثبات لفترة زمنية ممتدة في أي حجم معين من الفضاء بحيث يستقبل العديد من الإشارات المرتدة، مع السماح في نفس الوقت للرادار بالعمل مع قيمة أقل للنسبة إشارة إلى ضوضاء. ومن شأن استعمال عرض كبير للنبضة وتردد منخفض لتكرار النبضة أن يعطي قدرة إشارة مرتدة تبلغ 8 dB تقريباً بالنسبة لقيمة معينة للانعكاسية (dBZ).

2.5 أسلوب هطول الأمطار

يؤدي أسلوب هطول الأمطار وظيفة مختلفة تماماً عن أسلوب الجو الصافي. حيث تكون سرعة المسح في أسلوب هطول الأمطار دالة في زاوية الارتفاع. ويسمح هذا الارتباط بأقصى عدد ممكن من زوايا الارتفاع عند اعتيان الحجم الإجمالي لمسح الرادار. ويستفيد أسلوب هطول الأمطار من مخططات متعددة لتغطية حجم المسح لتنفيذ أنماط مختلفة من استراتيجيات المسح (انظر المثال الوارد في الفقرة 2.4) مع عينات مختلفة لزوايا الارتفاع. وترتبط الأحداث المتعلقة بالأحوال الجوية التي تُرصد عادة بأسلوب هطول الأمطار بتطور هطول الأمطار الذي يضم عواصف حاملة (الأمطار والبرّد) والعواصف الرعدية الشديدة والأعاصير وغيرها) كما ترتبط بالأنظمة الضخمة الشاملة.

6 نواتج بيانات رادارات الأرصاد الجوية

توفيراً لفهم أفضل لرادارات الأرصاد الجوية من أجل تحليل التداخل وإدارة الطيف الراديوي، يجب النظر في فئتين من نواتج بيانات رادارات الأرصاد الجوية: نواتج بيانات أساسية ونواتج بيانات مشتقة.

1.6 نواتج البيانات الأساسية التقليدية لرادارات الأرصاد الجوية

تولد رادارات الأرصاد الجوية دوبلرية ثلاث فئات من نواتج البيانات الأساسية من الإشارات المرتدة: الانعكاسية الأساسية والسرعة القطرية المتوسطة وعرض الطيف. وتتولد جميع النواتج الأعلى مستوى من هذه النواتج الأساسية الثلاثة. وتوصف دقة النواتج الأساسية كشرط أداء أساسي عند تصميم الرادار. وبدون توشي الدقة اللازمة عند هذا المستوى الأدنى (الأساسي)، يتعذر تحقيق الدقة في نواتج المستوى الأعلى المشتقة. وفي دراسات سابقة لقطاع الاتصالات الراديوية بشأن رادارات الأرصاد الجوية، ترد في التقرير ITU-R M.2136، استُخدم أثر التداخل المسموح به على نواتج البيانات الأساسية كمقياس لمعايير الحماية. فمثلاً، استخدم رادار تمثيلي يقيم الدقة الموضحة في الجدول 1 للبيانات الأساسية في دراسة لتحديد النسبة تداخل إلى ضوضاء التي تتسبب في عدم وفاء الرادار بمتطلبات تصميمه. ويتناول القسم 3.8 وكذلك الملحق 1 من التقرير ITU-R M.2136 التفاصيل الخاصة بتحديد معايير الحماية لرادارات الأرصاد الجوية.

الجدول 1

متطلبات دقة البيانات الأساسية لرادار تمثيلي للأرصاد الجوية (2 900-2 700 MHz)

متطلبات دقة التصميم	نواتج البيانات الأساسية
dB 1 >	الانعكاسية الأساسية
m/s 1 >	السرعة القطرية المتوسطة
Hz 1 000 <	عرض الطيف

1.1.6 الانعكاسية الأساسية

تستعمل الانعكاسية الأساسية في العديد من تطبيقات رادارات الأحوال الجوية، والتي يتمثل أهمها في تقدير معدل هطول الأمطار. والانعكاسية الأساسية هي شدة النبضات المرتدة وتحسب من متوسط خطي للقدرة المرتدة. ويضاف أي تداخل على الرادار إلى قدرة النبضات المرتدة ويؤدي إلى انحياز قيم الانعكاسية. ويمكن لقياسات الانعكاسية أن تتعرض للخلل إذا تجاوز هذا الانحياز متطلبات دقة البيانات الأساسية.

2.1.6 السرعة القطرية المتوسطة

تعرف السرعة القطرية المتوسطة أيضاً بالسرعة دوبلرية المتوسطة وهي تمثل السرعة المتوسطة المرجحة للانعكاسية للأهداف الواقعة ضمن عينة حجم مسح معينة. وتشير السرعة القطرية المتوسطة إلى اللحظة الأولى للكثافة الطيفية؛ أي السرعة القطرية للبيانات الأساسية. وهي تتحدد عادة من عدد كبير من النبضات المتتالية وتحسب من الإزاحة الزاوية للتغيرات المركب ذي التخلف الوحيد. وتوفر الإزاحة الزاوية للتغيرات المشترك المركب تقديراً للإزاحة الزاوية لمتجه الإشارة دوبلري بين نبضتين راداريتين. والسرعة الزاوية للمتجه دوبلري تساوي الإزاحة مقسومة على الفاصل الزمني بين النبضات. ويفصح الطيف دوبلري عن الانعكاسية والتوزيع المرجح للسرعات بالرادار داخل حجم المسح الراداري. وأي إشارة تداخل تظهر في شكل ضوضاء عريضة النطاق يكون لها احتمال منتظم عبر المستوي المركب وبالتالي لا تؤدي إلى دوران نظامي للمتجه دوبلري ولا إلى انحياز في التقدير. بيد أن عشوائية الإشارات المركبة إضافة إلى التداخل تزيدان من تباين التقدير الخاص بالإشارة دوبلرية.

3.1.6 عرض الطيف

في رادارات الأرصاد الجوية، يُحسب عرض الطيف من العلاقة ذات التخلف الوحيد مع افتراض كثافة طيفية غوسية. وهو قياس لتشتت السرعات داخل حجم عينة الرادار وعبرة عن انحراف معياري لطيف السرعة. ويعتمد عرض الطيف على الانعكاسية والقيم المتدرجة للسرعة عبر حجم النبضة والاضطراب داخل حجم النبضة². ولا يجري أي توسيط للعينات المستخدمة في حسابات عرض الطيف. بيد أن هناك تراكمًا للأجزاء الحقيقية والتخيلية من سلسلة العينات، أي أن العينات تؤخذ عبر الشعاع.

2.6 نواتج رادارات الأرصاد الجوية ثنائية الاستقطاب

1.2.6 الانعكاسية التفاضلية

الانعكاسية التفاضلية عبارة عن ناتج يرتبط برادارات الأرصاد الجوية ثنائية الاستقطاب وهي عبارة عن النسبة بين القدرة المرتدة المنعكسة أفقياً ونظيرتها المنعكسة رأسياً. وهي مؤشر جيد لكثير من الأمور من بينها شكل القطرة. وبدوره يعتبر الشكل بمثابة تقدير جيد لمتوسط حجم القطرة.

2.2.6 معامل الارتباط

هو أحد نواتج رادارات الأرصاد الجوية ثنائية الاستقطاب وهو ارتباط إحصائي بين القدرة المرتدة المنعكسة أفقياً ونظيرتها المنعكسة رأسياً. ويضيف هذا المعامل أوجه التماثل في خصائص الانعكاس الانتشاري للموجات المرتدة المستقطبة أفقياً ورأسياً. وهو مؤشر جيد للمناطق التي يكون فيها خليط من أنماط الهواطل مثل المطر والتلج.

3.2.6 معدل إزالة الاستقطاب الخطي

أحد نواتج الرادارات ثنائية الاستقطاب وهو عبارة عن معدل القدرة الرأسية المرتدة من نبضة أفقية أو القدرة الأفقية المرتدة من نبضة رأسية. ويعتبر هو الآخر مؤشراً جيداً للمناطق التي توجد فيها مخاليط من أنماط الهواطل.

4.2.6 الطور التفاضلي المحدد

يعد الطور التفاضلي المحدد هو الآخر من بين نواتج رادارات الأرصاد الجوية ثنائية الاستقطاب. وهو بمثابة مقارنة لفرق الطور المرتد بين النبضتين الرأسية والأفقية. ويرجع فرق الطور هذا إلى الفرق في عدد دورات الموجة (أو أطوال الموجة) عبر مسير الانتشار للموجات المستقطبة رأسياً وأفقياً. وينبغي عدم الخلط بين هذا الناتج وإزاحة التردد الدوبلرية والتي تعود إلى حركة السحاب وجسيمات الهواطل. وخلافاً للانعكاسية التفاضلية ومعامل الارتباط ومعدل إزالة الاستقطاب الخطي وهي نواتج تعتمد كلها على القدرة المنعكسة، فإن الطور التفاضلي المحدد عبارة عن "تأثير للانتشار". كما أنه يعتبر تقديراً جيداً جداً لمعدل هطول المطر.

3.6 نواتج البيانات المشتقة

يقوم المعالج بإنتاج نواتج بيانات مشتقة عالية المستوى لمستخدمي الرادار باستعمال نواتج البيانات الأساسية. ولن يتناول هذا النص نواتج البيانات المشتقة بالتفصيل، نظراً لاختلاف هذه النواتج من رادار لآخر، كما أن عدد هذه النواتج كبير جداً. وضمناً لدقة نواتج البيانات المشتقة، يتعين الحفاظ على دقة نواتج البيانات الأساسية.

² DOVIK, R. J. and ZRNIC. D. S.، الظاهرة الدوبلرية وعمليات الرصد الجوي. مؤسسة الصحافة الأكاديمية. سان دييغو، الولايات المتحدة الأمريكية 1984.

7 مخطط إشعاع الهوائي وديناميات الهوائي

تستخدم رادارات الأرصاد الجوية عادة هوائيات ذات عواكس مكافئية تنتج مخطط إشعاع رفيع الحزمة للهوائي. ولا تُطبق مخططات إشعاع الهوائي القياسية للاتحاد الدولي للاتصالات والخاصة بالهوائيات المكافئية على الهوائيات المستعملة في رادارات الأرصاد الجوية، نظراً إلى أن مخطط الإشعاع الرئيسي المتولد يكون في الغالب أعرض بكثير من مخطط الإشعاع الفعلي رفيع الحزمة. ومن شأن استعمال مخططات هوائيات أعرض أن يفضي في الغالب إلى نتائج مشتركة غير محددة تؤثر إلى وجود مشكلات تداخل أكثر خطورة من استعمال مخطط إشعاع هوائي دقيق.

1.7 حركة هوائي المسح ثلاثي الأبعاد

تتحقق التغطية الأفقية والرأسية اللازمة لمسح ثلاثي الأبعاد بحيث يُنتج جزءاً من الناتج في الاتجاه الرأسي، عن طريق تدوير الهوائي في مستوى أفقي بزواوية ارتفاع ثابتة. وتتم زيادة زاوية ارتفاع الهوائي بقيمة محددة سلفاً بعد كل قيمة من الناتج في الاتجاه الرأسي. وتتراوح القيمة الدنيا لناتج الاتجاه الرأسي عادة بين 0° و 1°، في حين يتراوح الحد الأقصى بين 20° و 40°، على الرغم من أن بعض التطبيقات يمكن أن تستخدم زوايا ارتفاع قدرها 60° أو أكثر. ولمعايرة الانعكاسية التفاضلية (Z_{dr})، يوجّه الهوائي عادة بزواوية ارتفاع تبلغ 90° ويدور بما لا يقل عن 360°.

وتختلف سرعة دوران الهوائي طبقاً للظروف الجوية والناتج المطلوب في هذا الوقت. ويجري ضبط سرعة الدوران وكذلك مدى زوايا الارتفاع والقفزات الوسيطة في زاوية الارتفاع وتردد تكرار النبضة بحيث يتم الحصول على الأداء الأمثل. وينتج عن الدوران البطيء للهوائي فترة توقف طويلة لكل شعاع بالنسبة للحساسية القصوى.

وتتيح سرعة دوران العالية للهوائي للمشغل الفرصة لتوليد مسح ثلاثي الأبعاد في فترة زمنية قصيرة عندما يفضل تغطية الحجم بالكامل بأسرع وقت ممكن. ويمكن التغير في قفزات زوايا الارتفاع وسرعة الدوران أن يؤدي إلى أزمنة لحيازة المسح الثلاثي الأبعاد تتراوح من دقيقة واحدة وتصل حتى 15 دقيقة. ونتيجة للفترات الزمنية الطويلة اللازمة لتحقيق مسح كامل للحجم مقارنة بالرادارات الأخرى التي تدور بزواوية ارتفاع ثابتة، يلزم تشغيل عمليات محاكاة دينامية أطول كثيراً للحصول على اعتيان ذي دلالة إحصائية للنتائج.

2.7 الاستراتيجيات الأخرى لتحريك الهوائي

تستخدم رادارات الأرصاد الجوية أيضاً استراتيجيات أخرى لتحريك الهوائي من أجل بعض التطبيقات الخاصة والأبحاث. ويستخدم المسح القطاعي للحصول على جزء من ناتج الاتجاه الرأسي. ويؤدي المسح القطاعي الثلاثي الأبعاد مسحاً ثلاثي الأبعاد لجزء من زاوية السمات 360° حيث يتخذ الهوائي أجزاءً متعددة من ناتج الاتجاه الرأسي. وفي الأسلوب الثالث يثبت الهوائي على زاويتي سمات وارتفاع ثابتتين لرصد نقطة محددة في الجو. وتتيح الاستراتيجيات الثلاث جميعها للمشغل التركيز على جزء محدد من الجو.

3.7 مخططات إشعاع الهوائي

ينبغي إجراء دراسات التقاسم باستعمال مخططات الإشعاع الفعلية لهوائيات الرادارات الخاضعة للدراسة، متى أمكن ذلك. ولكن في الحالات التي لا تتوفر فيها بيانات مخططات الإشعاع الفعلية للهوائيات، يمكن استعمال مجموعة تنوعية من المنحنيات أو المعادلات لاشتقاق خصائص تمثيلية للهوائي.

وحالياً، لا توجد معادلات محددة لمخططات إشعاع هوائيات الرادارات لدى قطاع الاتصالات الراديوية تمثل هوائيات الأرصاد الجوية، ذات الحزم الرفيعة. وفي غياب بيانات مقيسة، يمكن استعمال أربعة نماذج رياضية لمخططات إشعاع هوائيات، حسب الاقتضاء، في تحليل التداخل باستعمال أجهزة الرادار المشار إليها في التوصيات ITU-R F.1245 و ITU-R F.699 والتذييل 1 بالملحق 6 للتوصية ITU-R M.1652، أو الواردة في الجدول 5 بالملحق 1 للتوصية ITU-R M.1851. وفي حين أن التوصيات الثلاث الأولى تعتبر تمثيلية للهوائيات المكافئية، فإنها تنزع إلى الزيادة في تقدير عرض حزمة مخطط الإشعاع رفيع الحزمة الذي يمثل عادة مخطط الإشعاع الذي تستخدمه رادارات الأرصاد الجوية.

8 تأثيرات التداخل والضوضاء الشمسية على رادارات الأرصاد الجوية

يسهل إلى حد بعيد تحديد تأثيرات التداخل على الرادارات المستعملة في اكتشاف الأهداف النقطية. حيث يمكن إجراء الاختبار بإدخال أهداف معروفة مقلدة على الرادار ثم يُحدد بصرياً مستوى التداخل الذي تُفقد فيه الأهداف أو تتولد عنده أهداف زائفة. والمعاينة البصرية لنواتج البيانات المشتقة من مسح حجمي لرادار أرصاد جوية على النحو المعروضة به على خزانة المشغل، لا يعطي بياناً واضحاً عما إذا كان التداخل قد قلل من أداء الرادار. فمثلاً، إذا أحدث التداخل انخيازاً في بيانات الانعكاسية الأساسية مقداره 1 dB، فإن هذا الأثر لن يظهر بوضوح على شاشة العرض البيانية الخاصة بمطول الأمطار. بيد أنه إذا غطى التداخل جزءاً كبيراً من حجم المسح، فإن كل قدرة مدى والفدرات جميعها سيلحق بها انخياز داخل الحجم المتأثر بالتداخل ويتمثل التأثير المتراكم لهذا الأمر في تقدير مبالغ فيه إلى حد كبير لمعدل هطول الأمطار في منطقة جغرافية ما.

وتعاني جميع رادارات الأرصاد الجوية من ومضات شمسية خلال فترات شروق الشمس وغروبها. وتحدث الومضة الشمسية عندما تتراصف الحزمة الرئيسية للهوائي مع الشمس خلال واحدة من المسحات الحجمية. وتتسبب الومضات الشمسية، بالنسبة لرادارات الأرصاد الجوية على وجه الخصوص، في فقدان كامل للبيانات عبر شعاع أو شعاعين في اتجاه الشمس. وتجدد الإشارة إلى أن إمكانية التنبؤ بالومضات الشمسية يمكن أن توضع في الاعتبار بالنسبة إلى المعايرة في السمات لتجاه تسديد الرادارات.

وهذه التأثيرات الشمسية غير مرغوب فيها، وإن كان يمكن التنبؤ بها. فمع الأشكال الأخرى للتداخل والضوضاء، يظل الموقع وشدة الإشارة غير معروفين ولا يمكن التنبؤ بهما أو تناولهما بسهولة عن طريق المعالجة أو تأويل المشغل.

وتتأثر النواتج الأساسية من جراء التداخل بطريقتين. أولاً، قد يطول القيم انخياز يقلل من دقة النظام، وثانياً، يمكن لتغاير المخرجات أن يتأثر. وفي وجود التداخل، تكون الانعكاسية حساسة إلى الانخياز وتكون السرعة النظرية المتوسطة حساسة لأخطاء التغير، فيما يتأثر عرض الطيف بالانخياز وأخطاء التغير على السواء. وبالنسبة إلى عرض الطيف، فإن الأخطاء نتيجة للانخياز تكون أكبر من الأخطاء نتيجة للتغاير، حيث إن الانخياز أو التخالف يمثل الخطأ في قياس السرعة، في حين يمثل التغير عدم اليقين في السرعات المقاسة.

1.8 أثر التداخل على أساليب التشغيل

في أسلوب الجو الصافي، تكون النسبة إشارة إلى ضوضاء للإشارات المرتدة في أدنى مستوياتها وتكون البيانات أكثر عرضة للتلف من جراء التداخل. ونظماً، عند التشغيل في أسلوب الجو الصافي، يبحث عالم الأرصاد عن الإشارات الأولية للحمل والتي يمكن أن تتطور إلى أحوال جوية خطيرة أو ربما أعاصير. ويحتاج الكشف عن الحمل إلى الكشف عن الخطوط الدقيقة التي تحدثها النشطات، والتي تشير إلى حدود التقطعات التي تطلق الحمل. ويتراوح عرض مناطق الحمل هذه عادة بين شعاع وشعاعين (بالنسبة للعرض) ويجول التداخل عبر هذه الأشعة دون الكشف. ولهذا فإن التداخل، حتى وإن كان لفترات قصيرة جداً يمكن أن يؤدي إلى فقدان اكتشاف أحوال جوية خطيرة في طور التشكل. وإذا ما فقدت هذه المعلومات عبر شعاع حرج أثناء مسح حجمية، فإن الكشف يحدث له تأخير في حدود 10 دقائق حتى يعيد المسح الحجمي تسديد الهوائي نحو هذه المنطقة من الفضاء.

وأسلوب الهواطل هو الأسلوب الأكثر طلباً بالنسبة إلى الاتصالات وتوليد النواتج الرادارية والمعالجة والعرض للمستعمل. وبالنسبة إلى أسلوب الهواطل، تستند كل الخوارزميات تقريباً إلى البيانات الأساسية للانعكاسية والسرعة المتوسطة وعرض الطيف لتوليد النواتج المشتقة لكي يستعملها المشغل.

2.8 أثر التداخل على النواتج الأساسية

تتأثر النواتج الأساسية بالتداخل بطريقتين مختلفتين. أولاً، قد يطول الانخياز القيم وهو ما يقلل من دقة النظام، وثانياً، قد يتأثر تغاير المخرجات. ففي حال وجود التداخل، تكون الانعكاسية حساسة للانخياز وتكون السرعة القطرية المتوسطة حساسة لأخطاء التغير فيما يتأثر عرض الطيف بأخطاء الانخياز والتغاير على السواء. وبالنسبة لعرض الطيف، تكون الأخطاء نتيجة للانخياز أكبر بكثير من الأخطاء نتيجة للتغاير، نظراً إلى أن الانخياز أو التخالف يمثل الخطأ في قياس السرعة في حين يمثل التغير عدم اليقين في السرعات المقاسة.

وتُحسب الانعكاسية من المتوسط الخطي للقدرة. وفي بعض رادارات الأرصاد الجوية تتشكل تقديرات الانعكاسية من قدرات المدى التي تمتد في العمق بمقدار 250 m لكل عرض شعاع (1,0° تقريباً في اتجاه السمات). وتقوم هذه الأنظمة بتوسيط قدرات المدى لإنتاج خرج لتقدير الانعكاسية في الفترات المحددة. وهذا التوسيط من أربعة إلى واحد يمكن أن يزيد من تخفيف آثار التداخل الواقع على نبضة واحدة. وهناك خطط لأنظمة رادارات الأرصاد الجوية من الجيل التالي تتمثل في إضافة ناتج لانعكاسية "فائقة الاستبانة" تستغني عن عملية التوسيط وتنتج تقديرات للانعكاسية بفواصل 250 m. وعلاوة على ذلك، سيتم خفض عرض الشعاع إلى النصف (0,5°) حيث سيتم استعمال نصف العينات فقط. وسيتمثل التأثير الإجمالي في خفض حجم العينة بمقدار ثمانية. ولذا، فإن التداخل قد يكون أكثر وضوحاً في ناتج الانعكاسية "فائقة الاستبانة" عما هو في التقديرات الحالية.

وبالنسبة للنواتج الدوبلرية، يكون تأثير التداخل غير خطي. حيث تُحسب السرعة من إزاحة تباير مشترك مركب فيما يُحسب عرض الطيف من الارتباط الأوتوماتي. ولا يُقاس خليط من الإشارة مع التداخل خطياً كما هو الحال مع متوسط الانعكاسية. حيث تنشأ هذه التقديرات من تراكم قياسات الإشارة التي تتكون من معلومات لكل من المقدار وزاوية الطور. وعادة، يكون لمصادر التداخل أطوار عشوائية بالنسبة للإشارة الأصلية لرادار الأرصاد الجوية ويصعب التنبؤ بتأثيرها على دقة التقديرات.

وبالنسبة لعرض الطيف، يحدث التداخل انحيازاً وزيادة في تباير تقديرات عرض الطيف جنباً إلى جنب. ويعد الانحياز في التقدير أكثر خطراً من الزيادة في التباير.

ويتعين تحديد أخطاء القياس بحيث يمكن مواءمة الرصدات الرادارية على النحو الأمثل بالنسبة للتنبؤات الجوية الرقمية. وهناك جانبان يتعلقان بهذه المشكلة:

- 1 الأخطاء في القياسات الأصلية داخل كل حجم نبضة رادارية التي تتشكل في جزء منها من جراء إشارات التداخل،
- 2 مدى تمثيل تقديرات البيانات الرادارية المستعملة في عملية المواءمة.

وبالنسبة للسرعات القطرية، فإن المصدر الأول للخطأ يعتمد على شدة الإشارة المرتدة وعلى انتشار أو عرض طيف السرعة الدوبلرية. ويعتمد عرض الطيف بدوره وبصورة أساسية على الانعكاسية وعلى التغير في السرعة داخل وعبر حجم النبضة والاضطراب داخل حجم النبضة [Doviak and Zrnica, 1984]. ويتسم تقدير هذه الأخطاء بالتعقيد نتيجة إلى أن المكونات المطلوبة لتقدير موثوق للأخطاء هي في حد ذاتها مكونات مقاسة فحسب ومن ثم لديها مظاهر عدم يقين متأصلة.

وقد برز مفهوم مفاده أنه بالنسبة لخلية استبانة معينة للمدى، تقوم رادارات الأرصاد الجوية بتوسيط العديد من الإشارات النبضية المرتدة عبر فترة سكون الشعاع. وقد رُئي أنه في حال حدوث تداخل جزئي قصير من فترة سكون الشعاع، فإن أثر التداخل يجري توسيطه مع الإشارات النبضية الخالية من التداخل، ومن ثم يتم خفض آثار التداخل. فمثلاً، إذا تم تشغيل الرادار مع نسبة تداخل إلى ضوء أقل كثيراً من -10 dB، ولكن هذه النسبة -10 dB تنتهك لأي فترة قصيرة (نسبة مئوية صغيرة من وقت سكون الشعاع)، فإن أثر التداخل يجري توسيطه مع الإشارات المرتدة الخالية من التداخل. فإذا كانت النسبة I/N والتي تبلغ -10 dB تُنتهك، ولكن ليس من خلال مستوى عالٍ من التداخل، فإن النتيجة المحتملة هي أن انحياز الانعكاسية للإشارات المرتدة التي جرى توسيطها يمكن أن يبقى داخل حدود أهداف التصميم الخاصة بالرادار المعني. ولسوء الحظ، لا يكون هذا النهج فعالاً إلا إذا كانت إشارة أو إشارات التداخل متماسكة عبر فترة السكون. ونظراً إلى أن ذلك لا يحدث عادة، فإن تقنيات التوسيط قد لا تكون هي الأسلوب الأكثر فعالية للتخفيف من آثار التداخل على النواتج الدوبلرية. بيد أنه، باستثناء رادارات الأرصاد الجوية التي تستخدم المعالجة الطيفية، يمكن للتوسيط أن يكون وسيلة فعالة للتخفيف من التداخل شريطة أن يعطى متوسط التداخل عبر فترة السكون قيمة للنسبة I/N أقل من -10 dB.

وتأثير التداخل على نواتج الرادارات الاستقطابية أو رادارات الأرصاد الجوية مزدوجة الاستقطاب، مثل الانعكاسية التفاضلية ومعامل الارتباط ومعدل إزالة الاستقطاب الخطي والطور التفاضلي المحدد، يحتاج لمزيد من الدراسة من المنظورين الرياضي والمتعلق بالقياس وذلك لتحديد الكمي لمستويات معايير الحماية اللازمة لضمان عدم تأثر نواتج الرادارات الاستقطابية بالسلب من جراء التداخل.

وينبغي أن نعي أن التداخل على رادارات الأرصاد الجوية ينبغي تدنيته بغية تخفيف التداخل أو تفاديه كلياً. وخلافاً لأنظمة الاتصالات التي تستعمل الإطناب وتصحيح الأخطاء، لا تستطيع رادارات الأرصاد الجوية استعادة حياة المعلومات المفقودة. لذا،

عند النظر في خصائص الرادار من أجل دراسة التقاسم داخل قطاع الاتصالات الراديوية، يجب مراعاة عوامل أخرى وهو ما سيتم تناوله في الأقسام التالية.

3.8 الاشتقاق الرياضي لمعايير حماية رادارات الأرصاد الجوية

تقوم رادارات الأرصاد الجوية بإجراء ثلاثة قياسات أساسية، والتي بالاقتران مع معلومات المشغل تستخدم في اشتقاق نواتج الأرصاد الجوية. والنواتج الثلاثة الأساسية التي يُشتق منها النواتج الأخرى هي انعكاسية الحجم (ثلاثية الأبعاد)، والسرعة القطرية و عرض الطيف.

ويقدم القسم 2 من الملحق 1 من التقرير ITU-R M.2136 مناقشة مفصلة لمعايير حماية رادارات الأرصاد الجوية المشتقة رياضياً من هذه النواتج الثلاثة والتي تدعمها نتائج الاختبارات للتحقق من صلاحية النواتج المشتقة.

وفي حين أنه من السهل وغالباً ما يحدث، فإنه لا يمكن تطبيق قيمة واحدة لمعايير الحماية على جميع رادارات الأرصاد الجوية التي تعمل في نطاق تردد واحد. ورادارات الأرصاد الجوية مصممة بحيث تحقق أهداف أداء متباينة، حيث يجري استئصال هذه الأهداف طبقاً لشروط محددة للأرصاد الجوية. ودقة الناتج الأساسي والحد الأدنى لنسبة S/N للرادار تختلفان من تطبيق راداري لآخر. فكلما قل الحد الأدنى للنسبة S/N التي يستعملها الرادار قلت معايير الحماية المطلوبة.

وتقوم عملية معالجة الإشارة بإزالة الكثير من تأثيرات ضوضاء نظام الرادار من قياسات الانعكاسية و عرض الطيف؛ ونتيجة لذلك، يمكن لبعض الأنظمة أن تنتج تقديرات لهذه النواتج الأساسية لمستويات للإشارة تقل عن مستوى ضوضاء المستقبلات. ويختار مشغل الرادار العتبة المرغوب فيها لنسبة S/N^3 والتي قد تتراوح قيمتها بين -12 dB و 6 dB.

ويقدم رادار الأرصاد الجوية النمطي المستعمل في الأمثلة المقدمة في الفقرة 2 من الملحق 1 من التقرير ITU-R M.2136 قياسات مفيدة لمستويات العتبة S/N تصل في انخفاضها إلى -3 dB. والتداخل عند هذا المستوى من الإشارة وما علاه سيصيب جودة النواتج الأساسية بالأخطاط. ويبرز هذا الأمر ضرورة تحديد نسبة I/N تحمي سلامة هذه النواتج.

وبمعرفة المواصفات التقنية وشروط الدقة المتعلقة بالبيانات الأساسية لأي رادار معين من رادارات الأرصاد الجوية، يمكن اشتقاق القيم النظرية للنسبة I/N اللازمة لضمان عدم تأثر النواتج الأساسية بالسلب من منظوري الانحياز والتغاير.

4.8 أنماط التداخلات المحتملة

يمكن لرادارات الأرصاد الجوية أن تتعرض لأنماط مختلفة من التداخل:

- ثابت؛

- متغير مع الزمن؛

- في شكل نبضة.

وكخطوة أولى، يقترح تحديد أثر تداخل ثابت يقابل معايير حماية للنسبة I/N مقدارها -10 dB، ثم يتم بعد ذلك تقييم معايير الحماية المحتملة لمصادر التداخل الأخرى لضمان مستوى مماثل من الخطاط أداء الرادار.

1.4.8 أثر تداخل ثابت

تقابل معايير الحماية للنسبة I/N التي تبلغ -10 dB زيادة في الضوضاء أو الطاقة مقدارها 0,5 dB.

وعلى أساس أن الرادارات تُعاير لكي تتطابق مع مستوى ضوضاء المستقبل (أي -113 dBm تقريباً) مع مستوى انعكاسية 0 dBz عند 100 km، فإنه تحدث زيادة في الضوضاء تغير من الشروط الاسمية للرادار مما يؤدي إلى خفض مدى الرادار.

وعلى هذا الأساس، يفرض أن التغطية الحالية لرادارات الأرصاد الجوية العاملة في مدى التردد 5 250-5 725 MHz تمتد حتى 200 km تقريباً، فإن الجدول 2 يلخص الخسارة في المدى والتغطية إزاء الزيادة في التداخل I/N والضوضاء.

الجدول 2

الخسارة في المدى والتغطية

الزيادة في الضوضاء (dB)	النسبة I/N المقابلة (dB)	الخسارة في التغطية (km)	الخسارة في التغطية (% من السطح)
0,5	10-	11	%11
1	6-	22	%21
2	2,3-	42	%38
3	0	59	%50
4	1,8	75	%61
5	3,3	88	%69
6	4,7	100	%75
7	6	111	%80
8	7,3	121	%84
9	8,4	130	%88
10	9,5	137	%90

ومن جهة أخرى، يحدث التداخل الثابت كذلك زيادة في الطاقة التي يستقبلها الرادار تؤخذ في الاعتبار عند حساب الانعكاسية. وطبقاً للوصف الوارد في الفقرة 2.2، فإن معدل الهواطل المقابل لمستوى معين من الانعكاسية (dB) يتحصل عليه من:

$$z = AR^B$$

حيث:

z : الانعكاسية

A : ثابت التشتت

B : مضاعف نسبة

و

$$10 \log z \text{ (dBz)} = z$$

حيث:

dBz: الانعكاسية (dB).

وبإعادة ترتيب الحدود والحل للمعادلة R ، نحصل على المعادلة التالية:

$$R_{\text{(mm/h)}} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10} \right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}$$

وبفرض زيادة ثابتة في الطاقة C ، فإن معدل هطول الأمطار الناتج يساوي:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz} + C}{10} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}}}{200} \right)$$

والزيادة في معدل هطول الأمطار كنسبة مئوية تكون بعد ذلك مقداراً ثابتاً يتحصل عليه من:

$$p(R_{(\text{mm/h})}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16} \right)} - 1 \right)$$

ويدرج الجدول 3 ثوابت التشتت النمطية ومضاعفات النسبة لأنماط الهواطل العديدة⁴.

الجدول 3

ثوابت التشتت ومضاعفات النسب لأحداث هواطل مختلفة

المتغيرات	الأمطار الستراتوسفيرية	أمطار الحمل	الثلج	البرد
ثوابت التشتت (A)	200	500	2 000	2 000
مضاعفات النسب (B)	1,6	1,5	2	1,29

ويوجز الجدول 4 الزيادة في النسبة المئوية للمطر للعديد من أحداث الهواطل.

الجدول 4

ملخص للتقديرات الزائدة للهواطل

الزيادة في الضوضاء (dB)	النسبة //N المقابلة (dB)	الزيادة في نسبة الأمطار الستراتوسفيرية (%)	الزيادة في نسبة أمطار الحمل (%)	الزيادة في نسبة الثلج (%)	الزيادة في نسبة البرد (%)
0,5	10-	7,5	8,0	5,9	9,3
1	6-	15,5	16,6	12,2	19,5
2	2,3-	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

وتبين هذه الحسابات أنه بصرف النظر عن قيمة المطر ونمط هطول الأمطار، فإن النسبة المئوية للتقدير الزائد المقابلة لزيادة معينة ثابتة في الطاقة تكون هي الأخرى ثابتة ومن ثم لا يمكن إهمالها.

⁴ ثوابت التشتت ومضاعفات النسب للأمطار الستراتوسفيرية وأمطار الحمل والثلج والبرد تشتق من القياسات.

كما أنه بالنظر إلى أن حساب الانعكاسية لبيكسل معينة والذي يقوم على المتوسط (dBz) عبر كل التقديرات والانحراف المعياري ذي الصلة، تجدر الإشارة هنا إلى أن زيادة ثابتة في الطاقة الخاصة لكل التقديرات ستزيد من هذا المتوسط وإن كانت لن تغير في الانحراف المعياري. وهذا يعني أن ذلك لن يعدل في كشف الرادار للمطر (أي أن أي قياس لا يعتبر خلية مطر سيظل لا ينظر إليه على هذا النحو) ولكن سيكون له تأثير على معدل المطر فحسب.

كما تجدر الإشارة أنه بالنسبة للخسارة في التغطية أو التقدير الزائد لمعدل المطر، فإن معيار حماية يبلغ -10 dB يمثل انحطاطاً في أداء الرادار بالنسبة إلى المدى يتراوح بين 7 و 11% وهو ما يتفق بوجه عام مع الأرقام المتعلقة بجميع خدمات الاتصالات الراديوية. وبالنسبة للقياسات الدوبلرية، يختلف تقييم أثر تداخل ثابت معين بعض الاختلاف ويعتمد تحديداً على الكيفية التي يمكن لطور إشارة التداخل أن يعدل بها طور الإشارة المطلوبة.

وهذا الافتراض الأخير لا يسهل بالتأكيد تحديده وسيعتمد على الإشارة و/أو البيئة. وكلا الموقفين يجري بحثهما في الحالتين التاليتين:

- الحالة 1: إذا كان طور إشارة التداخل المكتشفة بواسطة الرادار عشوائياً، فهذا يعني أن المتجه الناتج سيكون عديم القيمة مهما كان مستواه. ومن ثم لن يكون له أي تأثير من الناحية النظرية على قياسات الرياح.
- الحالة 2: إذا كان الطور المكتشف غير عشوائي وثابتاً إلى حد ما، فإنه ينتج عنه متجه ثابت بوحدة قياس معينة وسيعتمد تأثيره على قياسات الرياح على طور ومستوى هذا المتجه على حد سواء.

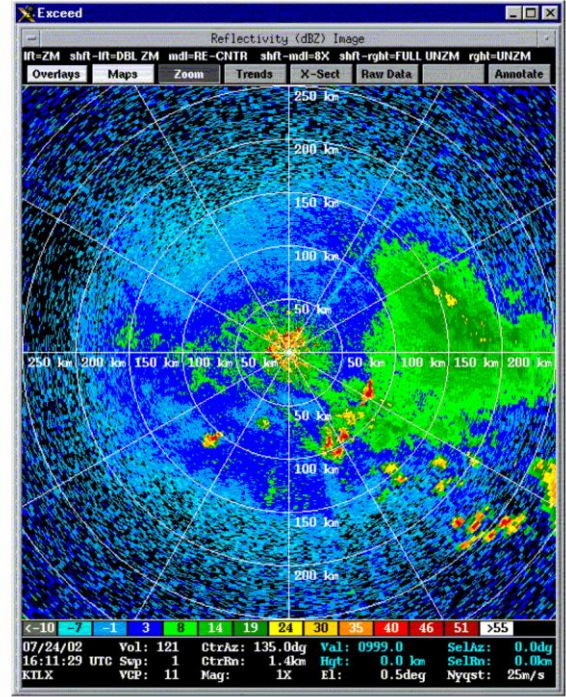
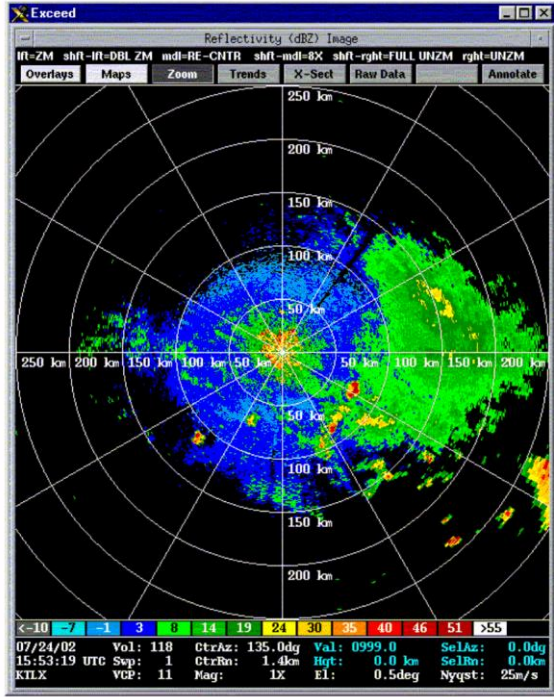
وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أيضاً افتراض أنه عندما يكون مستوى التداخل أقل كثيراً من الإشارة المطلوبة، فإن طور الإشارة المطلوبة لا يصاب بأي تغيير. وإذا كانت إشارة التداخل أكبر بكثير، فإن الطور الذي يكتشفه الرادار يكون طور إشارة التداخل وتسري المناقشة الخاصة بالحالتين 1 و 2 أعلاه. وبين الموقفين، أي عندما تكون مستويات كل من إشارة التداخل والإشارة المطلوبة متقاربة، يصعب إلى حد كبير تقييم أي من الإشارتين سيتحكم في كشف الطور.

2.4.8 أثر التداخل النبضي

قد يكون للتداخل النبضي تأثير كبير على بيانات الانعكاسية التي يستعملها علماء الأرصاد الجوية في التنبؤ بالأحداث الجوية الخطيرة. ويمكن للتداخل النبضي في بعض الحالات أن يؤدي لبيانات للإشارة المرتدة لا يمكن أن تنتج صورة يعول عليها للأهداف الموجودة في الجو. ويمكن الاطلاع على أمثلة لذلك في الشكل 12.

الشكل 12

صورة لرادار أرصاد جوية بدون تداخل مقابل صورة بالتداخل (أسلوب الموهابل)

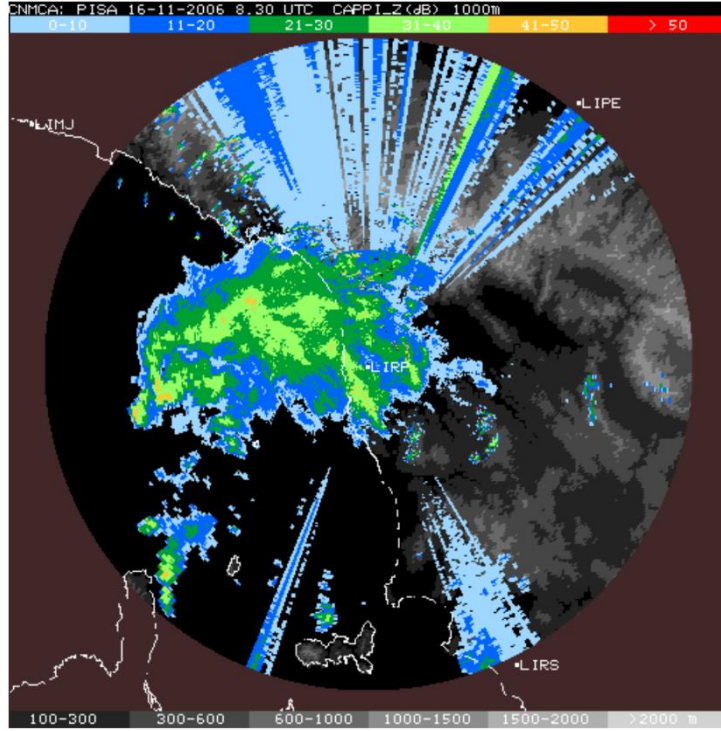


M.1849-12

ويمكن الاطلاع على مثال آخر لتداخل على رادار أرصاد جوية من مرسل وحيد منخفض القدرة داخل المباني وذلك في الشكل 13.

الشكل 13

التداخل على رادار أرصاد جوية (أسلوب الهواطل)



M.1849-13

وفي حالة تطبيق تداخل يقوم بإرسال إشارات نبضية، ونتيجة لمبدأ قياسات المطر والرياح القائمة على أخذ المتوسط عبر عدد كبير من النبضات الرادارية، يُعتقد أن الذي سيتحكم في الأثر على رادارات الأرصاد الجوية هي على الأغلب النسبة بين تردد تكرار النبضة لبوابات رادارات الأرصاد الجوية (عرض النبضة) ومصدر التداخل.

فمن جهة، يفترض أن هذه النسبة يمكن حسابها من الصيغة الواردة في الفقرة 2.3 من التوصية ITU-R RS.1280 والتي تعطي الجزء الخاص بالنبضات المتطابقة بين تطبيقين نبضيين والذي سيعتمد على ما إذا كان تردد تكرار النبضة بالنسبة لكل من الإشارة المطلوبة وغير المطلوبة يرتبطان بمضاعفات صحيحة (الحالة I) أم لا (الحالة II). ويتحصل على الجزء الخاص بالنبضات المتطابقة f_c من:

I للحالة

$$f_c = \frac{GCF(PR F_i, PR F_g)}{PR F_g}$$

II للحالة

$$f_c = PR F_i(\tau_g + \tau_i)$$

حيث:

$PR F_i$: تردد تكرار النبضة لإشارة التداخل؛ بوحدات Hz أو النبضات في الثانية (pps)

$PR F_g$: تردد تكرار النبضة لبوابة الرادار

$GCF(PR F_i, PR F_g)$: العامل المشترك الأكبر للترددين $PR F_i$ و $PR F_g$

τ_i : عرض نبضة إشارة التداخل؛ بوحدات الثانية

τ_g : عرض نبضة بوابة الرادار.

ويلاحظ أنه عندما يكون τ_I أكبر من τ_g وعندما يكون تردد تكرار النبضة لكل من الإشارة المطلوبة والإشارة غير المطلوبة غير مرتبطين بمضاعفات صحيحة (الحالة II)، فإن f_c تساوي دورة عمل نبضات التداخل تقريباً.

وعلى هذا الأساس، لكي نحافظ على نفس مستوى الانحطاط (نحو 10%) كما هو الحال في التداخل الثابت حيث تنطبق النسبة $I/N_{constant} = -10$ dB، يفترض أن النسبة I/N القصوى المتعلقة بتداخل نبضي يمكن أن يتحصل عليها من:

$$I/N_{pulse} = I/N_{constant} - 10 \log(f_c)$$

وفي الواقع، إذا كان جزء النبضات المتطابقة يساوي 0,5 وهو ما يعني أن واحداً من بين كل تقديرين من تقديرات الرادار سيتأثر بالسلب من جراء التداخل وأن إشارة التداخل تتضاعف (+3 dB) مقارنة بالوضع السائد عندما تكون النسبة I/N تساوي -10 dB، فمن الواضح أن المتوسط الذي يحسبه الرادار سيكون هو نفسه.

ومن جهة أخرى، سيزيد الانحراف المعياري وهو ما يؤدي في بعض الأحوال إلى أن ينظر إلى بعض الأحداث غير المتعلقة بالأرصاد الجوية على أنها حالة مطر. وفي هذه الحالة، يفترض أن انحطاطاً مقداره 10% يكون مقبولاً، ولكن يحتاج ذلك إلى التحقق من صدقه وتبريره عن طريق الحساب وكذلك عن طريق الاختبار.

وتجدر الإشارة إلى أن المبدأ المشار إليه آنفاً والخاص بأن النسبة I/N الأعلى التي تقابلها قدرة الذروة للتداخل النبضي ويمكن لرادارات الأرصاد الجوية قبولها، قد تم التحقق منه عن طريق اختبار جرى مؤخراً (انظر الملحق 2 من التقرير ITU-R M.2136). وحتى إذا لم يتحقق من صلاحية الصيغة أعلاه بشكل كامل في جميع الحالات، يفترض عندئذ تصور نهج وثيق الصلة. ومع ذلك قد يكون من المناسب إجراء مزيد من التحليل لتحديد العلاقة بين خصائص الإشارتين المتأثرة بالتداخل والمسببة للتداخل (تردد تكرار النبضة وعرضها).

1.2.4.8 طريقة بديلة لاشتقاق مستويات النسبة I/N للتداخل النبضي

تعالج رادارات الأرصاد الجوية الإشارات المرتدة لقياس الهواطل وأنماط الرياح. وتشمل المعالجة جمع النواتج الأساسية ومعالجتها وهذه النواتج هي الانعكاسية والسرعة القطرية المتوسطة وعرض الطيف. وفي شرح مبسط، يقوم الرادار بأخذ المتوسط لعينة من الإشارات المرتدة لاشتقاق التقديرات اللازمة لإنتاج نواتج الأرصاد الجوية. وتتيح عملية التوسيط لرادار الأرصاد الجوية القدرة على معالجة مستويات أعلى من التداخل النبضي مقارنة بإشارات التداخل ذات الموجات المستمرة أو الشبيهة بالضوضاء.

ويقوم رادار الأرصاد الجوية بمعالجة العديد من الإشارات النبضية المرتدة التي تقع في نطاق فدره واحدة للمدى لكي يكون عينة يحدد حجمها المستعمل. والإشارات النبضية المرتدة المتعددة والتي تكون عينة فدره المدى يجري توسيطها لاشتقاق التقدير الخاص بفدره المدى. وأنظمة خدمة استكشاف الأرض الساتلية وادارات الأرصاد الجوية المقترحة تعمل على ترددات لتكرار النبضة تختلف كثيراً عن بعضها، لذا فإن احتمال وقوع أكثر من نبضة تداخل داخل مجموعة عينات وحيدة لفدرات المدى لرادار أرصاد جوية يكون ضعيفاً، نتيجة لصغر حجم العينة. ويتمثل النهج في تحديد المستوى الأقصى لأي نبضة وحيدة لا يخل بمتوسط حجم العتبة بما يتجاوز أهداف أداء الرادار بخصوص نواتج البيانات الأساسية.

ولتحديد معايير الحماية يجب الإلمام بمستوى ضوضاء مستقبل الرادار والحد الأدنى للنسبة إشارة إلى ضوضاء المستعمل في المعالجة ومتطلبات الدقة بالنسبة للنواتج الأساسية للرادار (الانعكاسية والسرعة القطرية المتوسطة وعرض الطيف). ونظراً إلى أن هناك مجموعة متنوعة من رادارات الأرصاد الجوية تعمل في نطاق التردد هذا، يتعين وضع بعض الافتراضات. والرادار المستعمل في التحليل تبلغ قيمة الضوضاء المتأصلة لمستقبله -110 dBm عند أضييق عرض نطاق IF.

والحد الأدنى للنسبة إشارة إلى ضوضاء، ربما تكون هي القيمة الأصعب في تحديدها دون الإشارة إلى رادارات محددة. فبالنسبة للرادارات التي تعمل في نطاق التردد 2 700-2 900 MHz، تعتبر قيمة النسبة إشارة إلى ضوضاء التي تتراوح بين صفر و 3 dB هي النموذجية، نظراً إلى أن رادارات الترددات الأقل تعمل عادة للكشف على مديات طويلة. وتستعمل رادارات الأرصاد الجوية التي تعمل في نطاق التردد 9 300-9 500 MHz عادة في الكشف على المديات الأقصر مع استبانة أعلى ويمكن تشغيلها على قيمة أكبر للحد الأدنى للنسبة إشارة إلى ضوضاء. ولأغراض هذا التحليل، فإن قيمة النسبة S/N مقداره +3 dB وضوضاء متأصلة تبلغ -110 dBm لمستقبل الرادار تؤديان بمتطلبات الدقة المدرجة في الجدول 5 بالنسبة لنواتج البيانات الأساسية.

الجدول 5

متطلبات الدقة بالنسبة للبيانات

متطلبات الدقة بالنسبة للبيانات الأساسية	
dB 1	تقديرات الانعكاسية
m/s 1	تقديرات السرعة
Hz 1 000	تقديرات عرض النطاق

وكما يتبين من الجدول 5، يفترض أن أقصى انحياز في الانعكاسية بالنسبة لرادار الأرصاد الجوية المستعمل في هذا المثال هو 1 dB؛ ويترجم ذلك إلى قيمة للنسبة تداخل إلى أدنى إشارة مقدارها 0,26 أو نسبة قدرة مقدارها 1,26. كما يفترض حجم عينة للانعكاسية مقدارها 25. ويجوز أن يكون حجم العينة أكبر من 25 لزيادة خفض تأثير النبضة الوحيدة، وإن كانت الزيادة في حجم العينة تزيد أيضا من احتمال ظهور نبضة تداخل ثانية في نفس العينة.

2.2.4.8 حساب النسبة I/N لمصدر تداخل نبضي (إصابة نبضية واحدة)

1.2.2.4.8 افتراضات

- المستوى الأدنى للإشارة المسترجعة عادة تكون لها النسبة S/N تساوي 2 dB.
- الانحياز يعتمد على نسبة القدرة المتوسطة للإشارة إلى التداخل. ومن ثم يعتمد على كل من مستوى التداخل وعدد "الإصابات النبضية" في المخطط الدوري للتقديرات.
- المستوى الأقصى للتداخل بالنسبة للانعكاسية يحدد بانحياز الانعكاسية.
- ينتج عن انحياز في الانعكاسية مقدارها 1 dB نسبة قدرة (Power Ratio) تبلغ 1,2589.

$$\text{Power Ratio} = 10^{(Rb/10)} = 10^{(0,1)} = 1,2589$$

وبطرح نسبة القدرة الخالية من الانحياز من نسبة القدرة التي يحدث عندها انحياز مقدارها 1 dB نسبة تداخل إلى إشارة مقدارها 0,2589.

$$I/S = [10^{(Rb/10)} - 10^{(Rb/10)}] = [1,2589 - 1] = 0,2589$$

ويمكن حساب مستوى قدرة التداخل من المعادلة:

$$IL = (N_s) (I/S) = (16) (0,2589) = 4,14$$

وتُترجم هذه القيمة إلى إشارة قيمتها 6,17 dB.

$$I_L \text{ (dB)} = 10 \log (4,14) = 6,17 \text{ dB}$$

وبالنسبة لقيمة مقدارها 3 dB للنسبة إشارة إلى ضوضاء، يمكن حساب النسبة I/N كالتالي:

$$I/N = 6,17 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 9,17 \text{ dB}$$

وبدمج هذه المعاملات في دالة تصف النسبة I/N كعلاقة مع N_s و I/N و R_b نحصل على معادلة تعطينا الحد الأقصى المطلوب للنسبة I/N "إصابة نبضية" وحيدة.

$$I/N = [10 \log [(N_s) (I/S)]] + S/N$$

حيث:

N_s : عدد العينات في التقدير

S_{mp} : متوسط قدرة الإشارة

S/N : النسبة إشارة-إلى-ضوضاء للمستقبل

I/S : النسبة تداخل-إلى-إشارة

كما يعبر عن النسبة I/S كالتالي:

$$I/S = [10(R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)]$$

حيث:

R_b : الانحياز في الانعكاسية

N_{nf} : مستوى الضوضاء المتأصلة المعاييرة

وبدمج المعادلتين نحصل على:

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

وفيما يلي مثال حسابي يستند إلى الافتراضات السابقة المذكورة آنفاً:

2.2.2.4.8 مثال حسابي

الافتراضات:

$$16 = N_s$$

$$\text{dB } 3 = S/N$$

$$\text{dB } 1 = R_b$$

$$\text{dB } 0^5 = N_{nf}$$

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

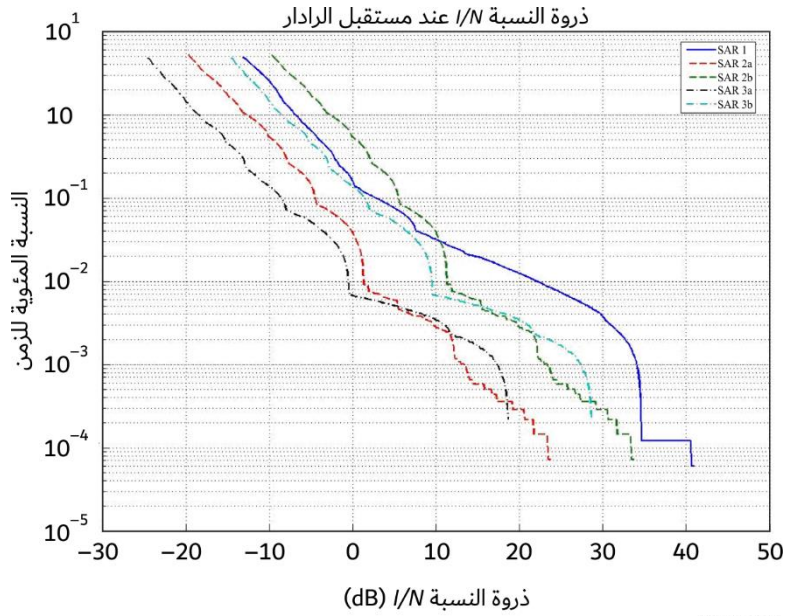
$$I/N = [10 \log [(16) ([10 \uparrow (1/10)] - [10 \uparrow (0/10)])]] + 3 = 9,17 \text{ dB}$$

3.4.8 تأثير التداخل المتغير مع الزمن

يصف الشكلان 14 و 15 التداخل المحتمل من نظام للبحث والإنقاذ على رادار أرصاد جوية محدثاً تداخلاً متغيراً مع الزمن.

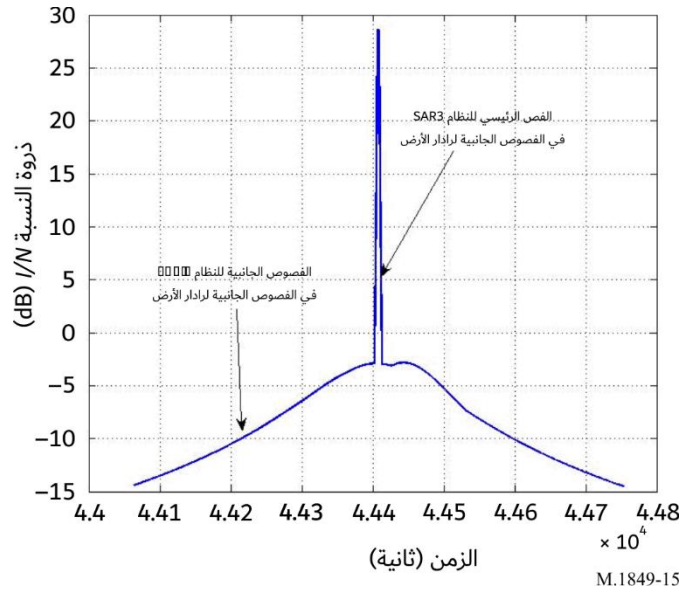
الشكل 14

دالة توزيع تراكمي لذروة نسبة التداخل إلى الضوضاء (I/N)



الشكل 15

ذروة النسبة I/N بالنسبة إلى الزمن لممر واحد فوق رادار أرصاد جوية



وطبقاً لهذين الشكلين يتبين أن هناك حالتين يُرجح أن تقع إحداهما:

- (أ) في الحالة الأولى، مستوى عالٍ من النسبة I/N ينتج لفترة زمنية قصيرة وهو ما يجعل على الأرجح رادار الأرصاد الجوية عاطلاً خلال هذه الفترة سواء بحجب قدرات قياس المطر أو بتقديم تقديرات أعلى بكثير لمعدل هطول الأمطار؛
- (ب) وفي الحالة الثانية، وفي خلال فترة زمنية أطول (400 ثانية تقريباً)، يجري تجاوز لمعايير التداخل.

ويصعب تقييم تأثير هذا النمط من التداخل على رادارات الأرصاد الجوية. ومع ذلك، ينبغي أن نفترض أنه نتيجة للدورة القصيرة لتكامل البيكسل، فإن التداخل المتغير مع الزمن يُرجح أن يظهر على أساس فترة قصيرة (أي على أساس تحليل كل بيكسل على حدة) وبالتالي يمكن أن ينطبق نفس التأثير الخاص بالتداخل الثابت (سواء كان تداخلاً نبضياً أو غير نبضي) على نحو ما تم شرحه في الفقرتين 1.4.8 و 2.4.8. وتحديد تأثير التداخل المتغير مع الزمن على أساس كل حالة وبيكسل على حدة لا يعد أمراً هيناً.

ومع الإقرار بالحاجة إلى المزيد والمزيد من التحليل المفصل، تجدر الإشارة إلى أن مستوى مقداره 30 dB للنسبة I/N (دون أخذ الجانب النبضي لإرسال النظام SAR في الاعتبار) بحيث يمكن أن يناسب الحالة الأولى؛ يمكنه أن ينتج، في منطقة معينة، زيادة كبيرة في تقدير المعدل الخطي لهطول المطر وهو ما يخل بإحصاءات المطر على المدى الطويل (من ساعة إلى عدة أيام) والتي تستعمل في عمليات الإنذار الهيدرولوجية. وتقابل فترة زمنية للتداخل مقدارها 400 ثانية 7 دورات للرادار تقريباً وتتعلق بالفصوص الجانبية للرادار. وفي هذه الحالة، يتأثر عدد كبير من البيكسلات (وبالتالي منطقة جغرافية كبيرة) عبر العديد من الأحداث مما يجعل من تقريب البيكسلات أمراً مستحيلاً. ويعتمد حجم المنطقة الجغرافية صراحة على مستوى التداخل الذي يفترض أن يؤثر بداية على حافة التغطية الرادارية. بيد أنه حتى القدر الضئيل من التداخل يمكن أن يحدث خسارة في التغطية تصل إلى بضع عشرات في المائة. وتحديد تأثير التداخل المتغير مع الزمن ليس بالأمر الهين ويحتاج إلى تحليل حالة بحالة يراعي نتائج المحاكاة الدينامية التي يجب أن تطبق عليها معايير التداخل المستعملة لمصادر التداخل الثابت أو النبضي.

5.8 استنتاجات بشأن معايير حماية رادارات الأرصاد الجوية

على الرغم من أن متطلبات الحماية لرادارات الأرصاد الجوية تعتمد بشكل كبير على خصائصها ومواصفاتها، فإن التحليل الوارد أعلاه في الفقرة 8 والعناصر الواردة في التقرير ITU-R M.2136، تتعرض للتأثيرات على كل من مدى الرادارات ودقة النواتج الأساسية وتؤكد على أنه بالنسبة للتداخل الثابت، تعتبر قيمة مقدارها -10 dB للنسبة I/N مناسبة ومن ثم ينبغي استعمالها لضمان توفير الحماية لرادارات الأرصاد الجوية. ويتفق هذا المعيار مع توصيات قطاع الاتصالات الراديوية الحالية.

واستنتج من تحليل التداخل النبضي واختباراته إمكانية تطبيق نسبة I/N مختلفة تبعاً لخصائص المرسل المسبب للتداخل والمستقبل المتأثر (أساساً تردد تكرار النبضة وعرضها). وريثما تجرى دراسات أخرى عن تأثير التداخل النبضي، يمكن تقدير نسبة I/N هذه باستخدام أحد الأساليب المبينة في الفقرة 2.4.8 أو الفقرة 1.2.4.8.

وفي الوقت الحاضر، لم يتم بعد استنباط صيغة عامة للتداخل المتغير مع الزمن. وطبقاً لما إذا كان مصدر التداخل مستمراً (ثابتاً) أو نبضياً وقصير الأجل (يؤثر على أشعة الرادار) أو طويل الأجل (عبر حجم المسح بأكمله)، فإن التحليل ينبغي أن يجري على أساس حالة بحالة ومن نتائج عمليات محاكاة ديناميكية تأخذ في الاعتبار المعايير المذكورة آنفاً بالنسبة للتداخل سواء كان ثابتاً أو في شكل نبضات.

9 أثر توربينات الرياح

من أجل التنبؤ الدقيق بأحوال الطقس، تُصمم رادارات الأحوال الجوية بحيث تعمل في نطاق ضيق نسبياً من زوايا الارتفاع. ونتيجة لحساسية الرادارات، فإن توربينات الرياح، إذا تم نشرها على خط البصر مع منشأة رادار الأحوال الجوية، يمكنها أن تحجب الانتشار إلى الأمام للإشارات الرادارية مما يتسبب في انعكاس جلبة ينتج عنها إشارات رادارية مرتدة مستحثة من أثر الاضطراب. وقد تؤدي آليات التداخل هذه إلى تقديرات زائفة للرادار بشأن تراكم الهواطل وعلامات زائفة بشأن الأعاصير والنوآت والخطأ في تحديد سمات العواصف الرعدية والتعريف الخطأ لخلية العاصفة. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن لآليات التداخل هذه أن تؤدي إلى الخطأ في أداء الرادار والتأثير بالسلب على عمليات التنبؤ والإنذار.

1.9 التقنيع

من شأن أي هيئة جغرافية أو بناية تقع بين الرادار والهدف أن تتسبب في حدوث حجب أو تقنيع. ويمكن لتوربينات الرياح، طبقاً لحجمها، أن تتسبب في حدوث ظاهرة الحجب. ويتوقع لتأثيرات الحجب هذه أن تتغير طبقاً لأبعاد التوربينة ونمط رادار الإرسال وخصائص التوربينة (ارتفاعها وزاوية ريشتها وسرعة الدوران وموقع التوربينة بالنسبة إلى الرادار).

2.9 الجلبة

يمكن استقبال إشارات مرتدة من أي سطح عاكس للموجات الرادارية. وفي بعض المناطق الجغرافية أو تحت ظروف جوية معينة، يمكن لأداء الرادار أن يتأثر بالسلب من جراء الإشارات المرتدة غير المطلوبة. وتعرف هذه الإشارات المرتدة غير المطلوبة بجلبة الرادار. وبالنسبة لأي عامل في مجال التنبؤ بالطقس، يمكن لأي توربينة أو توربينات رياح موجودة في محيط رادار الأحوال الجوية أن تتسبب في مشكلات تشغيلية.

ولإشارات الجلبة الأرضية انعكاسية كبيرة وإزاحة دوبلرية تقترب من الصفر وعرض طيف صغير وتوزع بصورة منتظمة. ومقارنة بالجلبة الأرضية (GC) الشائعة الظهور، فإن التداخل الذي تسببه توربينات الرياح يمثل تحدياً أكثر صعوبة إلى حد كبير. حيث تستقبل إشارات منعكسة مباشرة من البرج (ثابت) والريش الدوارة (غير ثابتة) على السواء. وعلى غرار الجلبة الأرضية، ينبغي لإشارة جلبة توربينة الرياح (WTC) أن تتسم بانعكاسية كبيرة إلى حد ما مع احتمال التشكيل نتيجة لدوران الريش مما يتسبب في تغاير نظامي في المقطع العرضي للرادار.

وتتأثر الإزاحة الدوبلرية بالعديد من العوامل، من بينها سرعة دوران الريشة واتجاه الجهاز الدوار بالنسبة لحزمة الرادار. وتكون السرعات الدوبلرية في ذروتها عندما يكون اتجاه الجهاز الدوار متعامداً على خط البصر للرادار وتقترب من الصفر عندما يكون مواجهاً للرادار أو عكس اتجاهه. ولما كان حجم استبانة الرادار سيغطي على الأرجح الهيكل الكامل لتوربينة الرياح، فإنه يتوقع حدوث زيادة كبيرة في عرض الطيف. ويرجع ذلك إلى دوران الريشة في مواجهة الرادار أو عكس اتجاهه. ومن شأن وجود العديد من التوربينات داخل حجم استبانة واحد أن يزيد من تفاقم هذا الأثر ليس إلا.

3.9 الطاقة المرتدة من الدوامات الهوائية العاتية

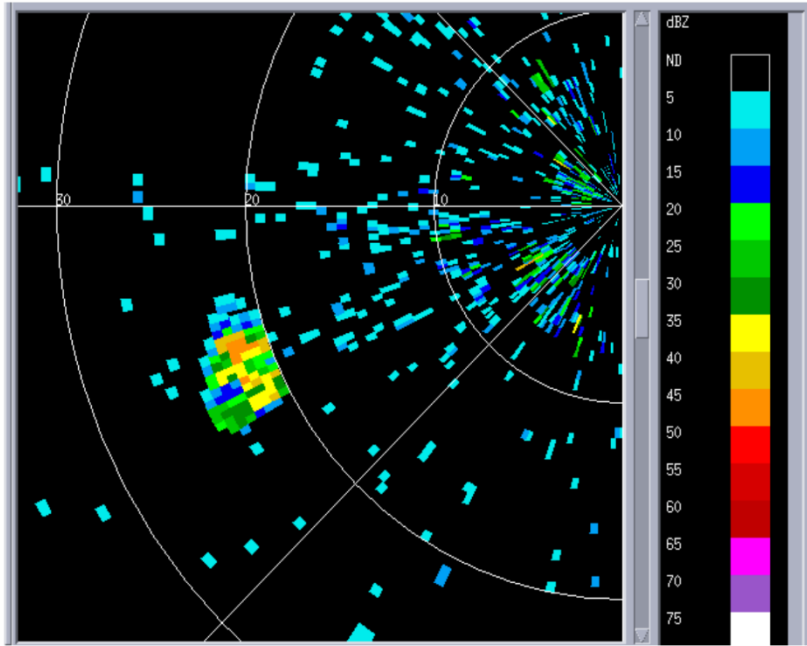
إضافة إلى إشارات جلبة توربينات الرياح التي تنشأ عن الانعكاسات من توربينات الرياح الفعلية، فقد تظهر من جراء تشغيل مجموعة من توربينات الرياح طاقة منعكسة عن الدوامات الهوائية العاتية. ويتوقع أن تتسم هذه الإشارات المرتدة بخصائص مشابهة للإشارات المرتدة في الجو الصافي من جراء التقطعات في قربة الانكسار للرادار بمقياس براغ. وتنجرف هذه الإشارات المرتدة بقوة مجال الرياح وتكون انعكاسيتها على الأرجح أقل بكثير من الانعكاسات المباشرة من التوربينات. ومع ذلك، يمكن لهذه الإشارات أن تزيد بشكل كبير من منطقة التغطية الرادارية التي تتأثر بجلبة توربينات الرياح ومن ثم تزيد المشكلة تفاقمًا.

4.9 أمثلة على جلبة توربينات الرياح

يمكن الاطلاع في الشكل 16 على صور للكيفية التي تظهر بها مزرعة رياح (مجموعة من توربينات الرياح) على شاشة رادار للأرصاد الجوية. (وهذا الشكل عبارة عن صورة للانعكاسية تبين الإشارات المرتدة من مزرعة رياح تبعد عن رادار للأرصاد الجوية بمسافة 40 km تقريباً في الاتجاه الجنوبي الغربي).

الشكل 16

صورة على رادار للأرصاد الجوية تبين مزرعة رياح في الاتجاه الجنوبي الغربي من موقع الرادار

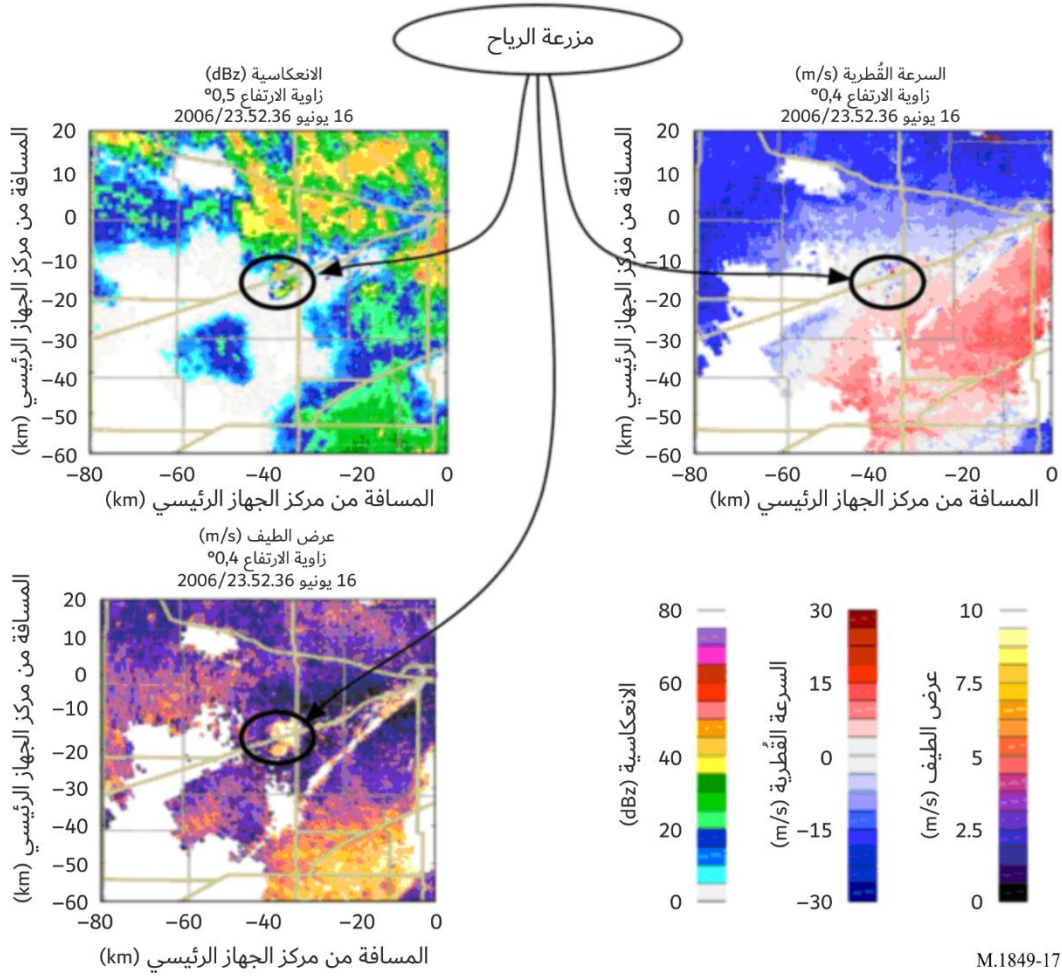


M.1849-16

ويبين الشكل 17 بيانات المستوى II حيث تختلط الإشارات المرتدة عن عواصف معزولة مع تلك المرتدة من جلبة توربينات الرياح. وتتسم إشارات توربينات الرياح بسرعة قُطرية عشوائية وعرض طيف كبير.

الشكل 17

تأثير التداخل الناجم عن مزرعة رياح على بيانات المستوى II



ودون دراية سابقة، يصعب إلى حد كبير التمييز بين جلبة توربينات الرياح والعواصف الرعدية. ونتيجة لدوران ريش مروحة التوربينة نحو الرادار وبعيداً عنه، يمكن توقع سرعة دوبلرية تقترب من الصفر. وعروض الطيف الكبيرة ستقلل من دقة تقديرات السرعة الدوبلرية كما هو موضح في الشكل 17 بالانحرافات الطيفية عن الصفر.

5.9 تأثير جلبة توربينات الرياح على عمليات رادارات الأرصاد الجوية ودقة التنبؤات

أجريت دراسات ميدانية أثبتت تأثير جلبة توربينات الرياح على رادارات الأرصاد الجوية. وبينت هذه الدراسات أن مزارع توربينات الرياح يمكن أن يكون لها تأثير كبير على رادارات الأرصاد الجوية، ومن ثم يمكنها التأثير بالسلب على التنبؤ بالأحداث الجوية الخطيرة. وقد بينت هذه التحليلات بوضوح أن الجلبة التي تنتجها توربينة رياح تظهر في زوايا السمات الكبيرة جداً (عدة عشرات من الدرجات) المقاسة من اتجاه التوربينة حتى لو كانت التوربينة موجودة على مسافات بعيدة إلى حد ما. لذا لا يمكن إهمال تأثير توربينات الرياح على عملية الانعكاسية لرادارات الأحوال الجوية.

كما بينت التحليلات أن تأثير توربينة رياح واحدة على رادار أرصاد جوية يعمل بأسلوب دوبلر يكون كبيراً جداً، خاصة عندما تكون موجودة على مسافات تقل عن 10 km حيث تكون كل البيانات عندها خاطئة على كل زوايا السمات.

ويتعين وجود بعض أشكال التخفيف من آثار جلبة التوربينات لتوفير الحماية لرادارات الأرصاد الجوية من التداخل الضار الناجم عن مزارع توربينات الرياح.

وقبل تحديد استنتاجات نهائية بشأن طرائق المعالجة التي من شأنها أن تخفف من آثار جلبة توربينات الرياح، ينبغي إجراء مزيد من الدراسات بشأن جلبة توربينات الرياح لفهم المدى الكامل لهذه الجلبة وتأثيرها على رادارات الأرصاد الجوية. وبمجرد تحديد ذلك، قد يتعين تطوير طرائق للتخفيف من آثار جلبة توربينات الرياح على أن يوضع في الاعتبار النمو المتوقع لأنظمة توليد الطاقة القائمة على طاقة الرياح.

وريثما تظهر نتائج الدراسات الجارية بشأن تخفيف التداخل الناجم عن جلبة توربينات الرياح على رادارات الأرصاد الجوية، فإن الحل الحالي لتحاشي تأثير مزارع الرياح أو الحد منه هو ضمان مسافات فصل بين النظامين. فمثلاً، تتبع بعض البلدان الأوروبية في الوقت الراهن التوصيات التالية:

- (أ) عدم نشر أي توربينات رياح على مسافة من هوائي الرادار تقل عن:
- 5 km للرادارات العاملة في مدى التردد 5 250-5 725 MHz؛
 - 10 km للرادارات العاملة في مدى التردد 2 700-2 900 MHz؛
- (ب) أن تخضع أي مشروعات تتعلق بمزارع الرياح لدراسة بشأن آثارها عندما ينظر في نشرها على مسافات أقل من:
- 20 km للرادارات العاملة في مدى التردد 5 250-5 725 MHz؛
 - 30 km للرادارات العاملة في مدى التردد 2 700-2 900 MHz.

10 الاختبارات السابقة لأنظمة رادارات الأرصاد الجوية

أجريت في السابق اختبارات على رادارات الأرصاد الجوية بهدف تحديد معايير حماية الرادارات. ويرد التعريف المفصل للإجراءات ومنهجية تحليل البيانات في الملحق 1 بالتقرير ITU-R M.2136. وتضمن الاختبار ضخ إشارة تداخل نحو المستقبل بمستوى معين. وتم السماح للرادار بإجراء مسح حتمي جزئي (دورة واحدة أو دورتان للهوائي) أو كلي دون وجود التداخل. وأعيد ضبط الرادار ثانية لإجراء نفس المسح الجزئي أو الكلي ولكن مع ضخ إشارة التداخل نحو مسار المستقبل باستعمال وحدة دمج RF. وتم تخزين النواتج الأساسية للمسح الكلي أو الجزئي مع عدم وجود التداخل ومع ضخ إشارة التداخل على قرص. وقد تم عمل المسح الجزئي أو الكلي مع عدم وجود التداخل ومع وجوده بشكل متبادل عند مستويات لإشارة التداخل تعطي قيم للنسبة I/N تتراوح بين $+6$ dB و -15 dB.

وجرى بعد ذلك تحليل للبيانات من خلال إجراء مقارنة بين فدره مدى خالية من التداخل وأخرى بالتداخل عبر كل شعاع. ومن البيانات الناتجة، يمكن تحديد مستوى النسبة I/N التي يؤدي التداخل عندها إلى تجاوز دقة النواتج الأساسية الحدود المعقولة.

وقد وفر الاختبار رؤية بشأن التحسينات المحتملة على الاختبارات. وتم إجراء الاختبار الموثق في الملحق 1 بالتقرير ITU-R M.2136 باستعمال رادار يقوم بجمع البيانات من الجو. وكان الافتراض يقوم على أن الظروف الجوية لن تتغير كثيراً خلال المدة التي تتراوح من 3 إلى 5 دقائق اللازمة لإجراء المسح الجزئي أو الكليين بدون تداخل ومع وجوده. وقد أظهر تحليل البيانات أن هذا الافتراض لا ينطبق دائماً.

وتجدر الإشارة إلى أنه عبر مدى أوسع لرادارات الأرصاد الجوية، فإن الحساسية للتداخل قد تختلف نتيجة لاعتماد مستوى التداخل الذي يتحملة كل رادار على المتطلبات الخاصة بالحد الأدنى للنسبة إشارة إلى ضوضاء المعنية وانحياز التقديرات والتغاير في الأداء.

وقد أجريت منذ وقت قريب جداً اختبارات تداخل لتحديد الحساسية للتداخل المقابلة لإشارات تداخل مختلفة (ثابتة أو موجات مستمرة أو بتشكيل التردد أو نبضية) لرادار أرصاد جوية يعمل في مدى التردد 5 250-5 725 MHz وأثبتت صحة التحليل الوارد في الفقرة 8 إضافة إلى الاختبارات السابقة المتعلقة برادارات الأرصاد الجوية العاملة في مدى التردد 2 700-2 900 MHz. ويرد ملخص لنتائج هذه الاختبارات في الملحق 2 للتقرير ITU-R M.2136.

11 الاختبارات المستقبلية

ينبغي لطرائق الاختبار المستقبلية أن تدرس استعمال نظام لحيازة الإشارة وإعادة توليدها في الحالات التي يمكن فيها التقاط إشارات الرادار IF أو الإشارات المتماثلة في الطور (I) والمتعامدة (Q) ورقمنتها وتخزينها على قرص. ويمكن التقاط إشارات مسح حجمي واحد بدون تداخل ورقمنتها.

وباستعمال مولد (مولدات) شكل موجة اعتباطي ومولد إشارة RF، يمكن إعادة توليد الإشارة الرادارية المستقبلية المرقمنة وضخها نحو مستقبل الرادار بأي عدد مرات يلزم لإجراء الاختبار، بحيث تحاكي الإشارات المرتدة من الجو. ويمكن لهذا النهج أن يوفر ظروف اختبار مماثلة لعمليات المسح الحجمي الحالية من التداخل أو المحتوية على تداخل الجزئي منها والكلي.

وقد يتعين إجراء اختبارات مع نمطي التداخل النبضي والتداخل المتغير مع الزمن لتقييم حساسية رادارات الأرصاد الجوية والتثبت منها إزاء هذين النمطين من التداخل. وينبغي إجراء هذا الاختبار على رادارات أرصاد جوية أحادية الاستقطاب (مستقطبة أفقياً) وثنائية الاستقطاب (مستقطبة أفقياً ورأسياً).

12 نماذج الانتشار

تناقش الأقسام السابقة ضرورة تدنية كم التداخل المسموح به الذي تستقبله رادارات الأرصاد الجوية. ومع ذلك، يُعترف أيضاً بضرورة مراعاة نماذج الانتشار المناسبة عند إجراء دراسات التقاسم، وفقاً لما حددته لجنة الدراسات 3 المعنية بمسألة الانتشار، بقطاع الاتصالات الراديوية.

13 الاتجاهات المستقبلية

جاري حالياً تنفيذ تحديثات العتاد الرئيسية على أنظمة رادارات الأرصاد الجوية بالإدارات. وتمثيل التحسين المقبل في إدخال الرادار ثنائي الاستقطاب، حيث سيضاف الاستقطاب الرأسي إلى الموجات الرادارية الأفقية المستخدمة حالياً.

كما أن هناك تقنيات إضافية قيد التنفيذ لزيادة تحسين أداء رادارات الأرصاد الجوية. وأبرز هذه التقنيات عبارة عن خوارزميات مختلفة لتحليل مظاهر الالتباس في المدى/السرعة ولزيادة سرعة الاستحواذ بالنسبة للبيانات والحد من تأثير الأخطاء البشرية وتقليل الجلبة والمعالجة الفعالة للإشارات لتوفير تقديرات أرصاد جوية تكون دقيقة بقدر الإمكان. ومن بين المساعي الأخرى الاستعمال المشترك لكل من رادارات الأرصاد الجوية ورادارات تحديد الخصائص. وهناك جهد لا بأس به موجه للدراسات المتعلقة بالبرق وأخطاره لتحديد إمكانية التنبؤ ببدايته ونهايته.

وثمة اتجاه مستقبلي آخر يتمثل في استعمال مرسلات أشباه الموصلات بدلاً من المضخمات القائمة على الصمامات مثل الماغنترون أو الكليسترون. ونظراً لتدني ذروة قدرة خرج مرسلات الحالة الصلبة، يجب استعمال مخططات انضغاط النبضات لتحقيق نفس حساسية أنظمة رادارات الأرصاد الجوية القائمة على الصمامات. وبضغط النبضة، تكون النبضة المرسلّة مشكّلة عبر التردد و/أو الطور. وباستعمال مخططات ضغط النبضة، يمكن لنبضة مرسل طويلة نسبياً بقدرة ذروة منخفضة بالمقارنة، أن تحقق حساسية أفضل، مما يؤدي إلى مدى كشف أطول مما هو متوقع من معادلة الرادار. وذلك لأن الإشارة المستقبلية تتلازم مع النبضة المرسلّة أثناء الاستقبال لزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء. ويتدني كثيراً احتمال أن يكون نمط إشعاع الضوضاء المستقبلية مماثلاً للنبضة المرسلّة ومن ثم أن تشكل إشارة الضوضاء إشارة خرج بضغط النبضات. ويمكن أن يتراوح طول النبضة المرسلّة بين 10 و 100 μs مما يؤدي إلى مدى حجب يتراوح بين 1,5 و 15 km فلا يستقبل المستقبل أصداً جراء استمرار نشاط المرسل. وبمبدأ المدى المحجوب باستعمال نبضة قصيرة يبلغ طولها 1 أو 2 μs مثلاً.

والباحثون على وشك البدء في تكييف تكنولوجيا رادار الصفييف المتطور (المتحد في الطور) لاستعمالها في تطبيقات مراقبة الطقس. وسيحل الصفييف المتطور محل الهوائيات الطبقيّة المكافئية ذات التوجيه الميكانيكي عن طريق هوائي صفييفي بتوجيه إلكتروني. وسيوفر هذا التغيير المزيد من استراتيجيات المسح المرنة وزيادة في سرعة تحديث الظروف الجوية المتغيرة. وقد أثبتت الاختبارات

المبكرة لنظام رادار الصفييف المتطور إمكانياته الواعدة. وستزيد تكنولوجيا الصفييف المتطور من الفهم الجوهرى لتطور العاصفة وهو ما يؤدي بدوره إلى تحسين النماذج الحاسوبية وزيادة دقة التنبؤات والتبكير أكثر بالنسبة للإنذارات. كما أن هذه التكنولوجيا تنطوي على إمكانية زيادة متوسط مهلة الإنذار بالنسبة للأعاصير بحيث تزيد كثيراً عن المتوسط الحالي والذي يبلغ 13 دقيقة. ويجرى تنفيذ تحسينات النظام بشكل اقتصادي أكبر عبر إدخال تحسينات على المستقبل وعلى أنظمة المعالجة الفرعية للإشارة. وعلى الرغم من أنه لا يتوقع تنفيذ الصفييف المتطور في غضون السنوات العشر القادمة، هناك احتمال ألا يُعاد في التحديث الخاص بالصفييف المتطور (حال تنفيذه) استعمال المرسل الحالي، حيث سيستعاض عنه بوحدات إرسال/استقبال موزعة في الصفييف المتطور. ولسوف يلزم تتبع هذه الاتجاهات المستقبلية، فمع تطور التكنولوجيات سيكون لهذه الاتجاهات تأثير على أي استراتيجيات مستقبلية لتخفيف التداخل وعلى تعاريف معايير الحماية.

14 ملخص

تعمل رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض وتعالج الإشارات بشكل مختلف عن الرادارات الأخرى وتعطي نواتج تختلف كثيراً عن أنماط الرادارات الأخرى. ويمكن لهذه الاختلافات أن تؤثر في الطريقة التي ينبغي اتباعها لتحليل التداخل وكذلك الطريقة التي تستخدم في تقييم نتائج التحليل.

وإجمالاً، تتسم رادارات الأرصاد الجوية المنصوبة على الأرض بطبيعة خاصة، حيث تستعمل استراتيجيات مختلفة لتحريك الهوائيات لإجراء مسح لحجم جوي حول الرادار بحيث يجري قياس تمثيل كامل للظروف الجوية في هذا الحجم. وبالمقارنة، تقوم غالبية أنماط الرادارات الأخرى بتتبع أهداف منفصلة ولا يعنيه إلا الإشارات المرتدة المتعلقة بخلايا المدى المرتبطة بهذه الأهداف. بينما في رادارات الأرصاد الجوية، تُعالج جميع خلايا المدى الموجودة في جميع الأشعة.

الملحق 2

خصائص رادارات الأرصاد الجوية

جدول المحتويات

الصفحة

40 MHz 2 900-2 700	1
44 MHz 5 725-5 250	2
49 MHz 9 500-9 300	3

1 رادارات الأرصاد الجوية العاملة في مدى التردد MHz 2 900-2 700

يُرد في الجدول 6 الخصائص التقنية لرادارات الطقس التمثيلية العاملة في مدى التردد MHz 2 900-2 700. بيد أن الرادار 1 يمكن أن يعمل على ترددات تصل إلى النطاق MHz 3 000. وهذه الرادارات هي أنظمة رادارات الطقس الأساسية المستعملة في أنشطة تخطيط الرحلات الجوية. وهي تُنصب بشكل مشترك على الصعيد العالمي في المطارات وتوفر تقييمات دقيقة لظروف الطقس التي تستعمل لإدارة عمليات الرحلات الجوية. وتعمل هذه الرادارات يومياً على مدار الساعة.

ويستعمل الرادار 1 تكنولوجيا الرادارات الدوبلرية لرصد وجود عناصر الظروف الجوية الخطيرة وحساب سرعتها واتجاه حركتها، مثل الأعاصير القمعية والأعاصير المائية والعواصف الرعدية العنيفة. كما يوفر الرادار 1 قياسات كمية لمنطقة الهواطل والتي تؤدي دوراً هاماً في التنبؤات المائية وقدرة الكشف عن الظروف الجوية الخطيرة وحركتها التي توفرها هذه الرادارات تساهم في تحقيق زيادة في دقة خدمات الإنذار وحسن توقيتها. ويتفوق الرادار 1 في عمليات الكشف المبكر للرياح المدمرة وفي تقدير كميات هطول المطر التي تستعمل في التنبؤ بأحوال الأنهار والفيضانات.

ويستعمل الرادار 1 كشبكة متكاملة تغطي الولايات المتحدة الأمريكية وغوام وبورتوريكو واليابان وكوريا الجنوبية والصين والبرتغال. ويوفر مدى التردد MHz 2 900-2 700 خصائص ممتازة من حيث الأرصاد الجوية والانتشار بالنسبة لقدرة التنبؤ والإنذار المتعلقة بالطقس. وينبغي للتحسينات المخططة لهذه الرادارات أن تزيد من فترة عملها بحيث تصل إلى العام 2040. وتفيد المنظمة العالمية للأرصاد الجوية أن هناك أكثر من 320 رادار أرصاد جوية تعمل في نطاق التردد هذا في 52 بلداً على الأقل في جميع أنحاء العالم.

والرادار 2 ليس من الرادارات الدوبلرية وهو يستعمل في كثير من البلدان.

ويجمع الراداران 3 و4 بين تطبيقات الطيران والطقس والأرصاد الجوية في رادار واحد.

الجدول 6

الرادار 6	الرادار 5	الرادار 4	الرادار 3	الرادار *2	الرادار *1	الخصائص	
(2)3 000-2 700	(2)3 000-2 700	(2)3 000-2 700	(2)3 000-2 700	2 900-2 700	3 000-2 700	مدى التوليف (MHz)	
P0N	P0N	P0N, Q3N	P0N, Q3N	P0N	P0N	التشكيل	
1 000	850	160	40	556 أو 400	500	قدرة المرسل إلى الهوائي (kW)	
4,5-0,4	3,3-0,5	1,0 (نبضة قصيرة) 250,0 ≥ (نبضة طويلة)	1,0 (نبضة قصيرة) 60,0 (نبضة طويلة)	1,0 (نبضة قصيرة) 4,0 (نبضة طويلة)	1,6 (نبضة قصيرة) 4,7 (نبضة طويلة)	عرض النبضة (μs)	
0,06 / 0,05	غير معروف	0,2 (نبضة قصيرة) 3 (نبضة طويلة)	0,2 (نبضة قصيرة) 3 (نبضة طويلة)	غير معروف	0,12	مدة صعود/هبوط النبضة (μs)	
1 400-250	2 000-250	4 300-320 (نبضة قصيرة) 1 500-320 (نبضة طويلة) ملاحظة (3)	6 100-320 (نبضة قصيرة) 1 300-320 (نبضة طويلة) ملاحظة (3)	539 (نبضة قصيرة) 162 (نبضة طويلة)	1 304-318 (نبضة قصيرة) 452-318 (نبضة طويلة)	معدل تكرار النبضة أو النبضات في الثانية (Hz or pps)	
0,11	0,11	0,4- ⁽⁴⁾ 0,2 (نبضة قصيرة) 12,0 ≥ ⁽⁵⁾ (نبضة طويلة)	0,6- ⁽⁴⁾ 0,2 (نبضة قصيرة) 12,0 ≥ ⁽⁵⁾ (نبضة طويلة)	غير معروف	0,21 كحد أقصى	دورة التشغيل (%)	
لا ينطبق	لا ينطبق	3	3	لا ينطبق	لا ينطبق	عرض نطاق الزقفة (MHz)	
لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	عرض النبضة الفرعية بتشغيل الطور	
لا ينطبق	لا ينطبق	750 ≥	180	لا ينطبق	لا ينطبق	معدل الانضغاط	
1,5	2				0,6	عرض نطاق البث بالترددات الراديوية (MHz)	
2	3,5	1,3 (نبضة قصيرة) 2,0 (نبضة طويلة)	1,3 (نبضة قصيرة) 2,0 (نبضة طويلة)				dB 3-
8	10				4.6		dB 6-
25	20	10,4 (نبضة قصيرة) 6,2 (نبضة طويلة)	10,4 (نبضة قصيرة) 6,2 (نبضة طويلة)				dB 20-
						dB 40-	
كليسترون	ماغنترون	حالة صلبة	حالة صلبة	ماغنترون محوري	كليسترون	جهاز الخرج	

الجدول 6 (تابع)

الرادار 6	الرادار 5	الرادار 4	الرادار 3	الرادار *2	الرادار *1	الخصائص
حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	تغطية حزمة رفيعة حتى 100 000 قدم	تغطية حزمة رفيعة حتى 70 000 قدم	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	نمط المخطط الإشعاعي للهوائي (رفيع، مروحة، مربع قاطع تمام الزاوية، إلخ)
عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	صفييف مرتب الأطوار ذو 4 وجوه (صفييف مرتب الأطوار قطره 8 أمتار في كل وجه)	صفييف مرتب الأطوار ذو 4 وجوه (صفييف مرتب الأطوار قطره 4 أمتار في كل وجه)	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	نمط الهوائي (عاكس، صفييف متطور، صفييف مشقوق، إلخ)
خطي (ثنائي الاستقطاب)	خطي (ثنائي الاستقطاب)	خطي: أفقي ورأسي	خطي: أفقي ورأسي	خطي: أفقي	خطي: رأسي وأفقي إرسال/استقبال متزامن	استقطاب الهوائي
46 بالحد الأقصى	46 بالحد الأقصى	46	41	38,0	45,0	كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)
1,25-0,9	1,25-0,9	1,5-0,9	2,7-1,6	2,0	0,92	عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (بالدرجات)
1,25-0,9	1,25-0,9	1,4-0,9	2,7-1,6	2,0	0,92	عرض حزمة الهوائي في اتجاه السم (بالدرجات)
0 إلى 36	0 إلى 36	لا ينطبق	لا ينطبق	18 وتدوير يدوي كامل	متغير بين 4 و 30	معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية)
360 درجة	360 درجة	غير منتظم ليغطي 360 درجة	غير منتظم ليغطي 360 درجة	360 درجة وقطاعي	360 درجة	نمط المسح الأفقي للهوائي (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ)
0 إلى 36	0 إلى 36	لا ينطبق	لا ينطبق		14 خطوة في 5 دقائق	معدل المسح الرأسي للهوائي (درجة/ثانية)
الحجم	الحجم	غير منتظم ليغطي الحجم المطلوب	غير منتظم ليغطي الحجم المطلوب	2,0- إلى 60+	خطوات ثابتة: 20-0,5	نمط المسح الأفقي للهوائي (بالدرجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي)، إلخ
26-	26-	17 عند الإرسال و 25 عند الاستقبال	17 عند الإرسال و 25 عند الاستقبال	15+ (تقديرياً)	20	مستويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفصوص الجانبية الأولى والفصوص الجانبية البعيدة) (dB)
متغير	متغير	متغير	متغير	30	متغير (2,5 إلى 30)	ارتفاع الهوائي (m)

الرادار 6	الرادار 5	الرادار 4	الرادار 3	الرادار *2	الرادار *1	الخصائص
20 عند -3 dB	20 عند -3 dB	1,2 عند -6 dB (نبضة قصيرة) 1,6 عند -6 dB (نبضة طويلة)	1,2 عند -6 dB (نبضة قصيرة) 1,8 عند -6 dB (نبضة طويلة)	0,25 عند -3 dB (نبضة طويلة) 0,5 عند -3 dB (نبضة قصيرة)	0,714 عند -3 dB	عرض نطاق المستقبل IF (MHz)
> 2,5	> 2,5	> 6	> 6	9,0	2,7	معامل ضوضاء المستقبل (dB)
-112	-112	-110	-110	-110	-112	الحد الأدنى للإشارة المكتشفة (dBm/MHz)
0	0	10	10	-32	-17	نقطة ضغط الكسب الأمامية للمستقبل عند 1 dB (dBm)
لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق		-10	مستوى تشبع المستقبل عند التوليف (dBm)
20	20	300	200	0,5 (نبضة طويلة) 1,5 (نبضة قصيرة)	18	عرض نطاق المستقبل RF عند 3 dB (MHz)
لا ينطبق	لا ينطبق	13	13		-10	مستويات تشبع المستقبل RF و IF (dBm)
1	1	> 0,5	> 0,5		1	أزمة الاستعادة (μs)
					(المقدر) 95 ⁽¹⁾	عرض نطاق الترشيح الدوبلري (Hz)
في جميع أنحاء العالم						التوزيع الجغرافي
100						الفترة الزمنية للاستعمال (%)

ملاحظات على الجدول 6:

- (1) الترشيح الدوبلري وإزالة نبضة التشبع.
- (2) مدى التوليف 2,7-2,9 GHz عند القيام بوظيفة الملاحة الراديوية للطيران.
- (3) لا تُستخدم ترددات تكرار النبضة (PRF) العالية جداً إلا في زوايا الارتفاع العالية.
- (4) دورة التشغيل لنبضة قصيرة هي 0,2% عند المسح في أدنى ارتفاع (الأفق).
- (5) تطابق توليفة عرض النبضة وتردد تكرار النبضة لإبقاء دورة التشغيل ما دون 12%.

2 رادارات الأرصاد الجوية العاملة في مدى التردد 5 725-5 250 MHz

تعمل رادارات الأرصاد الجوية المحمولة جواً والمنصوبة على الأرض على السواء في مدى الترددات 5 850-5 250 MHz. وترد بالجدول 8 الخصائص التقنية للرادارات المنصوبة على الأرض.

ويمكن ملاحظة أن بعض خدمات الأرصاد الجوية تشغل رادارات محددة غير دوارة في مدى الترددات هذا لتتبع مسبارات الرصد الراديوية التي لا تقوم بتنفيذ مهام ملاحية راديوية وتحديد مواقع هذه المسبارات. وتختلف هذه الرادارات اختلافاً جوهرياً عن رادارات الأرصاد الجوية من حيث إنها تستفيد من عرض نبضة أقل (حتى 0,2 μ s) وبمجرد ضغط اتجاهها على المسبار الراديوي، فإنها تتبع مساره حتى نهاية الإطلاق. ولا تغطي هذه التوصية هذه الرادارات.

وتجدر الإشارة إلى أن رادارات الأرصاد الجوية الأرضية يمكنها أن تعمل نظرياً في مدى التردد 5 850-5 250 MHz بأكمله، ولكن تشغيلها بوجه عام مقصور على مدى التردد 5 725-5 430 MHz. ومعظم هذه الرادارات تعمل داخل مدى التردد 5 650-5 600 MHz.

الجدول 7

الرادار 5	الرادار 4	الرادار 3	الرادار 2	الرادار 1	الخصائص
5 650-5 600	5 700-5 300	5 650-5 600	5 650-5 600	5 700-5 300	مدى التوليف (MHz)
250	250	250	250	250	قدرة المرسل في الهوائي (الذروة kW)
3,0	2,0-0,8	4,5-0,4	18-0,05	2,0	عرض النبضة (μs)
0,3	0,08	0,05 / 0,05	0,005	0,2	مدة صعود/هبوط النبضة (μs)
259	1 180-250	2 000-250	4 000-0	1 200 و 250 و 50	معدل تكرار النبضة أو النبضات في الثانية (pps)
ماغنترون محوري	ماغنترون قابل للتوليف	كليسترون	كليسترون	ماغنترون محوري	جهاز الخرج
حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة مخروطية	نمط المخطط الإشعاعي للهوائي (رفيع، مروحة، مربع قاطع تمام الزاوية، إلخ)
عاكس مكافئي صلب	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي صلب	نمط الهوائي (عاكس، صفييف متطور، صفييف مشقوق، إلخ)
أفقي	أفقي	خطي (ثنائي الاستقطاب)	أفقي	رأسي	استقطاب الهوائي
40	40	50 بالحد الأقصى	44	39	كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)
1,65	1,0 >	1-0,5	0,95	4,8	عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (درجات)
1,65	1,0 >	1-0,5	0,95	0,65	عرض حزمة الهوائي في اتجاه السم (درجات)
48-30	48-30	36-0	36-0 (rpm 6-0)	0,65	معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية)
360	360	360	360	360	نمط المسح الأفقي للهوائي (درجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ)
15	15	36-0	لا ينطبق	لا ينطبق	معدل المسح الرأسي للهوائي (درجة/ثانية)
1- إلى 60+	علي خطوات، 2- إلى 60+	الحجم	لا ينطبق	لا ينطبق	نمط المسح الأفقي للهوائي (درجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي)، إلخ
25-	25-	28-	35-	26-	مستويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفصوص الجانبية الأولى والفصوص الجانبية البعيدة) (dB)
30	30	متغيرة	10	30	ارتفاع الهوائي (m)
0,5 إلى 0,25	0,6	20	20	0,5	عرض نطاق المستقبل IF عند 3 dB (MHz)
3	3	2,5 ≥	4	7	معامل ضوضاء المستقبل (dB)
114-	109- إلى 112-	112-	97-	110-	أدنى إشارة يمكن كشفها (dBm)

التوصية ITU-R M.1849-3

الجدول 7 (تابع)

الرادار 10	الرادار 9	الرادار 8	الرادار 7	الرادار 6	الخصائص
5 650-5 600	5 650-5 600	5 725-5 250	5 650-5 600	5 650-5 600	مدى التوليف (MHz)
مع إمكانية الدوبلر (بما في ذلك معايرة الضوضاء في أوقات وغير أوقات الإرسال)	مع إمكانية الدوبلر	مع إمكانية الدوبلر	مع إمكانية الدوبلر	تقليدي	التشكيل
400-250	250	2,25	250	250	قدرة المرسل في الهوائي (الذروة kW)
3,5 إلى 0,5	10 و 5 و 2-0,8	0,1	5-0,8	5-0,8	عرض النبضة (μs)
0,2 / 0,1		0,005	2-0,2	2-0,2	مدة صعود/هبوط النبضة (μs)
2 400-250	1 200 -50 ثابت ومتخالف	100 000	1 200-50	1 200-250	معدل تكرار النبضة أو النبضات في الثانية (pps)
ماغنترون محوري	ماغنترون محوري	ماغنترون محوري	ماغنترون محوري	ماغنترون محوري أو كليسترون	جهاز الخرج
حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	نمط المخطط الإشعاعي للهوائي (رفيع، مروحة، مربع قاطع تمام الزاوية، إلخ)
عاكس مكافئ	عاكس مكافئ صلب	عاكس مكافئ صلب	عاكس مكافئ صلب	عاكس مكافئ صلب	نمط الهوائي (عاكس، صفيق متطور، صفيق مشقوق، إلخ)
خطي (ثنائي الاستقطاب)	أفقي	أفقي أو رأسي	أفقي أو رأسي	أفقي و/أو رأسي	استقطاب الهوائي
50 بالحد الأقصى	48-44	45-35	50-40	50-40	كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)
1,0-0,5	1-0,65	12-2,4	2-0,5	2-0,5	عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (درجات)
1,0-0,5	1-0,65	12-1,5	2-0,5	2-0,5	عرض حزمة الهوائي في اتجاه السمات (درجات)
36-0	36-3 6-0,5	1,2	18-6 3-1	18-6 3-1	معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية) rpm
360	360	360	360	360	نمط المسح الأفقي للهوائي (درجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ)
36-0		لا ينطبق	14-1	10-1	معدل المسح الرأسي للهوائي (درجة/ثانية)
الحجم	2- إلى 90+	لا ينطبق	5- إلى 90+	1- إلى 90+	نمط المسح الرأسي للهوائي (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ) (درجات)
28-	45- إلى 25-	20-	35- إلى 25-	35- إلى 25-	مستويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفصوص الجانبية الأولى والفصوص الجانبية البعيدة) (dB)
متغير	30-6	10	30-6	30-6	ارتفاع الهوائي (m)
20	1,25 إلى 0,1	10	3,0 إلى 0,1	4 إلى 0,7	عرض نطاق المستقبل IF عند 3 dB (MHz)
2,5 ≥	3	3	8-1,5	8-3,5	معامل ضوضاء المستقبل (dB)
112	54- إلى 30- (عند 1 km)	118- إلى 113-	120- إلى 113-	120- إلى 113-	الحد الأدنى للإشارة المكتشفة (dBm)

الرادار 15	الرادار 14	الرادار 13	الرادار 12	الرادار 11	الخصائص
5 370-5 250	5 470-5 430	5 370-5 250	5 370-5 330	5 350-5 250	مدى التوليف (MHz)
P0N, Q0N	مع إمكانية الدوبلر	مع إمكانية الدوبلر	مع إمكانية الدوبلر	تقليدي	التشكيل
6	240 لكل استقطاب	200	250	250	قدرة المرسل إلى الهوائي (ذروة kW)
1,0 (نبضة قصيرة) 256-32 (نبضة طويلة)	0,5	1	1 و 2,5	2,8-2,5	عرض النبضة (μs)
0,2 (نبضة قصيرة) 2,4 (نبضة طويلة)	0,30-0,25	0,5-0,2	0,9-0,1	0,8-0,1	مدة صعود/هبوط النبضة (μs)
2 000-260	1 500-600	2 000-400	1 500-260	260	معدل تكرار النبضات (pps)
الحالة الصلبة	الحالة الصلبة	كليسترون	كليسترون	ماغنترون محوري	جهاز الخرج
حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	نمط مخطط الهوائي (رفيع، مروحة، قاطع تمام مربع، إلخ)
عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	عاكس مكافئي	نوع الهوائي (عاكس، صفيح مرتب الأطوار، صفيح بشقوق، إلخ)
استقطاب ثنائي (أفقي ورأسي)	أفقي ورأسي	أفقي	أفقي	أفقي	استقطاب الهوائي
43	45	50-48	45-42	45-41	كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)
1,1	1	0,65-0,58	1,2-1	1,5-1	عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (بالدرجات)
1,1	1	0,65-0,6	1,2-1	1,5-1	عرض حزمة الهوائي في اتجاه السمات (بالدرجات)
60-3	36-18	24/12	36-6	24	معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية)
360	360	360	360	360	نمط المسح الأفقي للهوائي (درجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ)
6	20 خطوة في 5 دقائق	2- إلى 90+ خلال 10 ثوان	2- إلى 45+ خلال 15 ثانية	2- إلى 45+ خلال 15 ثانية	معدل المسح الرأسي للهوائي (درجات)
2- إلى 90+	2- إلى 40+	2- إلى 90+	2- إلى 45+	2- إلى 45+	نمط المسح الرأسي للهوائي (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ) (درجات)
26-	28-	28- إلى 34-	26- إلى 35-	25- إلى 33-	سويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفص الجانبي الأول، الفصوص الجانبية البعيدة) (dB)
40-10	45-5	33 إلى 44	10 إلى 60	18 إلى 53	ارتفاع الهوائي (m)
1,2	2,5	1,4 إلى 1,0	1,4 إلى 0,4	1,6 إلى 1,2	عرض النطاق IF عند 3 dB للمستقبل (MHz)
2	1,8	2-1	3-1,9	5-1,2	عامل ضوضاء المستقبل (dB)
111-	113-	112- إلى 110-	114- إلى 110-	114- إلى 108-	أدنى إشارة يمكن كشفها (dBm)

الجدول 7 (تابع)

الرادار 20	الرادار 19	الرادار 18	الرادار 17	الرادار 16	الخصائص
5 650-5 600	5 700-5 300	5 370-5 330	5 850-5 300	5 370-5 250	مدى التوليف (MHz)
مشكل نبضياً	نبضة رادارية غير مشكّلة	P0N, Q0N	P0N, Q0N	P0N, Q0N	التشكيل
250	0,250	4	12	6	قدرة المرسل في الهوائي (الذروة kW) (المتوسط) W
150 000	0,005	400	1 200	600	
12 إلى 0,4 إلى 2، 5 إلى 12	0,05 إلى 24	1,0 (نبضة قصيرة) 200-32 (نبضة طويلة)	1,0 (نبضة قصيرة) 200-32 (نبضة طويلة)	1,0 (نبضة قصيرة) 200-32 (نبضة طويلة)	عرض النبضة (μs)
0,112/0,104	0,25/0,25	0,2 (نبضة قصيرة) 3,0 (نبضة طويلة)	0,2 (نبضة قصيرة) 3,0 (نبضة طويلة)	0,2 (نبضة قصيرة) 3,5 (نبضة طويلة)	مدة صعود/هبوط النبضة (μs)
2000-100، 500-100	2000-100	1 800-200	2 000-100 20 000 (نبضة قصيرة فقط)	2 000-200	معدل تكرار النبضات (pps)
ماغنترون محوري	ماغنترون محوري	الحالة الصلبة	الحالة الصلبة	الحالة الصلبة	جهاز الخرج
حزمة رفيعة	حزمة مروحية	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	نمط مخطط الهوائي (رفيع، مروحة، قاطع تمام مربع، إلخ.)
عاكس مكافئ	صفيّ مرتب	عاكس مكافئ	عاكس مكافئ	عاكس مكافئ	نوع الهوائي (عاكس، صفيّ مرتب الأطوار، صفيّ بشقوق، إلخ.)
أفقي ورأسي	أفقي	استقطاب أحادي (أفقي)	استقطاب ثنائي (أفقي ورأسي)	استقطاب ثنائي (أفقي ورأسي)	استقطاب الهوائي
45	30	43	45	48	كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)
1	7>	1,1	0,95	0,65	عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (بالدرجات)
1	7>	1,1	0,95	0,65	عرض حزمة الهوائي في اتجاه السمّ (بالدرجات)
36	10-0.1	60-6	36-3	42-6	معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية)
360	360	360	360	360	نمط المسح الأفقي للهوائي (درجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ.)
20	10-0,1	لا ينطبق	15	24	معدل المسح الرأسي للهوائي (درجات)
90 إلى 5	90 إلى 2-	90+ إلى 2-	90+ إلى 2-	90+ إلى 2-	نمط المسح الرأسي للهوائي (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ.) (درجات)
35- إلى 20-	20-	26-	26-	23-	سويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفص الجانبي الأول، الفصوص الجانبية البعيدة) (dB)
30-6	30	40-10	40-10	40-10	ارتفاع الهوائي (m)
3,5 إلى 0,3	8 إلى 6	1,2	1,2	1,2	عرض النطاق IF عند 3 dB للمستقبل (MHz)
3	5	2	2	2	عامل ضوضاء المستقبل (dB)
119- إلى 100-	125- إلى 100-	111-	111-	111-	أدنى إشارة يمكن كشفها (dBm)

الجدول 7 (تتمة)

الرادار 21	الخصائص
5 750-5 430	مدى التوليف (MHz)
ذو قدرة دوبلرية	التشكيل
400-250	قدرة المرسل إلى الهوائي (ذروة kW)
3,5-0,5	عرض النبضة (μs)
0,2 / 0,1	وقت صعود/هبوط النبضة (μs)
2 400-250	معدل تكرار النبضات (pps)
ماغنترون	جهاز الخرج
حزمة رفيعة	نمط مخطط الهوائي (رفيع، مروحة، قاطع تمام مربع، إلخ.)
عاكس مكافئي	نوع الهوائي (عاكس، صفيق مرتب الأطوار، صفيق بشقوق، إلخ.)
خطي (ثنائي الاستقطاب)	استقطاب الهوائي
50-44	كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)
1,0-0,5	عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (بالدرجات)
1,0-0,5	عرض حزمة الهوائي في اتجاه السمات (بالدرجات)
36-0	معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية)
360	نمط المسح الأفقي للهوائي (درجات) (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ.)
36-0 (20 خطوة في 5 دقائق)	معدل المسح الرأسي للهوائي (درجات)
2- إلى 90+	نمط المسح الرأسي للهوائي (مستمر، عشوائي، 360 درجة، قطاعي، إلخ.) (درجات)
28-	سويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفص الجانبي الأول، الفصوص الجانبية البعيدة) (dB)
45-5	ارتفاع الهوائي (m)
20	عرض النطاق IF عند 3 dB للمستقبل (MHz)
2,5	عامل ضوضاء المستقبل (dB)
112-	أدنى إشارة يمكن كشفها (dBm)

3 إدارات الأرصاد الجوية العاملة في النطاق 9 500-9 300 MHz

تجدر الإشارة إلى أن إدارات الأرصاد الجوية الأرضية يمكنها العمل في مدى التردد 8 500-10 500 MHz، ولكنها تقتصر بوجه عام على العمل في نطاق التردد 9 500-9 300 MHz. وترد في الجدول 8 الخصائص التقنية لهذه الرادارات.

الجدول 8

الخصائص	الرادار 1	الرادار 2	الرادار 3
مدى التوليف (MHz)	9 375-9 300	9 500-9 200	9 375
التشكيل	نبضي	نبضي	نبضي
قدرة المرسل إلى الهوائي (ذروة kW)	50	250	75
عرض النبضة (μs)	0,1 و 0,25 و 1,0	0,5 و 1,0 و 0,8 و 2,0	2,5-0,33
معدل تكرار النبضات (pps)	1 000 إلى 2 000	1 500 إلى 250	3 000-250
دورة التشغيل القصوى (%)	0,002	غير محدد	0,1
وقت صعود/هبوط النبضة (μs)	0,05	غير محدد	0,1 / 0,08
جهاز الخرج	كليسترون أو ماغنترون	ماغنترون	ماغنترون
نقط مخطط الهوائي	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة	حزمة رفيعة
نوع الهوائي	عاكس مكافئ بتغذية كاسجرين	عاكس مكافئ	عاكس مكافئ
استقطاب الهوائي	خطي (مزودج الاستقطاب)	خطي	خطي (مزودج الاستقطاب)
كسب الحزمة الرئيسية للهوائي (dBi)	46	45	45 بالحد الأقصى
عرض حزمة الهوائي في اتجاه الارتفاع (درجات)	0,9	1,0 >	1,5-1,0
عرض حزمة الهوائي في اتجاه السمات (درجات)	0,9	1,0 >	1,5-1,0
معدل المسح الأفقي للهوائي (درجة/ثانية)	0 إلى 20	0 إلى 36	0 إلى 36
نمط المسح الأفقي للهوائي (مستمر، عشوائي، قطاعي، إلخ) (درجات)	حجمي، قطاعي، ثابت، تتبع	حجمي	360
معدل المسح الرأسي للهوائي (درجة/ثانية)	0 إلى 20	غير محدد	0 إلى 36
نمط المسح الرأسي للهوائي (درجات)	بخطوات حتى زاوية الارتفاع التالية بعد الدوران الأفقي أو تغيير زاوية الارتفاع مع سمت ثابت	بخطوات حتى زاوية الارتفاع التالية بعد الدوران الأفقي	2- إلى 9-
مستويات الفصوص الجانبية للهوائي (الفصوص الجانبية الأولى والفصوص الجانبية البعيدة) (dBi)	26	16	27-
ارتفاع الهوائي (m)	4	2 إلى 30	متغير
عرض النطاق IF عند 3 dB للمستقبل (MHz)	10 أو 4 أو 1	غير محدد	20
الضوضاء المتأصلة في المستقبل (dBm)	110-	114-	112-
الخسارة في المستقبل (dBm)	غير محدد	غير محدد	غير محدد
عرض نطاق الإرسال RF: عند 3 dB عند 20 dB (MHz)	غير محدد 6 إلى 60 MHz - حسب عرض النبضة	غير محدد غير محدد	5 15