التوصية ITU-R RA.769-2

معايير الحماية المستخدمة في قياسات الفلك الراديوي

(المسألة ITU-R 145/7)

(2003-1995-1992)

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن العديد من أهم التطورات الفلكية الأساسية التي تحققت في العقود الخمسة الماضية، (من قبيل اكتشاف مجرات راديوية، ونجوم زائفة، ونجوم نابضة، والقياس المباشر للهيدروجين المحايد، والقياس المباشر لمسافات بعض المجرات الخارجية، وإنشاء إطار مرجعي موضعي بدقة ~20 قوس µs) من خلال علم الفلك الراديوي، ويُتوقع أن تستمر الرصدات الفلكية الراديوية في تقديم مساهمات أساسية لفهمنا للكون، وهي تقدم الطريقة الوحيدة للتحقق من بعض الظواهر الكونية؛

ب) أن تطور علم الفلك الراديوي أدى إلى تقدم تكنولوجي، لا سيما في تقنيات الاستقبال والتصوير، وإلى تحسين المعرفة بالقيود الأساسية للضوضاء الراديوية ذات الأهمية الكبرى للاتصالات الراديوية، وهو يبشر بنتائج هامة أخرى؛

ج) أن علماء الفلك الراديوي قد قاموا برصدات فلكية مفيدة من سطح الأرض في جميع نوافذ الغلاف الجوي المتاحة التي تتراوح بين 2 MHz و1 000 GHz وما فوق؛

د) أن تقنية علم الفلك الراديوي الفضائي، والتي تنطوي على استعمال تلسكوبات راديوية من منصات فضائية تتيح النفاذ إلى كامل الطيف الراديوي فوق ما يقرب من 10 kHz، بما في ذلك أجزاء من الطيف الترددي لا يمكن الوصول إليها من الأرض جراء الامتصاص في الغلاف الجوي؛

هـ) أن الحماية من التداخل ضرورية للنهوض بعلم الفلك الراديوي والقياسات المرتبطة به؛

و) أن الرصدات الفلكية الراديوية تُجرى في الغالب باستخدام هوائيات أو صفائف عالية الكسب، لتقديم أعلى استبانة زاوية ممكنة، وبالتالي لا يلزم النظر في تداخل الحزمة الرئيسية في معظم الحالات، باستثناء الحالات التي يمكن فيها تضرر المستقبِل؛

ز) أن معظم التداخل الذي يؤدي إلى تردي البيانات الفلكية يُستقبل من خلال الفصوص الجانبية البعيدة للتلسكوب؛

ح) أن حساسية معدات الاستقبال الفلكي الراديوي، ما زالت تتحسن باطراد، لا سيما عند أطوال الموجات المليمترية، وأنها تفوق إلى حد كبير حساسية معدات الاتصالات ومعدات الرادار؛

ط) أن الرصدات الفلكية الراديوية النمطية تتطلب أوقات تكامل تتراوح بين بضع دقائق وساعات، لكن الرصدات الحساسة، لا سيما للخطوط الطيفية، يمكن أن تتطلب فترات تسجيل أطول، تصل أحياناً إلى عدة أيام؛

ي) أن بعض الإرسالات من المركبات الفضائية يمكن أن تسبب مشاكل تداخل على علم الفلك الراديوي وأن تجنبها متعذر عن طريق اختيار موقع لمرصد أو عن طريق الحماية المحلية؛

ك) أن التداخل على علم الفلك الراديوي يمكن أن ينجم عن إرسالات للأرض تنعكس عن القمر وطائرات وربما عن سواتل؛

ل) أن بعض أنواع رصدات القياس بالتداخل ذات الاستبانة المكانية العالية تتطلب استقبالاً متزامناً، على نفس التردد الراديوي، عن طريق أنظمة استقبال ذات تباعد واسع قد تقع في بلدان مختلفة أو في قارات مختلفة أو على منصات فضائية؛

م) أن ظروف الانتشار على ترددات أدنى من 40 MHz تقريباً تجعل المرسل الذي يعمل في أي مكان على الأرض مصدراً محتملاً لتداخل ضار بعلم الفلك الراديوي؛

ن) أن قدراً ما من الحماية يمكن تحقيقه بتخصيصات ترددية مناسبة على أساس وطني بدلاً من دولي؛

س) أن المؤتمرات العالمية للاتصالات الراديوية حسنت توزيعات لعلم الفلك الراديوي، لا سيما فوق 71 GHz، لكن الحماية في كثير من النطاقات، ولا سيما تلك المشتركة مع الخدمات الراديوية الأخرى، ربما لا تزال بحاجة إلى تخطيط دقيق؛

ع) أن المعايير التقنية المتعلقة بالتداخلات الضارة على خدمة علم الفلك الراديوي (RAS) قد وُضعت وهي ترد في الجداول 1 و2 و3،

توصي

1 بتشجيع علماء الفلك الراديوي على اختيار مواقع تخلو قدر الإمكان من التداخل؛

2 بأن تقدم الإدارات كل الحماية العملية للترددات والمواقع التي يستخدمها علماء الفلك الراديويون في بلدانهم والبلدان المجاورة وعند التخطيط للأنظمة العالمية، مع مراعاة مستويات التداخل الواردة في الملحق 1 على النحو الواجب؛

3 أن تتخذ الإدارات، في سعيها لتقديم الحماية لرصدات فلكية راديوية معينة، جميع الخطوات العملية لخفض جميع الإرسالات غير المطلوبة التي تقع ضمن نطاق الترددات المطلوب حمايتها لعلم الفلك الراديوي إلى أدنى حد ممكن؛ ولا سيما الإرسالات الصادرة من الطائرات ومحطات المنصات عالية الارتفاع والمركبات الفضائية والمناطيد؛

4 أن تأخذ الإدارات في الاعتبار، عند اقتراح توزيعات ترددية، الصعوبة البلغة التي يواجهها علم الفلك الراديوي في التشارك في الترددات مع أي خدمة أخرى تتعلق بمسيرات خط البصر المباشرة من المرسلات إلى المراصد. وأن التشارك في الترددات التي تعلو فوق حوالي 40 MHz قد يتسنى عملياً مع الخدمات التي لا تقع فيها المرسلات في خط البصر المباشر للمراصد، ولكن التنسيق قد يكون ضرورياً، خاصة إذا كانت المرسلات ذات قدرة عالية.

الملحق 1

حساسية أنظمة الفلك الراديوية

1 الاعتبارات والافتراضات العامة المستخدمة في حساب مستويات التداخل

1.1 معيار المستوى الضار من التداخل

يمكن تحديد حساسية رصدة في علم الفلك الراديوي بدلالة أصغر تغيير ΔP في مستوى القدرة P عند دخل المقياس الراديوي يمكن كشفه وقياسه. ويعبّر عن معادلة الحساسية بالعلاقة:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \tag{1}$$

حيث:

P وΔP: الكثافة الطيفية لقدرة الضوضاء

Δf_0: عرض النطاق

t: زمن التكامل. ويمكن التعبير عن P وΔP في المعادلة (1) بوحدات الحرارة من خلال ثابت بولتزمان (Boltzmann)، k:

$$\Delta P = k\,\Delta T; \quad \text{also} \quad P = k\,T \tag{2}$$

وبالتالي يمكن التعبير عن معادلة الحساسية على النحو التالي:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \tag{3}$$

حيث:

$$T = T_A + T_R$$

وتنطبق هذه النتيجة على استقطاب واحد للتلسكوب الراديوي. وT هي مجموع T_A، (مساهمة حرارة ضوضاء الهوائي الناجمة عن الانبعاثات الكونية والغلاف الجوي للأرض والإشعاع من الأرض)، وT_R، وحرارة ضوضاء المستقبل. ويمكن استخدام المعادلة (1) أو المعادلة (3) لتقدير مستويات الحساسية والتداخل في الرصدات الفلكية الراديوية. والنتائج مدرجة في الجدولين 1 و2، ويفترض زمن الرصد (أو زمن التكامل) t بمقدار 000 2 ثانية، ويعبَّر عن مستويات عتبة التداخل، ΔP_H، الواردة في الجدولين 1 و2 كقدرة التداخل ضمن عرض النطاق Δf الذي يؤدي إلى خطأ بنسبة 10% في قياس ΔP (أو ΔT)، أي:

$$\Delta P_H = 0.1\,\Delta P\,\Delta f \tag{4}$$

وباختصار، يمكن حساب الأعمدة المناسبة في الجدولين 1 و2 باستخدام الطرائق التالية:

– ΔT، باستخدام المعادلة (3)،

– ΔP، باستخدام المعادلة (2)،

– ΔP_H، باستخدام المعادلة (4).

ويمكن أيضاً التعبير عن التداخل بدلالة كثافة تدفق القدرة (pfd) الواردة إلى الهوائي، إما في كامل عرض النطاق أو في شكل كثافة تدفق القدرة الطيفية (spfd)، S_H، في كل 1 Hz من عرض النطاق. وتعطى القيم لهوائي له كسب، في اتجاه وصول التداخل، مساوٍ لكسب هوائي متناح (يغطي مساحة فعالة قدرها $c^2/4\pi f^2$، حيث c هي سرعة الضوء وf هو التردد). ويُستخدم كسب مشع متناحٍ، بقيمة 0 dBi، كقيمة عامة ذات صفة تمثيلية لمستوى الفص الجانبي، على النحو الذي ورد بحثه في الفقرة 3.1.

وتستخرج قيم ($S_H \Delta f$ (dB(W/m^2)) من ΔP_H (dBW) بإضافة:

$$20 \log f - 158{,}5 \quad \text{dB} \tag{5}$$

حيث يقدر f (Hz). عندئذ تستخرج S_H بطرح $10 \log \Delta f$ (Hz) لمراعاة عرض النطاق.

2.1 وقت التكامل

تستند الحساسيات المحسوبة ومستويات التداخل الواردة في الجدولين 1 و2 إلى أوقات تكامل مفترضة تبلغ 2 000 ثانية (s). وتغطي أوقات التكامل المستخدمة فعلياً في الرصدات الفلكية مجموعة واسعة من القيم. وتمثّل الرصدات المستمرة التي تجرى باستخدام التلسكوبات أحادية الهوائي (على نحو يختلف عن مصفوفات القياس بالتداخل) تمثيلاً جيداً بوقت التكامل البالغ 2 000 s، وهو نمطي للرصدات عالية الجودة. من ناحية أخرى فإن 2 000 s أقل تمثيلاً لرصدات الخطوط الطيفية. وقد سمحت التحسينات في استقرار جهاز الاستقبال والاستخدام المتزايد لمقاييس طيف التلازم بزيادة وتيرة استخدام أوقات التكامل الأطول المطلوبة لمراقبة الخطوط الطيفية الضعيفة، وتشيع تماماً رصدات الخطوط الطيفية التي تستمر لعدة ساعات. ووقت التكامل الأكثر تمثيلا لهذه الرصدات سيمتد إلى 10 ساعات. وبالنسبة للتكامل لمدة 10 ساعات، تزيد صرامة مستوى التداخل عند العتبة بنسبة 6 dB عن القيم الواردة في الجدول 2. وهناك أيضاً رصدات معينة للظواهر المتغيرة بتغير الزمن، من قبيل رصدات الرشقات النجمية أو الشمسية، والتلألؤات بين الكواكب التي قد يكون من الأنسب لها استخدام فترات زمنية أقصر بكثير.

3.1 مخطط استجابة الهوائي

يكاد يُستقبل التداخل على علم الفلك الراديوي دائماً عبر الفصوص الجانبية للهوائي، لذلك لا حاجة للنظر في استجابة الحزمة الرئيسية للتداخل.

ويُعتبر نموذج الفصوص الجانبية لهوائيات مكافئية كبيرة في المدى الترددي من 2 إلى 30 GHz، الوارد في التوصية ITU-R SA.509 تقريباً جيداً لاستجابة العديد من هوائيات علم الفلك الراديوي ويُعتمد في جميع فقرات هذه التوصية كهوائي مرجعي لعلم الفلك الراديوي. وفي هذا النموذج، ينخفض مستوى الفص الجانبي بمسافة زاوية (بالدرجات) من محور الحزمة الرئيسية وهو يساوي $32 - 25 \log \varphi$ (dBi) من أجل $1° < \varphi < 48°$. ومن الواضح أن تأثير إشارة تداخل ما يتوقف على زاوية الورود نسبة إلى محور الحزمة الرئيسية في الهوائي، ذلك لأن كسب الفص الجانبي، ممثلاً بالنموذج، يتراوح من +32 إلى –10 dB كدالة لهذه الزاوية. ولكن يستفاد من حساب مستويات عتبة شدة التداخل لقيمة معينة لكسب الفص الجانبي، التي نختارها بنسبة 0 dBi، ونستخدمها في الجداول من 1 إلى 3. ومن النموذج، يحدث مستوى الفص الجانبي هذا بزاوية 19,05 درجة من محور الحزمة الرئيسية. ثم ستتجاوز الإشارة عند مستوى العتبة الضار، المعرَّف لكسب الفصوص الجانبية بنسبة 0 dBi، معيار المستوى الضار عند دخل المستقبِل إذا وردت إلى الهوائي بزاوية أصغر من 19,05 درجة. والزاوية الصلبة ضمن مخروط نصف قطر زاوي بواقع 19,05 درجة هو 0,344 sr، وهو ما يساوي 5,5% من 2π sr في السماء فوق الأفق التي يستطيع التلسكوب الراديوي رصدها في أي وقت. وبالتالي، إذا توزع احتمال زاوية ورود التداخل بانتظام فوق السماء، فإن حوالي 5,5% من الإشارات المسببة للتداخل سترد ضمن 19,05 درجة من محور الحزمة الرئيسية لهوائي موجه نحو السماء. ويجدر بالذكر أيضاً أن الرقم 5,5% يتماشى مع المستويات الموصى بها لفقدان البيانات في رصدات علم الفلك الراديوي في النسبة المئوية من الوقت المحددة في التوصية ITU R RA.1513.

والحالة الخاصة للسواتل في مدارات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض عبارة عن حالة دينامية، أي أن مواقع السواتل نسبة إلى حزمة هوائي الفلك الراديوي تتعرض لتغييرات كبيرة داخل نطاق التكامل الزمني البالغ 2 000 ثانية. ويتطلب تحليل التداخل في هذه الحالة دمج الاستجابة عبر المستويات المتفاوتة للفصوص الجانبية، وذلك مثلاً باستخدام مفهوم كثافة تدفق القدرة المكافئة (epfd) المعرّف في الرقم 5C.22 من لوائح الراديو. وبالإضافة إلى ذلك، من الضروري عادةً الجمع بين الاستجابات في تليسكوب راديوي لعدد من السواتل ضمن نظام معين. ويُقترح في هذه الحسابات، إلى أن يتوفر نموذجٌ موضوعٌ خصيصاً لهوائيات الفلك الراديوي، استخدام مخطط استجابة الهوائي لهوائيات قطرها أكبر من 100 λ في التوصية ITU-R S.1428 لتمثيل هوائي الفلك الراديوي؛ انظر الفقرة 2.2 للاطلاع على بحث أوفى في هذا الصدد.

4.1 عرض النطاق

تُظهر المعادلة (1) الحصول على الرصدات ذات الحساسية العالية عندما يستفيد علماء الفلك الراديوي من أكبر عرض نطاق ممكن. وبالتالي، يُفترض في الجدول 1 (بشأن الرصدات المتواصلة) أن Δf هو عرض نطاقات الفلك الراديوي الموزَّعة للترددات تصل إلى 71 GHz. وما فوق 71 GHz، تُستخدم قيمة 8 GHz، وهو عرض نطاق ذو صفة تمثيلية يستخدم عموماً في مستقبلات علم الفلك الراديوي في هذا المدى. وفي الجدول 2 (رصدات الخط الطيفي)، يُستعمل عرض نطاق قناة، Δf، الذي يساوي انزياح دوبلر بواقع 3 km/s في السرعة للإدخالات التي تقل عن 71 GHz. وتمثل هذه القيمة حلاً وسطاً بين الاستبانة الطيفية العالية المرغوبة والحساسية. ويوجد عدد كبير جداً من الخطوط المهمة من الناحية الفيزيائية الفلكية ما فوق 71 GHz، على النحو الموضح في التوصية ITU-R RA.314 ولا يوجد سوى عدد قليل من القيم ذات الصفة التمثيلية للمستويات الضارة في الجدول 2 بشأن المدى 71-275 GHz. وعرض نطاق القناة المستخدم لحساب المستويات الضارة فوق 71 GHz هو 1 000 kHz (1 MHz) في جميع الحالات.

واختيرت هذه القيمة لأسباب عملية. وفي حين أنه أوسع قليلاً من عرض القناة الطيفي المعتاد في مستقبلات علم الفلك الراديوي عند هذه الترددات، فإنه يُستخدم كعرض النطاق المرجعي المعياري للخدمات الفضائية فوق 15 GHz.

5.1 حرارة ضوضاء المستقبِل وحرارة الهوائي

تمثل حرارة ضوضاء المستقبل في الجدولين 1 و2 الأنظمة المستخدمة في علم الفلك الراديوي. وبالنسبة للترددات ما فوق 1 GHz، فهي مضخمات أو خلاطات مبردة تبريداً عالياً. ويضع التأثير الكمي حداً نظرياً أدنى بواقع hf/k لحرارة ضوضاء هذه الأجهزة، حيث h وk هما ثابتا Planck وBoltzmann، على التوالي. ويصبح هذا الحد مهماً في الترددات التي تزيد عن 100 GHz، حيث يساوي 4,8 K. وتسجل الخلاطات والمضخمات العملية، في النطاقات عند 100 GHz فأعلى، حرارة ضوضاء أكبر من hf/k بعامل يقارب أربعة أمثال. وبالتالي، بالنسبة للترددات ما فوق 100 GHz، تُستخدم حرارة ضوضاء تساوي 4 hf/k في الجدولين 1 و2.

تمثل حرارة الهوائي في الجداول أيضاً الأنظمة العملية المستخدمة في علم الفلك الراديوي. وهي تشمل تأثيرات الأيونوسفير أو الجو المحايد، والتقاط الأرض في الفصوص الجانبية الناتجة عن الطفح أو الانتشار، والخسائر الأومية، والخلفية الكونية الميكروية. وعند الترددات ما فوق 100 GHz، تصبح الخسائر الجوية بسبب بخار الماء في الجو المحايد مهمة للغاية. وبالنسبة إلى هذه الترددات، تراعي القيم المعطاة خصوصية مواقع الأرض المستخدمة في مرافق علم الفلك الراديوي العاملة على الموجات المليمترية، مثل ماونا كيا أو هاواي أو لانو دي تشانانتور على ارتفاع 000 5 متر في شيلي، وهو الموقع الذي اختير لصفيف دولي كبير من هوائيات علم الفلك الراديوي نعمل على ترددات في المدى من 30 GHz إلى 1 THz.

2 حالات خاصة

تنطبق المستويات الواردة في الجدولين 1 و2 على المصادر الأرضية للإشارات المسببة للتداخل. وتفترض كثافة تدفق القدرة (pfd) الضارة وكثافة تدفق القدرة الطيفية الموضحة في الجدولين 1 و2 أن التداخل يُستقبل عبر فص جانبي كسبه 0 dBi وينبغي اعتباره معيار التداخل العام لرصدات علم الفلك الراديوي عالية الحساسية، عندما لا يدخل التداخل عبر الفصوص الجانبية القريبة.

1.2 التداخل من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض

يعد التداخل من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض حالة ذات أهمية خاصة. ونظراً لأن مستويات القدرة في الجدولين 1 و2 حُسبت بناءً على كسب هوائي قدره 0 dBi، سيظهر تداخل ضار بعلم الفلك الراديوي عند توجيه هوائي مرجعي، على النحو الموضح في التوصية ITU-R SA.509، ضمن زاوية 19,05 درجة من ساتل يشع بمستويات وفقاً لتلك المدرجة في الجدولين. وهكذا من شأن سلسلة من هذه السواتل الواقعة حول المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض أن تستبعد رصدات الفلك الراديوي ذات الحساسية العالية من نطاق سماوي باتساع 38,1° متمركزة على المدار. وفقدان هذه المساحة الكبيرة من السماء يفرض قيوداً شديدة على رصدات الفلك الراديوي.

وبشكل عام، ما من سبيل عملي لكبح الإرسالات غير المطلوبة من السواتل إلى ما دون المستوى الضار عند توجيه الحزمة الرئيسية للتلسكوب الراديوي نحو الساتل مباشرة. ويُقترح حل عملي من خلال رصد مسقط إشعاع الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض في الإحداثيات السماوية كما يُنظر إليها من خطوط العرض لعدد من رصدات علم الفلك الراديوي الرئيسية (انظر التوصية ITU-R RA.517). وإذا أمكن تسديد تليسكوب راديوي ضمن 5° من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض دون مواجهة تداخل ضار، عندئذ يكون لهذا التليسكوب فسحة من السماء باتساع 10° غير متاحة للرصدات عالية الحساسية. ويمثل ذلك لأي مرصد معين خسارة كبيرة. ومع ذلك، يمكن لمجموعة من التليسكوبات الراديوية الموجودة في خطوط العرض الشمالية والجنوبية، تعمل في نفس الترددات، أن تنفذ إلى السماء بأكملها. ولذلك ينبغي أن تُعتبر قيمة 5° مطلوبة من أجل الحد الأدنى من التباعد الزاوي بين الحزمة الرئيسية لهوائي فلك راديوي والمدار المستقر بالنسبة إلى الأرض.

وفي استجابة الهوائي النمطي في التوصية ITU-R SA.509، يكون مستوى الفص الجانبي عند زاوية 5° من الحزمة الرئيسية 15 dBi. وهكذا، ولتجنب أي تداخل ضار في تليسكوب راديوي يستوفي أداء الفص الجانبي لهوائي التوصية ITU-R SA.509 والمسدد بزاوية 5° من المرسل، ينبغي خفض انبعاثات السواتل ضمن نطاقات الفلك الراديوي بمقدار 15 dB دون مستوى كثافة تدفق القدرة الوارد في الجدولين 1 و2. وعند مباعدة السواتل على مسافات بضع درجات فقط على طول المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، يجب أن تكون مستويات القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) لفرادى الإرسالات أدنى من ذلك أيضاً لتلبية اشتراط أن يكون مجموع القدرات من كل إشارات التداخل الواردة بمقدار 15 dB دون ΔP_H في الجدولين 1 و2.

ومن المسلم به أن قيود البث التي نوقشت أعلاه لا يمكن، عملياً، أن تتحقق لتمكين التشارك في نفس النطاق الترددي بين علم الفلك الراديوي والإرسالات على الوصلة الهابطة من السواتل. ولكن القيود تنطبق على البث غير المطلوب من المرسلات الساتلية، التي تقع ضمن نطاقات علم الفلك الراديوي المدرجة في الجدولين 1 و2. ولقيود البث هذه آثار على الخدمات الفضائية المسؤولة عن التداخل، وهي تتطلب تقييماً دقيقاً. علاوةً على

ذلك، ينبغي أن يسعى تصميم هوائيات علم الفلك الراديوي الجديدة إلى التقليل إلى أدنى حد من مستوى كسب الفص الجانبي بالقرب من الحزمة الرئيسية كوسيلة مهمة للحد من التداخل من أجهزة الإرسال في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض.

2.2 التداخل من السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض

في حالة السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض، وخاصة بالنسبة للسواتل ذات المدار الأرضي المنخفض، تتضمن الأنظمة عادةً كوكبات تضم العديد من السواتل الفردية. وبالتالي يتطلب تحديد مستويات التداخل تحليل التأثير المشترك للعديد من الإشارات، والتي يُستقبل معظمها عبر الفصوص الجانبية البعيدة لهوائي علم الفلك الراديوي. وبالتالي، يُستحسن وضع نموذج فص جانبي أكثر تفصيلاً من نموذج التوصية ITU-R SA.509، ويُقترح استخدام النموذج الوارد في التوصية ITU-R S.1428 ريثما يتوفر نموذج أكثر تمثيلاً لهوائيات الفلك الراديوي. وعند استخدام هذا النموذج المقترح، تكون حالة الهوائيات التي يزيد قطرها عن 100 λ مناسبة بشكل عام لتطبيقات علم الفلك الراديوي. ويجدر بالذكر تعذر تطبيق الملاحظة 1 في التوصية ITU-R S.1428، التي تسمح بتجاهل المكونات المتقاطعة الاستقطاب، لأن هوائيات علم الفلك الراديوي تستقبل بشكل عام إشارات في استقطابين متعامدين في آن واحد. وتتطلب حركة السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض عبر السماء خلال فترة تكامل قدرها 000 2 ثانية (s) حساب متوسط مستوى التداخل خلال هذه الفترة، أي أنه يجب دمج الاستجابة لكل ساتل أثناء تحرك الساتل عبر مخطط الفص الجانبي. ومن أنظمة التحليل التي تتضمن هذه المتطلبات طريقة كثافة تدفق القدرة المكافئة (epfd) الموصوفة في الرقم 5C.22 من لوائح الراديو. وتمثل قيم كثافة تدفق القدرة المكافئة كثافة تدفق القدرة لإشارة تدخل الهوائي من خلال مركز الحزمة الرئيسية مما يُنتج مستوى مكافئ من قدرة التداخل. وبما أن مستويات عتبة التداخل الضار في الجدولين 1 و2 تتوافق مع كثافة تدفق القدرة المستقبَلة بكسب هوائي قدره 0 dBi، فمن الضروري مقارنتها مع قيم ($epfd + G_{mb}$)، حيث G_{mb} هو كسب الحزمة الرئيسية، لتحديد ما إذا كان التدخل يتجاوز المستوى الضار. وبالاستفادة من طريقة كثافة تدفق القدرة المكافئة، وُضعت التوصية ITU-R S.1586 مؤخراً لحساب التداخل بين تلسكوبات علم الفلك الراديوي وبين الأنظمة الساتلية غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض في الخدمة الثابتة الساتلية. ووُضعت توصية مماثلة، هي التوصية ITU-R M.1583، لحساب التداخل بين تلسكوبات علم الفلك الراديوي وأنظمة الخدمة المتنقلة الساتلية وخدمة الملاحة الراديوية الساتلية غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ويرد في التوصية ITU-R RA.1513 وصف تطبيق معايير الحماية الواردة في الجدولين 1 و2.

3.2 استجابة مقاييس التداخل والصفائف للتداخل الراديوي

ثمة تأثيران يخفضان من الاستجابة للتداخل. وهما يرتبطان بتردد ذبذبات الحافة الملحوظة لدى الجمع بين خرجي هوائيين، ولأن مكونات إشارة التداخل التي تستقبلها هوائيات مختلفة ومتباعدة جداً تتعرض لتأخرات زمنية نسبية مختلفة قبل إعادة جمعها. ومعالجة هذه الآثار أكثر تعقيداً من معالجة آثار هوائيات وحيدة، كما في الفقرة 1. وبصفة عامة، إذا بقيت شدة إشارة التداخل المستقبَلة ثابتة، ينخفض التأثير بعامل يكاد يساوي متوسط زمن تذبذب طبيعي واحد مقسوماً على متوسط وقت البيانات. وهذا يتراوح عادةً من بضع ثوانٍ لصفيف متراص بتباعد $L \sim 10^3$ λ، حيث λ هو الطول الموجي، إلى أقل من ملليثانية للصفائف عابرة للقارات بتباعد $L \sim 10^7$ λ. وهكذا، ومقارنةً بهوائي فلك راديوي وحيد، يكون لمقياس التداخل درجة من الحصانة إزاء التداخل تزداد بتزايد حجم الصفيفة معبراً عنه بأطوال الموجة.

وتتحقق أكبر حصانة من التداخل لمقاييس التداخل والصفائف التي يكون فيها فصل الهوائيات بعيداً بما يكفي بحيث تتضاءل كثيراً فرصة حدوث تداخل متلازم (ومثال ذلك في قياس التداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI)). وفي هذه الحالة، لا تنطبق الاعتبارات المذكورة أعلاه. ويتحدد مستوى التداخل المسموح به من خلال اشتراط ألا يتجاوز مستوى قدرة الإشارة المسببة للتداخل 1% من قدرة ضوضاء المستقبِل لمنع الأخطاء الجسيمة في قياس اتساع الإشارات الكونية. وترد مستويات التداخل لرصدات VLBI النمطية في الجدول 3، استناداً إلى قيم T_A وT_R الواردة في الجدول 1.

ويجب التأكيد على أن استخدام مقاييس التداخل والصفائف يقتصر عموماً على دراسات مصادر لَمَعان عالية منفصلة لها أبعاد زاويّة لا تزيد عن بضعة أعشار من الثواني القوسية لنظم قياس التداخل ذي خط الأساس الطويل جداً (VLBI). وهكذا تظل نتائج القدرة الكلية في الجدولين 1 و2 صالحة لحماية خدمة الفلك الراديوي عموماً.

الجدول 1

المستويات العتبية للتداخل الضار برصدات الفلك الراديوي المتواصلة

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

[1] يستند حساب مستويات التداخل إلى التردد المركزي المبين في هذا العمود (1) وإن لم يكن لجميع الأقاليم نفس التوزيعات.

[2] افترض زمن تكامل قدره 2 000 ثانية؛ وإذا استخدمت أزمنة تكامل من 15 دقيقة أو ساعة أو ساعتين أو 5 ساعات أو 10 ساعات، ينبغي تعديل القيم ذات الصلة في الجدول بمقدار +1,7 أو –1,3 أو –2,8 أو–4,8 أو–6,3 dB على التوالي.

[3] ومستويات التداخل المدرجة هي تلك التي تنطبق على قياسات إجمالي القدرة التي يستقبلها هوائي واحد. وقد تكون مستويات أقل صرامة أنسب لأنواع أخرى من القياسات، كما جاء في الفقرة 2.2. وبالنسبة للمرسلات في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فمن المستحسن تعديل المستويات بمقدار –15 dB، كما هو موضح في الفقرة 1.2.

الجدول 2*

المستويات العتبية للتداخل الضار برصدات الفلك الراديوي في الخطوط الطيفية

التردد المركزي f (MHz)	عرض نطاق قناة الخطوط الطيفية المفترض Δf (MHz)	درجة حرارة ضوضاء الهوائي الدنيا T_A (K)	درجة حرارة ضوضاء المستقبل T_R (K)	حساسية النظام[2] (تقلبات الضوضاء)		مستويات التداخل العتبية[1] [2]		
				درجة الحرارة ΔT (mK)	كثافة القدرة الطيفية ΔP (dB(W/Hz))	قدرة الدخل ΔP_H (dBW)	pfd $S_H \Delta f$ (dB(W/m^2))	spfd S_H (dB(W/(m^2 · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	60	22,3	245–	215–	204–	244–
1 420	20	12	10	3,48	253–	220–	196–	239–
1 612	20	12	10	3,48	253–	220–	194–	238–
1 665	20	12	10	3,48	253–	220–	194–	237–
4 830	50	12	10	2,20	255–	218–	183–	230–
14 500	150	15	15	1,73	256–	214–	169–	221–
22 200	250	35	30	2,91	254–	210–	162–	216–
23 700	250	35	30	2,91	254–	210–	161–	215–
43 000	500	25	65	2,84	254–	207–	153–	210–
48 000	500	30	65	3,00	254–	207–	152–	209–
88 600	1 000	12	30	0,94	259–	209–	148–	208–
150 000	1 000	14	30	0,98	259–	209–	144–	204–
220 000	1 000	20	43	1,41	257–	207–	139–	199–
265 000	1 000	25	50	1,68	256–	206–	137–	197–

* ليس القصد من هذا الجدول إعطاء قائمة كاملة بنطاقات الفلك الراديوي وإنما مجرد أمثلة نمطية عبر الطيف.

(1) افترض زمن تكامل قدره 2 000 ثانية؛ وإذا استخدمت أزمنة تكامل من 15 دقيقة أو ساعة أو ساعتين أو 5 ساعات أو 10 ساعات، ينبغي تعديل القيم ذات الصلة في الجدول بمقدار +1,7 أو –1,3 أو –2,8 أو–4,8 أو–6,3 dB على التوالي.

(2) ومستويات التداخل المدرجة هي تلك التي تنطبق على قياسات إجمالي القدرة التي يتلقاها هوائي واحد. وقد تكون مستويات أقل صرامة أنسب لأنواع أخرى من القياسات، كما جاء في الفقرة 2.2. وبالنسبة للمرسلات في المدارات المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فمن المستحسن تعديل المستويات بمقدار –15 dB، كما هو موضح في الفقرة 1.2.

شرح الأعمدة في الجدولين 1 و2:

العمود

(1) تردد مركزي للنطاق الموزع لخدمة الفلك الراديوي (الجدول 1) أو تردد خط طيفي اسمي (الجدول 2).

(2) عرض نطاق مفترض أو موزع (الجدول 1) أو عرض قناة نمطية مفترضة مستخدمة في رصدات الخطوط الطيفية (الجدول 2).

(3) درجة حرارة ضوضاء الهوائي الدنيا، وهي تتضمن مساهمات من الأيونوسفير والغلاف الجوي للأرض والإشعاع من الأرض.

(4) درجة حرارة ضوضاء المستقبِل الممثلة لنظام قياس راديوي يراد استخدامها لرصدات علم الفلك الراديوي عالية الحساسية.

(5) مجموع حساسية النظام بوحدة milli-Kelvin (mK) كما يحسب من المعادلة (1) باستخدام مجموع درجتي حرارة ضوضاء الهوائي والمستقبل، وعرض النطاق المدرج، وزمن تكامل بمقدار 000 2 ثانية.

(6) على غرار (5) أعلاه، ولكن في شكل كثافة طيفية لقدرة الضوضاء باستخدام المعادلة $\Delta P_s = k \Delta T$، حيث $\Delta P = k \Delta T$، $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ (J/K) (ثابت Boltzmann). والأرقام الفعلية في الجدول هي التعبير اللوغاريتمي عن ΔP.

(7) تعتبر سوية القدرة عند دخل المستقبل ضارة بالرصدات عالية الحساسية، ΔP_H. ويعبر عنه في مستوى التداخل المؤدي إلى خطأ لا يزيد عن 10% في قياس ΔP؛ $\Delta P_H = 0{,}1\ \Delta P\ \Delta f$: والأرقام في الجدول هي التعبير اللوغاريتمي عن ΔP_H.

(8) كثافة تدفق القدرة اللازمة في قناة خط طيفي لإنتاج سوية قدرة ΔP_H في نظام استقبال له هوائي استقبال متناحٍ. والأرقام في الجدول هي التعبير اللوغاريتمي عن $S_H\ \Delta f$.

(9) كثافة تدفق القدرة الطيفية اللازمة لإنتاج سوية قدرة ΔP_H في نظام المستقبل ذي هوائي استقبال متناحٍ. والأرقام في الجدول هي التعبير اللوغاريتمي عن S_H. للحصول على مستويات القدرة المقابلة في عرض نطاق مرجعي بمقدار 4 kHz أو 1 MHz، يضاف 36 dB أو 60 dB، على التوالي.

الجدول 3

مستويات التداخل العتبية لرصدات VLBI

التردد المركزي (MHz)	المستوى العتبي (dB(W/(m² · Hz)))
325,3	217–
611	212–
1 413,5	211–
2 695	205–
4 995	200–
10 650	193–
15 375	189–
23 800	183–
43 000	175–
86 000	172–