الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R SA.1014-3

(2017/07)

متطلبات الاتصالات الراديوية لمركبات أبحاث الفضاء البعيد المأهولة وغير المأهولة

السلسلة SA

التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية

تمهيد

يضطلع 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 لمدى 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 الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار 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)

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2018

© ITU 2018
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 SA.1014-3

متطلبات الاتصالات الراديوية لمركبات أبحاث الفضاء البعيد المأهولة وغير المأهولة

(2017-2011-2006-1994)

مجال التطبيق

تصف هذه التوصية بإيجاز بعض الخصائص الأساسية للاتصالات الراديوية بخدمة أبحاث (في الفضاء البعيد). وتؤثر هذه الخصائص أو تحدد المتطلبات اللازمة لانتقاء النطاقات المرشحة والتنسيق وتقاسم النطاقات والحماية من التداخلات.

مصطلحات أساسية

الفضاء البعيد، الاتصالات الراديوية، القياس عن بُعد، التحكم عن بُعد، معدل البيانات، المحطات الأرضية، المحطات الفضائية، قياس المسافة، علم الراديو.

التوصيات والتقارير ذات الصلة

التوصية ITU-R SA.1015، التقرير ITU-R SA.2167، التقرير ITU-R SA.2177.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن الاتصالات الراديوية بين الأرض ومحطات الفضاء البعيد لها متطلباتها الخاصة؛

ب) أن هذه المتطلبات تؤثر على انتقاء النطاقات المرشحة وتقاسم النطاقات والتنسيق والحماية من التداخلات وغير ذلك من المسائل التنظيمية ومسائل إدارة الترددات،

توصي

بمراعاة المتطلبات والخصائص الوارد وصفها في الملحق للاتصالات الراديوية في الفضاء البعيد فيما يتعلق بخدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد) وتفاعلها مع الخدمات الأخرى.

الملحق

متطلبات الاتصالات الراديوية لمركبات أبحاث الفضاء البعيد المأهولة وغير المأهولة

1 مقدمة

يعرض هذا الملحق بعض الخصائص المتعلقة بمهام الأبحاث في الفضاء البعيد، والمتطلبات الوظيفية ومتطلبات الأداء للاتصالات الراديوية اللازمة لإجراء الأبحاث في الفضاء البعيد بواسطة مركبة فضائية، والطرائق التقنية ومعلمات الأنظمة المستعملة فيما يتعلق بهذه المهام.

وترد في التقرير ITU-R SA.2177 دراسة للاعتبارات المتعلقة بخصائص عرض النطاق ومتطلباته.

2 متطلبات الاتصالات الراديوية

تتطلب مهام الفضاء البعيد اتصالات راديوية عالية الموثوقية على مدى فترات زمنية طويلة وعلى مسافات بعيدة. فمثلاً تستغرق مهمة مركبة فضائية تسعى إلى جمع معلومات علمية عن كوكب نبتون (Neptune) ثماني سنوات وتتطلب إجراء اتصالات راديوية على مسافة تبلغ $4{,}65 \times 10^9$ km. والحاجة إلى مستقبلات ذات قدرة مشعة مكافئة متناحية e.i.r.p. عالية وحساسة للغاية هو نتيجة للمسافات الكبيرة للاتصالات الراديوية التي ينطوي عليها البحث في الفضاء البعيد.

والاستعمال المستمر لنطاقات الاتصالات الراديوية بخدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد) هو نتيجة لوجود مهام متعددة الآن ومهام جاري تخطيطها. ولأن مهام كثيرة في الفضاء البعيد تستمر لفترات تستغرق عدة سنوات، ولأن هناك مهام متعددة عادة تحقق تقدماً في نفس الوقت، ثمة ضرورة مناظرة لإجراء اتصالات راديوية مع عدة مركبات فضائية في أي وقت.

وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تتضمن كل مهمة أكثر من مركبة فضائية واحدة، بحيث يستلزم الأمر إجراء اتصالات راديوية مع عدة محطات فضائية. كما قد يقتضي الأمر إجراء اتصالات راديوية منسقة متآونة بين محطة فضائية وأكثر من محطة أرضية.

1.2 متطلبات القياس عن بُعد

يستعمل القياس عن بُعد لنقل معلومات علمية ومعلومات تتعلق بالصيانة من الفضاء البعيد.

ويجب تلقّي معلومات القياس عن بُعد للصيانة بشأن ظروف المركبة الفضائية عند الحاجة إليها لضمان سلامة المركبة الفضائية ونجاح المهمة. ويتطلب ذلك إقامة وصلة اتصالات راديوية لا تتأثر بالطقس وذات قدرة كافية. وهذا المطلب يعتبر بمثابة محدد جزئي لنطاقات التردد المفضلة للبحث في الفضاء البعيد (انظر التقرير ITU-R SA.2177).

ويعني إجراء قياسات علمية عن بُعد إرسال المعلومات المجمّعة بواسطة الأجهزة العلمية الموجودة على متن المركبة. وقد يختلف معدل البيانات المطلوب ومعدل الخطأ المقبول إلى حد ما حسب الجهاز والقياس. ويتضمن الجدول 1 المعدلات القصوى المطلوبة لإرسال البيانات المستعملة للقياسات العلمية عن بُعد والقياسات عن بُعد المتعلقة بالصيانة.

الجدول 1

معدلات البتات القصوى المطلوبة للبحث في الفضاء البعيد

الاتجاه والوظيفة	خاصية الوصلة		
	بغض النظر عن الطقس	عادي	معدل بيانات مرتفع
أرض–فضاء			
التحكم عن بُعد (bit/s)	1 000	1 000	2 000
البرمجة بالحاسوب (kbit/s)	50	100	200
إشارة سمعية (kbit/s)	45	45	45
إشارة فيديوية (Mbit/s)	4	12	30
فضاء–أرض			
القياس عن بُعد للصيانة (bit/s)	500	500	2×10^5
بيانات علمية (kbit/s)	115	500	3×10^5
إشارة سمعية (kbit/s)	45	45	45
إشارة فيديوية (Mbit/s)	0,8	8	30

ازدادت بانتظام قدرة وصلة القياس عن بُعد مع تطور الأجهزة والتقنيات الجديدة. ويمكن استعمال هذه الزيادة بطريقتين:

- جمع قدر أكبر من البيانات العلمية بشأن كوكب معين أو مسافة معينة؛
- السماح بتنظيم مهام مفيدة إلى كواكب أبعد مسافة.

وبالنسبة لنظام القياس عن بُعد، يتناسب أقصى معدل بيانات ممكن تناسباً عكسياً مع مربع مسافة الاتصال الراديوي. ويمكن لقدرة الوصلة ذاتها التي توفر معدل بيانات قدره 134 kbit/s بالقرب من كوكب المشتري (Jupiter) ($9,3 \times 10^8$ km) أن توفر أيضاً معدل بيانات قدره 1,74 Mbit/s بالقرب من كوكب الزهرة (Venus) ($2,58 \times 10^8$ km). وحيث إن معدلات البيانات الأعلى تتطلب عرض نطاقات إرسال أوسع، تتوقف الفعالية في استعمال أقصى قدرة للقياس عن بُعد على عرض النطاقات الموزعة، وعلى عدد المهام الآنية لمركبة الفضاء الواقعة ضمن عرض حزمة المحطة الأرضية والعاملة في نفس النطاق.

ومن المساهمات الهامة في القياس عن بُعد تطوير طرائق التشفير التي تسمح بالتشغيل بنسب إشارة/ضوضاء أدنى. وتتطلب الإشارة المشفرة عرض نطاق إرسال أوسع. ويمكن أن يحد عرض نطاق الترددات من استعمال القياس عن بُعد بالتشفير بمعدل بيانات مرتفع للغاية.

2.2 متطلبات التحكم عن بُعد

الموثوقية من أهم متطلبات وصلة التحكم عن بُعد. إذ إن تعليمات التحكم يجب أن تصل بدقة وأن تُرسل عند الحاجة إليها. وعادة لا يتجاوز معدل الخطأ في البتات في وصلة التحكم عن بُعد المطلوبة 1×10^{-6}. ويجب استقبال الأوامر بنجاح، بغض النظر عن اتجاه المركبة الفضائية، حتى في حالة عدم تسديد الهوائي الأولي بكسب مرتفع نحو الأرض. وفي هذه الظروف، يقتضي الأمر الاستقبال باستعمال هوائي المركبة الفضائية الصالح لجميع الاتجاهات تقريباً. وثمة ضرورة لأن تكون قيمة e.i.r.p. مرتفعة للغاية للمحطات الأرضية بسبب انخفاض كسب هوائي المركبة الفضائية، وحتى يمكن توفير موثوقية عالية.

ووجود حواسيب على متن المركبة الفضائية يُمكِّن من أن يحدد مسبقاً التتابع الأوتوماتي وتشغيل أنظمة المركبة الفضائية وتخزين هذه المعلومات على متنها لاستعمالها في وقت لاحق. وبالنسبة لبعض التتابعات المعقدة يكون التشغيل الأوتوماتي ضرورياً. والقدرة على التحكم عن بُعد مطلوبة في حالة تعديل التعليمات المخزنة أثناء الرحلة، والتي قد تكون ضرورية لتصحيح التفاوتات أو سوء التشغيل الملحوظ في سلوك المركبة الفضائية. وينطبق ذلك بشكل خاص على المهام التي تستغرق فترة طويلة، وعلى الظروف التي يتوقف فيها التتابع على نتائج أحداث سابقة لها تأثير على المركبة الفضائية. فمثلاً تستند التعليمات الخاصة بتصحيح مسار المركبة الفضائية إلى قياسات التتبع ولا يمكن تحديدها مسبقاً.

ويرد في الجدول 1 مدى معدلات البتات اللازمة لأداء وظائف التحكم.

ويشمل التحكم عن بُعد الموثوق الحاجة إلى قياس عن بُعد للصيانة الموثوقة والمستعملة للتحقق من سلامة استقبال التعليمات وتخزينها في ذاكرة التحكم.

3.2 متطلبات التتبع

يوفر التتبع المعلومات اللازمة لملاحة المركبة الفضائية وللدراسات العلمية في مجال الراديو.

1.3.2 الملاحة

تشمل قياسات التتبع لأغراض الملاحة إزاحة دوبلرية للتردد الراديوي ووقت الانتشار ذهاباً وإياباً لإشارة قياس المسافة، واستقبال الإشارات المناسبة المستعملة لقياس التداخل بخط أساسي طويل. ويجب إجراء القياسات بدرجة من الدقة تستوفي متطلبات الملاحة. وتتأثر دقة القياسات بالتفاوتات في سرعة الانتشار، ومعرفة موقع المحطة، ودقة التوقيت، وتأخر الدارة الإلكترونية في تجهيز المحطة الأرضية والمحطة الفضائية. ويرد في الجدول 2 مثال جارٍ لمتطلبات الدقة في الملاحة والقياسات المصاحبة لها.

الجدول 2

متطلبات الملاحة والتتبع

المعلمة	القيمة
دقة الملاحة (m)	300 (عند Jupiter)
دقة قياس دوبلر (Hz)	± 0,0005
دقة قياس المدى (m)	± 0,15
دقة تحديد موقع المحطة الأرضية (m)	± 1
معدل شرائح قياس المسافة (أرض–فضاء وفضاء–أرض) *	
بمعزل عن الطقس (MChip/s)	1
العادي (MChip/s)	10
العالي (MChip/s)	24

* معدل نبضات الإرسال أو الاستقبال لتتابع شفرة الضوضاء شبه العشوائية (PN) المستخدم في القياس.

2.3.2 علم الراديو

يمكن لوصلات الاتصالات الراديوية بالمركبات الفضائية أن تؤدي دوراً هاماً في الدراسات الخاصة بالانتشار والنسبية وعلم الميكانيكا السماوية والجاذبية الأرضية. وتوفر قياسات الاتساع والطور والتردد والاستقطاب والتأخر المعلومات اللازمة. وتتوقف الفرصة على إجراء هذه القياسات على تيسر التوزيعات المناسبة. وفوق 1 GHz، يتناقص تأخر الإرسال ودوران فاراداي (أثر الجزيئات المشحونة والمجال المغنطيسي) بسرعة مع تزايد التردد، وتكون أفضل الترددات للدراسة هي الترددات المنخفضة. أما الترددات العالية فهي توفر حماية نسبية من هذه الآثار وهي مناسبة أكثر لإجراء دراسات النسبية والجاذبية الأرضية وعلم الميكانيكا السماوية. ولإجراء هذه الدراسات، ثمة ضرورة لمعايرة آثار الجزيئات المشحونة عند ترددات أدنى.

ويلزم إجراء قياسات المدى بدقة مطلقة تبلغ 1 إلى 2 cm من أجل هذا العمل العلمي الأساسي. وتتوقف هذه الدقة على شفرات النطاق العريض والاستعمال الآني لترددات متعددة من أجل معايرة الجزيئات المشحونة.

4.2 المتطلبات الخاصة بمهام المركبات المأهولة في الفضاء البعيد

تكون المتطلبات الوظيفية لمثل هذه المهام مماثلة لمهام المركبات الفضائية غير المأهولة. بيد أن وجود عناصر بشرية في المركبة الفضائية سيؤدي إلى متطلبات إضافية تتعلق بموثوقية وظائف القياس عن بُعد، والتحكم عن بُعد والتتبع. وبالنظر إلى المستوى اللازم للموثوقية، سيكون أهم فارق بين مهام مركبات الفضاء المأهولة وغير المأهولة هو استعمال الوصلات السمعية والفيديوية للاتصالات الراديوية أرض–فضاء وفضاء–أرض. ويرد في الجدول 1 معدلات البيانات الخاصة بهذه الوظائف.

ومن منظور الاتصالات الراديوية، يتمثل أثر هذه الوظائف الإضافية في التوسع المطلوب لعرض نطاق الإرسال لكي يتسنى استيعاب الإشارات الفيديوية. وبالنظر إلى موثوقية الوصلة اللازمة والأداء المطلوب لدعم معدلات تحويل البيانات المطلوبة، تعتبر الاتصالات الراديوية الخاصة بالأبحاث في الفضاء البعيد سواء في المركبات المأهولة أو غير المأهولة متماثلة.

3 الخصائص التقنية

1.3 مواقع وخصائص المحطات الأرضية لخدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد)

يعطي الجدول 3 مواقع المحطات الأرضية القادرة على التشغيل ضمن النطاقات الموزعة للبحث في الفضاء البعيد.

الجدول 3

مواقع المحطات الأرضية لخدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد)

الإدارة	الموقع	خط العرض	خط الطول
الصين	كاشي	38° 55' N	75° 52' E
	جياموسي	46° 28' N	130° 26' E
وكالة الفضاء الأوروبية	سيبريروس (إسبانيا)	40° 27' N	4° 22' W
	مالارغي (الأرجنتين)	35° 46' S	69° 22' W
	نيو نورسيا (أستراليا)	31° 20' S	116° 11' E
ألمانيا	فايلهايم	47° 53' N	11° 04' E
أوكرانيا	إيفباتوريا	45° 11' N	33° 11' E
روسيا	مدفيزي أوزيرا	55° 52' N	37° 57' E
	أوزورسك	44° 01' N	131° 45' E
اليابان	أوشيدا، ناغانو	36° 08' N	138° 22' E
	أوشينورا	31° 15' N	131° 04' E
الولايات المتحدة	كانبرا (أستراليا)	35° 28' S	148° 59' E
	غولدستون، كاليفورنيا (الولايات المتحدة)	35° 22' N	115° 51' W
	مدريد (إسبانيا)	40° 26' N	04° 17' W
الهند	بايالالو	12° 54' N	77° 22' E

ويوجد في كل موقع من هذه المواقع هوائي أو أكثر، ومستقبلات ومُرسلات يمكن استعمالها لوصلات خدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد) في واحد أو أكثر من النطاقات الموزعة. وترد في الجدول 4 المعلمات الرئيسية التي تميز أقصى أداء لمحطة أو أكثر من هذه المحطات. وإن كانت هذه الخصائص لا تنطبق على جميع المحطات، إلا أنه من الأساسي أن تستند توزيعات النطاق ومعايير الحماية من التداخلات إلى أقصى أداء متيسِّر. وهذه ضرورة أساسية لتوفير تشغيل المهام في خدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد) وحمايتها على المستوى الدولي.

الجدول 4

خصائص المحطات الأرضية لخدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد) بهوائيات تبلغ أقطارها 70 متراً

التردد (GHz)	كسب الهوائي (dBi)	عرض حزمة الهوائي (بالدرجات)	قدرة المرسل (dBW)	القدرة المشعة المكافئة المتناحية (dBW)	درجة حرارة ضوضاء نظام الاستقبال (K)	كثافة القدرة الطيفية لضوضاء نظام الاستقبال (dB(W/Hz))
2,120-2,110 أرض–فضاء	62	0,14	50 [1]56	112 [1]118	–	–
2,300-2,290 فضاء–أرض	63	0,13	–	–	[2]25 [3]21	[2]214– [3]215–
7,190-7,145 أرض–فضاء	72	0,04	43	115	–	–
8,450-8,400 فضاء–أرض	74	0,03	–	–	[2]37 [3]27	[2]213– [3]214–
32,3-31,8 فضاء–أرض	[4]83,6	[4]0,01	–	–	[4][2]83 [4][3]61	[4][2]209– [4][3]211–
34,7-34,2 أرض–فضاء	[4]84	[4]0,01	[4]30	[4]114	–	–

[1] قدرة الإرسال 56 dBW المستعملة فقط أثناء حالات طوارئ مركبة الفضاء.

[2] جو صحو، زاوية ارتفاع 30°، أسلوب ديبلكس للإرسال والاستقبال الآنيين.

[3] جو صحو، زاوية ارتفاع 30°، استقبال فقط.

[4] تقدير.

يحدد عادة أداء استقبال المحطات الأرضية لخدمة الأبحاث (في الفضاء البعيد) من حيث نسبة طاقة الإشارة لكل بتة إلى الكثافة الطيفية للضوضاء المطلوبة لتحديد نسبة خطأ معينة. والطريقة الأخرى لتبيان الأداء الرفيع وحساسية هذه المحطات هو التعبير عن نسبة كسب الهوائي إلى حرارة الضوضاء. ويشار إلى هذه النسبة عادة بالتعبير *G/T*، وهي 50 dB/(K) تقريباً عند 2,3 GHz، و59,5 dB/(K) عند 8,4 GHz. ويمكن مقارنة هذه القيم بالقيمة المتحصّل عليها والبالغة 41 dB/(K) لبعض محطات الأرض للخدمة الثابتة الساتلية.

2.3 المحطات الفضائية

يحدد حجم ووزن المركبة الفضائية بقدرة الحمولة النافعة لمركبة الإطلاق. وتكون قدرة مرسل المحطة الفضائية وحجم الهوائي محدودتين مقارنة بمعلمات محطات الأرض. وتكون حرارة ضوضاء المستقبل أعلى نظراً لاستعمال مكبر سابق غير مبرد بشكل عام.

وتكون المحطة الفضائية مزودة بجهاز استقبال–إرسال، يطلق عليه المرسل–المستجيب، ويمكن تشغيله بأحد الأسلوبين التاليين. أسلوب ثنائي الاتجاه (يطلق عليه أيضاً في كلا الاتجاهين)، حيث يستعمل إشارة الموجة الحاملة المستقبلة من محطة الأرض للتحكم في مذبذب عروة محكمة الطور. ثم يستعمل تردد هذا المذبذب للتحكم في تردد ذبذبة المرسل المستجيب بمعدل ثابت. أما في الأسلوب أحادي الاتجاه، يكون التحكم في تردد إرسال المحطة الفضائية بواسطة مذبذب بلوري.

وفي الأسلوب ثنائي الاتجاه، يتم التحكم في تردد وطور إرسال المحطة الفضائية بدقة شديدة نظراً للدقة الشديدة التي تتسم بها الإشارة المستقبلة من محطة الأرض.

ويحدد الجدول 5 الخصائص الرئيسية التي تتسم بها عادة المحطات الفضائية المصممة للأبحاث في الفضاء البعيد.

الجدول 5

الخصائص النمطية للمحطات الفضائية للأبحاث في الفضاء البعيد

تردد أرض–فضاء (GHz)	قطر الهوائي (m)	كسب الهوائي (dBi)	عرض حزمة الهوائي (بالدرجات)	درجة حرارة ضوضاء المستقبِل (K)	كثافة القدرة الطيفية لضوضاء المستقبل (dB(W/Hz))
2,120-2,110	3,7	36	2,6	200	206–
7,190-7,145	3,7	48	0,64	330	203–
34,7-34,2	3,7	61	0,14	2 000	196–

تردد فضاء–أرض (GHz)	قطر الهوائي (m)	كسب الهوائي (dBi)	عرض حزمة الهوائي (بالدرجات)	قدرة المرسل (dBW)	القدرة المشعة المكافئة المتناحية (dBW)
2,300-2,290	3,7	37	2,3	13	50
8,450-8,400	3,7	48	0,64	13	61
32,3-31,8	3,7	59,5	0,17	13	72,5

بالنظر إلى أن قيمة e.i.r.p. محدودة في حالة المحطات الفضائية، يجب تزويد المحطات الأرضية بجهاز استقبال يتسم بأقصى قدر من الحساسية. ولكن بالنظر إلى ارتفاع قيمة e.i.r.p. بالمحطات الأرضية فإنه يمكن للمحطات الفضائية أن تستعمل أجهزة استقبال أقل حساسية. وتتوقف حرارة ضوضاء جهاز استقبال المركبة الفضائية على معدل بتات محدد واعتبارات أخرى خاصة بالحجم والوزن والتكلفة ومدى التعقيد والموثوقية.

وتقيد قدرة المحطة الفضائية في المقام الأول بالقدرة الكهربية التي يمكن أن توفرها المركبة الفضائية.

4 طرائق الاتصالات الراديوية في الفضاء البعيد

تؤدى وظائف القياس والتحكم عن بُعد من أجل الاتصالات الراديوية في الفضاء البعيد بإرسال موجات حاملة مشكلة الطور. ويتم تتبع دوبلر بالتحسس المتسق لطور الموجة الحاملة. وتطبق وظيفة القياس عن بُعد بإضافة إشارة قياس عن بُعد إلى التشكيل.

1.4 تتبع الموجة الحاملة وقياسات دوبلر

يخضع تردد إشارة صادرة من مركبة فضائية إلى تعديل بظاهرة دوبلر عند استقبالها بالمحطة الأرضية. ويجري تتبع طور الموجة الحاملة لقياس الإزاحة الدوبلرية وبالتالي سرعة المركبة الفضائية مقابل المحطة الأرضية. وتتبع أجهزة استقبال المحطة الأرضية والمحطة الفضائية إشارة الموجة الحاملة بواسطة عروة محكمة الطور أو عروة (Costas). وفي أسلوب المستجيب ثنائي الاتجاه يستعمل التردد والطور في عروة المحطة الفضائية محكمة الطور لإنتاج تردد أو أكثر في الاتجاه فضاء–أرض. وهكذا تحصل المحطة الأرضية على إشارات مترابطة مع التردد الناتج في الاتجاه أرض–فضاء، مما يسمح بقياس ظاهرة دوبلر على نحو دقيق.

وفي حالة الأسلوب أحادي الاتجاه، تنتج الترددات المستعملة في الاتجاه فضاء–أرض بواسطة مذبذب المستجيب، وتتم قياسات دوبلر على أساس معرفة تردد المذبذب سلفاً.

2.4 التشكيل وإزالة التشكيل

تستعمل الوصلات الراديوية تشكيل الطور للموجة الحاملة للتردد الراديوي. وتستعمل إشارة البيانات الرقمية بالنطاق الأساسي لتشكيل موجة حاملة فرعية تقوم بدورها بتشكيل موجة حاملة للتردد الراديوي. وتستعمل عادة موجة حاملة فرعية مربعة للقياس عن بُعد؛ أما للتحكم عن بُعد فتستعمل موجة حاملة فرعية جيبية. ويجري ضبط نسبة التشكيل بحيث يتحدد المعدل المطلوب لقدرة الموجة الحاملة المتبقية لقدرة النطاقات الجانبية لإشارة البيانات. وتختار قيمة هذا المعدل من أجل التوصل إلى التتبع الأمثل للموجة الحاملة والتحسس الأمثل للبيانات في المستقبِل.

ويتم إزالة تشكيل الموجة الحاملة من التردد الراديوي والموجة الحاملة الفرعية للبيانات بعُرى محكمة الطور (PLL) وبصورة عامة يتم الكشف عن البيانات بواسطة تقنيات بمراشيح مترابطة ومتلائمة.

ويمكن تطبيق أساليب أخرى للتشكيل وإزالة التشكيل على الوصلات الفيديوية والوصلات السمعية في حالة المركبات الفضائية المأهولة. وتستعمل أساليب تشكيل وإزالة تشكيل (تخالف) عرض النطاق الفعال للتشكيل التربيعي بزحزحة الطور QPSK والإبراق بأدنى زحزحة بمرشاح غوسي (GMSK) في هذه الحالات مع تتبع موجة حاملة بواسطة عروة (Costas) بدلاً من عروة محكمة الطور (PLL).

3.4 التشفير

يمكن الحد من احتمال الخطأ في وصلة اتصال رقمية بزيادة عرض نطاق المعلومات. ويستعمل التشفير لتحقيق هذه الزيادة بترجمة كل بتة بيانات إلى عدد أكبر من رموز الشفرة بطريقة معينة. وينطبق ذلك مثلاً على الشفرات التلافيفية والفدرية. فبعد الإرسال تسترجع البيانات الأصلية بعملية لإزالة التشفير تتفق مع هذا النمط من التشفير. ويرتبط تحسن الأداء بالإرسال المشفر باستعمال عرض نطاق أكبر، ويمكن أن يتراوح من 3,8 dB (معدل الخطأ الاثنيني 1×10^{-3} في حالة الشفرة التلافيفية) إلى أكثر من 9 dB (تشفير توربيني بمعدل 1/6).

4.4 تعدد الإرسال

يمكن بتدفق وحيد للبيانات الرقمية إرسال القياسات العلمية وقياسات الصيانة عن بُعد بتعدد الإرسال في الوقت، كما يمكن استعمال موجات حاملة فرعية منفصلة تضاف من أجل الحصول على إشارة مركبة للتشكيل. كما يمكن إدخال إشارة قياس المدى في إشارة قياسات المسافة أو التحكم عن بُعد. ويتم تعديل اتساع إشارات المعطيات المختلفة بحيث توزع على نحو مناسب قدرة الإرسال بين الموجة الحاملة والنطاقات الجانبية التي تحوي المعلومات.

5.4 تحديد المدى

يتم قياس المدى اعتباراً من محطة أرضية باستعمال مستجيب المحطة الفضائية بأسلوب ثنائي الاتجاه. ويسترجع التشكيل المقابل المطبق على الإشارة أرض–فضاء في المرسل–المستجيب ويستعمل لتشكيل الموجة الحاملة التي يتم إرسالها في الاتجاه فضاء–أرض. وفي محطة أرضية يمكن بمقارنة شفرات قياس المدى المرسلة والمستقبلة قياس مدة الإرسال التي تتناسب مع المسافة.

ومن أهم ما يحد من دقة قياس المدى نذكر القدرة على قياس العلاقة المترابطة الزمنية بين الشفرات المرسلة والشفرات المستقبلة. وفي النظام المستعمل حالياً يبلغ أعلى تردد تشفير 2,062 MHz. وتبلغ مدة الشفرة 0,485 µs ومن السهل التوصل إلى درجة وضوح تبلغ 1 ns بافتراض أن نسبة الإشارة إلى الضوضاء نسبة كافية. ويعادل هذا الوضوح 30 cm على مسير في كلا الاتجاهين أي 15 cm على المدى المقاس. وفي الظروف الحالية تعتبر هذه القيمة قيمة كافية تفي بدقة متطلبات الملاحة في الجدول 2.

وتتطلب التجارب الراديوية العلمية (انظر الفقرة 2.3.2) دقة تبلغ 1 cm مما يفترض استعمال تردد شفرة لا يقل عن 30 MHz. وفي خدمة أبحاث الفضاء، تستعمل أنظمة قياس المسافة الحالية بشفرة الضوضاء شبه العشوائية (PN) معدل شرائح أقصى يبلغ 24 MChip/s.

6.4 الكسب وتسديد الهوائي

بالنسبة للهوائيات المكافئة المستعملة عادة لأغراض البحث الفضائي، يكون الكسب الأقصى محدوداً بالدقة التي يقترب بها السطح من قطع مكافئ فعلاً، مما يقيد الحد الأقصى للتردد الذي يمكن استعماله بفعالية مع هوائي معين.

ومن بين العوامل التي تتوقف عليها دقة السطح، هناك عامل مشترك بين هوائيات المحطات الأرضية والفضائية هو مدى الدقة في التصنيع. وبالنسبة لهوائيات المحطات الأرضية، تتسبب الرياح والحرارة في تزايد تشوه السطح. وباختلاف زاوية الارتفاع تسبب الجاذبية الأرضية بعض التشوهات في السطح حسب درجة صلابة الهيكل الحامل.

وبالنسبة لهوائيات المحطات الفضائية يكون الحجم مقيداً بالكتلة المسموح بها وبالفراغ المتاح في مركبة الإطلاق، وكذلك بمدى تطور تصميم هوائيات تنشر. وتُعد الحرارة من أسباب تشوه أسطح هوائيات المحطات الفضائية.

ومما يحد من أقصى كسب للهوائي المستعمل نذكر القدرة على تسديده بدقة. ويجب أن يكون عرض الحزمة ملائماً بحيث يراعى الخطأ في تحديد زاوية التسديد لجميع أسباب تشوه سطح العاكس تأثيراً على دقة التسديد. ويتوقف تسديد هوائيات المحطات الفضائية أيضاً على دقة نظام التحكم في توجيه المركبة الفضائية (وتتوقف هذه الدقة على كمية الأرغول (الوقود الدفعي) التي يمكن حملها).

وتتوقف أيضاً فتحة الحزمة الدنيا والكسب الأقصى الذي يمكن استخدامه على درجة الدقة في تحديد مواقع كل من المحطة الأرضية والمحطة الفضائية.

ويبين الجدول 6 القيود النمطية المتعلقة بأداء الهوائيات.

الجدول 6

القيود الحالية المتعلقة بالدقة وأقصى كسب للهوائي

المعلمة المقيدة	هوائيات محطة فضائية		هوائيات محطة أرضية	
	القيمة القصوى النمطية للمعلمة	الكسب الأقصى	القيمة القصوى النمطية للمعلمة	الكسب الأقصى
دقة سطح المكافئي	0,24 mm، قيمة فعّالة لعاكس قطره 3,7 m	61 dBi[1] عند 34 GHz	0,53 mm، قيمة فعالة لعاكس قطره 70 m	84 dBi[1] عند 34 GHz
دقة التوجيه	$\pm$ 0,15° (3σ)	56 dBi[2]	$\pm$ 0,005° (3σ)	82,5 dBi[2]

(1) يكون الكسب أقل على ترددات أخرى.

(2) كسب الهوائي بعرض حزمة نصف القدرة يساوي ضعف دقة التسديد. ويكون عرض حزمة الهوائي بكسب أعلى ضيقاً للغاية بالنسبة لدقة التسديد.

7.4 تقنيات إضافية للملاحة الراديوية

تعطي قياسات دوبلر وقياسات المدى معلومات التتبع الأساسية اللازمة للملاحة. وقد تم تطوير تقنيات أخرى لتحسين الدقة في الملاحة.

1.7.4 معايرة سرعة الانتشار المتأثرة بالجزيئات المشحونة

تتأثر قياسات المدى وقياسات دوبلر بتغير سرعة انتشار الموجات الراديوية ويرجع هذا التغير إلى الإلكترونات الحرة الموجودة على مسير الإرسال. وتختلف كثافة هذه الإلكترونات في الفراغ وفي الغلاف الجوي للكواكب، وهي مرتفعة جداً بالقرب من الشمس. وما لم تراع هذه الكثافة فقد يؤدي تغير سرعة الانتشار إلى أخطاء في حسابات الملاحة.

وتتسبب الجزيئات المشحونة في تزايد سرعة الطور وفي تناقص سرعة الزمرة. ويمكن تحديد أثر هذه الجسيمات بمقارنة تغير المدى بأثر دوبلر المتكامل أثناء فترة معينة. ويتناسب التأثير على سرعة الانتشار تناسباً عكسياً مع مربع التردد الراديوي. ويمكن استعمال تبعية

التردد من أجل تحسين دقة المعايرة. ويمكن قياس المدى ذهاباً وإياباً وإجراء التتبع بأثر دوبلر باستعمال عدة إشارات ترسل في نفس الوقت في اتجاه فضاء–أرض بعدة نطاقات مختلفة. وتختلف الجزيئات المشحونة في حجمها بالنطاقات المختلفة ويسمح الفرق بينها بتحسين المعايرة.

ويرد في التقرير ITU-R SA.2177 أثر الجزيئات المشحونة على الطور وسرعة متجه الزمرة وكذلك على قياس المدى.

2.7.4 قياس التداخل بخط أساسي طويل جداً (VLBI)

تتوقف دقة الملاحة في مركبة فضائية على دقة تحديد إحداثيات المحطة الأرضية في نظام إحداثيات الملاحة. ويمكن أن يترتب على خطأ قدره 3 m في تحديد الموقع المفترض للمحطة خطأ بمسافة 700 km في حساب موقع مركبة فضائية على مسافة تساوي مسافة كوكب زحل (Saturn). ويمكن بطريقة VLBI تحسين تقدير موقع المحطة بصورة أدق باستعمال مصدر إشعاع سماوي شبه نجمي (quasar) كمصدر للإشارات يقع في نقطة لا تتغير بالنسبة للمجال السماوي. ويمكن تسجيل إشارات شبه نجمية quasar بحيث يحدد بصورة دقيقة الفرق بين لحظات الاستقبال بمحطتين على مسافة بعيدة جداً من بعضهما. ويمكن بإجراء عدة قياسات تحديد مواقع المحطات بدقة نسبية تبلغ 10 cm. وتستعمل حالياً ترددات قريبة من 2 و8 و32 GHz لقياسات VLBI.

وتستعمل تقنية VLBI أيضاً لقياس زاوية انحناء المركبة الفضائية مباشرة. وتقاس المسافة التي تقع عندها المركبة بواسطة محطتين تعرف إحداثياتهما بدقة وتفصل بينهما مسافة طويلة في اتجاه شمال/جنوب. وعلى أساس هذه القياسات يمكن حساب الانحناء بدقة عالية.

وهناك تطبيق ثالث لطريقة VLBI يشار إليه اختصاراً برمز DDOR ويمكن استعماله لتحسين دقة قياس الموقع الزاوي لمركبة فضائية. تشاهد محطتان أرضيتان أو أكثر إشارة لمركبة فضائية وإشارة شبه نجمية الواحدة تلو الأخرى. وبمعرفة الوقت وإحداثيات المحطات وتأثير دوران الأرض على الإشارات، يمكن تحديد الموقع الزاوي للمركبة الفضائية بالنسبة للمراجع السماوية. وسوف تسمح هذه الطريقة عند تطويرها تماماً بالتوصل إلى درجة دقة أفضل بعشرة أمثال من الدرجة المتحققة حالياً 0,002 ثانية قوس (بما يكافئ 10 nrad). وسيكون بالإمكان تحقيق المزيد من الدقة في الملاحة، ونتيجة لذلك، إدخال مدار كوكبي أكثر كفاءة.

5 تحليل الأداء وهوامش التصميم

يعرض الجدول 7 قائمة بخصائص وصلة يمكن الاستناد إليها لتحليل الأداء. ويتعلق المثال المعروض بالقياس عن بُعد بمعدل بتات عال من كوكب المشتري. وتم إجراء نفس هذا التحليل للتحكم عن بُعد وقياس المدى. واستخدمت الخصائص المبينة أعلاه لمحطات أرضية ومحطات فضائية لحساب هامش الأداء لكل وظيفة من وظائف الاتصالات الراديوية.

الجدول 7

توزيع الأداء في مركبة فضائية–أرض من المشتري

مهمة: Voyager Jupiter/Saturn 1977 **الأسلوب: قياس المدى، 115,2 kbit/s, coded, 8,45 GHz carrier**	
معلمات المرسل	
القدرة RF (W 21) (dBW)	13,2
خسارة الدارة (dB)	0,2–
كسب الهوائي (m 3,7) (dBi)	48,1
خسارة التسديد (dB)	0,2–
معلمات المسير	
خسارة الفضاء الحر بين هوائيات في جميع الاتجاهات (dB) (GHz 8,45، $9,3 \times 10^{8}$ km)	290,4–
معلمات المستقبِل	
كسب الهوائي (m 64، زاوية ارتفاع °30) (dBi)	72,0
خسارة التسديد (dB)	0,3–
توهين الطقس (dB)	0,1–
الكثافة الطيفية لقدرة ضوضاء النظام (K 22,6) (dB(W/Hz))	215,1–
ملخص القدرة الإجمالية	
خسارة الوصلة (dB)	171,1–
القدرة المستقبلة (dBW) *P(T)*	157,9–
أداء تتبع الموجة الحاملة (two-way)	
قدرة الموجة الحاملة/القدرة الإجمالية (dB)	15,4–
قدرة الموجة الحاملة عند الاستقبال (dBW)	173,3–
عرض نطاق ضوضاء عتبة الموجة الحاملة ($10 \log B$) (B = 10 Hz)	10,0
قدرة الضوضاء (dBW)	205,1–
عتبة الإشارة/الضوضاء (dB)	20
قدرة الموجة الحاملة عند العتبة (dBW)	185,1–
هامش الأداء (dB)	11,8
أداء كشف البيانات	
قدرة البيانات/القدرة الإجمالية (dB)	0,3–
الخسارة عند استقبال البيانات وعند كشف البيانات (dB)	0,5–
قدرة البيانات المستقبلة (dBW)	158,7–
عرض نطاق الضوضاء (عرض نطاق الضوضاء الفعلي والكشف بمرشاح متوائم بمعدل 115,2 kbit/s) (dB)	50,6
قدرة الضوضاء (dBW)	164,5–
عتبة الإشارة/الضوضاء (معدل الخطأ في البتات 5×10^{-3}) (dB)	2,3
عتبة قدرة البيانات (dBW)	162,2–
هامش الأداء (dB)	3,5

وتجدر الإشارة إلى نقطة هامة في مجال تصميم مهام البحث في الفضاء البعيد وهي الهامش المحدود للغاية لأداء القياس عن بُعد (3,5 dB في المثال المبين). وهو ناتج عن الحاجة إلى التوصل إلى أقصى قيمة علمية من كل مركبة فضائية. وعند زيادة الهامش بقيمة 10 dB من أجل السلامة تنخفض كمية بيانات قياسات المسافات بعامل 10. وتكمن الخطورة في استعمال نظام بهامش أداء محدود في أنه يمكن أن يتعرض لتداخل ضار. وبالنسبة للنطاقات التي تزيد عن 2 GHz، تتناقص الموثوقية بتأثير الأحوال الجوية.