

التوصية ITU-R SA.1014-1

متطلبات الاتصالات

لمركبات أبحاث الفضاء البعيد المأهولة وغير المأهولة

(المسألة ITU-R 131/7)

(2006-1994)

مجال التطبيق

يصف النص السابق بإيجاز بعض الخصائص الأساسية للاتصالات في الفضاء البعيد. وتؤثر هذه الخصائص أو تحدد المتطلبات لتوزيع النطاقات وتنسيقها وتقاسمها وحمايتها من التداخلات.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

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

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

توصي

1 بمراعاة المتطلبات والخصائص الوارد وصفها في الملحق 1 للاتصالات الفضاء البعيد فيما يتعلق بالأبحاث في الفضاء البعيد وتفاعله مع الخدمات الأخرى.

الملحق 1

متطلبات الاتصالات

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 اللازمة لإجراء الأبحاث في الفضاء البعيد بواسطة مركبة فضائية، والطرائق التقنية ومعلومات الأنظمة المستعملة في التوصيل مع هذه المهام.

وترد في التوصية ITU-R SA.1013 دراسة للاعتبارات المتعلقة بخصائص عرض النطاق ومتطلباته.

2 متطلبات الاتصالات

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 على مسافة تبلغ $4,65 \times 10^9$ km. والحاجة إلى مستقبلات ذات قدرة مشعة متناحية متكافئة e.t.r.p. عالية وحساسية للغاية هو نتيجة للمسافات الكبيرة للاتصالات الراديوية التي ينطوي عليها البحث في الفضاء البعيد.

والاستعمال المستمر لنطاقات الاتصالات الراديوية 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، ثم ضرورة مناظرة لإجراء اتصالات راديوية مع عدة مركبات فضائية في أي وقت.

بالإضافة 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 تلقي 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 المطلوب يعتبر بمثابة محدد جزئي لنطاقات التردد المفضلة للبحث في الفضاء البعيد (انظر التوصيتين ITU-R SA.1012 و ITU-R SA.1013).

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

الجدول 1

معدلات البتات المطلوبة للبحث في الفضاء البعيد

خاصية الوصلة			الاتجاه والوظيفة
معدل بيانات مرتفع	عادي	بغض النظر عن الطقس	
أرض - فضاء			
2000-1	1000-1	1000-1	التحكم عن بعد (bit/s)
200-1	100-1	50-1	البرمجة بالحاسوب (kbit/s)
45	45	45	الصوت (kbit/s)
100-6	12-0,2	4-1	التلفزيون (Mbit/s)
100	10	1	المدى (Mbit/s)
فضاء - أرض			
$5 \times 10^8 - 2$	500-8	500-8	القياس عن بعد للصيانة (bit/s)
$5 \times 10^4 - 3$	500-1	115-0,008	بيانات علمية (kbit/s)
45	45	45	الصوت (kbit/s)
1000-6	8-0,2	0,8-0,2	التلفزيون (Mbit/s)
100	10	1	المدى (Mbit/s)

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) $(9,3 \times 10^8 \text{ km})$ أن توفر أيضاً معدل بيانات قدره 1,74 Mbit/s بالقرب من كوكب الزهرة (Venus) $(2,58 \times 10^8 \text{ km})$. 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 الآتية 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 يُمكن من أن يحدد مسبقاً التابع 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 التابع 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 لملاحاة المركبة الفضائية وللدراسات العلمية في مجال الراديو.

1.3.2 الملاحاة

تشمل قياسات التتبع لأغراض الملاحاة 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 الملاحاة. 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 الملاحاة والقياسات المصاحبة لها.

الجدول 2

متطلبات الدقة للتتبع والملاحة

المعلمة	القيمة
دقة الملاحة (m)	300 (عند Jupiter)
دقة قياس دوبلر (Hz)	$\pm 0,0005$
دقة قياس المدى (m)	$\pm 0,15$
دقة تحديد موقع المحطة الأرضية (m)	± 1

2.3.2 علم الراديو

يمكن لوصلات الاتصال 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 الجزئيات 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 الجزئيات المشحونة عند ترددات أدنى.

ويلزم إجراء قياسات المدى بدقة مطلقة تبلغ 1 أو 2 cm من أجل هذا العمل العلمي الأساسي. وتتوقف هذه الدقة على شفرات النطاق العريض والاستعمال الآني لترددات متعددة من أجل معايرة الجزئيات 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 الصوتية والتلفزيونية للاتصالات الراديوية أرض - فضاء وفضاء - أرض. ويرد في الجدول 1 معدلات البيانات الخاصة بهذه الوظائف.

ومن منظور الاتصالات، 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 الخاصة بالأبحاث في الفضاء البعيد سواء في المركبات المأهولة أو غير المأهولة متماثلة.

3 الخصائص التقنية

1.3 مواقع وخصائص المحطات الأرضية للفضاء البعيد

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

الجدول 3

مواقع المحطات الأرضية للفضاء البعيد

خط العرض	خط الطول	الموقع	الإدارة
40° 27' N	4° 22' W	إسبانيا	وكالة الفضاء الأوروبية
31° 20' S	116° 11' E	أستراليا	
45° 11' N	33° 11' E	إيفياتوريا	أوكرانيا
55° 52' N	37° 57' E	مدفيزي أوزيرا	روسيا
44° 01' N	131° 45' E	أوزورسك	
36° 08' N	138° 22' E	أوسودا، ناجانو	اليابان
35° 28' S	148° 59' E	كانبرا (أستراليا)	الولايات المتحدة
35° 22' N	115° 51' W	غولدستون، كاليفورنيا (الولايات المتحدة)	
40° 26' N	4° 17' W	مدريد (إسبانيا)	

ويوجد في كل موقع من هذه المواقع هوائي أو أكثر، ومستقبلات ومُرسلات يمكن استعمالها لوصلات الفضاء البعيد في واحد أو أكثر من النطاقات الموزعة. وترد في الجدول 4 العلامات 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 متيسر. وهذه ضرورة أساسية لتوفير تشغيل المهام في الفضاء البعيد وحمايتها على المستوى الدولي.

الجدول 4

خصائص محطات الأرض للفضاء البعيد بهوائيات 70 متراً

التردد (GHz)	كسب الهوائي (dBi)	عرض حزمة الهوائي (بالدرجات)	قدرة المرسل (dBW)	القدرة المشعة المتاحية المكافئة (dBW)	درجة حرارة ضوضاء نظام الاستقبال (K)	كثافة القدرة الطيفية لضوضاء نظام الاستقبال (dB(W/Hz))
2,1 أرض - فضاء	62	0,14	50 (1)56	112 (1)118	--	--
2,3 أرض - فضاء	63	0,13	--	--	(2)25 (3)21	(2)214- (3)215 -
7,2 أرض - فضاء	72	0,04	50	115	--	--
8,45 أرض - فضاء	74	0,03	--	--	(2)37 (3)27	(2)213- (3)214-
32 أرض - فضاء	(4)83,6	(4)0,01	--	--	(4)(2)83	(4)(2)209-
34,5 أرض - فضاء	(4)84	(4)0,01	على أن تحدد	على أن تحدد	(3)(2)61	(4)(3)211-

(1) قدرة الإرسال dBW 56 المستعملة فقط أثناء حالات طوارئ مركبة الفضاء.

(2) جو صحو، زاوية ارتفاع 30، أسلوب ديبلكس للإرسال والاستقبال الآتئين.

(3) جو صحو، زاوية ارتفاع 30، استقبال فقط.

(4) تقدير.

يحدد عادة أداء استقبال محطات الأرض للفضاء البعيد من حيث نسبة طاقة الإشارة لكل بته 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 (K^{-1}) 50 dB تقريباً عند 2,3 GHz، (K^{-1}) 59,5 dB عند 8,4 GHz. ويمكن مقارنة هذه القيم بالقيمة المتحصّل عليها وبالباغلة (K^{-1}) 41 dB لبعض محطات الأرض للخدمة الثابتة الساتلية.

2.3 المحطات الفضائية

يحدد حجم ووزن المركبة الفضائية بقدرتها 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 المستقبلية من محطة الأرض للتحكم في مذنب عروة محكمة الطور. ثم يستعمل تردد هذا المذبذب للتحكم في تردد ذبذبة المرسل المستجيب بمعدل ثابت. أما في الأسلوب أحادي الاتجاه، لا تستقبل أي إشارة من محطة الأرض، ويكون التحكم في تردد إرسال المحطة الفضائية بواسطة مذنب بلوري.

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

يحدد 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

كثافة القدرة الطيفية لضوضاء المستقبل (dB(W/Hz))	درجة حرارة ضوضاء المستقبل (K)	عرض حزمة الهوائي (بالدرجات)	كسب الهوائي (dBi)	قطر الهوائي (m)	تردد أرض - فضاء (GHz)
198-	1200	2,6	36	3,7	2,1
202-	390	0,64	48	3,7	7,2
يتعين تقريرها	يتعين تقريرها	0,14	61	3,7	34,5

القدرة المشعة المتاحة المكافئة (dB(W/Hz))	قدرة المرسل (dBW)	عرض حزمة الهوائي (بالدرجات)	كسب الهوائي (dBi)	قطر الهوائي (m)	تردد فضاء - أرض (GHz)
50	13	2,3	37	3,7	2,3
61	13	0,64	48	3,7	8,45
72,5	13	0,17	59,5	3,7	32

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 الكهربائية التي يمكن أن توفرها المركبة الفضائية.

4 طرائق الاتصال بالفضاء البعيد

تؤدي وظائف القياس والتحكم عن بعد من أجل الاتصال بالفضاء البعيد بإرسال موجات حاملة مشكلة الطور. ويتم تتبع دوبلر بالتحسس المتسق لطور الموجة الحاملة. وتطبق وظيفة القياس عن بعد بإضافة إشارة قياس عن بعد 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 التردد 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 بعد؛ أما للتحكم عن بعد 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 والتحصن الأمثل للبيانات في المستقبل.

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

ويمكن تطبيق أساليب أخرى للتشكيل وإزالة التشكيل على وصلات التلفزيون والوصلات الصوتية في حالة المركبات الفضائية المأهولة. وتستعمل أساليب تشكيل وإزالة تشكيل (تخالف) عرض النطاق الفعال للتشكيل التربيعي بزحزحة الطور QPSK والإبراق بأدنى زحزحة بمراشيع 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 بنة 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 10^{-3} في حالة الشفرة التلافيفية) إلى أكثر من 9 dB (تشفير توربيني بمعدل 6/1).

4.4 تعدد الإرسال

يمكن بتدفق وحيد للبيانات الرقمية إرسال القياسات العلمية وقياسات الصيانة عن بعد 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 بعد. 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 المرسل والمستقبل قياس مدة الإرسال التي تتناسب مع المدى.

ومن أهم ما يجد من دقة قياس المدى نذكر القدرة على قياس العلاقة المترابطة الزمنية بين الشفرات المرسل والشفرات المستقبلية. وفي النظام المستعمل حالياً يبلغ أعلى تردد تشفير 2 062 MHz. وتبلغ مدة الشفرة 0,485 μs ومن السهل التوصل إلى درجة وضوح تبلغ 4 ns بافتراض أن نسبة الإشارة إلى الضوضاء نسبة كافية. ويعادل هذا الوضوح 120 cm على مسير في كلا الاتجاهين أي 60 cm على المدى المقاس. وفي الظروف الحالية تعتبر هذه القيمة قيمة كافية تفي بدقة متطلبات الملاحظة في الجدول 2.

وستطلب التجارب الراديوية العلمية مستقبلاً (انظر الفقرة 2.3.2) دقة تبلغ 1 cm مما يفترض استعمال تردد شفرة لا يقل عن 30 MHz.

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 للهوائيات المحطات الأرضية، تسبب الرياح والحرارة في تزايد تشوه السطح. وباختلاف زاوية الارتفاع تسبب الجاذبية الأرضية بعض التشوهات في السطح حسب درجة صلابة الهيكل الحامل.

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

ومما يجد 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

هوائيات محطة أرضية		هوائيات محطة فضائية		المعلمة المقيدة
الكسب الأقصى	القيمة القصوى النمطية للمعلمة	الكسب الأقصى	القيمة القصوى النمطية للمعلمة	
83 dBi ⁽¹⁾ عند 37 GHz	0,53 mm، قيمة فعالة لعاكس قطره 70 m	66 dBi ⁽¹⁾ عند 100 GHz	0,24 mm، قيمة فعالة لعاكس قطره 3,7 m	دقة سطح المكافئ
75 dBi ⁽²⁾	± 0,005 °(3σ)	55 dBi ⁽²⁾	± 0,15 °(3σ)	دقة التوجيه

(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 معايير سرعة الانتشار المتأثرة بالجزئيات 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 تراعى هذه الكثافة فقد يؤدي تغير سرعة الانتشار إلى أخطاء في حسابات الملاحة.

وتتسبب الجزئيات 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 المعايير. ويمكن قياس المدى ذهاباً وإياباً وإجراء التتبع بأثر دوبلر باستعمال عدة إشارات ترسل في نفس الوقت في اتجاه فضاء - أرض بعدة نطاقات مختلفة. وتختلف الجزئيات المشحونة في حجمها بالنطاقات المختلفة ويسمح الفرق بينها بتحسين المعايير.

ويرد في التوصية ITU-R SA.1012 أثر الجزئيات المشحونة 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 و 8 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 يمكن 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 كثيراً من الدرجة المتحققة حالياً 0,01 ثانية قوس. وسيكون بالإمكان تحقيق المزيد من الدقة في الملاحة.

5 تحليل الأداء وهوامش التصميم

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

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

وتجدر الإشارة إلى نقطة هامة في مجال تصميم مهام البحث في الفضاء البعيد وهي الهامش المحدود للغاية لأداء القياس عن بعد dB (3,5 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.