

ITU-R SA.1805 التوصية

الخصائص التقنية والتشغيلية لأنظمة الاتصالات فضاء-فضاء

العاملة في جوار 354 THz* و 366 THz**

(المسألة ITU-R 235/7)

(2007)

مجال التطبيق

تحدد هذه التوصية المعلمات التقنية (الترددات واتجاه الوصلات وخصائص الإشارات والبيانات ومعلمات الهوائي وغيرها) والخصائص التشغيلية لأنظمة الاتصالات التي تعمل في الاتجاه فضاء-فضاء حوالي الترددين 354 THz و 366 THz والتي يمكن أن تستخدم في دراسات التقاسم.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أنه يتم التخطيط حالياً لاستعمال وصلات اتصالات في بعض الأنظمة الساتلية لأغراض الاتصالات بين المدارات في حيز الترددات ما بين 354 THz و 366 THz؛

ب) أن علماء الفلك يبذلون جهوداً متضافرة مستعملين التطورات التكنولوجية الحديثة لإقامة تليسكوبات وإجراء عمليات رصد في هذا القسم من الطيف؛

ج) أن هذا القسم من الطيف يُستخدم أيضاً في خدمات أخرى للأرض وفي خدمات فضائية أخرى؛

د) أن هذا القسم من الطيف يستخدم أيضاً لأغراض علمية وصناعية أخرى غير الاتصالات،

توصي

1 بأن تراعى في دراسات التقاسم التي تتناول سواتل البحث الفضائي العاملة في الاتجاه فضاء-فضاء حول الترددين 354 THz و 366 THz المعلمات التقنية والتشغيلية الواردة في الملحق 1.

الملحق 1

1 مقدمة

إزاء ازدياد الضغط على استعمال الطيف الكهرمغناطيسي وتقدم التكنولوجيا يولّى مزيد من الاهتمام لاستعمال ترددات فوق 3 000 GHz في الاتصالات في الفضاء الحر. إذ تسمح الاتصالات في الفضاء الحر في ترددات فوق 3 000 GHz بإرسال بيانات بمعدلات أعلى باستعمال أنظمة أقل حجماً من أنظمة التردد الراديوي التقليدية، فضلاً عن تلبية متطلبات الكسب والاتجاهية الخاصة بالحزم المستعملة في التطبيقات فضاء-فضاء.

* GHz 1 000 = THz 1

** ينبغي أن تحاط لجنة الدراسات 1 للاتصالات الراديوية علماً بهذه التوصية.

1.1 الاعتبارات الخاصة بالترددات

يتركز معظم الاهتمام بوصلات الاتصالات في الفضاء الحر فوق 3 000 GHz في الوقت الحالي حول الترددات 200 و283 و311 و353 THz، التي تقابل أطوال موجات تبلغ 1,5 و1,06 و0,965 و0,850 μm تقريباً. وهذه الترددات هي نفس الترددات الأكثر استعمالاً في الاتصالات بالألياف البصرية. ويركز الاهتمام بالنسبة للاتصالات بين المدارات على استعمال ليزرات بأشباه موصلات عالية القدرة تعمل بمعدل 0,850 μm تقريباً أو استعمال حزمة ليزر بأشباه موصلات مضخمة بواسطة مضخم ألياف بصرية معززة بعنصر Erbium (EDFA) بطول موجة قدره 1,5 μm . ونظام الليزر بأشباه الموصلات الذي يعمل بطول موجة قدره 0,85 μm تقريباً أكثر موثوقية وأعلى قدرة من ذلك العامل مع المضخم EDFA من أجل التطبيقات. بمعدل بيانات منخفض نسبياً لا يتطلب قدرة إرسال عالية.

2.1 المعلمات النمطية للمهام

ينبغي أن تستند المعلمات التقنية المناسبة لتحليلات التداخل إلى وصلات الاتصالات النمطية بين المدارات القريبة من الأرض، ولذلك فإن أطوال الوصلات تتراوح بين بضعة آلاف ومئات الآلاف من الكيلومترات. ويقدم الجدول 1 ملخصاً للمعلمات التقنية الأساسية لوصلة الاتصالات بين المدارات القريبة من الأرض والعاملة قرب الترددين THz 354 وTHz 366.

الجدول 1

المعلمات التقنية لنظام مرجعي للاتصالات بين المدارات يعمل حوالي الترددين THz 354 وTHz 366 في الاتجاه فضاء-فضاء

المعلمة	وصلة الذهاب	وصلة العودة
قدرة المرسل (mW)	10	40
فتحة المرسل (cm)	25	26
تردد المرسل (طول الموجة) (THz)	اتصال: 366 (μm 0,819) منار: 374 (μm 0,801)	354 (μm 0,847)
التشكيل	2PPM	NRZ
دقة التسديد (μrad)	$\pm 2.6 (3\sigma)$	
المدى في الفضاء الحر (km)	يصل إلى 40 000	
معدل البيانات (Mbit/s)	2,048	49,3724
فتحة المستقبل (cm)	26	25
نمط المكشاف	مكشاف APD	مكشاف APD

APD: صمام ضوئي ثنائي الخياري (plid-o-diode)

NRZ: دون عودة إلى الصفر

PPM: جزءاً في المليون

2 الاعتبارات الخاصة بالوصلات

تقام الوصلات المدارية بين ساتل مداري متزامن مع الأرض (GEO) وساتل مداري أرضي منخفض (LEO) في الاتجاه فضاء-فضاء وتعمل في جوار التردد 366 THz بالنسبة إلى وصلة الذهاب والتردد 354 THz بالنسبة إلى وصلة العودة. وترسل إشارة المنار في التردد 374 THz لمساعدة عمليات التليسكوب في التسديد والتتبع.

1.2 أداء الوصلة

يقاس أداء الوصلة التي تعمل في جوار التردد 354 THz و 366 THz من حيث معدل البيانات ونسبة الخطأ في البتات (BER)، شأنه في ذلك شأن النظام فضاء-فضاء الذي يعمل في طيف التردد الراديوي التقليدي. ويُحسب الأداء بدلالة القدرة ونوعية التليسكوب والاعتبارات الخاصة بالانتشار والضوضاء وحساسية المستقبل. وتتوقف قيمة كل من هذه المعلمات على متغيرات إضافية.

1.1.2 نسبة الخطأ في البتات

ينبغي أن تكون نسبة الخطأ في البتات (BER) أقل من 10^{-6} بعد تصحيح الأخطاء كي يمكن استبقاؤها. وينبغي للوصلة أن تستبقي 99% من أرتال البيانات.

2.1.2 متطلب الهامش

يتراوح متطلب الهامش لوصلة بين السواتل تعمل في جوار التردد 354 THz و 366 THz عموماً بين 1 و 3 dB.

2.2 التشكيل

تستعمل وصلة العودة التي تعمل حوالي التردد 354 THz الأسلوب NRZ (دون العودة إلى الصفر). وتستعمل وصلة الذهاب التي تعمل حوالي التردد 366 THz التشكيل 2PPM. وتتيح تقنية التشكيل هذه الكشف المباشر من قبل المستقبل بدلاً من اعتماد مستقبلات متسقة.

3.2 الإشارة المستقبلية

الطريقة العامة في حساب سوية الإشارة في التردد 354 THz و 366 THz التي تستقبلها المحطة فضاء-فضاء هي نفس الطريقة المستخدمة في الأنظمة الراديوية التقليدية.

$$(1) \quad P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_s \quad \text{dBW}$$

حيث:

P_S : قدرة الإشارة المستقبلية (dBW)

P_t : متوسط قدرة خرج الليزر (dBW)

G_t : كسب هوائ المرسل (dBi)

G_r : كسب هوائي الاستقبال (dBi)

L_t : خسائر المرسل (dB)

L_r : خسائر المستقبل (dB)

L_p : خسائر التسديد (dB)

L_s : خسارة الفضاء الحر (dB).

4.2 خسائر الوصلات

- تشمل الخسائر L_t آثار الامتصاص والانتثار وخسائر الانعكاس في النظام البصري للمرسل؛
 - تشمل الخسائر L_r آثار الامتصاص والانتثار وخسائر الانعكاس في القطر البصري للمستقبل؛
 - تشمل الخسائر L_p آثار الهوائي أو ارتعاش السائل وسوء تسديد هوائي الإرسال؛
 - تعزى الخسائر L_s إلى الفصل المادي بين المرسل والمستقبل.
- وتختلف قيم كل مصدر للخسارة باختلاف تصميم المعدات وعمرها ومتطلبات المهمة والمرحلة التي تجتازها. ويقدم الجدول 2 القيم المقترحة للخسائر التي يتعين استعمالها في تحليلات التداخل النوعي.

الجدول 2

خسائر الوصلات في نظام مرجعي للاتصالات بين المدارات يعمل في جوار الترددين THz 354 و THz 366 في الاتجاه فضاء-فضاء

القيمة النمطية	آلية الخسارة
0,63 (= 2- dB)	خسائر المرسل L_t
0,5 (= 3- dB)	خسائر المستقبل L_r
0,5 (= 3- dB)	خسائر التسديد L_p

وتحسب خسارة الفضاء الحر، L_s ، في الترددين THz 354 و THz 366 بنفس الطريقة التي تحسب بها خسائر الأنظمة الراديوية التقليدية.

$$(2) \quad L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2$$

حيث:

R : المسافة بين المرسل والمستقبل (m)

λ : طول الموجة (m)

f : التردد البصري (Hz)

c : سرعة الضوء (m/s).

5.2 معلمات تليسكوبات الإرسال/الاستقبال

تستعمل وصلات الاتصالات العاملة في جوار الترددين THz 354 و THz 366 باعتبارها هوائيات للإرسال والاستقبال. كما تختلف مخططات إشعاع هوائي الإرسال عن مخططات إشعاع هوائي الاستقبال نظراً لأن بصريات المرسل تغذيها عادة حزمة بتوزيع غوسي في حين تستعمل بصريات المستقبل مكشاف في مستو واحد. وبالنسبة إلى غلاف مخططات كسب الهوائي لهوائيات الإرسال والاستقبال التي تعمل في حوالي الترددين THz 354 و THz 366، يرجى الرجوع إلى الملحق 2 بالتوصية ITU-R SA.1742. وتقدم التوصية المذكورة مخطط كسب هوائي مرجعي للأنظمة البصرية فضاء-أرض العاملة في التردد THz 283. وهذا المخطط قابل للتطبيق في الأنظمة فضاء-فضاء التي تعمل في حوالي THz 354 و THz 366.

1.5.2 القَطْر

لأغراض تحليلات التداخل ينبغي افتراض أن يكون قطر الهوائي البصري cm 26/25. وتكون فتحة الإرسال مفتوحة أو مسدودة بمقدار 5 cm.

2.5.2 مخطط كسب الإرسال

يستعمل المرسل تليسكوباً يغذيه الليزر. ولا تعمل أجهزة الليزر هذه عادة إلا في أسلوب التحويل الأدنى (TEM₀₀) الذي تنتج عنه حزمة توزيع غوسي للطاقة ذات شدة قصوى على طول محور إرسالها. ومخطط الحزمة مصمم بحيث لا يتبدد سوى نسبة مئوية قليلة من قدرة الحزمة عندما يتناقص اتساع شدة الحزمة بتناقص الفصل الزاوي عن محور الإرسال. وثمة نقطتان مرجعيتان هما الزاويتان اللتان يتناقص فيهما اتساع الحزمة إما إلى 37% أو 13% من الاتساع على المحور. وتسمى هاتان النقطتان 1/e و 1/e² على التوالي، وكثيراً ما يشار إليهما في خصائص مخططات قدرة الليزر المنطلقة.

ويتم الحساب التقريبي للزاوية الكاملة لفتحة الحزمة عند النقطة 1/e² باستعمال المعادلة التالية:

$$(3) \quad \theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad}$$

حيث:

$$\theta_{1/e^2} : \text{فتحة زاوية الحزمة عند النقطة } 1/e^2 \text{ (rad)}$$

$$D : \text{قطر الفتحة (m).}$$

وفي حال إرسال حزمة غوسية بتردد 354 THz من فتحة بمقدار 26 cm، فإن سعة الفتحة عند النقطة 1/e² تكون $4,1 \times 10^{-6}$ rad تقريباً.

وفيما يتعلق بمطراف الإرسال، يمكن استعمال المعادلات التالية لحساب مخطط إشعاع المجال البعيد لليزر ذي موجة مستوية ذات اتساع غوسي تغذي تليسكوباً. ويقوم استعمال هذه المعادلات على الافتراضات الأساسية التالية:

- يتميز مصدر الليزر باعتباره بثاً غوسياً أحادي الأسلوب؛
- تقاس مخططات كسب الهوائي في المجال البعيد؛
- الفتحة دائرية.

وتقدّم المعادلة (4) مخطط كسب تليسكوب نصف قطره a تغذيه موجة مستوية غوسية الاتساع لها نصف قطر خصر يبلغ ω ، حيث تمثل ω المسافة من المحور الرئيسي للنظام البصري إلى نقطة الشدة 1/e²، وله وسيلة حجب رئيسية نصف قطرها b . والمصطلح G_0 هو الحد الأعلى لكسب هوائي يتم الحصول عليه لفتحة دائرية غير محجوبة ومتجانسة الإضاءة. والمصطلح الثاني، $g_t(\alpha, \gamma, X)$ ، مصطلح لكفاءة الكسب يفسر الحجب والبتر والشدة خارج المحور وآثار عدم إحكام التبئير.

$$(4) \quad G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 g_t(\alpha, \gamma, X)$$

حيث:

$$(5) \quad G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2$$

$$(6) \quad g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2$$

$$(7) \quad \gamma = \frac{b}{a}$$

A : منطقة فتحة التليسكوب (m^2)

a : نصف قطر مرآة التليسكوب (m)

b : نصف قطر المرآة الثانوية (m)

g_t : كفاءة الكسب

J_0 : دالة Bessel من النوع الأول من الرتبة صفر

α : النسبة، α/ω

γ : نسبة الحجب

u : متغير التكامل

$$X: \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot a \cdot \sin(\theta)$$

θ : الزاوية خارج المحور البصري (rad).

بالنسبة لداخل المحور، تكون $X = 0$ وتصبح كفاءة الكسب في المعادلة (6) كما يلي:

$$(8) \quad g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right]$$

وبذلك يصبح أقصى كسب للحزمة الرئيسية الوارد في المحور في المعادلة (4):

$$(9) \quad G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right]$$

ومن شأن أي حجب (b) أن يقلل كسب الحزمة الرئيسية وأن يملأ الفراغات وأن يزيد الفصوص الجانبية.

3.5.2 مخطط كسب الاستقبال

يتصل حجم مجال الرؤية بالحجم المادي للمكشاف وبالطول البؤري للتليسكوب. ويمكن تحديده بالمعادلة:

$$(10) \quad \phi = \frac{d}{F}$$

حيث:

ϕ : مجال الرؤية للمكشاف (rad)

d : نصف قطر المكشاف (m) عادة 10^{-4} إلى 10^{-3} m

F : الطول البؤري للتليسكوب (m).

ويتوافق مخطط هوائي الاستقبال عادة مع المكشاف. والمكشاف معزول عن أي طاقة غير مطلوبة باستعمال وقفات المجالات وهو معرض إلا للجزء من الحزمة الرئيسية داخل ϕ راديان من محور الحزمة الرئيسية. ولذلك فإن الطاقة غير المطلوبة الواصلة إلى الفصوص الجانبية من نمط هوائي الاستقبال لا تصل إلى المكشاف ويمكن إهمالها خلال تحليلات التداخل.

وبافتراض أن فتحة الاستقبال في المجال البعيد لهوائي الإرسال، فإن الطاقة المستقبلة تعامل عادة باعتبارها موجة مستوية. ويمكن أن يستعمل نظام الاستقبال فتحة مشتركة أو منفصلة عن نظام الإرسال. وتقاس فتحة حزمة فتحة الاستقبال عموماً من حيث نقطتها $1/e^2$.

ويعطى أقصى كسب هوائي الاستقبال G_R على المحور في المعادلة التالية:

$$(11) \quad G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log(1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi}$$

حيث:

A : مساحة فتحة الاستقبال (m^2)

λ : طول موجة الإشارة الواصلة (m)

δ : الخسارة الناجمة عن انسكاب الطاقة فوق حافة المكشاف (dB)

و

$$(12) \quad \gamma = \frac{b}{a}$$

حيث:

a : نصف قطر مرآة التليسكوب (m)

b : نصف قطر المرآة الثانوية (m).

ويمثل الكسب المحسوب في المعادلة (11) كمية الطاقة الساقطة على المكشاف. ويفترض التعبير G_R أن هوائي الاستقبال في المجال البعيد للمرسل، وأن كلاً من الفتحة والمكشاف مستدير. والتعبير الأول في المعادلة (11) هو كسب الهوائي التقليدي الذي يحققه هوائي مثالي غير محجوب مساحته A . والتعبير الثاني يمثل الخسائر بسبب الحجب الناجم عن المرآة الثانوية لنظام Cassegrain. وفي حالة الأنظمة التي تخلو من مرآة ثانوية، تصبح القيمة b في المعادلة (12) صفراً، وعندئذٍ يمكن إهمال التعبير الثاني في المعادلة (11).

ويمثل التعبير الثالث، δ ، من المعادلة (11) الخسائر (dB) الناجمة عن انسكاب طاقة الإشارة فوق حافة المكشاف. وبالنسبة لأنظمة الكشف المباشر مثل PPM، فإن δ تتناقص بتزايد نسبة حجم المكشاف إلى الطول البؤري للتليسكوب. وبالنسبة لمعظم القيم العملية، لن تكون قيمة δ أكثر من -0,5 dB.

6.2 التسديد والتتبع

تفرض فتحة الحزمة الضيقة والمدى الطويل للوصلة فضاء-فضاء التي تعمل في حوالي 354 THz و 366 THz متطلبات صارمة بشأن التسديد والتتبع على أي نظام. وتتحدد متطلبات التسديد النمطية بحكم تباعد حزمة الاتصالات. وبالنسبة للنظام المرجعي المبين في الجدول 1 فإن هذا يساوي 2,6 μrad وخسارة تسديد لا تزيد على 3 dB.

3 نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N)

يتوقف أداء وصلات الاتصالات فضاء-فضاء التي تعمل في حوالي 354 THz و 366 THz بصورة مباشرة على تحقيق نسبة إشارة إلى ضوضاء عالية (S/N) في المستقبل. وكلما ارتفعت نسبة الإشارة إلى الضوضاء انخفضت نسبة الخطأ في البتات. وبوجه عام:

$$(13) \quad S/R = \frac{P_s}{N_t}$$

حيث:

P_s : هي قدرة الإشارة المستقبلية بموجب المعادلة (1)

N_t : قدرة الضوضاء من جميع المصادر.

وتأتي الضوضاء من مصدرين مستقلين هما ضوضاء المكشاف وإشارة الخلفية. وتعزى إشارة الخلفية إلى طاقة خارجية تصل إلى المكشاف بسبب البياض الانعكاسي والضوء الآتي من الشمس أو الكواكب أو النجوم. أما ضوضاء المكشاف التي بُحثت في الفقرة 1.3 فتعزى إلى الضوضاء الناجمة داخل المكشاف.

ويمكن تبسيط المعادلات الأساسية التي تصف أداء وصلة متقاطعة بصرية ليزيرية عن طريق الافتراضات الأساسية التالية:

- هوائيات الإرسال والاستقبال البصرية ليس لها عوائق مركزية.
- أشكال الموجات المرسله غوسية ومبتورة عند النقاط $1/e^2$.
- الأمواج المستقبلية أمواج مستوية.
- تُبتر أقراص الانعراج Airy عند أول صفر في مخطط القرص.

1.3 ضوضاء المكشاف

يستعمل في أنظمة الاتصالات في الترددين 354 THz و 366 THz مستقبل كشف مباشر مجهز بصمام ضوئي ثنائي الهياياري (APD). وتعمل أجهزة الكشف APD عادة في واحدة من منطقتي كشف محدودة الضوضاء. وتقتصر مكاشيف استقبال سويات عالية من قدرة الدخل، بوجه عام، على ضوضاء رشقية فوتونية. إلا أن المكاشيف المستقبلية لسويات قدرة دخل منخفضة محدودة من حيث كشف الضوضاء. وتُعرض أدناه نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الصمام الضوئي الثنائي الهياياري (APD) الشائع الاستعمال يعقبها مضمّم مرحلة تالية في نظام كشف مباشر.

حساب عامل الضوضاء الزائدة، N_E ، من خلال:

$$(14) \quad N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1-k)$$

حيث:

N_E : عامل الضوضاء الزائدة

G : الكسب

k : معدل الإلكترون/تأين الثقب.

ويمكن حساب نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) من خلال:

$$(15) \quad S/N = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L}\right)}$$

حيث:

e : شحنة الإلكترون (1.6×10^{-19} coulomb)

P_S : قدرة الإشارة المستقبلية (W)

R_D : تجاوية الصمام الضوئي الثنائي الهياياري (APD)

k_B : ثابت بولتزمان (1.38×10^{-23} J/K)

T : الحرارة (K)

i_S : تيار سطحي قائم في المكشاف (A)

i_B : تيار جملة قائم في المكشاف (A)

R_L : مقاومة مكبرّ المعاوقة (Ω)

N_A : رقم ضوضاء المكبرّ

B : عرض نطاق المرشاح (μm)

B_F : عرض نطاق المرشاح (Hz).
