التوصية ITU-R SA.1742

الخصائص التقنية والتشغيلية للأنظمة الكوكبية وأنظمة الفضاء البعيد والتي تعمل في الاتجاه فضاء–أرض حوالي 283 THz

(المسألة ITU-R 235/7)

(2006)

مجال التطبيق

تحدد هذه التوصية المعلمات التقنية (خصائص الترددات والوصلات والإشارات والبيانات ومعلمات الهوائي، وما إلى ذلك). والخصائص التشغيلية للأنظمة الكوكبية وأنظمة الفضاء البعيد والتي تعمل في الاتجاه فضاء–أرض حوالي 283 THz والتي يمكن أن تُستخدم في دراسات التقاسم.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أنه يتم التخطيط لاستعمال بعض وصلات الاتصالات في بعض الأنظمة الساتلية للاتصالات الراديوية في الفضاء البعيد والاتصالات الراديوية الكوكبية بترددات في منطقة التردد البصري 283 THz؛

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

ج) أن هذا القسم من الطيف يُستخدم أيضاً في خدمات أرضية وفضائية أخرى؛

د) أن هذا القسم من الطيف يُستخدم أيضاً لأغراض علمية وصناعية أخرى غير الاتصالات الراديوية؛

هـ) أن آليات التداخل بين السواتل العاملة في الفضاء البعيد والأنظمة المنفعلة من مثل أنظمة علم الفلك العاملة فوق 20 THz يمكن أن تختلف عن الآليات في الجزء من الطيف الخاص بالترددات الراديوية،

وإذ تسلّم

1 بأن الرقم 78 من المادة 12 من دستور الاتحاد الدولي للاتصالات تشير إلى وظيفة لقطاع الاتصالات الراديوية تتضمن، "... إجراء دراسات من دون تحديد لمدى الترددات واعتماد توصيات ..."؛

2 بأنه ينبغي بموجب الملاحظة 2 من الرقم 1005 من ملحق اتفاقية الاتحاد الدولي للاتصالات، للجان الدراسات أن تعتبر مصطلح "اتصال راديوي" يشمل أيضاً الاتصالات المحققة بموجات كهرمغنطيسية يفوق طيفها 000 3 GHz، وتنتشر في الفضاء دون مرشد اصطناعي ولذلك لدى إجراء دراستها أو استحداث مشاريع توصيات جديدة؛

3 أن استعمال وتقاسم هذا القسم من الطيف لم يُدرَس دراسة شاملة داخل قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد،

توصي بأن

1 تأخذ دراسات التقاسم التي تدرس سواتل البحوث الفضائية التي تعمل في الفضاء البعيد في الاتجاه فضاء–أرض حوالي 283 THz، في اعتبارها المعلمات التقنية والتشغيلية المقدَّمة في الملحقين 1 و2.

الملحـــق 1

1 مقدمة

مع ازدياد الضغط على استعمال الطيف الراديوي، ومع تقدم التكنولوجيا يولَى مزيد من الاهتمام لاستعمال الترددات فوق GHz 3 000 في الاتصالات الراديوية في الفضاء الحر. وأصبحت وصلات الاتصالات الراديوية حقيقة واقعة في نطاقات التردد فوق GHz 3 000 كنتيجة لكثير من التطورات التكنولوجية الحديثة العهد في مجال اتصالات الألياف البصرية وخصوصاً في مجال الليزر وتكنولوجيا التشكيل والمستقبلات. فباستطاعة الاتصالات الراديوية في الفضاء الحر باستعمال ترددات فوق GHz 3 000 دعم معدّلات بيانات عالية مع كتلة أقل من أنظمة التردد الراديوي التقليدية، فضلاً عن تلبية متطلبات الكسب والاتجاهية الخاصة بالحزم المستعملة في التطبيقات الخاصة بالفضاء البعيد.

1.1 الاعتبارات الخاصة بالترددات

يتركز معظم الاهتمام بوصلات الاتصالات الراديوية في الفضاء الحر فوق GHz 3 000 في الوقت الحالي حول الترددات 200، و283 و311 و353 THz[1]، التي تبلغ أطوال الموجات المقابلة لها 1,5 و1,06 و0,965 و0,850 µm تقريباً. وهذه الترددات هي نفس الترددات المستعملة على أوسع نطاق في الاتصالات بالألياف البصرية. ويركز الاهتمام بالنسبة للاتصالات الراديوية الكوكبية وفي الفضاء البعيد في الاتجاه فضاء-أرض على استعمال مضخِّم الألياف البصرية Ytterbium-doped (Yb) بمعدل 1,06 µm في تشكيل مضخم قدرة مذبذب رئيسي (MOPA) والليزر Q-switched، و Neodymium: Yttrium Aluminium Garnet (Nd:YAG) أو Neodymium: Yttrium Vanadate ($Nd:YVO_4$) التي تعمل حول 283 THz (1,06 µm) وإن كان يمكن استعمال ترددات أخرى تبعاً لمتطلبات المهمة المعنية واستعمال Yb وNd:YAG و$Nd:YVO_4$ هو استعمال أساسي بسبب التيسر والموثوقية.

2.1 المعلمات التنوعية للمهام

ينبغي أن تستند المعلمات التقنية المناسبة لتحليلات التداخل إلى المهام الكوكبية التنوعية الموجهة إلى المريخ والمشتري. ولأغراض التقليل إلى أدنى حد من الوزن واستهلاك الوقود، ينبغي للوصلات أن تدعّم متطلبات الاتصال الراديوي التي تبدأ بعد فترة قصيرة من الإطلاق وتستمر طوال مدة المهمة مما يبطل الحاجة إلى أنظمة اتصالات راديوية إضافية. ولذلك سوف تختلف مسافات الوصلات من آلاف قليلة من الكيلومترات إلى عدة وحدات فلكية (AU[2]). وتختلف المسافات من الأرض إلى المريخ أو المشتري من 0,5 إلى 6,2 وحدة فلكية. ويرد في الجدول 1 ملخص للمعلمات التقنية الأساسية لوصلة 283 THz في الفضاء البعيد تعمل في الاتجاه فضاء-أرض.

2 الاعتبارات الخاصة بالوصلات

يمكن للوصلات في الفضاء الحر التي تعمل في الاتجاه فضاء-أرض عند 283 THz أن تستعمل الليزر Yb، Nd:YAG أو $Nd:YVO_4$. وسترسل الحزمة من تليسكوب 30 cm على متن المركبة الفضائية ويستقبلها تليسكوب على الأرض بقطر فعلي يبلغ 4,2 m إلى 10 m.[3]

---

[1] 1 THz = 1 000 GHz.

[2] 1 AU ≈ 149 597 870 km.

[3] لأغراض الاتصالات عبر الفضاء الحر بحوالي 283 THz، فإن التليسكوب يشكل فعلياً هوائياً.

الجدول 1

المعلمات التقنية لمهمتين مرجعيتين في الفضاء البعيد
تعملان في التردد 283 THz في الاتجاه فضاء–أرض

المعلمة	المريخ	المشتري
قدرة المرسِل	5 W (المتوسط)	
فتحة المرسِل	30 cm	
تردد (طول موجة) المرسِل	283 THz (1,06 µm)	
التشكيل	تشكيل موقع النبضات (PPM) (64 = *M* إلى 256) مع تشفير متسلسل	
دقة التسديد	0,35 µrad	
المدى	0,5 إلى 2,5 AU	4,2 إلى 6,2 AU
معدل المعطيات (أثناء اليوم عند المطراف الأرضي)[1]	3 إلى 30 Mbit/s (4,2 m المطراف الأرضي)	1,5 إلى 3 Mbit/s (مطراف 10 m)
فتحة المستقبِل	سعة مكافئة لـ 4,2 إلى 10 m	
نمط المكشاف	صفيفة من أسلوب Geiger InGaAsP/InP APDs	
هامش الوصلة المطلوب	2 إلى 3 dB	

[1] تكون معدلات المعطيات أثناء الليل على الأرض أعلى بنحو 30% (1,13 dB).

1.2 أداء الوصلة

يقاس أداء الوصلة التي تعمل في التردد 283 THz من حيث معدل المعطيات ونسبة الخطأ في البتات (BER)، شأنه في ذلك شأن نظام الفضاء البعيد الذي يعمل في طيف التردد الراديوي التقليدي. ويُحسب الأداء باعتباره دالة على القدرة، ونوعية التليسكوب، والاعتبارات الخاصة بالانتشار، والضوضاء وحساسية المستقبِل. ويُعدّ كل من هذه المعلمات دالة على متغيرات إضافية.

1.1.2 معدل المعطيات

على خلاف نظام يعمل في الفضاء البعيد في طيف التردد الراديوي التقليدي عندما تُضبط جميع المعلومات الأخرى على نحو ثابت، فإن معدل المعطيات لا يكون متناسباً على نحو عكسي بالضبط مع تربيع مسافة الانتشار؛ إلا أنها قيمة تقريبية قريبة للغاية من الوصلات التي تعمل من منطقة مجاورة للمريخ وللمشتري، ومن ثم فهي تشكّل قياساً تقريبياً جيداً. وستختلف معدلات المعطيات من المريخ تبعاً لمعلمات كثيرة بما في ذلك مدى الوصلات والهندسة مع الشمس. وستكون معدلات المعطيات من المريخ بوجه عام أعلى تقريباً من معدلات المعطيات من المشتري.

2.1.2 نسبة الخطأ في البتات

ينبغي أن تكون نسبة الخطأ في بتات أرتال المعطيات أقل من 10^{-6} بعد تصحيح الأخطاء كي يمكن استبقاؤها. وينبغي للوصلة أن تستبقي 99% من أرتال المعطيات.

3.1.2 متطلب الهامش

يتراوح متطلب الهامش النمطي لوصلة نظام فضاء بعيد أو وصلة نظام كوكبي تعمل في الاتجاه فضاء-أرض في التردد 283 THz بين 2 و3 dB. وتتوقف الأحوال اللازمة على عوامل تشمل ضمن جملة أمور، الطقس والوقت من اليوم وزاوية الارتفاع.

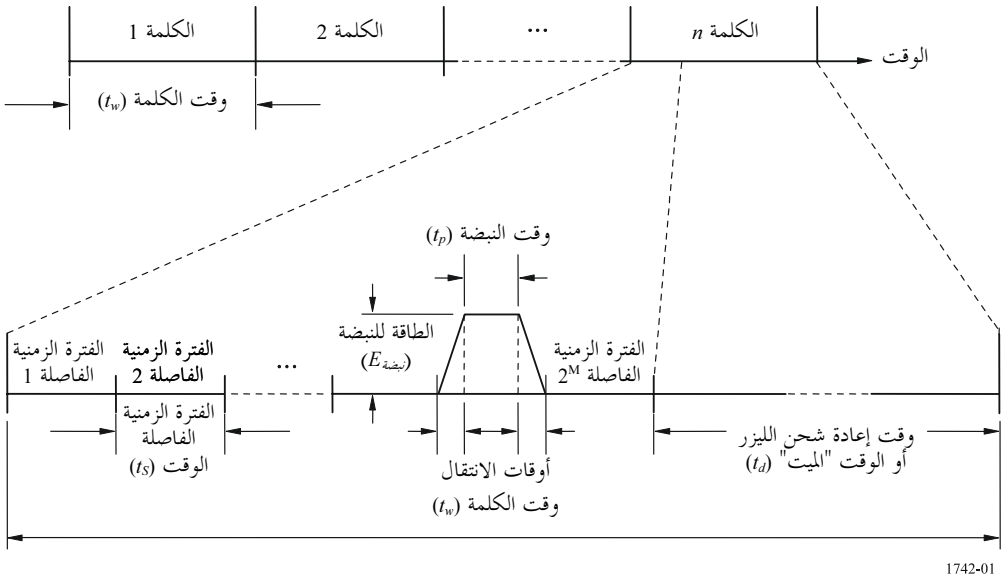
2.2 التشكيل

ستستعمل وصلات الفضاء البعيد والوصلات الكوكبية التي تعمل حوالي 283 THz تشكيل موقع النبضات (PPM). وتتيح تقنيات التشكيل هذه الكشف المباشر (وعلى وجه التحديد عَدّ الفوتونات) من قِبَل المستقبِل بدلاً من تنفيذ مستقبِلات متماسكة. وستشفَّر إشارة تشكيل موقع النبضات بشفرة متسلسلة.

ويستعمل تشكيل موقع النبضات نبضة طاقة منفردة خلال الوقت اللازم لكلمة. ويمكن إرسال البتات M للمعطيات بنبضة طاقة واحدة كائنة مؤقتاً ضمن الفترات الفاصلة الزمنية 2^M لكلمة. ويُستعمل جزء من إجمالي الوقت اللازم لكلمة من أجل إعادة شحن الليزر ولن يحتوي إطلاقاً على نبضة. ووقت إعادة الشحن أو الوقت "الميت" هذا كثيراً ما يمثل أغلب وقت الكلمات بمعدلات معطيات منخفضة لكنه يصبح أقل من عامل في معدلات المعطيات الأعلى. وتبيَّن في الشكل 1 الخصائص الزمنية لإشارة تشكيل موقع النبضات PPM والقياسات ذات الصلة بها.

الشكل 1

خصائص إشارة تشكيل موقع النبضات



3.2 القدرة القابلة للنقل

سيُنتِج المرسِل Yb, Q-switched, Nd:YAG أو $Nd:YVO_4$ عادة قدرة متوسطة تبلغ 5 W. وستختلف قدرة الذروة مع اختلاف معدل المعطيات لكنها يمكن أن تكون في رتبة تتراوح بين 30 و40 dBW. ويحسب الإجراء التالي قدرة الذروة، P_{peak} ذروة لمرسل تشكيل موقع النبضات PPM. ويلزم توفير المعلمات التالية:

M: دليل التشكيل

P_{ave}: متوسط قدرة المرسِل (W)

t_d: الوقت (الأوقات) الميت (الميتة)

t_p: وقت (أوقات) نبضة المرسل

t_s: الفترة (الفترات) الزمنية الفاصلة.

الخطوة 1: حساب وقت الكلمة، t_w، من خلال:

$$t_w = M \cdot t_s + t_d \quad \text{s} \tag{1}$$

الخطوة 2: حساب الطاقة للكلمة، E_{word}، من خلال:

$$E_{word} = P_{ave} \cdot t_w \quad \text{J} \tag{2}$$

الملاحظة 1 – نظراً لأن نبضة واحدة فقط تحدث أثناء كل وقت كلمة، تكون الطاقة للنبضة مساوية للطاقة للكلمة (أي $E_{pulse} = E_{word}$).

الخطوة 3: حساب ذروة قدرة المرسِل، P_{peak}، من خلال:

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{t_p} \quad \text{W} \tag{3}$$

4.2 الإشارة المستقبَلة

الطريقة العامة المتبعة في حساب سوية الإشارة في التردد 283 THz التي تستقبلها المحطة الأرضية هي الطريقة ذاتها المستخدمة مع الأنظمة التقليدية للترددات الراديوية.

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_a + L_s \quad \text{dBW} \tag{4}$$

حيث:

P_S: قدرة إشارة المستقبِل

P_t: متوسط قدرة خرج الليزر (القيمة النمطية هي 4,7 إلى 7,0 dBW)

G_t: كسب هوائي المرسِل (القيمة النمطية هي 119 dB) مناقش بالتفصيل في الفقرة 2.6.2

G_r: كسب الهوائي المستقبِل (القيمة النمطية هي بين 129 إلى 149 dB) يناقش بالتفصيل في الفقرة 3.6.2

L_t: خسائر المرسِل

L_r: خسائر المستقبِل

L_p: خسائر عدم التسديد

L_a: الخسائر الجوية على طول الوصلة فضاء–أرض

L_s: خسارة الفضاء الحر.

5.2 خسائر الوصلات

هناك خمسة مصادر أولية لخسائر الوصلات:

- خسائر المرسِل الداخلية، L_t، التي تشمل آثار الامتصاص والانتثار وخسائر الانعكاس في القطار البصري للمرسِل؛
- خسائر المستقبِل الداخلية، L_r، التي تشمل آثار الامتصاص والانتثار وخسائر الانعكاس في القطار البصري للمستقبِل؛
- خسائر عدم التسديد، L_p، التي تشمل آثار الهوائي أو ارتعاش المركبة الفضائية أو سوء تسديد هوائي الإرسال؛
- الخسائر الجوية، L_a، التي تشمل آثار الانتثار والاضطراب الجويين؛
- خسارة الفضاء الحر، L_s، التي تُعزى إلى الفصل المادي بين المرسِل والمستقبِل.

وستختلف قيم كل مصدر للخسارة باختلاف تصميم المعدات وعمرها ومتطلبات المهمة والمرحلة التي تجتازها المهمة. وترد في الجدول 2 القيم المقترحة للخسائر التي يتعين استعمالها في تحليلات التداخل التنوعية. وتم تناول الانتشار الجوي في هذه المنطقة من الطيف على نحو مفصَّل في توصيات لجنة الدراسات 3 من خلال التوصيتين ITU-R P.1621 وITU-R P.1622.

الجدول 2

المعلمات التقنية لمهمتين مرجعيتين في الفضاء البعيد
تعملان في الاتجاه فضاء–أرض في التردد 283 THz

آلية الخسارة	القيمة النمطية
خسائر المرسِل، L_t	0,63 (= –2 dB)
خسائر المستقبِل L_r	0,63 (= –2 dB)
خسائر عدم التسديد، L_p	0,63 (= –2 dB)
الخسائر الجوية، L_a	0,89 (= –0,5 dB) عند 90º 0,56 (= –2,5 dB) عند 30º

تُحسب خسارة الفضاء الحر، L_s، في التردد 283 THz بنفس الطريقة التي تُحسب بها خسائر الأنظمة التقليدية للترددات الراديوية:

$$L_S = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2 \quad (5a)$$

التي تنخفض في التردد 283 THz إلى:

$$L_s = \frac{7{,}169 \times 10^{-15}}{R^2} \quad (5b)$$

حيث:

R: هي المسافة بين المرسِل والمستقبِل (m).

6.2 معلمات تليسكوبات الإرسال/الاستقبال

سوف تستعمل وصلات الاتصالات الراديوية في الفضاء البعيد ووصلات الاتصالات الراديوية الكوكبية التي تعمل في حوالي 283 THz التليسكوبات باعتبارها هوائيات للإرسال والاستقبال. وستختلف المعلمات النمطية لتليسكوبات الإرسال والاستقبال اختلافاً كبيراً بعضها عن بعض. وستؤثر هذه الاختلافات على نمط كل كسب خاص بتليسكوب. كما تختلف أنماط هوائيات الإرسال والاستقبال نظراً لأن بصريات المرسِل تغذيها عادة حزمة غوسية موزعة في حين أن لبصريات المستقبِل مكشاف عناصر مستوية. وبالنسبة لغلاف أنماط كسب الهوائي لهويات الإرسال والاستقبال التي تعمل في حوالي 283 THz، يرجى الرجوع إلى الملحق 2.

1.6.2 القُطر

لأغراض تحليلات التداخل ينبغي افتراض أن يكون قطر هوائي الإرسال 30 cm. وستكون فتحة الإرسال إما بلا عائق أو بها وسيلة حجب تبلغ 3 cm.

ويمكن أن يختلف القُطر الفعلي لهوائي الاستقبال، وأن يتراوح بين متر و10 أمتار، لكنه سيكون بالنسبة لمعظم التطبيقات على الأقل 4,2 متراً. ولأغراض تحليلات التداخل، ينبغي بحث استعمال هوائيات ذات 1 و4,2 و10 أمتار. وسيكون لفتحة الاستقبال الرئيسية حاجب ثان لا يزيد قطره على 20% من قطر الفتحة الرئيسية.

2.6.2 نمط كسب الإرسال

يستعمل المرسِل تليسكوباً يغذيه الليزر. ولا تعمل أجهزة الليزر هذه عادة إلا في أسلوب أدنى تجويف (TEM_{00})، الذي تنتج عنه حزمة ذات توزيع غوسي للطاقة ذي شدة قصوى على طول محاور إرسالها. ونمط الحزمة مصمم بحيث أنه عندما ينقص اتساع شدة الحزمة مع حدوث فصل زاوي عن محور الإرسال فلن يبدَّد أكثر من نسبة مئوية قليلة من قدرة الحزمة. وتتمثل نقطتان مرجعيتان في الزاويتين اللتين ينقص فيهما اتساع الحزمة إما بنسبة 37% أو 13% من الاتساع على المحور. وتسمى هاتان النقطتان 1/e و$1/e^2$ على التوالي وكثيراً ما يشار إليهما فيما يتعلق بتحديد خصائص أنماط طاقة الليزر التي أمكن بثها.

ويتم تقريب الزاوية الكاملة لفتحة الحزمة عند النقطة $1/e^2$ من خلال ما يلي:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \tag{6}$$

حيث:

θ_{1/e^2}: فتحة الحزمة (rad)

λ: طول الموجة (m)

D: قطر الفتحة (m)

وفي حالة إرسال حزمة غوسية 283 THz من فتحة 30 cm فإن سعة الفتحة عند النقطة $1/e^2$ تكون تقريباً $4,5 \times 10^{-6}$ rad.

وبالنسبة لمطراف الإرسال، يمكن استعمال المعادلات التالية لحساب نمط إشعاع المجال البعيد لليزر ذي موجة مستوية ذات اتساع غوسي تغذي تليسكوباً. ويؤدي استعمال هذه المعادلات إلى الافتراضات الأساسية التالية:

- يميَّز مصدر الليزر باعتباره بثاً غوسياً عادي الأسلوب؛
- تقاس أنماط كسب الهوائي في المجال البعيد؛
- الفتحة دائرية.

وتقدّم المعادلة (7) نمط 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 $1/e^2$، وله وسيلة حجب رئيسية ذات نصف قطر، b. والمصطلح، G_0، هو الحد الأعلى لكسب هوائي يتم الحصول عليه لفتحة دائرية غير معتمة ومتجانسة الإضاءة. والمصطلح الثاني، g_t، (α، γ، X)، هو مصطلح لكفاءة الكسب يفسر الحجب والبتر والشدة خارج المحور وآثار عدم إحكام التبئير.

$$G_t(\alpha,\gamma,X) = G_0 \cdot g_t(\alpha,\gamma,X) \quad \text{dBi} \tag{7}$$

حيث:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \quad \text{dBi} \tag{8}$$

$$g_t(\alpha,\gamma,X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^{1} J_0\left(X\sqrt{u}\right) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \tag{9}$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \tag{10}$$

A: منطقة فتحة التليسكوب (m^2)

a: نصف قطر الفتحة الرئيسية (m)

b: نصف قطر الحجب (m)

J_0: وظيفة Bessel من النوع الأول ذي الرتبة صفراً

α: النسبة، α/ω، نصف قطر فتحة المرسِل، a، إلى نصف قطر خصر الحزمة الغوسية للتغذية، ω، عند النقطة $1/e^2$

u: متغير التكامل

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

θ: الزاوية خارج المحور البصري (rad).

بالنسبة لداخل المحور، $X = 0$ ويصبح مصطلح كفاءة الكسب في المعادلة (9) كما يلي:

$$g_t(\alpha,\gamma,0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2\alpha^2} \right]^2 \right] \tag{11}$$

وبذا يصبح أقصى كسب للحزمة الرئيسية الوارد في المحور في (7):

$$G_t(\alpha,\gamma,0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2\alpha^2} \right]^2 \right] \quad \text{dBi} \tag{12}$$

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

3.6.2 نمط كسب الاستقبال

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

$$\varphi = \frac{d}{F} \tag{13}$$

حيث:

φ: مجال الرؤية (rad)

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

F: الطول البؤري للتليسكوب (m).

ويتوافق نمط هوائي الاستقبال عادة مع المكشاف. والمكشاف معزول عن أي طاقة غير مطلوبة مع استعمال وقفات المجالات وعدم التعرّض إلا للجزء من الحزمة الرئيسية داخل φ راد (وحدة الجرعة الإشعاعية الممتصة) محور الحزمة الرئيسية. ولذلك فإن الطاقة غير المطلوبة المتلقاة في الفصوص الجانبية من نمط هوائي الاستقبال لا تصل إلى المكشاف ويمكن إهمالها خلال تحليلات التداخل.

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

ويتحقق أقصى كسب لهوائي الاستقبال G_R على المحور من خلال ما يلي:

$$G_R = 10 \log\left(\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right) + 10 \log(1-\gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \tag{14}$$

حيث:

A: هي مجال فتحة الاستقبال (m^2)

λ: طول موجة الإشارة الواصلة (m)

و

$$\gamma = \frac{b}{a} \tag{15}$$

حيث:

a: نصف قطر المرآة الرئيسية (m)

b: نصف قطر المرآة الثانوية (m).

ويمثل الكسب المحسوب في المعادلة (14) كمية الطاقة الساقطة على المكشاف. ويفترض التعبير G_R أن يكون هوائي الاستقبال في المجال البعيد للمرسِل، وأن يكون كل من الفتحة والمكشاف مستديراً. والتعبير الأول للمعادلة (14) هو كسب الهوائي التقليدي الذي يحققه هوائي مثالي غير محجوب للمجال A. ويفسر التعبير الثاني الخسائر التي تعود إلى الحجب الذي تسببه المرآة الثانوية لنظام Gassegrain. وفي حالة الأنظمة التي تخلو من مرايا ثانوية، تصبح القيمة b في المعادلة (15) صفراً، كما يمكن إهمال التعبير الثاني للمعادلة (14).

ويمثل التعبير الثالث، δ، من المعادلة (14) الخسائر (dB) التي تعود إلى انسكاب طاقة الإشارة وراء حافة المكشاف. وبالنسبة لأنظمة الكشف المباشر مثل PPM، فإن δ تنقص مع تزايد نسبة حجم المكشاف إلى الطول البؤري للتليسكوب. وبالنسبة لمعظم القيم العملية، لن يكون δ أكثر من –0,5 dB.

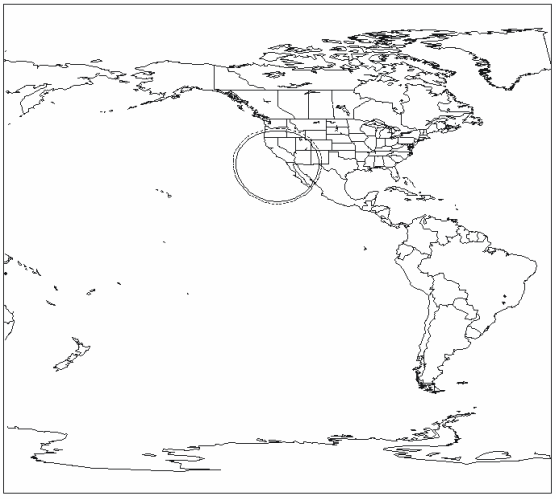
7.2 التسديد والتتبع

تفرض فتحة الحزمة الضيقة والمدى الطويل لوصلة في الفضاء البعيد أو وصلة كوكبية تعمل في حوالي 283 THz متطلبات خاصة بالتدقيق والتتبع الدقيقين على أي نظام. وتقتضي متطلبات التسديد النمطية دقة في التسديد تبلغ قرابة عُشر فتحة الحزمة. وبالنسبة للنظام المرجعي المبين في الجدول 1 فإن هذا يساوي 0,35 شعاع صغير (μrad) وخسارة تسديد لا تزيد على 2 dB.

ويُعرض في الشكلين 2 و3 على التوالي حيز الكفاف $1/e^2$ لوصلة تبلغ وحدتين فلكيتين و6 وحدات فلكية من حيث الطول. ويفترض الشكلان أن المركبة الفضائية تقوم بالإرسال على طول المستوي الاستوائي للأرض وأنها مسددة صوب المرفق التجريبي للوصلات الهابطة البصرية التابع للإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (NASA) في رايتوود، كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية. ويمثل الكفاف الداخلي المتواصل (غير المتقطع) في كل شكل الحيز التسديد الكامل. أما الكفاف المؤلف من شُرَط فيمثل مدى الكفاف مع خطأ عشوائي في التسديد يبلغ 0,35 μrad. والمسافتان اللتان تبلغان وحدتين فلكيتين و6 وحدات فلكية تعادلان المسافتين النمطيتين إلى الأرض من المريخ ومن المشتري، على التوالي.

الشكل 2

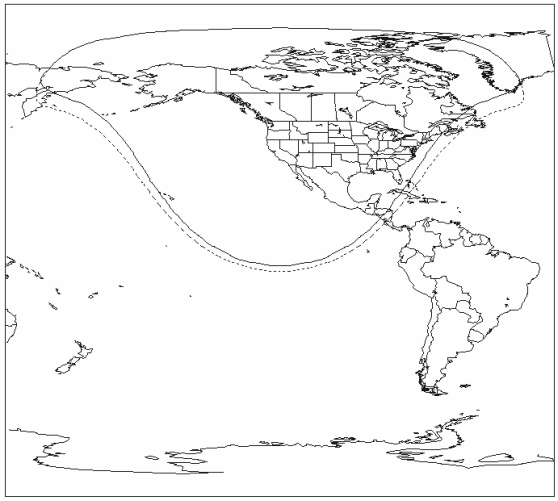
حيز حزمة تبلغ 8 μrad من وحدتين فلكيتين



1742-02

الشكل 3

حيز حزمة تبلغ µrad 8 من 6 وحدات فلكية



1742-03

3 نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)

يتوقف أداء وصلات اتصالات في الفضاء البعيد أو اتصالات كوكبية تعمل في حوالي THz 283 بصورة مباشرة على تحقيق نسبة إشارة إلى ضوضاء عالية (SNR) عند المستقبِل. وكلما ارتفعت نسبة الإشارة إلى الضوضاء كلما انخفضت نسبة الخطأ في البتات. وبوجه عام:

$$SNR = \frac{P_s}{N_t} \quad (16)$$

حيث:

P_s: هي قدرة الإشارة المستقبَلة حسبما تقدمها المعادلة (4)

N_t: هي قدرة الضوضاء من جميع المصادر.

وتأتي الضوضاء من مصدرين مستقلين هما ضوضاء المكشاف وإشارة خلفية. وتعود الإشارة الخلفية التي بُحثت في الفقرة 1.3 إلى طاقة خارجية من السماء تصل إلى المكشاف. أما ضوضاء المكشاف التي بُحثت في الفقرة 2.3 فتعود إلى الضوضاء الناجمة داخل المكشاف.

ويمكن تبسيط المعادلات الأساسية التي تصف أداء وصلة متقاطعة بصرية ليزر أو وصلة من خلال الجو عن طريق الافتراضات الأساسية التالية:

- هوائيات الإرسال والاستقبال البصرية ليس لها عوائق رئيسية.
- أشكال الموجات المرسلة غوسية ومبتورة عند النقاط $1/e^2$.
- الأمواج المستقبَلة هي أمواج مستوية.
- تُبتر الأقراص الأيرية عند أول خمود في مخطط القرص الأيري.

1.3 إشارة الخلفية

أثناء العمليات النهارية أو عندما يظهر شيء مضاء في مجال رؤية المكشاف، ستكون إشارة الخلفية هي مصدر الضوضاء المهيمن. وقد تنشأ قدرة إشارة الخلفية، P_{back}، التي تقع على المكشاف عن طاقة منتشرة من السماء أو الكواكب أو النجوم. وتكون الضوضاء السماوية أكبر أثناء ساعات النهار، وهي تختلف باختلاف ظروف الأرصاد الجوية المحلية لكنها تكون متواجدة دائماً عند بعض السويات المنتهية. وستشكل الضوضاء من الكواكب أو النجوم عاملاً عندما تكون داخل مجال رؤية المستقبِل. ويمكن جمع الضوضاء الصادرة من كل مصدر من أجل حساب إشارة الخلفية الإجمالية.

وينبغي استخدام الإجراء التالي لحساب مستويات إشارة الخلفية عند مكشاف محطة الأرض. وتلزم في هذا الصدد المعلمات التالية:

D: نصف قطر فتحة المستقبِل (m)

γ: نسبة حجب تليسكوب المحطة الأرضية

φ: مجال رؤية المكشاف (rad)

B: عرض نطاق المستقبِل (µm).

الخطوة 1: حساب مجال المستقبِل، A_{rec}، بواسطة:

$$A_{rec} = (1-\gamma^2)\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \quad \text{m}^2 \tag{17}$$

الخطوة 2: حساب الزاوية المتواصلة لمجال رؤية مكشاف الاستقبال، φ'، بواسطة:

$$\varphi' = 2\pi\left(1-\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right) \quad \text{Sr} \tag{18a}$$

التي يجري بالنسبة للزوايا الصغيرة تقريبها من خلال ما يلي:

$$\varphi'_{det} = \frac{\pi\varphi^2}{4} \quad \text{Sr} \tag{18b}$$

الخطوة 3: تحديد قيمة نصوع السماء، H_{sky}، عند 283 THz. وإذا لم تكن القيم المقاسة متيسرة، يتم الاختيار من القيم الواردة في الجدول 3.

الجدول 3

النصوع عند التردد 283 THz بالنسبة لأحوال اللمعان السماوي الاعتباطي، H_{sky} (W/m²/µm/Sr)

المصدر	النصوع
لمعان شمس النهار	54,45
النهار العادي	25,32
النهار الغائم	17,99
الليل	$1{,}000 \times 10^{-5}$

الخطوة 4: حساب القدرة عند المكشاف من السماء، P_{sky}، بواسطة:

$$P_{sky} = H_{sky} \cdot A_{rec} \cdot \varphi' \cdot B \quad \text{W} \tag{19}$$

الخطوة 5: تحديد قيمة كثافة تدفق الإشعاع، N_{star}، عند التردد 283 THz للنجم، إن وُجد، الذي يظهر في مجال رؤية المحطة الأرضية. وإذا لم تتيسر القيم المقاسة يتم الاختيار من القيم الواردة في الجدول 4. وإذا لم يكن هناك نجم في مجال الرؤية، جَعْل $P_{star} = 0$ ومباشرة تنفيذ الخطوة 7.

الجدول 4

كثافة تدفق الإشعاع عند التردد 283 THz بالنسبة لنجوم مختارة، N_{star} ($W/m^2/\mu m$)

المصدر	كثافة تدفق الإشعاع	المصدر	كثافة تدفق الإشعاع
Achernar	$1,94462 \times 10^{-9}$	Capella	$1,67642 \times 10^{-8}$
Aldebaran	$2,87647 \times 10^{-8}$	Pollux	$1,61359 \times 10^{-8}$
Altair	$2,68864 \times 10^{-9}$	Procyon	$1,22510 \times 10^{-8}$
Arcturus	$3,22719 \times 10^{-8}$	Rigel	$4,76926 \times 10^{-9}$
Betelgeuse	$3,99278 \times 10^{-8}$	Rigil Kent	$1,67642 \times 10^{-8}$
Canopus	$2,09429 \times 10^{-8}$	Sirius	$2,09013 \times 10^{-8}$

الخطوة 6: حساب القدرة عند المكشاف من النجم، P_{star}، بواسطة:

$$P_{star} = N_{star} \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \tag{20}$$

الخطوة 7: تحديد نصف القطر، D_{planet}، bond albedo، χ_{planet}، والكثافة الطيفية للقدرة، ψ_{planet}، من كوكب في مجال رؤية المستقبِل من القيم الواردة في الجدول 5. وإذا لم يكن هناك كوكب في مجال رؤية المستقبِل، جَعْل $P_{planet} = 0$ ومباشرة تنفيذ الخطوة 10.

الجدول 5

أنصاف الأقطار، والبياض الانعكاسي، والكثافة الطيفية للكواكب

الكوكب	نصف القطر (m)	البياض الانعكاسي للكوكب	الكثافة الطيفية الواقعة على الكوكب (W/µm)
عطارد	4 866 070	0,119	$8,336 \times 10^{16}$
الزهرة	12 108 756	0,75	$1,469 \times 10^{17}$
المريخ	6 778 400	0,25	$1,043 \times 10^{16}$
المشتري	142 989 171	0,343	$3,950 \times 10^{17}$
زحل	120 582 610	0,342	$8,228 \times 10^{16}$
أورانوس	51 204 220	0,3	3.891×10^{15}
نبتون	49 508 383	0,29	$1,373 \times 10^{15}$
بلوتو	2 308 404	0,145	$1,803 \times 10^{12}$

الخطوة 8: حساب الزاوية التي تقع قبالة الكوكب كما تُرى من المستقبِل، θ_{planet}، بواسطة:

$$\theta_{planet} = \frac{D_{planet}}{R_{planet}} \quad \text{rad} \tag{21}$$

حيث:

R_{planet}: تمثل المسافة من الأرض إلى الكوكب (m).

الخطوة 9: إذا كانت $\theta_{planet} < \varphi$، تُحسب القدرة عند المكشاف من الكوكب، P_{planet}، بواسطة ما يلي:

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \tag{22a}$$

وإلا،

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \cdot \left(\frac{\varphi'}{\theta'_{planet}} \right) \quad \text{W} \tag{22b}$$

حيث θ'_{planet} هي الزاوية المتواصلة للكوكب الذي يقع قبالة المكشاف وتقدَّم من خلال ما يلي:

$$\theta'_{planet} = 2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\theta_{planet}}{2} \right) \right) \approx \frac{\pi \theta_{planet}^2}{4} \quad \text{S/r} \tag{23}$$

الخطوة 10: حساب القدرة الإجمالية لإشارة الخلفية، P_{back}، التي تقع على المكشاف من خلال ما يلي:

$$P_{back} = P_{sky} + P_{star} + P_{planet} \quad \text{W} \tag{24}$$

2.3 ضوضاء المكشاف

سوف تستعمل معظم التطبيقات المخططة للاتصالات الراديوية في الفضاء البعيد والاتصالات الراديوية الكوكبية مستقبِل كشف مباشر ذي صمام ضوئي ثنائي انهياري (APD). وستعمل أجهزة الكشف ذات الصمام الضوئي الثنائي الانهياري (APD) عادة في منطقة من منطقتي كشف محدود للضوضاء. وستقتصر مكاشيف استقبال مستويات قدرة الدخل العالية، بوجه عام، على ضوضاء رشقية فوتونية. إلا أن المكاشيف المستقبِلة لمستويات قدرة دخل منخفضة مثل المكاشيف المرتبطة بوصلات الفضاء البعيد والوصلات الكوكبية ستكون مكاشيف محدَودة من حيث كشف الضوضاء. وتُعرض أدناه نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الصمام الضوئي الثنائي الانهياري الشائع الاستعمال يعقبها مضخّم مرحلة تالية في نظام كشف مباشر.

حساب عامل الضوضاء الزائدة، N_E، من خلال ما يلي:

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G} \right)(1-k) \tag{25}$$

حيث:

G: تعني الكسب

k: تعني معدل الإلكترون/تأين الثقب.

ويمكن حساب نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) من خلال ما يلي:

$$SNR = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L} \right)} \tag{26}$$

حيث:

e: شحنة الإلكترون ($1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb)

P_S: متوسط قدرة الإشارة المستقبَلة (W)

R_D: تجاوبية الصمام الضوئي الثنائي الانهياري (APD)

k_B: قيمة بولتزمان Boltzmann الثابتة ($1{,}38 \times 10 - 23$ J/K)

T: درجة الحرارة (K)

i_S: مكشاف تيار سطحي قاتم (A)

i_B: مكشاف تيار قاتم بجملته (A)

R_L: مقاومة مكبِّر المعاوقة المؤقتة (Ω)

N_A: رقم ضوضاء المكبِّر

B_F: عرض نطاق المستقبِل (Hz).

4 قائمة المتغيرات

a: نصف قطر مرآة التليسكوب (m)

A: منطقة فتحة التليسكوب (m^2)

A_{rec}: منطقة فتحة تليسكوب الاستقبال (m^2)

α: النسبة، α/ω

b: نصف قطر المرآة الثانوية (m)

B: عرض نطاق المرشاح (μm)

B_F: عرض نطاق المرشاح (Hz)

c: سرعة الضوء (m/s)

χ_{planet}: البياض الانعكاسي الرابط لكوكب

d: نصف قطر المكشاف (m)

D: نصف قطر الفتحة (m)

D_{planet}: نصف قطر الكوكب (m)

δ: الخسائر بسبب تسرب الطاقة على حافة المكشاف (dB)

e: شحنة الإلكترون (coulomb)

E_{pulse}: الطاقة للنبضة (J)

f: التردد البصري (Hz)

F: الطول البؤري للتليسكوب (m)

φ: مجال رؤية المكشاف (راد rad)

φ': الزاوية المتواصلة لمجال رؤية المكشاف (سراد srad)

G_0: الحد الأقصى لكسب الهوائي على المحور (dBi)

G_r: كسب هوائي الاستقبال (dBi)

g_t: كفاءة الكسب

G_t: كسب هوائي المرسِل (dBi)

γ: نسبة الحجب

H_{sky}: نصوع السماء ($W/m^2/\mu m/Sr$)

i_b: التيار القائم بجملته في المكشاف (A)

i_s: تيار سطحي قائم في المكشاف (A)

k: معدل الإلكترون/تأين الثقب

k_B: قيمة بولتزمان الثابتة

L_t: خسائر المرسِل

L_r: خسائر المستقبِل

L_p: خسائر التسديد

L_a: خسائر جوية على طول الوصلة فضاء–أرض

L_s: خسارة الفضاء الحر

λ: طول الموجة (m)

M: دليل التشكيل

N_A: عامل ضوضاء المكبّر

N_E: عامل الضوضاء الزائدة

N_{star}: كثافة تدفق إشعاع نجمة ($W/m^2/\mu m$)

N_t: قدرة الضوضاء من جميع المصادر

P_{ave}: متوسط قدرة المرسِل (W)

P_{back}: إجمالي قدرة الخلفية المستقبَلة (W)

P_{peak}: قدرة الذروة (W)

P_{planet}: القدرة المستقبَلة من كوكب مضاء (W)

P_S: قدرة الإشارة المستقبَلة (W)

P_{sky}: القدرة المستقبَلة من السماء (W)

P_{star}: القدرة المستقبَلة من نجم (W)

P_t: متوسط قدرة ناتج الليزر (W)

θ: زاوية خارج المحور البصري (راد rad)

θ_{planet}: الزاوية الواقعة قبالة كوكب (راد rad)

θ_{1/e^2}: الفتحة الزاويّة للحزمة عند النقطة $1/e^2$ (راد rad)

θ'_{planet}: الزاوية المتواصلة الواقعة قبالة كوكب (راد rad)

R: المسافة بين المرسِل والمستقبِل (m)

R_D: تجاوبية الصمام الضوئي الثنائي الانهياري (APD)

R_L: مقاومة مكبّر المعاوقة المؤقتة

R_{planet}: المسافة بين الكوكب والمستقبِل (m)

t_d: الوقت الميت للمرسِل (s)

t_p: وقت نبضة المرسِل (s)

t_s: الفواصل الزمنية للمرسِل (s)

t_w: وقت كلمة المرسِل (s)

T: درجة الحرارة (K)

ω: الحجم الاستوائي للحزمة عند النقطة $1/e^2$

ψ_{planet}: الكثافة الطيفية لقدرة قمر أو كوكب ($W/\mu m$).

الملحـــق 2

1 نمط الهوائي لفتحات الإرسال الدائري غير المعتمة

يتم تقريب غلاف نمط كسب الهوائي لفتحة الإرسال الدائري غير المعتمة التي تعمل في حوالي 283 THz من خلال ما يلي:

$$G_t(\varphi) = G_{max} - 0{,}9 - (4{,}5\times10^{-4})\left(\frac{D}{\lambda}\cdot\varphi\right)^{2{,}5} \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } 0 \le \varphi \le \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_m < \varphi \le \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 35 - 30\log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30\log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_r < \varphi \le \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_1 < \varphi \le 180°$$

حيث:

$G_{max} = 20\log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$: كسب الحزمة الرئيسية (dBi)

$G_1 = G_{max} - 25{,}8$: كسب الفص الجانبي الأول (dBi)

D: نصف قطر الفتحة (m)

λ: طول الموجة (m)

φ: الزاوية خارج المحور (بالدرجات)

$\varphi_r = 5{,}83\left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D}\right)$: زاوية الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

$\varphi_m = 0{,}75\varphi_r$: الزاوية حيث كسب الفص الرئيسي يساوي كسب الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

φ_1: مجال الرؤية محدود بفعل وقفات بصرية (بالدرجات).

2 نمط الهوائي لفتحات الإرسال الدائرية المعتمة

يتم تقريب غلاف نمط كسب الهوائي لفتحة إرسال دائرية معتمة تعمل في حوالي 283 THz من خلال ما يلي:

$$G_t(\varphi) = G_{max} - 0{,}9 + 32\log(1-\gamma^2) - \left(4\times10^{-4} + \frac{\gamma}{2\,000}\right)\left(\frac{D}{\lambda}\cdot\varphi\right)^{2{,}5} \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } 0 \le \varphi \le \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_m < \varphi \le \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 40 + 15\gamma - 30\log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30\log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_r < \varphi \le \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_1 < \varphi \le 180$$

حيث:

$G_{max} = 20\log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$: كسب الحزمة الرئيسية (dBi)

$G_1 = G_{max} + 2{,}17 + 15\gamma - 30\log(5{,}77 - 2{,}9\gamma^2)$: كسب الفص الجانبي الأول (dBi)

D: نصف قطر الفتحة (m)

λ: طول الموجة (m)

φ: زاوية خارج المحور (بالدرجات)

$\varphi_r = (5{,}77 - 2{,}9\gamma^2)\left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D}\right)$: زاوية الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

$\varphi_m = (0{,}71 - 0{,}5\gamma)\cdot\varphi_r$: الزاوية حيث كسب الفص الرئيسي يعادل كسب الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

φ_1: مجال الرؤية محدود بفعل وقفات بصرية

$\gamma = \frac{b}{a}$: نسبة الحجب

a: نصف قطر الفتحة الرئيسية (m)

b: نصف قطر الفتحة الثانوية (m).

3 نمط الهوائي لفتحات استقبال دائرية غير معتمة

يمكن تقريب غلاف نمط كسب الهوائي لفتحة استقبال دائرية غير معتمة تعمل في حوالي 283 THz من خلال ما يلي:

$G_t(\varphi) = G_{max} - (6 \times 10^{-4})\left(\frac{D}{\lambda}\cdot\varphi\right)^{2,5}$	dBi	من أجل $0 \le \varphi \le \varphi_m$
$G_t(\varphi) = G_1$	dBi	من أجل $\varphi_m < \varphi \le \varphi_r$
$G_t(\varphi) = G_{max} + 42 - 30\log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30\log(\varphi)$	dBi	من أجل $\varphi_r < \varphi \le \varphi_1$
$G_t(\varphi) = -10$	dBi	من أجل $\varphi_1 < \varphi \le 180°$

حيث:

$G_{max} = 20\log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$: كسب الحزمة الرئيسية (dBi)

$G_1 = G_{max} - 17{,}5$: كسب الفص الجانبي الأول (dBi)

D: نصف قطر الفتحة (m)

λ: طول الموجة (m)

φ: زاوية خارج المحور (بالدرجات)

$\varphi_r = 5{,}14\left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D}\right)$: زاوية الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

$\varphi_m = 0{,}65\varphi_r$: الزاوية حيث كسب الفص الرئيسي يعادل كسب الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

φ_1: مجال الرؤية محدود بفعل وقفات بصرية (بالدرجات).

4 نمط الهوائي لفتحات استقبال دائرية معتمة

يمكن تقريب نمط كسب الهوائي لفتحة استقبال دائرية معتمة تعمل في حوالي 283 THz من خلال ما يلي:

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 20\log(1-\gamma^2) - \left(6\times10^{-4} + \frac{\gamma}{3\,000}\right)\left(\frac{D}{\lambda}\cdot\varphi\right)^{2.5} \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } 0 \le \varphi \le \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_m < \varphi \le \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 44 + 8\gamma - 30\log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30\log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_r < \varphi \le \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{من أجل } \varphi_1 < \varphi \le 180°$$

حيث:

$G_{max} = 20\log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$: كسب الحزمة الرئيسية (dBi)

$G_1 = G_{max} - 15{,}15 + 8\gamma$: كسب الفص الجانبي الأول (dBi)

D: نصف قطر الفتحة (m)

λ: طول الموجة (m)

φ: زاوية خارج المحور (بالدرجات)

$\varphi_r = 5{,}14\cdot\left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D}\right)$: زاوية الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

$\varphi_m = (0{,}62 - 0{,}3\gamma)\cdot\varphi_r$: الزاوية حيث كسب الفص الرئيسي يعادل كسب الفص الجانبي الأول (بالدرجات)

φ_1: مجال الرؤية محدود بفعل وقفات بصرية (بالدرجات)

$\gamma = \frac{b}{a}$: نسبة الحجب

a: نصف قطر الفتحة الرئيسية (m)

b: نصف قطر الفتحة الثانوية (m).