التوصيـــة ITU-R S.1782

إمكانيات توفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق على الصعيد العالمي بواسطة أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية

(المسألة ITU-R 269/4)

(2007)

مجال التطبيق

استجابة للقضايا المطروحة بنفس الوقت من جمعية الاتصالات الراديوية ومن المؤتمر WRC-03، أجريت دراسة تمهيدية عن إمكانيات توفير النفاذ إلى الإنترنت بمعدل معطيات عالٍ عبر ساتل. وتجد في الملحق 1 محاولة لتحديد النطاقات المناسبة في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) فاختيرت أزواج من عروضٍ النطاق يبلغ كل منها 500 MHz، ضمن توزيعات الخدمة الثابتة الساتلية في النطاقات 14/11 GHz و30/20 GHz و50/40 GHz. كما حسبت، استناداً إلى الوصلات الساتلية المباشرة انطلاقاً من مطاريف المستعملين المجهزة بهوائيات قطر كل منها 30 cm، خصائص الوصلتين الصاعدة والهابطة في كل حالة، وكذلك سعة كل ساتل. وجرى تقدير للسعة الكلية لهذه الأنظمة التي تخدم منطقة مرجعية تبلغ مساحتها 10 000 000 km^2. أما في الملحق 2 فتجد خصائص الوصلات الصاعدة والهابطة في النطاقات 30/20 GHz و14/11 GHz المنطبقة على نظام مصمم لتأمين الوصلات الساتلية المباشرة انطلاقاً من مطاريف المستعملين المجهزة بهوائيات قطر كل منها 1,2 m، وكذلك حسبت سعة كل ساتل والسعة الكلية. وفي الملحق 3 حددت خصائص نظام نموذجي مبني على نفاذ المستعمل بواسطة وصلات راديوية للأرض قاصدة إلى محطات أرضية "جماعية"، وبالتالي على استخدام ساتل في النطاقات 30/20 GHz أو 14/11 GHz باتجاه محطة أرضية واحدة مركزية، وفي هذه الحالة أيضاً حسبت السعة المقابلة لكل ساتل كما حسبت السعة الكلية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن تقنية الاتصالات الساتلية تستطيع تسريع تيسر خدمات الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي في البلدان النامية، بما فيها البلدان الأقل نمواً، والبلدان النامية المطوّقة بالبر (الداخلية) أو المطوّقة بالماء (الجزيرية) وكذلك بلدان الاقتصادات العبورية؛

ب) أن من المرغوب فيه تحديد الخصائص التقنية والتشغيلية لأنظمة الخدمة الثابتة الساتلية التي تستطيع تسهيل الإنتاج على المقياس الكبير لتجهيزات مطاريف المستعمل تكون بسيطة وسعرها مقدور عليه مُتَحمّل؛

ج) أن من المرغوب فيه تقدير السعة العالمية التي يمكن تقديمها في توزيعات التردد للخدمة الثابتة الساتلية بأنظمة لها الخصائص المبيّنة في البند ب) من الفقرة *إذ تضع في اعتبارها* ؛

د) أن الخصائص المبيّنة في البند ب) من الفقرة *إذ تضع في اعتبارها* يجب أن تأخذ بالحسبان إمكانية تصميم أنظمة متخصصة لتوفير النفاذ إلى الإنترنت ذات المعدل العالي من المعطيات بواسطة مطاريف مستعمل صغيرة، وكذلك تراعي بنفس الوقت وجود بعض الأنظمة المتوفرة فيها وسائل النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق؛

هـ) أن محطات أرضية بقدود مختلفة تستعمل حالياً لتوفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق عن طريق أنظمة قائمة في الخدمة الثابتة الساتلية، مصممة لتتحمل أيضاً تطبيقات أخرى باستخدام نطاقات تردد متعددة؛

و) أن وضع المعايير للتكنولوجيا الساتلية المذكورة في البند أ) من الفقرة *إذ تضع في اعتبارها* بشأن تطبيقات الإنترنت يسهّل توسيع استخدام الساتل للنفاذ إلى الإنترنت،

وإذ تلاحظ

أ) أن التوصية ITU-R S.1783 تشرح خصائص الأنظمة عالية الكثافة في الخدمة الثابتة الساتلية (HDFSS)؛

ب) أن التوصية ITU-R S.1709 تشرح الخصائص التقنية للسطوح البينية الراديوية للأنظمة الساتلية العالمية عريضة النطاق،

وإذ تدرك

أ) أن توزيعات التردد للخدمة الثابتة الساتلية يمكن أن تستعمل في الآجال القصير والمتوسط والطويل لتوفير خدمات الإنترنت عالية السرعة على الصعيد العالمي،

توصي

1 بأن المعلومات الواردة في الملحقات الأول والثاني والثالث تشكل ثلاثة أمثلة يمكن استخدامها لتأمين النفاذ إلى الإنترنت ذات المعدلات العالية من المعطيات على صعيد عالمي عن طريق الخدمة الثابتة الساتلية.

الملحـــق 1

إمكانيات توفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق[1] على الصعيد العالمي[2] بواسطة أنظمة في الخدمة الثابتة الساتلية مصممة للهوائيات الصغيرة جداً في المحطات الأرضية

1 اعتبارات خاصة بنطاقات التردد

1.1 النطاقات المناسبة

ينطبق المصطلح "في الأجل القصير" على النطاقات التي يوجد فيها فعلاً تكنولوجيا اتصالات ساتلية. وهذا الكلام صحيح كلياً فيما يخص التوزيعات للخدمة الثابتة الساتلية في النطاقات GHz 6/4 وGHz 14/11، وهو صحيح جزئياً فيما يخص التوزيعات للخدمة الثابتة الساتلية في النطاقات GHz 30/20. ومن المتوقع أن تصل تكنولوجيا الاتصالات الساتلية إلى مرحلة النضوج الكامل "في الأجل المتوسط"، أي أثناء السنوات العشر القادمة، وأنها ستمتد أيضاً إلى النطاقات GHz 50/40 إلى حدٍ ما، على الرغم من أن التجربة تدل على أن هذا التطور لن يكون كاملاً إلا "في الأجل الطويل". ويوجد في المادة 5 من لوائح الراديو توزيعات للخدمة الثابتة الساتلية واقعة فوق GHz 50، ولكن الاحتمال ضعيف أن تشهد تقدماً ذا معزى في هذه النطاقات قبل الأجل الطويل، بحيث لا يمكن البحث في ذلك هنا.

ونظراً إلى الدراسات التمهيدية التي أجريت، فإن استخدام النطاقات GHz 6/4 قد استبعد عن نطاق التطبيق المدروس، بسبب أن المطاريف قليلة التكلفة تقتضي استعمال هوائيات صغيرة جداً قد لا يكون كسبها كافياً عند هذه الترددات للعمل مع السواتل عريضة الحزم التي تستعمل عادة. وعلاوة على ذلك، فإن النطاقات GHz 6/4 مستعملة استعمالاً كثيفاً بالفعل، حتى أنه ولو توفرت سواتل الحزم النقطية في النطاق C، فإن من الصعب جداً على المحطات الأرضية التي هوائياتها المكافئية صغيرة جداً وفتحات حزمها كبيرة، أن تتقاسم الترددات مع الخدمات القائمة. وعليه فإن النطاقات GHz 6/4 غير مدروسة فيما يلي من هذا الملحق.

---

[1] المصطلح "على الصعيد العالمي" يعني في هذه الدراسة كل نقطة يمكن أن يخدمها ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض.

[2] مثال "النطاق العريض" في هذه الدراسة هو معدل بتات المستعمل الذي يبلغ Mbit/s 2.

ويظهر من هذه الدراسات التمهيدية أيضاً أن الاعتبارات التي أثيرت في الفقرة السابقة تنطبق أيضاً، إلى حد ما، على النطاقات GHz 14/11. غير أن الحدود المفروضة على قدود الهوائيات في المحطات الأرضية تكون أقل صراحة منها بشأن النطاقات GHz 6/4، لأن الكسب أكثر ارتفاعاً، واستعمال الحزم النقطية (المتوسطة) أكثر انتشاراً، غير أن تقاسم الترددات، كما في حالة النطاقات GHz 6/4، قد يكون مشكلة، نظراً إلى أن الترددات غير المخطط لها في النطاقات GHz 14/11 قد شاع استعمالها كثيراً منذ سنوات عديدة.

ويبدو أن توزيعات الخدمة الثابتة الساتلية في النطاقات GHz 30/20 الأكثر ملاءمة، لأسباب ذاتية صرف، لتوفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق في الأجل القصير، وذلك للأسباب التالية: الطول الموجي يلائم الهوائيات الصغيرة جداً، والتكنولوجيا محكمة الصنع نسبياً، واستخدامها ما زال بعد محدوداً. وفوق ذلك فإن نفاذ المستعملين إلى الإنترنت لا يتواءم مع الطريقة التي نظمت بها حتى الآن معظم نطاقات الخدمة الثابتة الساتلية على الصعيد الدولي، أي التنسيق بين مختلف المحطات الأرضية. ولما كانت مطاريف المستعملين يمكن أن تباع بكميات كبيرة لدى تجار المفرق "بالكبيرة" لكي يتم تركيبها في المنازل أو في المكاتب، فإن من اللازم وضع نظام تنظيمي شبيه بالنظام الموضوع لأخذ التطبيقات عالية الكثافة في الخدمة الثابتة الساتلية (HDFSS) بالحسبان. ويعاد فيما يلي للفائدة نشر الرقم 516B.5 من لوائح الراديو الذي تحيل إليه دراسات المؤتمر WRC-03 بشأن إمكانيات توفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق على الصعيد العالمي بواسطة أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية.

"تم تحديد النطاقات التالية لاستعمال التطبيقات عالية الكثافة في الخدمة الثابتة الساتلية:

GHz 17,7-17,3	(فضاء–أرض) في الإقليم 1،
GHz 19,3-18,3	(فضاء–أرض) في الإقليم 2،
GHz 20,2-19,7	(فضاء–أرض) في جميع الأقاليم،
GHz 40-39,5	(فضاء–أرض) في الإقليم 1،
GHz 40,5-40	(فضاء–أرض) في جميع الأقاليم،
GHz 42-40,5	(فضاء–أرض) في الإقليم 2،
GHz 47,9-47,5	(فضاء–أرض) في الإقليم 1،
GHz 48,54-48,2	(فضاء–أرض) في الإقليم 1،
GHz 50,2-49,44	(فضاء أرض) في الإقليم 1،

و

GHz 27,82-27,5	(أرض–فضاء) في الإقليم 1،
GHz 28,45-28,35	(أرض–فضاء) في الإقليم 2،
GHz 28,94-28,45	(أرض–فضاء) في جميع الأقاليم،
GHz 29,1-28,94	(أرض–فضاء) في الإقليم 2 و3،
GHz 29,46-29,25	(أرض–فضاء) في الإقليم 2،
GHz 30-29,46	(أرض–فضاء) في جميع الأقاليم،
GHz 50,2-48,2	(أرض–فضاء) في الإقليم 2."

وتجدر الملاحظة إلى أن هذه التسميات تضاف إلى عروض النطاق الكلية التالية:

النطاقات GHz30/20	الصعيد العالمي	زائداً	الإقليم 1	الإقليم 2	الإقليم 3
الوصلة الهابطة	MHz 500		MHz 400	MHz 1 000	–
الوصلة الصاعدة	MHz 1 030		MHz 320	MHz 470	MHz 160
النطاقات GHz 50/40					
الوصلة الهابطة	MHz 500		MHz 2 000	MHz 1 500	–
الوصلة الصاعدة	–		–	MHz 2 000	–

وعليه وبافتراض أن الترددات الواردة في النطاقات المحددة للاستعمال العالمي يمكن إعادة استعمالها على التآون في إقليمين أو ثلاثة أقاليم، فإن الطيف الكلي المحدد للتطبيقات عالية الكثافة في الخدمة الثابتة الساتلية (HDFSS) هو التالي موزعاً حسب الأقاليم:

الإقليم 1 400 3 MHz للوصلة الهابطة و350 1 MHz للوصلة الصاعدة؛

الإقليم 2 500 3 MHz للوصلة الهابطة و500 3 MHz للوصلة الصاعدة؛

الإقليم 3 000 1 MHz للوصلة الهابطة و190 1 MHz للوصلة الصاعدة.

ويظهر من هذه الأرقام أنه يلزم عرض نطاق للوصلة الهابطة أكبر منه بكثير للوصلة الصاعدة لتلبية احتياجات التطبيقات HDFSS في الإقليم 1، بينما الاحتياجات هي من نفس الرتبة في اتجاهي الإرسال في الإقليمين الآخرين.

وفيما يخص النطاقات 30/20 GHz و50/40 GHz، فإن الاعتبارات المعروضة في هذه التوصية تقتصر على النطاقات المحددة للأقاليم الثلاثة في الرقم 516B.5 من لوائح الراديو، أي 20,2-19,7 GHz و28,45-28,94 GHz و30,0-29,46 GHz و40,5-40,0 GHz (انظر الجدول 1).

وعلى الرغم من أن المؤتمر WRC-03 وجمعية الاتصالات الراديوية قد دعيا قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد إلى دراسة هذا الموضوع، إلا أنهما تصورا أن استعمال نطاقات الخدمة الثابتة الساتلية ونتائج التحليلات الواردة في هذا الملحق بشأن النطاقات 14/11 GHz للخدمة الثابتة الساتلية (FSS) يمكن أن تكون مشابهة لما حصل للنطاقات المجاورة في الخدمة المتنقلة الساتلية (أي 12,5-11,7 GHz في الإقليمين 1 و3 و12,7-12,2 GHz في الإقليم 2).

2.1 الاستعمال الحالي للنطاقات في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS)

في سبيل تقدير الحدّ الذي يمكن عنده تلبية احتياجات النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق بفضل السواتل المستقبلية العاملة في النطاقات المحددة في الفقرة 1.2، يجب تحديد الدرجة التي تستعمل بها حالياً موردي المدار أو الطيف الأنظمة الساتلية القائمة، أو درجة استعمالها مستقبلاً من الأنظمة التي هي قيد التطوير حالياً، لتطبيقات أخرى في الخدمة الثابتة الساتلية. وللحصول على دلالة على الفرق بين الاستعمال الحالي لكل نطاق واستعماله المتوقع يمكن الرجوع إلى قاعدة معطيات نظام الشبكات الفضائية (SNS) التابعة لمكتب الاتصالات الراديوية. ويهدف الجدول 1 إلى مقارنة عدد طلبات تخصيص الترددات التي وردت حتى يناير 2005 بشأن شبكات السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض في الخدمة الثابتة الساتلية، في قطاع قدره 500 MHz من كل توزيع للخدمة الثابتة الساتلية في مديات الترددات 14/11 GHz و30/20 GHz و50/40 GHz. وكل واحد من هذه القطاعات 500 MHz (ما عدا الأخير منها) موزع للخدمة الثابتة الساتلية في الأقاليم الثلاثة:

الجدول 1

مقارنة طلبات تخصيص الترددات

التوزيعات للخدمة FSS	عرض النطاق	اتجاه الإرسال	الاستعمال الأساسي	عدد بطاقات التبليغ
{GHz 11,2-10,95 {GHz 11,7-11,45	MHz 500	فضاء–أرض	تطبيقات تجارية عامة في الخدمة FSS	12 417
GHz 14,5-14,0	MHz 500	أرض– فضاء		16 467
GHz 20,2-19,7	MHz 500	فضاء–أرض	محددة للتطبيقات HDFSS	5 245
GHz 30,0-29,5	MHz 500	أرض– فضاء		4 830
GHz 40,5-40,0	MHz 500	فضاء–أرض	محددة للتطبيقات HDFSS	1 205
(GHz 48,7-48,2 [(1)])	MHz 500	أرض– فضاء		(797)

[(1)] هذا هو جزء من نطاق حدده المؤتمر WRC-03 للتطبيقات HDFSS في الوصلات الصاعدة في الإقليم 2. وعلى الرغم من أن هذا الجزء غير محدد بنفس الطريقة للإقليمين 1 و3، إلا أنه أضيف حتى يصبح الجدول قابلاً للتطبيق على الوصلات الصاعدة لتكملة الوصلات الهابطة عند التردد 40 GHz.

وإذا علمت بأن عدد الحمولات النافعة على السواتل العاملة حالياً في النطاقات GHz 14/11 هو أكبر بكثير من عددها في نطاقات التردد الأعلى من ذلك، يمكن استناداً إلى الجدول 1 استنتاج ما يلي:

- أن التوزيعات العالمية الأساسية الموزعة للخدمة الثابتة الساتلية عند الترددات GHz 14/11 تستعمل حالياً أكثر بكثير مما تستعمل أجزاء التوزيعات عند الترددات GHz 30/20 التي حددت لاستعمال التطبيقات العالية الكثافة في الخدمة الثابتة الساتلية (HDFSS) مستقبلاً على الصعيد العالمي.
- وأنه لم يبدأ بعد في الخدمة الثابتة الساتلية استعمال الترددات GHz 50/40 المحددة للتطبيقات HDFSS المستقبلية.

2 الخصائص التقنية المحتملة

1.2 الحزم الساتلية

دلت الدراسات التي أجريت على أن أكثر الأنظمة ملاءمة لتقديم خدمات النفاذ إلى الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي عن طريق مطاريف مستعمل سعرها مقدور عليه مُتَحمّل، هي الأنظمة التي تصمم لتتعامل مع محطات نانوية (أي مطاريف فتحات حزمها فائقة الصغر (USAT)) موجودة في طرف المستعمل في الوصلة. وقد اختير في هذه الدراسة قطر يساوي 30 cm كمثال. ولما كان كسب هذه المطاريف صغيراً نسبياً، وخاصة عند الترددات المنخفضة، فإن سعة كل ساتل ستكون قليلة، وهذا يؤدي إلى أن تكون تكلفة البتة الواحدة من المعلومات في القطاع الفضائي مرتفعة نسبياً، إلا إذا كان تصميم كل ساتل يأخذ بالاعتبار إعادة استعمال الترددات عن طريق الحزم النقطية المتعددة.

وتقدم الجداول 3 و4 و5 خلاصات عن المعلمات ذات الصلة بهذه الدراسة، مقتطفة من ملحقات التوصية ITU-R S.1328، كما تقدم أيضاً دلالة عن أبعاد الحزم النقطية التي يحتمل أن تتيسر في الوقت الحاضر أو في مستقبل قريب. وفي حالة النطاقات GHz 14/11، فإن المعطيات الواردة في الجدول 3 قد زيدت بنسب قيم كسب هوائي الاستقبال في الساتل التي اقتطفت من الإجابات التي وردت على استبيان أرسله مكتب الاتصالات الراديوية في عام 1998. ويمكن الافتراض بأن السواتل التي ستصمم في المستقبل الفوري لتوفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق سوف تكون لها حزم نقطية متعددة متجهة نحو هدف محدد بالضبط (هو الكسب المرتفع)، مع الأخذ بالحسبان الخصائص المبينة في الجداول 3 و4 و5. وعليه فقد اختيرت معلمات الجدول 2 لتكون القاعدة التي يستند إليها في تحديد خصائص وصلات المستعمل في الأنظمة الساتلية المناسبة. ولكي تسهل الحسابات فقد تم الانطلاق من الفرضية القائلة بأن الأنظمة الفرعية لهوائيات الساتل سوف تصمم بحيث يكون لزوج حزمتي الإرسال والاستقبال نفس الفتحة، وأن يكون لرقعتيها (أثريهما) على سطح الأرض نفس الموقعين الثابتين.

الجدول 2

الخصائص المختارة لحزمة الساتل النقطية

مدى الترددات في الخدمة FSS	GHz 14/11	GHz 30/20	GHz 50/40
الكسب في مركز الخدمة (dBi)	42	50	55
فتحة الحزمة عند −3 dB (بالدرجات)	1,4	0,6	0,3
عدد (*n*) حزم الإرسال/الاستقبال ثنائية الاستقطاب في كل ساتل	12	32	64

وتجدر الملاحظة هنا أنه مع تناقص فتحة الحزمة، يزداد تطلب دقة التسديد، مما يزيد التحكم في رقعة الحزمة صعوبة وتكلفة.

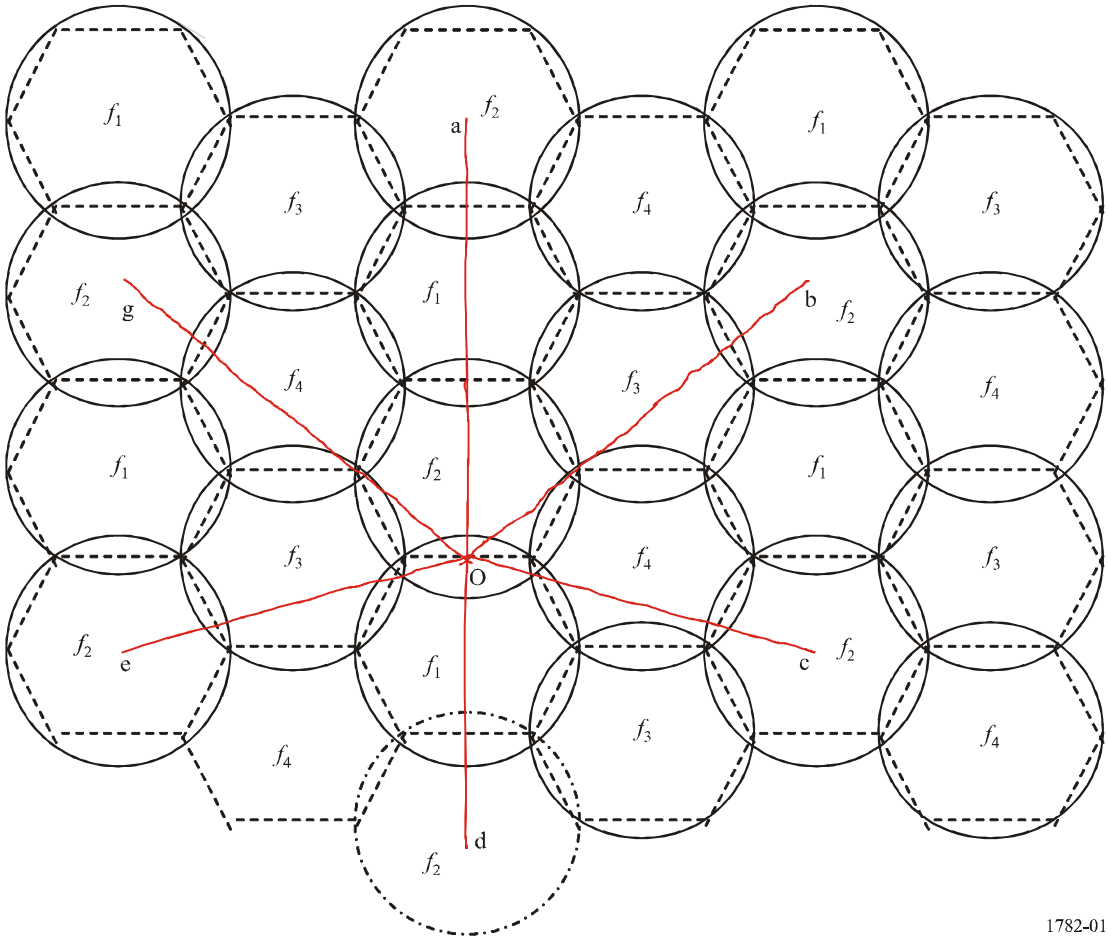
ونظراً إلى التقدم الحاصل في المركبات الفضائية أثناء السنوات الأخيرة، فإن من المعقول أن يفترض وجود ترتيبات لتغذية الهوائي تعوّض انحناء سطح الأرض حتى يكون لجميع الحزم التي يولدها الهوائي رُقع دائرية لها نفس القطر، بصرف النظر عن اتجاه التسديد. وهكذا يكون لكل حزمة، باستثناء الحزمة الموجهة نحو نقطة مسقط الساتل، مقطع عرضي إهليلجي تقريباً،

تتوقف نسبته المحورية (إهليلجيته) وتوجيهه على توجيه التسديد بالنسبة لنقطة مسقط الساتل. وتكون فتحتا الحزمتين للمحور الكبير (φ_a) وللمحور الصغير (φ_b) مرتبطتين بالعلاقة $(\varphi_0) = ((\varphi_b)\cdot(\varphi_a))^{0.5}$، حيث ($\varphi_0$) هي فتحة الحزمة عند 3- dB للحزمة (الدائرية) الموجهة نحو نقطة مسقط الساتل.

وللحصول على تغطية مستمرة بواسطة الحزم المتعددة التي رقعها دائرية، ينطلق من الافتراض بأن التراكبات تشكل شبيكة من سداسيات الأضلاع، كما في الشكل 1.

الشكل 1

شبيكة سداسيات الأضلاع من رُقَع حزم الساتل مع تراكبات



يفترض في مخطط إعادة الاستعمال رباعي الترددات الممثل في الشكل 1، أن كل واحدة من الحزم هي ثنائية الاستقطاب. وبافتراض تأمين معدلات التناقص القابلة للتحقيق عملياً، وسويات الفصوص الجانبية الأولى المشابهة للسويات المشروحة في معادلات التوصية ITU-R S.672، فإن التمييز بين مركز الحزمة وحافتها الأقرب إلى الحزمة التالية المشتركة في التردد معها، ينبغي أن يكون كافياً لهذا الأسلوب من التشغيل. فعند النقطة "0" مثلاً على حافة إحدى المساحات السداسية الأضلاع التي تخدمها حزمة بالتردد f_2، يمكن حساب إسهامات التداخل القادمة من الحزم الست الأقرب إليها، انطلاقاً من الزوايا خارج المحور oa، ob، oc، od، oe وog، التي تكون محمولة على مستوى الساتل. وتكتب حسب هندسة المخطط:

$$oa = 5(\varphi_0/2)\cdot\cos(30°) = 2{,}165(\varphi_0)$$
$$ob = og = (\{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2 + \{3(\varphi_0/2)\cdot\cos(30°)\}^2)^{0.5} = 1{,}984(\varphi_0)$$
$$oc = oe = (\{(\varphi_0/2)\cdot\cos(30°)\}^2 + \{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2)^{0.5} = 1{,}561(\varphi_0) \text{ and}$$
$$od = 3(\varphi_0/2)\cdot\cos(30°) = 1{,}299(\varphi_0)$$

الجدول 3

أبعاد الحزم النقطية من السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض في الخدمة الثابتة الساتلية المصممة للعمل في النطاقات GHz 14/11

أ) معلومات مقتطفة من التوصية ITU-R S.1328

الجدول في ملحقات التوصية ITU-R S.1328	الجدول 2		الجدول 17	الجدول 29
النظام الساتلي	GSO-C	GSO-D	GSO-VX	Pan-Af
كسب الذروة لهوائي استقبال الساتل (dBi)	30	30	33,5	38-32
فتحة حزمة إرسال الساتل عند –3 dB (بالدرجات)	(5,6)	(5,6)	(3,7)	(2,2-4,5)
كسب الذروة لهوائي استقبال الساتل (dBi)			33,5	
فتحة حزمة استقبال الساتل عند –3 dB (بالدرجات)			(3,7)	
الاستقطاب	دائري	دائري ثنائي	دائري ثنائي	خطي
عدد حزم الخدمة لكل ساتل				10

ب) معلومات مقتطفة من الإجابات عن استبيان مكتب الاتصالات الراديوية

إن 90 وصلة من وصلات الترددات GHz 14/11 التي قدمت المعطيات عنها، بلغ كسب الذروة لهوائي استقبال الساتل فيها أكثر من 30 dBi. وهكذا فإن فتحات الحزم المقابلة لنصف القدرة تقل عن 6°، لذلك يمكن اعتبار هذه الحزم حزماً نقطية.

وقيم هذا الكسب محصورة بين 30,1 و45,6 dBi، مع قيمة متوسطة هي 36,5 dBi، وهذا يقابل فتحات حزم تبلغ 5,5° (عظمى) و0,93° (صغرى) و2,7° (وسطى) على التوالي.

الجدول 4

أبعاد حزم السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض (GSO) في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) المصممة لتستعمل النطاقات GHz 30/20

الجدول في ملحقات التوصية ITU-R S.1328	الجدول 1		الجدول 2		الجدول 3			الجدول 5		الجدول 6	الجدول 12		الجدول 13
النظام الساتلي	GSO13	GSO20	GSOF	GSO30	GSO11	GSO12	GSO13	النظام P		النظام Q	GSO Ka-J		EKX
كسب الذروة لهوائي إرسال الساتل (dBi)	46,5	43,5	49	55	49,5	33	46,5	53,2	46,2	49	41	47	48,4
فتحة حزمة إرسال الساتل عند –3 dB (بالدرجات)	(0,84)	(1,18)	(0,63)	(0,32)	0,44	(3,97)	1,4	0,3	0,6	0,55	(1,58)	(0,79)	(0,67)
كسب الذروة لهوائي إرسال الساتل (dBi)	46,5	43,5	49	55	~50[1]		~47[1]	57,2	47.7	49			48,4
فتحة حزمة إرسال الساتل عند –3 dB (بالدرجات)	(0,84)	(1,18)	(0,63)	(0,32)	(0,56~)		0,9	0,3	0,6	0,55			(0,67)
الاستقطاب	دائري	دائري ثنائي		دائري ثنائي	خطي مضاعف	دائري	دائري ثنائي			دائري ثنائي	دائري	دائري	مضاعف
عدد حزم الخدمة لكل ساتل					7 + 7	1	24 + 24						

[1] مستنتجة من النسبة G/T.

الجدول 5

أبعاد حزم السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض (GSO) في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) المصممة لتستعمل النطاقات GHz 50/40؛ معلومات مقتطفة من التوصية ITU-R S.1328

الجدول في ملحقات التوصية ITU-R S.1328	الجدول 17	الجدول 18	الجدول 19	الجدول 21	الجدول 22	الجدول 27	الجدول 28
النظام الساتلي	GSO-VX	GSO-SV	GSO-LV	GSO-VI	GEOSAT-X	GSOV-B1	GSOV-B2
كسب الذروة لهوائي إرسال الساتل (dBi)	49,0	58,0	52,0	53,0	56,5	51,5	53,1
فتحة حزمة هوائي إرسال الساتل عند –3 dB (بالدرجات)	(0,63)	0,15	0,15	(0,4)	(0,27)	0,3	(0,39)
كسب الذروة لهوائي استقبال الساتل (dBi)	49,0	58,0	52,0	53,0			53,1
فتحة حزمة هوائي استقبال الساتل عند –3 dB (بالدرجات)	(0,63)	(0,22)	0,15	(0,4)			(0,39)
الاستقطاب	دائري ثنائي	دائري ثنائي	دائري ثنائي	دائري ثنائي	دائري ثنائي	خطي	
عدد حزم الخدمة لكل ساتل		40		24	48	24	80

ملاحظات تخص الجداول 3 و4 و5:

الأرقام غير الموجودة داخل قوسين في هذه الجداول أخذت مباشرة من التوصية ITU-R S.1328. وفتحات الحزم الموجودة بين قوسين استنتجت من أرقام كسب الذروة المقابلة، كما يلي في الهوائي المكافيء يكون:

$G_m = 10 \log((4\pi)/\lambda^2(\pi D^2/4)\eta)$

حيث:

G_m: كسب الذروة (dBi)

D: القطر (m)

λ: الطول الموجي (m)

η: كفاءة الفتحة، وليكن 0,65.

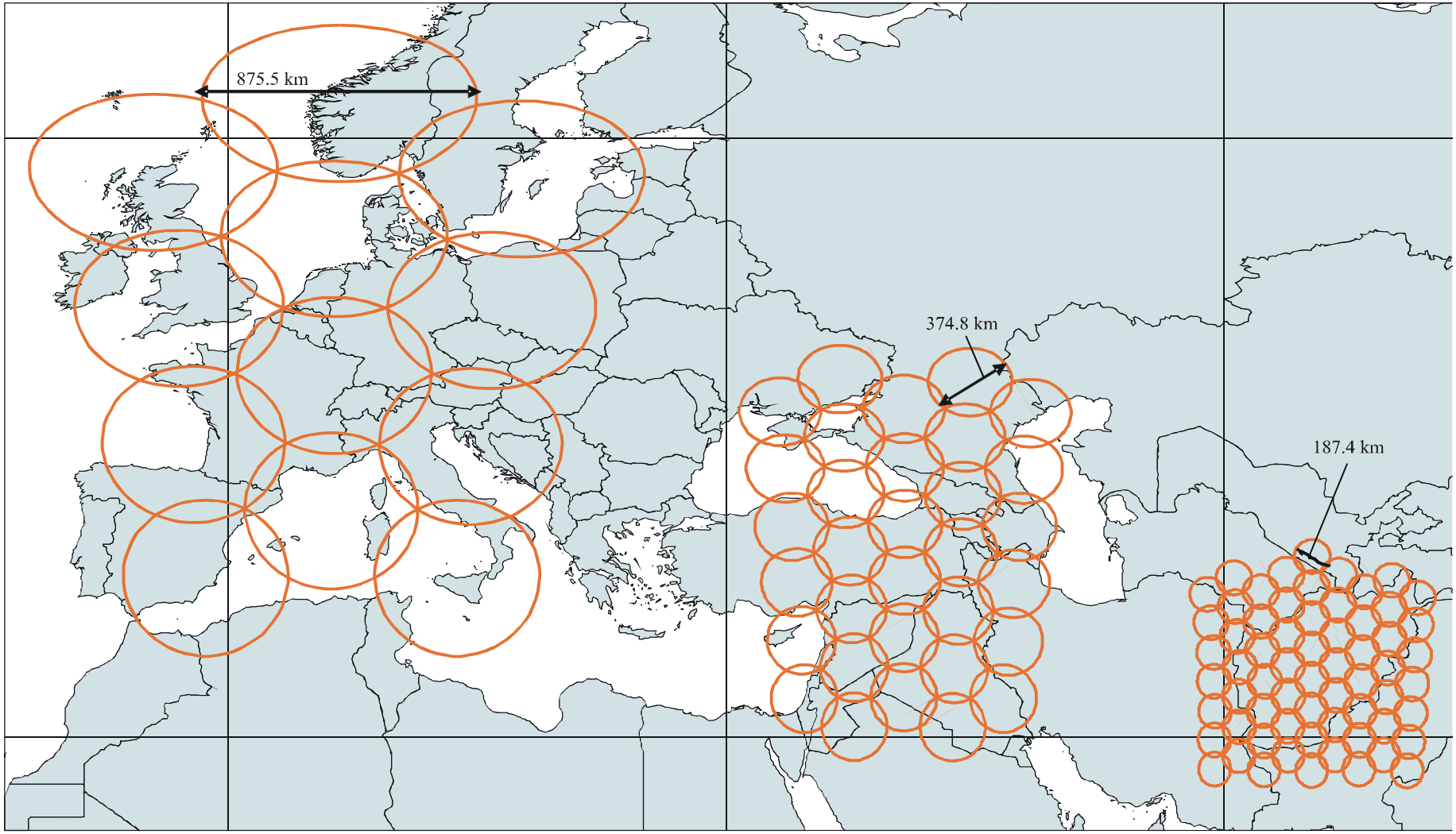
وعليه يكون: $D/\lambda = (10^{0.05Gm})/(\pi\sqrt{(0.65)})$.

ثم إن التعبير الجبري التجريبي لفتحة نصف القدرة هو $\varphi_{-3} = 70\lambda/D$ من الدرجات، وبالتعويض عن D/λ بقيمتها نجد: $\varphi_{-3} = (177{,}3)10^{-0.05Gm}$ بالدرجات.

أما الأحواز المتروكة بيضاء في الجداول فتدل على أن المعطيات ذات الصلة غير موجودة في التوصية *ITU-R S.1328*، ولا يمكن الحصول عليها بطريقة موثوقة من المعطيات المتيسرة.

الشكل 2

أمثلة على ترتيبات لسواتل الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) التي يمكنها توفير النفاذ إلى الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي



رُفَع 12 حزمة
في النطاقات GHz 14/11

رُفَع 32 حزمة
في النطاقات GHz 30/20

رُفَع 64 حزمة في
النطاقات GHz 50/40

وبالرجوع إلى التوصية ITU-R S.672 فيما يخص الحزم الدائرية والإهليلجية البسيطة، نجد أن كسب الفصوص الجانبية الأولى يقل بقدر 25 dB عن كسب الذروة، وإذا افترضنا من ناحية أخرى أن القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) هي نفسها في مركز كل حزمة، وافترضنا كذلك أن نسبة الاستقطابين المتحد والمتقاطع في كل حزمة هي أيضاً 25 dB، تعطى نسبة الموجة الحاملة إلى التداخل *(C/I)* في حالة إعادة استعمال الترددات بالعلاقة:

$$(C/I)_{FR} = -10 \log(7\{10^{-(25/10)}\}) = 16{,}5 \text{ dB}$$

وقيمة هذه النسبة $(C/I)_{FR}$ في الواقع تكون أكبر من ذلك، لأن الإسهامات الستة لا تكون على الغالب كلها في قيمة الذروة للفص الجانبي.

ويوضح الشكل 2 أمثلة على تغطية السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض التي يوجز ترتيبات حزمها الجدول 2. ويلاحظ أن التغطية الكلية تنخفض بشدة بتناسب عكسي مع التردد.

2.2 أمثلة على معلمات الوصلة

تتطرق هذه الدراسة إلى الحالة التي ينفذ فيها المستعملون الأفراد إلى الساتل مباشرة عبر المحطات النانوية (المطاريف التي فتحات حزمها فائقة الصغر (USAT)). والخيار البديل الكامن في استعمال محطات أرضية هوائياتها كبيرة، مدروس في الملحقين الثاني والثالث.

أجريت الحسابات التي تعطي معلمات وصلات المستعمل إلى الساتل، من أجل مجموعات نطاقات التردد الثلاث المشروحة في البند 1، باستخدام الافتراضات التالية:

- إذا كانت المحطات الأرضية للمستعمل مبنية على المطاريف USAT، فإن المحطات الأرضية التي ستتواصل معها عبر الساتل والتي ستكون بمثابة سطح بيني مع الإنترنت، ستكون هوائياتها كبيرة وستدعى فيما يلي "المحطات القاعدة". وسيكون عدد المحطات القاعدة أقل بكثير من مطاريف المستعملين.
- استعمال التشكيل بالإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK) مع معدل 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي. ويتم بلوغ عتبة التيسر عندما يهبط معدل الخطأ في البتات (BER) إلى 1×10^{-6} عند مخرج مزيل التشكيل، وهذا يقابل نسبة C/N تساوي 8,5 dB. وإذا اعتبرنا الانحطاط الناجم عن وصلة التغذية وعن التداخل الناجم عن إعادة استعمال الترددات المبحوث في الفقرة 1.2 (حيث $C/I = 16{,}5$ dB)، فإن قيمتي النسبتين $(C/N)_{\uparrow}$ و$(C/N)_{\downarrow}$ المطلوبتين عند العتبة يجب ألا تقلا عن 9,85 dB.

الملاحظة 1 – إن استعمال معدل قدرة 1/2 لتصحيح الأخطاء الأمامي (FEC). وإضافة تشفير من نوع ريد-سولومون، يخفض قيمة C/N المطلوبة، وبذلك تنخفض قيمة القدرة المشعة المكافئة المتناحية في الوصلتين الصاعدة والهابطة والقدرة الأولية للساتل. والتشفير تيوربو (العنفي) هو إمكانية أخرى لتحقيق نفس الأهداف. وقد أضيفت إلى النتائج فيما يلي النتائج المبنية على قيم العتبة للنسبتين $(C/N)_{\uparrow}$ و$(C/N)_{\downarrow}$ المساوية 7,0 dB بافتراض تشفير أكثر فعالية.

- ستتحمل الأنظمة التعامل مع مطاريف المستعمل التي قطر هوائياتها 30 cm، الأمر الذي سيساعد على تخفيض الأسعار وتسهيل الحصول على مطاريف محمولة. وعندئذ يمكن أن يكون كسب هوائي الإرسال مساوياً 30,2 dBi عند التردد 12,75 GHz و31,0 dBi عند التردد 14 GHz و37,2 dBi عند التردد 28,45 GHz و41,7 dBi عند التردد 48,2 GHz. ويمكن أن يكون كسب هوائي الاستقبال مساوياً 28,7 dBi عند التردد 10,7 GHz و28,9 dBi عند التردد 10,95 GHz و34,0 dBi عند التردد 19,7 GHz 40,1 dBi عند التردد 40 GHz.
- والقيم الصغرى لزوايا ارتفاع التشغيل تساوي 10° عند الترددات 14/11 GHz و17° عند الترددات 30/20 GHz و25° عند الترددات 50/40 GHz.

- وتثبت سويات القدرة المشعة المكافئة المتناحية (e.i.r.p.) عند قيم تدخل الهوامش التالية لتراعي الانحطاط المعزوّ إلى الخبو الناجم عن المطر، أثناء 99% من الوقت على الأقل في أغلب المناخات:
  - في الوصلات الصاعدة: 4,5 dB عند التردد 14 GHz، 11 dB عند التردد 30 GHz و21 dB عند التردد 50 GHz؛
  - في الوصلات الهابطة: 3,5 dB عند التردد 11 GHz و7 dB عند التردد 20 GHz و20 dB عند التردد 40 GHz.
- ومن المحتمل أن يستعمل التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة في نطاقات الترددين 30 و50 GHz، وربما باستثناء المناخات الأكثر جفافاً، بغية تصغير احتمال إحداث التداخل إلى أدنى حد. ومع ذلك تبقى مطاريف المستعمل تتطلب مراحل عند مخارجها قادرة على توليد القدرة المشعة المكافئة المتناحية المحسوبة مع الهامش، حتى ولو انخفضت السوية بشكل محسوس معظم الوقت. والتحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة يمكن أن يحتفظ بسعة البطارية في المطاريف المحمولة، غير أن القدرة المشعة المكافئة المتناحية في ظروف الجو الصافي يجب أن تبقى فوق عتبة التيسر بحوالي 2,5 dB، لتأمين معدل في خط البتات يساوي على الأقل 1×10^{-9}.
- القيم الدنيا لكسب حزمة الساتل المستعملة في الحسابات كانت تقل بقدر 3 dB عن القيم المعطاة في السطر الثاني من الجدول 2، أي قيم حافة الحزمة.
- يمكن لدرجة حرارة الضوضاء في الوصلة الصاعدة، مع تسامح للتداخل الخارجي، أن تكون من رتبة 800 k في نطاق الترددات 14 GHz، و1 000 k في نطاق الترددات 30 GHz، و1 200 k في نطاق الترددات 50 GHz.
- ويمكن لدرجة حرارة الضوضاء في الوصلة الهابطة، ومع تسامح أيضاً للتداخل الخارجي، أن تكون من رتبة 200 k في نطاق الترددات 11 GH، و300 k في نطاق الترددات 20 GHz، و500 k في نطاق الترددات 40 GHz.
- وفي تفسير المصطلحين "عريض النطاق" و"معدل المعطيات العالي" المطبقين على النفاذ إلى الإنترنت، يفترض فيهما تطبيق معدل بتات للمستعمل قدره 2 Mbit/s في كلا اتجاهي الإرسال إلى الساتل ومنه. وفيما يخص التشكيل بالإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK) مع معدل قدره 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي، مع مراعاة هامش للتشفير بالتقطيع التدريجي بالتجب قدره 50%، فهذا يقابل عرض نطاق قدره 1,6 MHz لكل موجة حاملة.

وعند نقل هذه الافتراضات إلى معادلات موازنة الوصلة، نحصل على السويات التالية للقدرة الحاملة التي يجب أن يغذى بها هوائي مطراف المستعمل في ظروف الجو الصافي (الأرقام الموجودة بين متعانقتين، {}، تقابل الافتراض المذكور أعلاه بشأن التشفير مع تصحيح أخطاء إضافي، وعرض النطاق المصاحب لكل موجة حاملة يكون حوالي 3 MHz).

نطاق الترددات 14 GHz: 14,3 dBW (27 W)، أو بوجود التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة 12,3 dBW (17 W)؛
{11.5 dBW (14 W)} {9,5 dBW (8,8 W)}

نطاق الترددات 30 GHz: 13,6 dBW (23 W)، أو بوجود التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة 5,1 dBW (3,2 W)؛
{10,8 dBW (12 W)} {2,3 dBW (1,7 W)}

نطاق الترددات 50 GHz: 19,2 dBW (83 W)، أو بوجود التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة 0,7 dBW (1,2 W)؛
{16,4 dBW (43 W)} {2,2− dBW (0,6 W)}

ونحصل على السويات للقدرة الحاملة الواجب تطبيقها على هوائي إرسال الساتل:

نطاق الترددات 11 GHz: 7,3 dBW (5,4 W)؛
{4,5 dBW (2,8 W)}

نطاق الترددات 20 GHz: 4,4 dBW (2,8 W)؛
{1,6 dBW (1,4 W)}

نطاق الترددات 40 GHz: 14,4 dBW (27,5 W)؛

{11,6 dBW (14,3 W)}.

من المفترض أن التحكم في القدرة لن ينفذ على الوصلات الهابطة، لذلك ولما كانت هوامش المطر المفترضة هي كلها أكبر من 2,5 dB، فإن معدل الخطأ في البتات (BER) في الجو الصافي يكون أفضل من 1×10^{-9} في الاتجاه من المحطة المركزية إلى مطراف المستعمل في كل الوصلات الهابطة الثلاث.

ولما كانت متطلبات الصحة العامة بشأن تجهيزات المستعمل تقع خارج سلطة الاتحاد، فإن من المهم لمخططي الأنظمة أن يكونوا واعين لسويات الحماية من الإشعاع المحددة على الصعيدين الوطني والدولي، وللإرشادات التي تضمن التقيد بهذه السويات، وخاصة في حالة الانتشار في كل مكان.

3.2 سعة كل ساتل (Cs)

الملاحظة 1 – النتائج الواردة في هذه الفقرة، وكذلك في الفقرة 3، جرى حسابها بشأن الموجات الحاملة بالإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة مع تشفير معدله 3/4. وتوجد في نهاية هذه الفقرة، وكذلك في نهاية الفقرة 3، نتائج تقريبية مقابلة، قائمة على تشفير أشد، كما هو مذكور في الفقرة 2.2.

وتكون قدرة الخرج من المرسل–المستجيب في العديد من سواتل الاتصالات تساوي حوالي 40 W عند إشباع الموجة الحاملة الواحدة، كما بنيت مرسلاتها المستجيبة أقوى تصلح لتطبيقات معينة. وهناك عدد من سواتل النطاقات 14/11 GHz تدور في المدارات بمرسلات–مستجيبة تبلغ قدرتها ما بين 90 و120 W. وفي أسلوب تعدد الموجات الحاملة، يلزم تطبيق تخفيض يبلغ حوالي 4 dB على الخرج، للاحتفاظ بآثار التشكيل البيني في سوية منخفضة بقدر كافٍ عن قيمة الانحطاط الناجم عن إعادة استعمال الترددات، مما يخفض قدرة الخرج المستعملة إلى حوالي 16 W. وحسب قيم قدرة الخرج المحسوبة في الفقرة 2.2 لكل موجة حاملة واحدة خارجة من مرسل الساتل، فإن هذه القيمة تلائم استخدام عدد قليل جداً من الموجات الحاملة (يكون عرض نطاق كل منها 1,6 MHz) في كل مرسل–مستجيب. وعليه فإن العدد الكبير من المرسلات–المستجيبة اللازم لاستعمال النطاق 500 MHz بكامله لا يشكل الحمولة النافعة المثلى، وهذا يفترض أن تستعمل مرسلات–مستجيبة أعلى قدرة في هذا التطبيق. لذلك يفترض أن قدرة الخرج من المرسل–المستجيب التي تبلغ 100 W عند الإشباع، أي 40 W مع تخفيض القدرة عند المخرج بقدر 4 dB، تستعمل في سواتل النطاقات 14/11 GHz و30/20 GHz. وفي حالة ساتل يعمل في النطاقات 50/40 GHz تكون قدرة المرسل–المستجيب مساوية 500 W عند الإشباع، أي 200 W بعد تخفيض القدرة عند المخرج، بعد مراعاة هامش الخبو الكبير على الوصلة الهابطة. ومن الجدير ذكره أنه يمكن محاربة الخبو بوسائل أخرى غير توفير قدرة مشعة مكافئة متناحية كبيرة–باستعمال التشفير التكيفي مثلاً – وقد تكشف دراسة لاحقة بديلاً آخر مفضلاً يستعمل مرسلات–مستجيبة منخفضة القدرة، بغرض الحدّ من متطلبات الساتل ومطراف المستعمل من القدرة. وقد يبدو هذا الأمر أولوياً في حالة النطاقات 50/40 GHz لأن المرسلات بقدرة 500 W ليست محققة عملياً في الترددات 40 GHz في الوقت الراهن، بينما تتيسر المرسلات في الوقت الحاضر بقدرة 100 W للسواتل العاملة بالترددات 11 GHz و20 GHz.

ففي حالة ساتل يعمل في النطاقات 30/20 GHz، يكون عدد الموجات الحاملة التي سعة كل منها 2 Mbit/s والتي يمكن أن يرسلها مرسل–مستجيب واحد يساوي $40 \div 2{,}8 = 14$ موجة حاملة. وإذا افترضنا النطاق الحارس بين الموجات الحاملة يبلغ 10%، يكون عرض النطاق اللازم للمرسل–المستجيب مساوياً $1{,}6 \times 1{,}1 \times 14 = 24{,}6$ MHz وهو ما يتسق مع الفاصل البالغ 25 MHz ما بين المرسلات–المستجيبة المتجاورة. وهذا يمكّن من توصية خمسة مرسلات–مستجيبة إلى كل حزمة ساتل، مما يعطي عرض نطاق كلياً لكل حزمة يبلغ 125 MHz وعرض نطاق قدره 500 MHz لأربع حزم. وهذه المعلمات تتلاءم مع مخطط إعادة استعمال 4 ترددات المبين في الشكل 1. وعليه يمكن حساب السعة الكلية لمثل هذا الساتل كما يلي:

السعة = (2 Mbit/s لكل موجة حاملة) × (14 موجة حاملة في المرسل–المستجيب) × (2 من الاستقطابات)
× (5 مرسلات مستجيبة لكل استقطاب في كل حزمة) × (32 حزمة) = 8 960 Mbit/s

وبنفس الطريقة تحسب سعة الساتل العامل في النطاقات GHz 14/11، فتكون Mbit/s 3 024، وهي تساوي Mbit/s 16 128 للساتل العامل في النطاقات GHz 50/40. وتبين الأشكال 3 و4 و5 ترتيبات المرسلات–المستجيبة والحزم المشروحة أعلاه في كل واحدة من مجموعات النطاقات الثلاث.

ويلاحظ أن عدد المرسلات–المستجيبة كبير لكل ساتل. فالساتل العامل في النطاقات GHz 14/11 يعدّ 216 مرسلاً–متسجيباً، الأمر الذي يمكن تحقيقه عملياً باستخدام مراحل الخرج المعتمدة على أشباه الموصّلات، وتكون القدرة الأولية اللازمة من رتبة kW 54. والأعداد المقابلة للساتل العامل في النطاقات GHz 30/20 هي 320 مرسلاً–مستجيباً و80 kW، وللساتل العامل في النطاقات GHz 50/40 لا تقل عن 1 152 مرسلاً–مستجيباً و1,44 MW. والمركبات الفضائية العاملة في النطاقات GHz 14/11 وGHz 30/20 تكون أبعادها كبيرة وغالية الثمن نسبياً[3]، لذلك يستحق البحث في كل حالة إمكانية تقسيم التغطية بين ساتلين (أو أكثر) يشغلان نفس الموقع الاسمي، ويكون لكل منهما عدد أصغر من الحزم ومن المرسلات–المستجيبة، وقدرة أولية أخفض. وهذا الخيار يبدو لا بد منه في حالة الترددات GHz 50/40، حيث يحتاج الأمر إلى تقسيم التغطية بين حوالي 20 ساتلاً أصغر، فقط لتصغير أبعاد وقدرة كل منها حتى تصبح مساوية لساتل واحد يعمل في النطاقات GHz 14/11 أو النطاقات GHz 30/20.

الملاحظة 1 – بافتراض أن تشفيراً مع تصحيح أخطاء أكثر فعالية يقود إلى خطط مرسل–مستجيب تختلف عن خطط الأشكال 3 و4 و5، نظراً إلى أن عرض النطاق لكل موجة حاملة هو أكبر، غير أنه بالمقارنة بما سبق، يمكن أن تكون المعلمات الأساسية تقريباً كما يلي:

سعة كل ساتل:

Mbit/s 1 612 في GHz 14/11؛ Mbit/s 4 778 في GHz 30/20؛ Mbit/s 8 600 في GHz 50/40

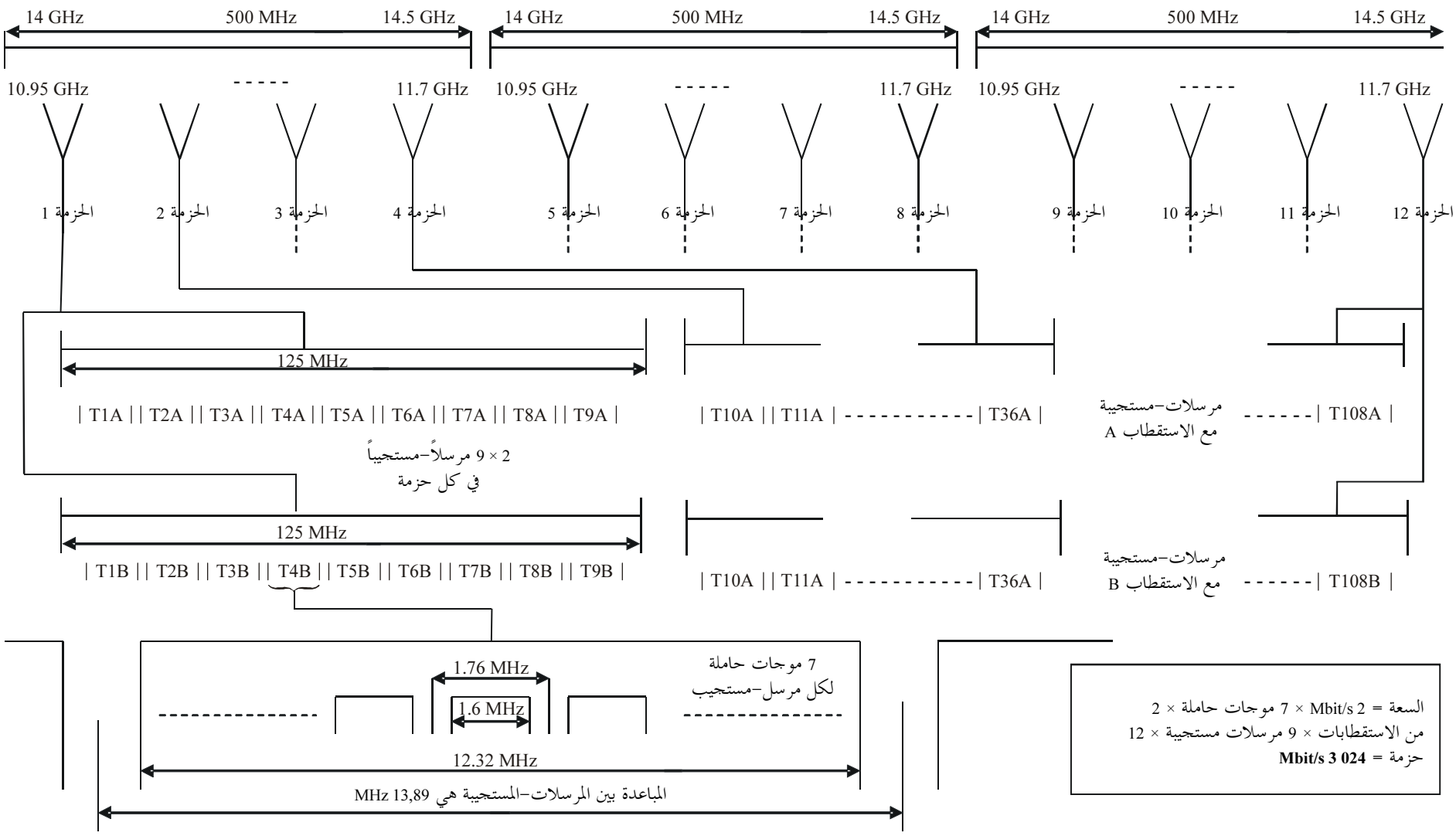
القدرة الأولية للساتل:

kW 29 في GHz 14/11؛ kW 43 في GHz 30/20؛ kW 770 في GHz 50/40.

[3] إن تكلفة إنشاء وإطلاق صاروخ كبير الأبعاد يمكن تحقيقه واقعياً تصل إلى عدة مئات من ملايين الدولارات الأمريكية في عام 2006.

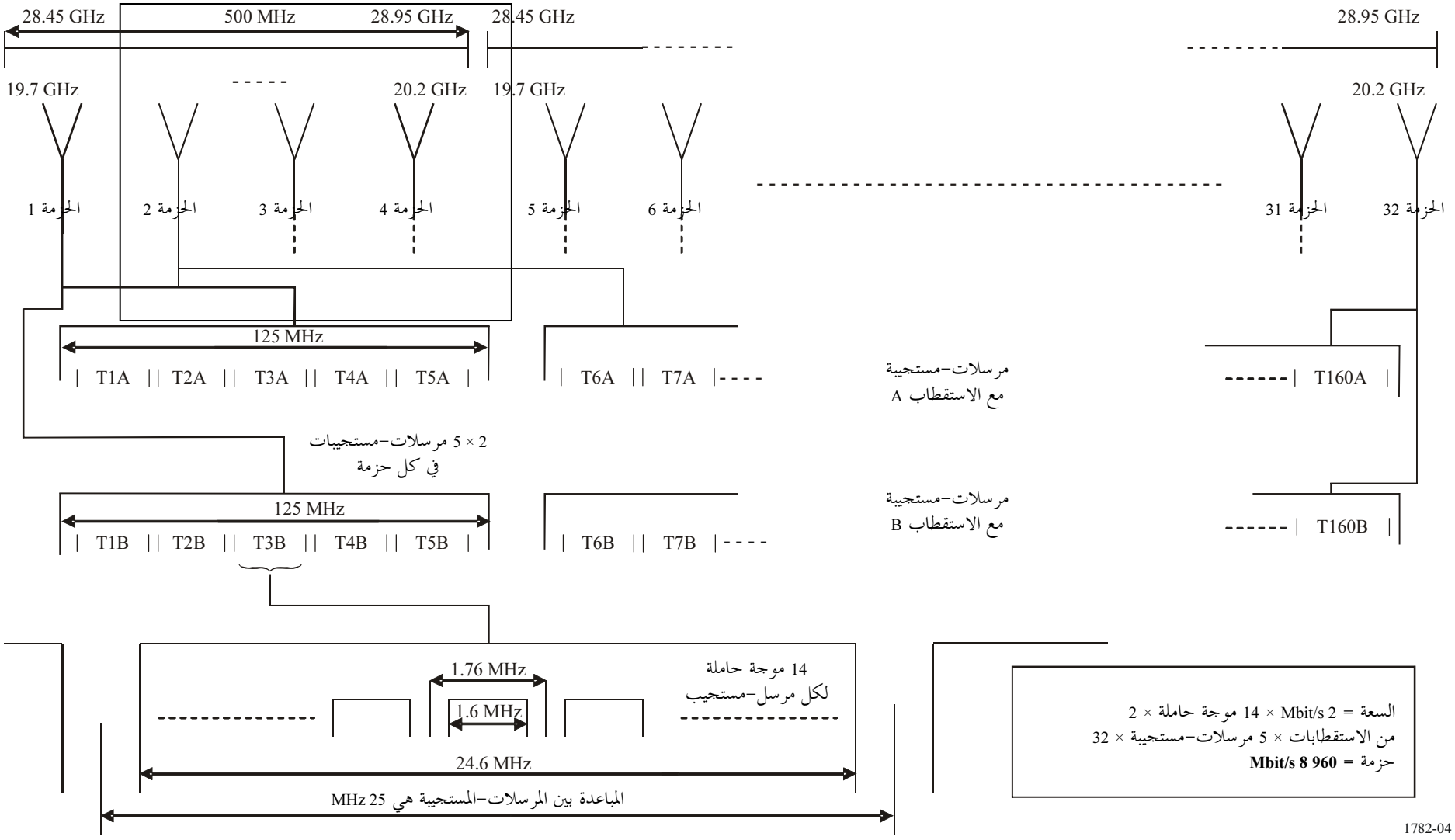
الشكل 3

ترتيبات المرسلات-المستجيبة والحزم لساتل الخدمة الثابتة الساتلية العامل في GHz 14/11 المصمم لتوفير النفاذ إلى الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي



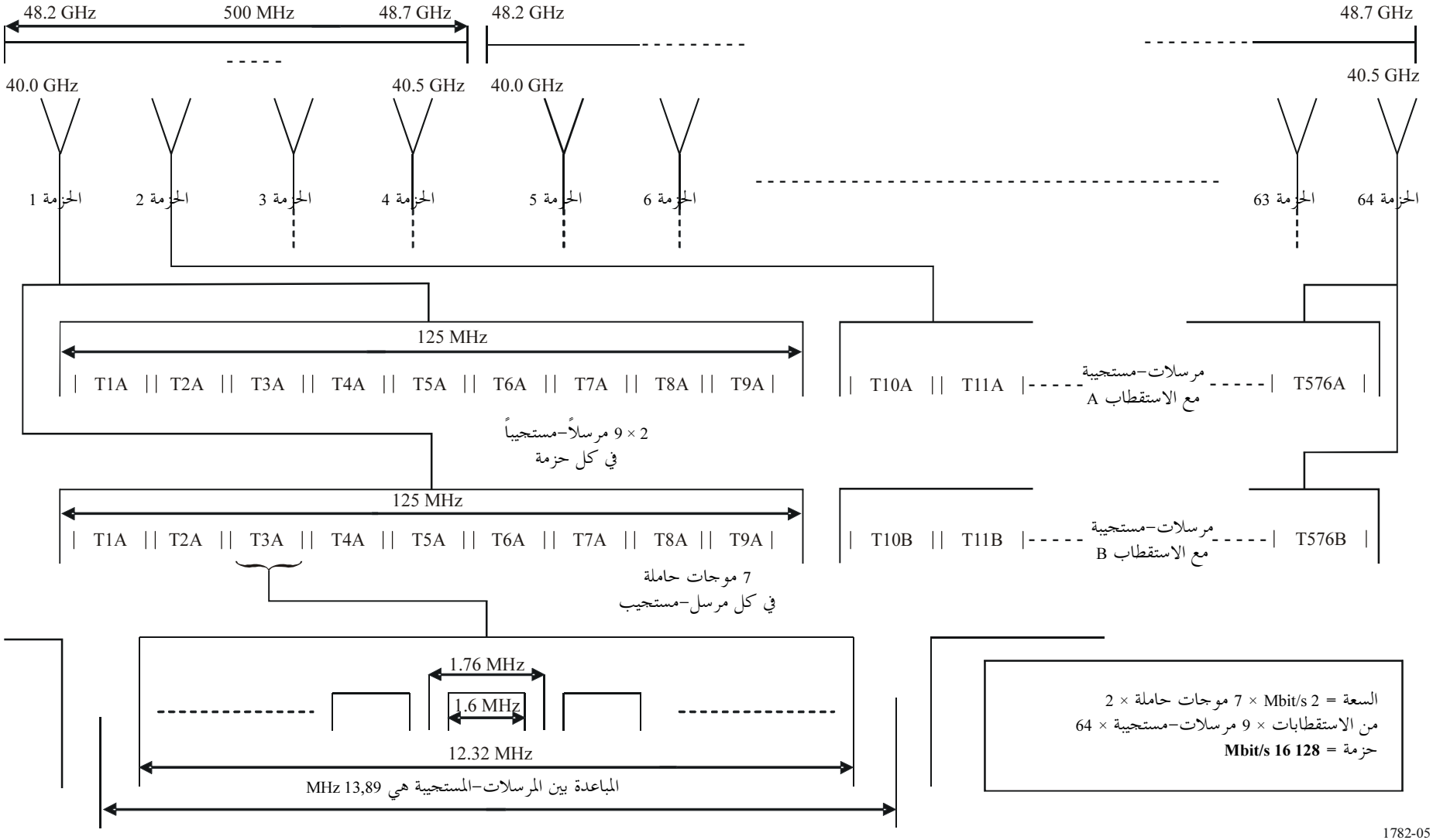
الشكل 4

ترتيبات المرسلات-المستجيبة والحزم لساتل الخدمة الثابتة الساتلية العامل في GHz 30/20 المصمم لتوفير النفاذ إلى الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي



الشكل 5

ترتيبات المرسلات-المستجيبة والحزم لساتل الخدمة الثابتة الساتلية العامل في GHz 50/40 المصمم لتوفير النفاذ إلى الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي



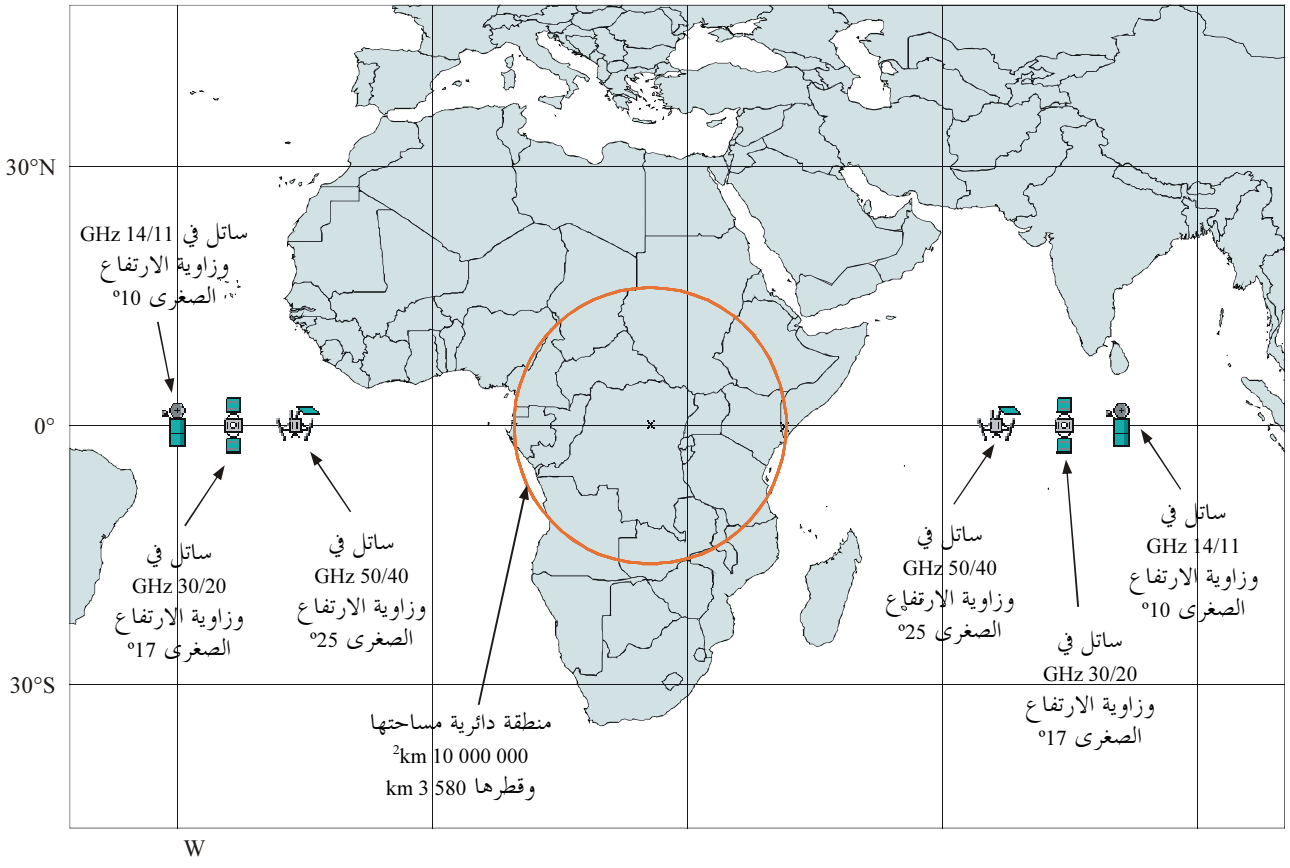
وفيما يخص القدرة الأولية للساتل، تجدر الملاحظة بأن القيمة العظمى المطبقة على المنصات المصممة حتى هذا اليوم هي 20 kW، لذلك من المفيد دراسة الوسائل التي تخفض هذه القيمة. وفي هذا الصدد يجدر البحث عن إمكانية الاحتفاظ بتعدد النفاذ بتقسيم التردد (FDMA) للوصلات الصاعدة، على أن يستعمل تعدد النفاذ بتقسيم الزمن (TDMA) على الوصلات الهابطة، مما يساعد على التخلص من الحاجة إلى خفض قدرة المرسل–المستجيب، وبذلك تخفض القدرة الأولية للساتل بقدر 4 dB.

3 السعة الكلية الكامنة (C_T)

لكي يمكن التعبير عن السعة الكلية لسواتل الخدمة الثابتة الساتلية في نطاق معيّن حتى يمكنها تقديم النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق، يلزم تحديد المنطقة الجغرافية المعنية. ومن بين الخيارات الممكنة لهذه المنطقة، سطح الكرة الأرضية بكاملها، وكل المنطقة البرية من سطح الكرة الأرضية، وسطح الكرة الأرضية المحصور بين خطي عرض معينين (بين 60° شمالاً و60° جنوباً مثلاً)، والمنطقة البرية بين خطي عرض معينين، والمنطقة البرية التي تزيد الكثافة السكانية فيها عن حد أدنى معين، وأمثلة أخرى مختلفة من المناطق ذات الأبعاد وخطوط العرض المعينة. ويقترح أن تقوم دراسات وتجري نقاشات لكي يتحدد الخيار الأكثر فائدة. ولأغراض هذه الدراسة الأولية، فقد اختيرت منطقة دائرية تبلغ مساحتها 10 000 000 km^2 يقع مركزها على خط الاستواء. ويبين الشكل 6 مثالاً على مثل هذه المنطقة واقعة في إفريقيا الوسطى، والنتائج ستكون هي ذاتها في أي موقع آخر استوائي.

الشكل 6

مثال على منطقة استوائية مساحتها 10 ملايين km^2



1782-06

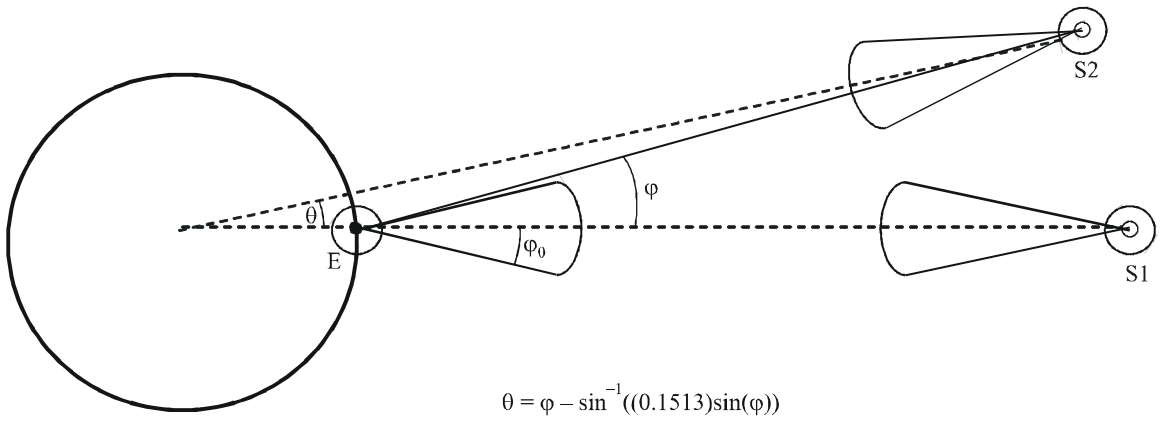
ولما كانت زوايا الارتفاع الدنيا مختلفة في المجموعات الثلاث من نطاقات التردد، فإن مديات خطوط الطول التي يستطيع فيها ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض أن يخدم منطقة مرجعية هي الأخرى تكون مختلفة في هذه المجموعات الثلاث. والشكل 6 يبين هذه المديات ولها القيم الرقمية التالية:

- وفي النطاقات GHz 14/11، من 30,1° غرباً إلى 81,0° شرقاً، يكون مدى خطوط الطول 111,1°؛
- وفي النطاقات GHz 30/20، من 23,4° غرباً إلى 74,3° شرقاً، يكون مدى خطوط الطول 97,7°؛
- وفي النطاقات GHz 50/40، من 15,8° غرباً إلى 66,7° شرقاً، يكون مدى خطوط الطول 82,5°.

إن عدد السواتل الموجودة في هذه المديات وتستطيع تخديم المنطقة باستخدام نفس الترددات وتشكيلات الحزم، يتوقف على المباعدة الصغرى ما بين السواتل المتجاورة، وهذه المباعدة تتوقف بدورها على سوية التداخل المقبول الذي تسببه للوصلتين الصاعدة والهابطة في ساتل معين السواتل التي تجاوره. ولكن لا تتأثر تأثراً محسوساً النسب الكلية *C/N* (حاملة/ضوضاء) المحسوبة في الفقرة 2.3، فإن نسبة الموجة الحاملة إلى التداخل لكل واحد من هذه السواتل ($(C/I)_{ADJ}$) ينبغي أن تساوي 23 dB على الأقل. وكما يبين الشكل 7 فإن سوية التداخل تتحدد أساساً بالتمييز الذي تقدمه مخططات الإشعاع لهوائيات الإرسال والاستقبال في مطاريف المستعمل، وبمعدلات تناقص الإشعاع في سواتل أخرى، غير المركبتين الفضائيتين المجاورتين اللتين تأثيرهما مهمل (بافتراض التباعد هو نفسه).

الشكل 7

التداخل بين السواتل المتجاورة



1782-07

يمثل E محطة أرضية للمستعمل تعمل مع الساتل S1، والمسير E-S2 هو مسير التداخل القاصد إلى الساتل المجاور S2 والقادم منه. ولما كان الساتلان S1 وS2 يخدّمان المنطقة ذاتها، فإن أي مخطط إشعاع لهوائي فيهما لا يقدم تمييزاً محسوساً في اتجاه مسير التداخل. فالتداخل الذي تسببه المحطة E للساتل S2 يحدث في الاتجاه φ° بالنسبة إلى محور هوائي المحطة E، والتداخل الذي تتلقاه المحطة E قادماً من الساتل S2 يحدث أيضاً عند سوية هذه الزاوية بالنسبة إلى المحور. ولما كانت هذه الدراسة تستخدم نمطاً وحيداً من الموجات الحاملة، تكون قيمتا القدرة المشعة المكافئة المتناحية للمحطتين الأرضيتين "المطلوبة" و"المسببة للتداخل" هما نفساهما، وكذلك تكون قيمتا هذه القدرة للساتلين "المطلوب" و"المسبب للتداخل" هما نفساهما أيضاً. لذلك ينتج التعبير التالي لحالتي الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة كلتيهما:

$$(C/I)_{ADJ} = G_M - G(\varphi)$$

حيث:

G_M: الكسب وفق محور هوائي المحطة E

$G(\varphi)$: الكسب وفق اتجاه التداخل.

مع الاحتفاظ بالافتراض السابق بأن قطر الهوائي يساوي 30 cm في مطراف المستعمل، تكون فتحات الحزم (φ_0) التي تقابل أخفض تردد في كل واحد من مجموعات النطاقات المختارة كما هي محسوبة في الجدول 6.

الجدول 6

أكبر عدد من السواتل المشتركة في التغطية والتردد ($\varphi_0 = 70.\lambda/D$)

التردد (GHz)	10,95	14,0	19,7	28,45	40,0	48,2
فتحة الحزمة (φ_0°)	6,39	5,0	3,55	2,46	1,75	1,45
φ_{min} (بالدرجات)	8,84	6,92	4,91	3,40	2,42	2,01
θ_{min} (بالدرجات)	7,51	5,88	4,17	2,89	2,05	1,71
العدد *(N)*	**14**	18	**23**	33	**40**	48

وإذا افترض أن التناقص في الحزمة الرئيسية يتم وفقاً لقانون تربيعي، $G(\varphi) = G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2$ dBi، فإن التمييز الأصغر اللازم يحصل عندما يكون: $G_M - (G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2) = 23$ dB، أي عندما يكون $12(\varphi/\varphi_0)^2 = 23$ dB. وإذا وضعنا $\varphi = 1.384\varphi_0$ للمباعدة الزاوية الصغرى بين السواتل، فقد عبّر عن هذه الزوايا بالرمز φ_{min} في السطر الثالث من الجدول 6. وقيم الزاوية θ المقابلة مبينة في السطر الرابع. وإذا علمنا أن مباعدة زاوية بين السواتل قدرها 3° (أو 2° في الإقليم 2) معتمدة عادة للشبكات التقليدية في الخدمة الثابتة الساتلية العاملة في النطاقات GHz 14/11، فإن قيم θ_{min} الواردة في الجدول 6 تبين أن من الصعوبة بمكان تحقيق التقاسم مع الأنظمة الموجودة حالياً في هذه النطاقات. وفيما يخص النطاقات GHz 30/20، فإن قيم θ_{min} لا تتواءم أيضاً مع المباعدة المقصودة البالغة 3° أو 2°، ولكن يلاحظ على الأقل أن هناك عدداً صغيراً فقط من السواتل موجودة حالياً، ولذلك فإن قضايا التقاسم تبقى افتراضية في جزئها الأكبر. ويمكن القول بأن قيم θ_{min} تبين بصورة عامة أن استعمال هوائيات صغيرة في مطاريف المستعمل يحدّ من فعالية موردي المدار والطيف.

وعندما تقسم قيم مديات خطوط الطول المبينة في الشكل 6 على θ_{min}، ينتج عدد السواتل العاملة بنفس التردد وتخدم المنطقة المرجعية في كل واحد من النطاقات البالغة MHz 500. وهذا العدد مبين في السطر الخامس من الجدول مقابل الرمز "*N*". ولما كانت الدراسة الحالية تهتم فقط بالتوصيلات ثنائية الاتجاهات، فإن قيم *N* التي تنطبق على الحالة المعتبرة تحددها ترددات الوصلة الهابطة وهي مكتوبة بأرقام سوداء في الجدول 6.

ويمكن استنتاج مساحة المنطقة السداسية *A* الواقعة داخل رقعة حزمة واحدة للساتل من الهندسة الممثلة في الشكلين 1 و2، وهي تحسب من المعادلة: $A = 383(1 - \cos(d/222.63))$ 211 375 km^2، حيث *d* هو قطر الرقعة (km) كما هو مبين في الشكل 2. وعليه تكون قيم *A* المطلوب استعمالها هنا هي:

A = 497 683,88 km^2 للنطاقات GHz 14/11، 38,83 912 km^2 للنطاقات GHz 30/20، 22 810,94 km^2 للنطاقات GHz 50/40

وبعد أن تضرب مساحات هذه الرقع بعدد الحزم لكل ساتل *n* المبين في الجدول 5، وتقسّم الجداءات على مساحة المنطقة المرجعية المبينة في الشكل 6، يتم الحصول على عدد السواتل من الأنماط المشروحة في الفقرة 3 التي يمكنها تخديم المنطقة المرجعية من موقع وحيد في المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض. وهذه الأعداد ليست بالضرورة أعداداً صحيحة، لأن رُقع بعض الحزم قد تقع خارج المنطقة المرجعية، وتمثل كسوراً من سعة كل ساتل لا تكون متيسرة للمستعملين الموجودين في المنطقة المرجعية. ويعبر عن السعة الكلية C_T بالعلاقة التالية:

$$C_T = N.C_S.(10\ 000\ 000)/(A.n) \text{ Mbit/s}$$

حيث C_S هي سعة كل ساتل كما هو مبين في الفقرة 3.

وعليه فإن قيم السعة C_T للتوصيلات ثنائية الاتجاهات في النطاقات MHz 500 المختارة هي القيم التالية تقريباً:

GHz 11,2-10,95 + GHz 11,7-11,45 على الوصلة الهابطة وGHz 14,50-14,00 على الوصلة الصاعدة – **71 {38} Gbit/s**؛

GHz 20,2-19,7 على الوصلة الهابطة وGHz 28,95-28,45 على الوصلة الصاعدة – **706 {380} Gbit/s**؛

GHz 40,5-40,0 على الوصلة الهابطة وGHz 48,70-48,20 على الوصلة الصاعدة – **4400 {2400} Gbit/s**.

الملاحظة 1 – الأرقام الواردة بين متعانقتين تعود إلى افتراض تشفير مع تصحيح أخطاء أشد.

وبالنظر إلى التكلفة التي يحتاجها تركيب وإطلاق ساتل كبير، يتضح أن اقتراح سعات من هذه الرتبة يكون باهظ الثمن. وعلى كل حال فإن السوق الكامنة للنفاذ إلى الإنترنت على صعيد عالمي بمعدل معطيات عالٍ هي سوق ذات أهمية عالية.

هذه السعات هي للاستعمال المستمر، وبافتراض أن معدل المستعمل هو Mbit/s 2، يكون أكبر عدد من التوصيلات ثنائية الاتجاهات المتآونة يساوي نصف السعة في كل زوج من النطاقات. وإذا كانت الموجات الحاملة المختلفة توزع على أساس دينامي "حسب الطلب"، فإن عدد المستعملين سيفوق عدد الموجات الحاملة المتيسرة بتناسب عكسي مع عامل النشاط المتوسط للمستعمل.

إن سعات كل ساتل المذكورة في الفقرة 3.2 والسعات الكلية المذكورة في هذه الفقرة جرى حسابها لحالة النفاذ إلى الإنترنت تؤمنه مطاريف مستعملين قطر الهوائي فيها cm 30. وكانت النتائج ستكون مختلفة لو استخدم قطر أكبر، وفي هذه الحالة كانت الحسابات استدعت ضرورة تعديل افتراضات أخرى غير قطر هوائي مطراف المستعمل. فإذا بقيت جميع الافتراضات الأخرى كما هي، وزيد قطر الهوائي إلى cm 60 مثلاً لكان أمكن الاستغناء عن التشفير بمعدل 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي، ولكان زيد معدل البتات للمستعمل إلى حوالي kbit/s 2 560، مما يسمح بزيادة السعة في كل ساتل بقدر 28% ولكانت ضربت السعة الكلية للمنطقة بعامل يساوي نحو 2,5. وفي كل الأحوال حسب أبعاد الهوائي المختارة، قد يبدو من المناسب أكثر التخلي عن بعض زيادة السعة أو كلها، بغية خفض قدرة الإرسال في مطراف المستعمل و/أو القدرة الأولية للساتل. وهناك إمكانية أخرى تتمثل في استخدام جزء من زيادة الكسب أو كلها في هوائي مطراف المستعمل، لخفض كسب الساتل خفضاً متناسباً، وهذا يسمح بزيادة فتحة الحزمة في كل ساتل، وتغطية نفس المنطقة بعدد حزم أقل. ومن الواضح أن تقدير السعة في حالة هوائي أكبر في مطراف المستعمل، يقتضي تطبيق مجموعة من الافتراضات خاصة بالحالة المعتبرة.

4 الاستنتاجات

يوضّح هذا الملحق الميزات الأساسية لنمط من نظام في الخدمة الثابتة الساتلية، مصمم لتوفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق على الصعيد العالمي، ويعطي تقديرات عامة عن المقدرة الشاملة التي يمكن أن تقدمها هذه الأنظمة. ولما كان من المهم إعطاء مجال للتدقيق في التحليل وتكييفه مع مختلف الشروط الجغرافية وظروف السوق، فإنه لا يبدو مناسباً إدراج خصائص الأنظمة المصممة لنفاذ ساتلي إلى الإنترنت عريض النطاق في لوائح الراديو (RR)، بل ينبغي مراجعة هذه التوصية من وقت إلى آخر لمراعاة ما يتحقق من تقدم في هذا الموضوع.

الملحـــق 2

إمكانيات توفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق على الصعيد العالمي بواسطة أنظمة في الخدمة الثابتة الساتلية مصممة لهوائيات أكبر في المحطات الأرضية

1 عموميات

إن معمارية النظام المشروحة في الملحق 1 كان يفرضها إلى حد بعيد خيار الهوائيات التي قطرها 30 cm لمحطات المستعمل الأرضية، وهي التي تقع أحياناً في فئة المحطات النانوية (أي المطاريف التي فتحات حزمها فائقة الصغر (USATs)). وعندما تفترض هوائيات مستعمل أكبر من ذلك، يمكن توفير نفاذ ساتلي إلى الإنترنت عريض النطاق (باستثناء ما يخص المطاريف المحمولة) عن طريق معماريات مختلفة للأنظمة، مع الملاحظة أن المعروض هنا هو مثال واحد منها.

وترد في الفقرة 1 من الملحق 1 مناقشة مختلف النطاقات الموزعة للخدمة الثابتة الساتلية الواقعة حتى 50 GHz، ومدى ملاءمتها للنفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق، ولا ضرورة لإعادة ذلك هنا. واستناداً إلى هذه المناقشة، فإن المعلمات المدروسة في هذا الملحق تتعلق فقط بنطاقات الخدمة الثابتة الساتلية الواقعة عند الترددات 30/20 GHz و14/11 GHz، وتستعمل نفس معمارية النظام في الحالتين.

وعلى الرغم من كون أبعاد الهوائي أقل سيطرة على تصميم أنظمة المطاريف غير المطاريف USAT، إلا أنها تبقى ذات تأثير كبير، لذلك يجدر انتقاء قدّ للهوائي في هذا الملحق له شعبية واسعة. وفي الإجابات الواردة عن استبيان مكتب الاتصالات الراديوية عام 1998، التي كانت تغطي المحطات الأرضية العاملة في النطاقات 30/20 GHz بهوائيات تمتد أقطارها من 0,3 m إلى 7,6 m، كان القطر الذي يذكر غالباً هو 1,2 m. وفي الإجابات التي وردت في نفس الاستبيان عن المحطات الأرضية العاملة في النطاقات 14/11 GHz بهوائيات تمتد أقطارها من 0,4 m إلى 18,0 m، كان القطر الذي يذكر غالباً لهذه المحطات هو أيضاً 1,2 m. لذلك فقد اختير القطر 1,2 m في هذا المثال، مع الملاحظة بأن المحطات الأرضية التي تستعمل هوائيات قطرها 1,2 m هي أيضاً مصنفة بين "مطاريف فتحة الحزمة فائقة الصغر" (VSAT) (أو المحطات النانوية).

وكما كان الهدف في الملحق 1، فهو أيضاً هنا الحصول على معدل بتات قدره 2 Mbit/s من المستعملين الأفراد وإليهم. وإن طريقة النفاذ المختارة هنا لكل مرسل-مستجيب ساتلي هي النفاذ المتعدد بتقسيم التردد (FDMA)، وطريقة التشكيل هي الإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK). كما أضيف المعدل 1/2 للتشفير مع تصحيح أخطاء أمامي لكي يكون استعمال قدرة الخرج للمرسل-المستجيب فعالاً بشكل معقول.

2 معمارية النظام

وكذلك كما في الملحق 1، يرتكز هذا المثال على تشكيلة "نجمية"، يكون النفاذ فيها إلى عدد من محطات المستعمل الأرضية عبر وصلات ساتلية إلى محطة أرضية "مركزية" موصولة بالإنترنت. وللتخفيف إلى أدنى حد من أثر الوصلة بين الساتل والمحطة المركزية على أداء النسبة *C/N* (حاملة إلى ضوضاء) في الموجات الحاملة الداخلة والخارجة، فقد اختير هوائي كبير (قطره 7,6 m) للمحطة المركزية. ويوضح الشكل 8 ترتيبة الوصلة.

وتستخدم السواتل في هذا المثال نطاقات بقدر 500 MHz في اتجاه الإرسال الصاعد والهابط، وهذه النطاقات هي التالية كما في السابق:

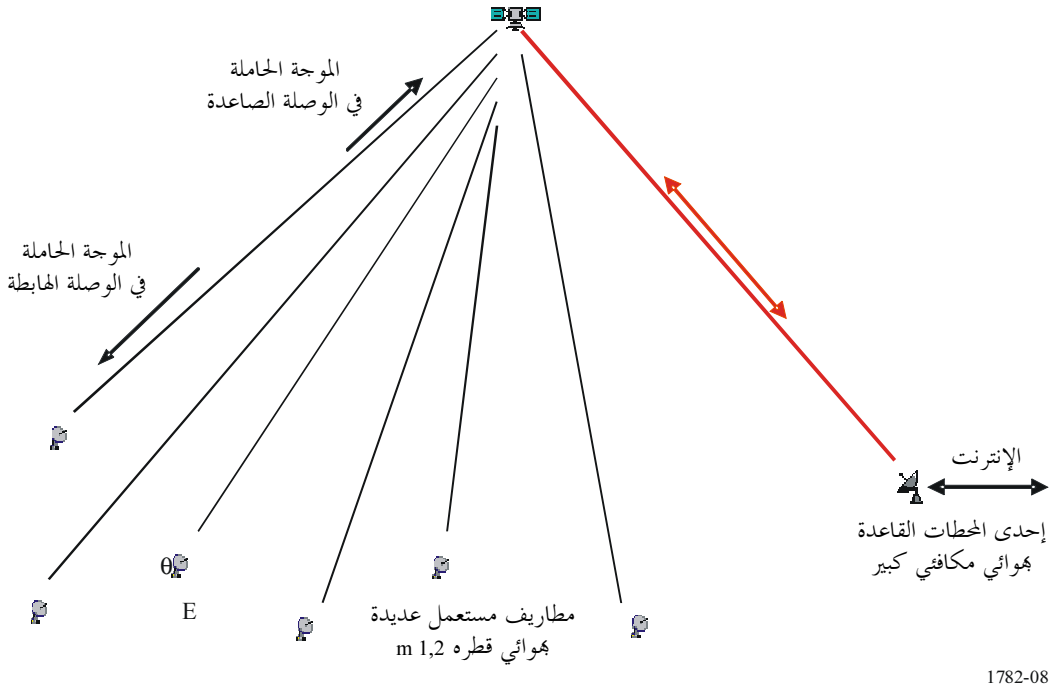
- نظام النطاقات 30/20 GHz – 20,2-19,7 GHz فضاء أرض و28,95-28,45 GHz أرض-فضاء؛
- نظام النطاقات 14/11 GHz – 11,2-10,95 GHz و11,7-11,45 GHz فضاء-أرض؛
- 14,5-14,0 GHz أرض-فضاء.

3 التغطية

في حالة التشكيل QPSK بمعدل 1/2 لتصحيح الأخطاء الأمامي، تطلب نسبة *C/N* (حاملة إلى ضوضاء) تساوي حوالي 7,5 dB عند مدخل مزيل التشكيل/مفكك التشفير لكي ينتج معدل خطأ في البتات (BER) قدره 1×10^{-6} في قطار البتات الخارج، الذي يمكن اعتباره بمثابة عتبة التيسر في هذا التطبيق. وكما في الملحق 1، يفترض بلوغ هذا المعدل أثناء 99% من الوقت على الأقل في معظم المناخات، وهذا يعني أن الوصلة بين المستعمل والساتل ينبغي أن تصمم لتتحسب من خبو ناجم عن المطر يبلغ حوالي 11 dB عند 30 GHz و7 dB عند 20 GHz و4,5 dB عند 14 GHz و3,5 dB عند 11 GHz، شريطة أن تبلغ زاوية الارتفاع الصغرى 17° في أنظمة النطاقات 30/20 GHz و10° في أنظمة النطاقات 14/11 GHz. وفي العديد من سواتل هذه الأيام مرسلات–مستجيبة ينتج كل منها بمفرده قدرة خرج تساوي 40 W عند حد إشباع موجة حاملة واحدة. وعندما تؤخذ بالاعتبار هذه العوامل مجتمعة مع قطر هوائي المستعمل البالغ 1,2 m، وتترك تسامحات مناسبة لإسهامات الضوضاء والتداخل الداخلي والخارجي، وجد من حسابات الوصلة أن الأمر يحتاج إلى حزمة ساتل تبلغ فتحتها عند نصف القدرة حوالي 2°. وكما يرى في الجدولين 3 و4 فإن هذه القيمة يمكن تحقيقها تماماً بإمكانيات التكنولوجيا الحالية.

الشكل 8

ترتيبة الوصلة لتوفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق ساتلي بواسطة محطات نانوية (مطاريف فتحات حزمها فائقة الصغر (VSAT))



ويبين الشكل 9 أن منطقة متواصلة تبلغ مساحتها تقريباً مساحة المنطقة المرجعية الدائرية المساوية 10 000 000 km^2 التي بحثت في الملحق 1 (الشكل 6)، يمكن تغطيتها بواسطة ثماني حزم دائرية (من A إلى H)، فتحة كل منها 2°، ومرتبة بحيث تشكل حدودها المتراكبة مخططاً من سداسيات الأضلاع المتشابكة. وتوضح الفقرة 1.2 في الملحق 1 أن إعادة استعمال التردد في كل حزمة واحدة من أربع حزم تقود إلى نسبة *C/I* (حاملة إلى ضوضاء) صغرى تساوي 16,5 dB على الأقل للتداخلات المتعددة الحزم.

4 تشكيلة الحمولة النافعة في الساتل

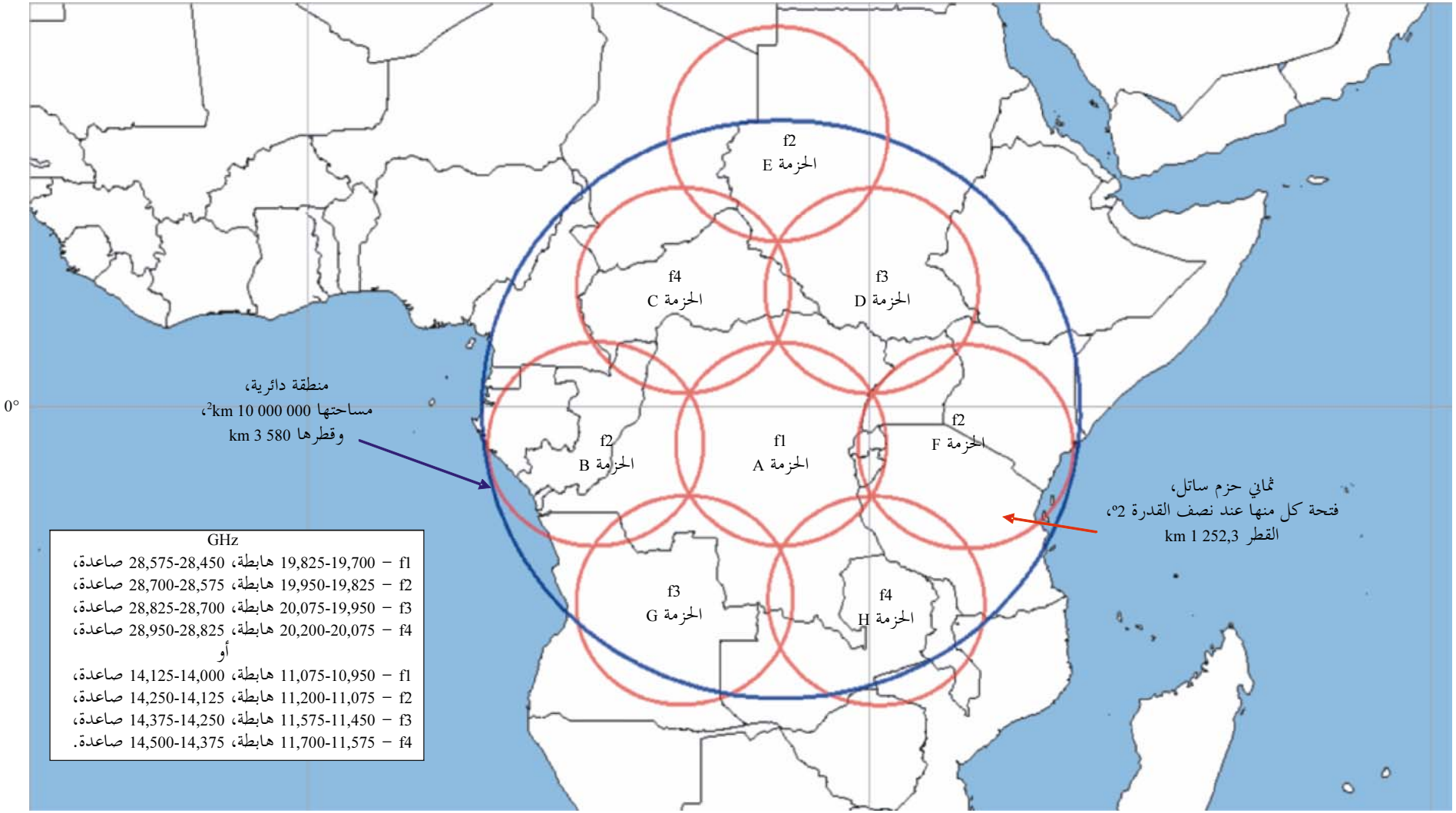
استناداً إلى المعلمات المفترضة في الفقرات السابقة من هذا الملحق، يبين الشكل 10 خطة مناسبة لمرسل-مستجيب يستخدم القدرة وعرض النطاق أمثل استخدام. ويعطى عرض النطاق لكل موجة حاملة واحدة بالعلاقة:

2,4 MHz = (قولبة الطيف) 1,2 × (معدل تصحيح الأخطاء 1/2) 2/1 × {(QPSK) 2/(معدل معطيات Mbit/s) 2}

وإذا ترك 18% من عرض نطاق المرسل-المستجيب للنطاقات الحارسة ما بين الموجات الحاملة، فإن هذه القيمة تقابل تباعداً ما بين الموجات الحاملة قدره 28,4 MHz. وهذا التسامح السخي نسبياً متوائم مع تشغيل 10 موجات حاملة داخل عرض النطاق لمرسل-مستجيب قدره 28,4 MHz، ويستمثل استعمال قدرة خرج المرسل-المستجيب كما هو مبين فيما بعد. وتسامح إضافي بقدر 10% للنطاقات الحارسة ما بين المرسلات-المستجيبة يقود إلى مباعدة قدرها 31,25 MHz ما بين المرسلات المستجيبة، وهي تمكن أربعة مرسلات-مستجيبة من العمل داخل 125 MHz، وهي ما يمثل ربع عرض نطاق الساتل. تستطيع كل واحدة من الحزم الثماني التي يمثل الشكل 9 رقعها عند نصف القدرة أن تستقبل أربعة مرسلات-مستجيبة على الاستقطابين الاثنين (خطي مضاعف أو دائري ميامن أو مباشر). وهكذا نحصل في النتيجة على 64 مرسلاً-مستجيباً.

الشكل 9

مثال على ترتيبة حزم ساتل لتوفير نفاذ ساتلي إلى الإنترنت عريض النطاق عن طريق محطات مستعمل قطر هوائيها 1,2 m



5 موازنات الوصلة

فيما يخص وصلة صاعدة أو وصلة هابطة بين محطة أرضية وساتل، تتحقق العلاقة التالية:

$$P_T + G_T - 20\log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10\log(BT) - (-228.6) = C/N \text{ dB} \quad (1)$$

حيث:

P_T: القدرة المقدمة إلى هوائي الإرسال (dBW)

G_T: كسب هوائي الإرسال (dBi)

d: طول المسير بين المحطة الأرضية والساتل (m)

f: التردد (Hz)

F: هامش (dB) للتعويض عن قيم الخبو أثناء النسبة المئوية المطلوبة من الوقت

G_R: كسب هوائي الاستقبال (dBi)

B: عرض نطاق الموجة الحاملة (Hz)

T: درجة حرارة ضوضاء الوصلة (K)

C/N (dB): النسبة الحاصلة عند المستقبل لبلوغ عتبة التيسر من معدل الخطأ في البتات (BER).

ولكي يؤخذ بالحسبان انحطاط الأداء الناتج عن الضوضاء الحرارية على الوصلة بين الساتل والمحطة المركزية، وعن إعادة استعمال الترددات متعدد الحزم، وعن التداخل الناتج عن الاستقطاب المتقاطع، وعن التشكيل البيني داخل الساتل، وعن التداخل القادم من مصادر خارجية، فإن نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء الحرارية على الوصلة الصاعدة وعلى الوصلة الهابطة بين الساتل ومطراف المستعمل ينبغي أن تساوي على الأقل 8,5 dB. ويلاحظ أن النسبة C/I لهذه الانحطاطات مجتمعة التي يعبّر عنها بنسبة كلية هي $C/(N + I)$ تساوي 7,5 dB (التي تقابل عتبة التيسر) هي 14,4 dB، وأن اجتماع إعادة استعمال التردد مع التداخل الناتج عن الاستقطاب المتقاطع ($C/I > 16{,}5$ dB)، وللتشكيل البيني ($C/I > 23$ dBi)، ولضوضاء الوصلة إلى المحطة القاعدة ($C/I > 24$ dB) وللتداخلات من الخارج ($C/I > 23$ dB)، لن يكون أكبر من هذه القيمة (أي أكبر من 14,39 dB).

وعليه:

للوصلة الصاعدة من محطة المستعمل الأرضية العاملة في نطاق الترددات 30 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية (FSS)

كما في المعادلة (1) حيث:

P_T = 11,3 dBW (13,5 W) (وحوالي 3 dBW في الجو الصافي مع تحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة)

G_T = 49,19 dBi (هوائي قطره 1,2 m عند التردد 28,45 GHz)

$d \geq$ 39 853 746 m (زاوية الارتفاع الصغرى تساوي 17°)

f = 28 450 000 000 Hz

F = 11 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 37,7 dBi (حافة نصف القدرة المساوية 2° لحزمة الساتل)

B = 2 400 000 Hz

T = 1 000 K، وعليه يكون:

C/N = 8,5 dB.

للوصلة الصاعدة من محطة المستعمل الأرضية العاملة في نطاق الترددات 14 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية (FSS)

كما في المعادلة (1)، حيث:

P_T = 3,95 dBW (وحوالي 2 dBW (2,5 W) في الجو الصافي مع تحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة)

G_T = 43,19 dBi (هوائي قطره 1,2 m عند التردد 14,25 GHz)

$d \geq$ 40 583 982 m (زاوية الارتفاع الصغرى تساوي 10°)

f = 14 250 000 000 Hz

F = 4,5 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 37,7 dBi (حافة نصف القدرة المساوية 2° لحزمة الساتل)

B = 2 400 000 Hz

T = 800 K، وعليه يكون:

C/N = 8,5 dB.

للوصلة الهابطة إلى محطة المستعمل الأرضية العاملة في نطاق الترددات 20 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية (FSS)

كما في المعادلة (1)، حيث:

P_T = 2,1 dBW (1,62 W)

G_T = 37,7 dBi (حافة حزمة الساتل المساوية 2°)

d = 39 853 746 m (زاوية الارتفاع الصغرى تساوي 17°)

f = 19 700 000 000 Hz

F = 7 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 46,0 dBi (هوائي قطره 1,2 m عند التردد 19,7 GHz)

B = 2 400 000 Hz

T = 300 K، وعليه يكون:

C/N = 8,5 dB.

للوصلة الهابطة إلى محطة المستعمل الأرضية العاملة في نطاق الترددات 11 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية (FSS)

كما في المعادلة (1)، حيث:

P_T = 2,1 dBW (1,62 W)

G_T = 37,7 dBi (حافة حزمة الساتل المساوية 2°)

d = 40 583 982 m (زاوية الارتفاع الصغرى تساوي 10°)

f = 10 950 000 000 Hz

F = 3,5 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 40,9 dBi (هوائي قطره 1,2 m عند التردد 10,95 GHz)

B = 2 400 000 Hz

T = 200 K، وعليه يكون:

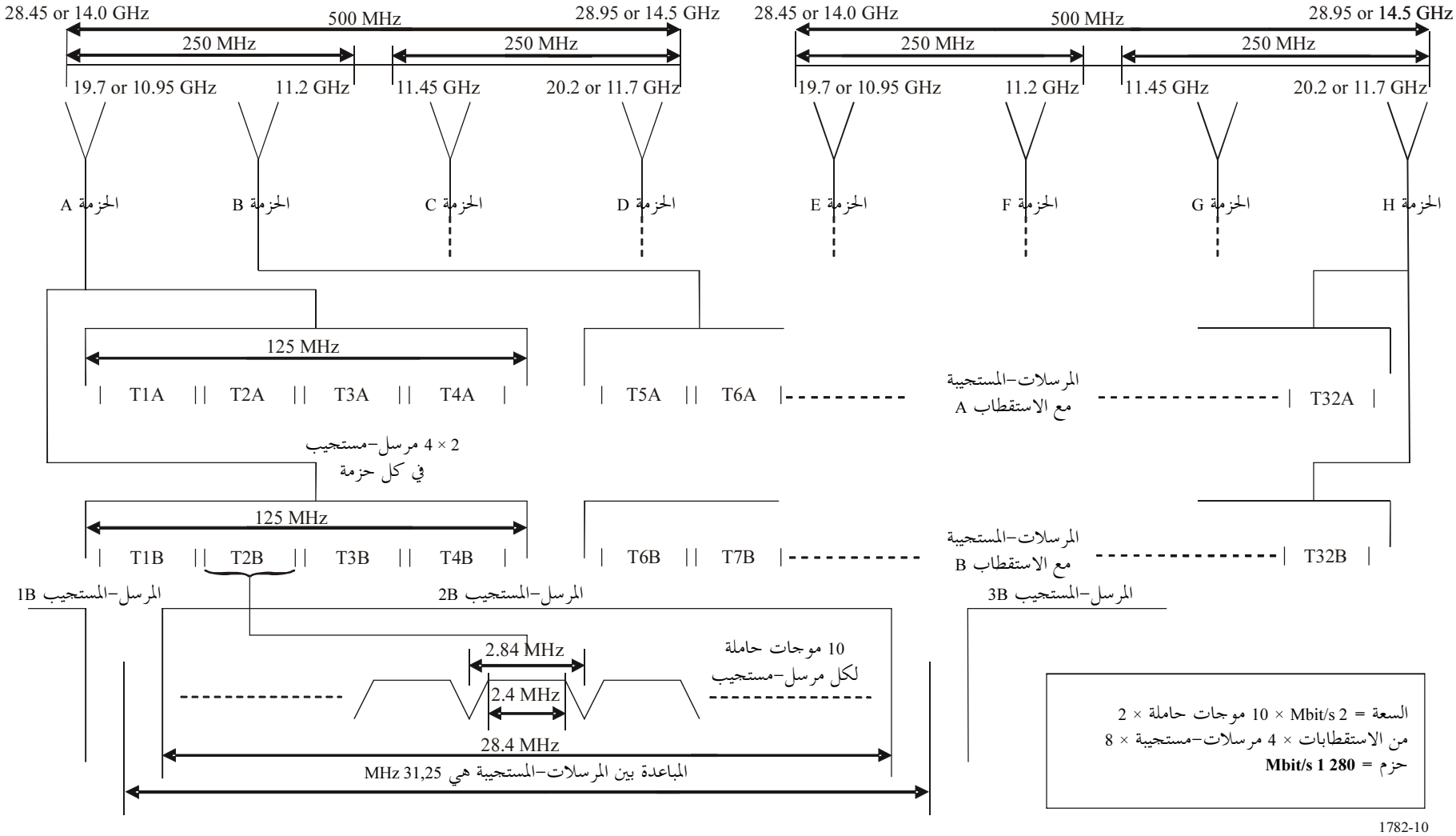
C/N = 13,6 dB.

وأكثر هذه الوصلات حرجاً هي الوصلة الهابطة عند التردد 19,7 GHz، حيث تساوي فيها قدرة الخرج من الساتل المطلوبة لكل موجة حاملة (P_T) المقدار 1,62 W. ولما كانت قدرة الخرج الكلية متعددة الموجات الحاملة من مرسل-مستجيب قدرته 40 W عند حد إشباع موجة حاملة واحدة هي حوالي 16 W (أي بتخفيض القدرة عند المخرج قدره 4 dB للحدّ من التشكيل البيني)، يكون عدد الموجات الحاملة ذات 2 Mbit/s من كل مرسل-مستجيب هو **10** (أي ناتج القسمة 16/1,62 تقريباً)، كما هو مبين في الشكل 10.

وفي النظام العامل عند النطاقات 14/11 GHz، فإن الهامش المنخفض للخبو يعطي نسبة C/N سخية لعشر موجات حاملة لكل مرسل-مستجيب وبقدرة 1,62 W لكل موجة حاملة. والترتيبة الأكثر استمثالاً يمكن أن تتكون من 11 موجة حاملة لكل مرسل-مستجيب، وذلك بتخفيض النطاق الحارس ما بين الموجات الحاملة إلى حوالي 7,6%، وتخفيض قدرة الساتل لكل مرسل-مستجيب إلى 16/11 = 1,45 W.

الشكل 10

ترتيبات المرسلات المستجيبة والحزم لساتل الخدمة الثابتة الساتلية العامل في GHz 30/20 أو GHz 14/11 لتوفير النفاذ إلى الإنترنت ذات معدل المعطيات العالي



6 سعة كل ساتل (C_S)

تعطى سعة ساتل له تشكيلة الحمولة النافعة المبينة في الشكل 10 كما يلي:

(2 Mbit/s لكل موجة حاملة) × (10 موجات حاملة لكل مرسل–مستجيب) (2 مجموعة × 4 مرسلات–مستجيبة لكل حزمة) × (8 حزم) = **1 280 Mbit/s**

وإذا افترضنا أن كفاءة القدرة هي 35% لكل مرسل–مستجيب، وأن الحمولة النافعة تمثل 75% من طلب القدرة في الساتل، تكون القدرة الأولية الكلية المطلوبة لمثل هذا الساتل تساوي حوالي: **10 kW** (لنفرض)

$(40\ W \times 2 \times 4 \times 8)/(0.35 \times 0.75) = 9\ 752\ W$

وفي حالة النطاقات GHz 14/11، إذا اشتغلت 11 موجة حاملة في كل مرسل–مستجيب، فإن السعة تكون مساوية Mbit/s 1 408.

7 السعة الكلية الكامنة (C_T)

لقد تبين في الفقرة 3 من الملحق 1 أن مدار السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض يمكن أن يرى من زاوية ارتفاع قدرها 17° أو أكثر من كل نقطة من المنطقة المرجعية التي مساحتها 10 000 000 km^2، في مدى من خطوط الطول قدره 97,7°. وتبين أيضاً أن مدى خطوط الطول يبلغ 111,1° عند زاوية ارتفاع صغري قدرها 10°. وباستخدام الطريقة المشروحة في هذه الفقرة، وجد أنه لو كان قطر هوائي محطة المستعمل الأرضية يساوي 1,2 m، لكانت المباعدة الصغرى ما بين السواتل بلغت نظرياً أقل من 2° في كلتا مجموعتي النطاقات GHz 30/20 وGHz 14/11 المتخذتين كمثالين. وفي كل الأحوال فإن التخفيض إلى أدنى حد من خطر حدوث التداخلات الناجمة مثلاً عن تحكم غير كامل في موقع الساتل، قد جعل إدخال مباعدة زاوية صغرى قدرها 2° أمراً شائعاً في التنظيمات، لذلك فقد اختيرت هنا هذه المباعدة. وهذا ما جعل عدد السواتل المشتركة في الترددات من النمط المشروح في هذا الملحق والتي تستطيع تخديم المنطقة المرجعية خدمة متآونة هو 48 ساتلاً في حالة النطاقات GHz 30/20، و55 ساتلاً في حالة النطاقات GHz 14/11. وعليه تكون السعة الكلية التي يمكن أن توفرها السواتل من هذا النمط للنفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق من قبل المستعملين الموجودين في المنطقة المرجعية كما يلي:

- مثال النطاقات GHz 30/20: $48 \times 1\ 280$ = **61,44 Gbit/s**،
- مثال النطاقات GHz 14/11: $55 \times 1\ 408$ = **77,44 Gbit/s**.

ولما كانت هناك حاجة لتقاسم الترددات مع الأنظمة القائمة في الخدمة الثابتة الساتلية، فإن من المحتمل ألا يمكن تحقيق جزء من هذه السعة في المستقبل المنظور، وخاصة في نطاقات التردد الأكثر انخفاضاً.

الملحـــق 3

مثال على النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق على صعيد عالمي يقدمه نظام في الخدمة الثابتة الساتلية مصمم لهوائيات المحطات الأرضية "الجماعية" وللتوزيع المحلي للأرض

1 عموميات

كان الهدف في الملحق 1 توفير نفاذ مباشر إلى محطات المستعمل الأرضية التي قطر هوائيها 30 cm، وهذا حدد طبيعة القطاع الفضائي، أي سواتل متعددة الحزم النقطية الضيقة بالقدر العملي المستطاع – وبالتالي ميز معمارية النظام المطلوبة. أما في هذا الملحق، فسيتم نفاذ المستعمل عبر الشبكات الراديوية المحلية إلى بضعة مواقع قليلة نسبية، تحتوي على محطات أرضية "جماعية"، تكون أبعاد الهوائيات المستعملة فيها أقل إحراجاً، وفيها يمكن استعمال مدى من معماريات الأنظمة. توجد إمكانات متنوعة (بما في ذلك نطاقات التردد) لتنفيذ شبكات راديوية محلية للأرض تصل المستعملين بالمحطات الأرضية "الجماعية". وعلى كل حال لا يقدم هذا الملحق إلا مثالاً واحداً فقط على معمارية نظام يسهل النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق عبر شبكات راديوية محلية متمركزة على المحطات الأرضية الجماعية. ويرتكز هذا المثال على استعمال النفاذ المتعدد بتقسيم التردد (FDMA) للشبكات الراديوية للأرض بين المستعمل والمحطة المركزية المحلية، مع التشكيل التقليدي بالإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK) والمعدل 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي في نطاق الترددات 4 GHz الموزع للخدمة الثابتة (FS). وهذا الاختيار له بعض التأثير في تصميم الوصلات الساتلية بين المحطات الأرضية المحلية والمحطة الأرضية المركزية الموصولة بالإنترنت، وإن كان هذا التأثير ليس بالقوة التي يقيّد إمكانيات المثال المعطى هاهنا.

وعلى الرغم من أن المثال في هذا الملحق يستعمل نطاق الترددات 4 GHz الموزّع للخدمة الثابتة من أجل التوزيع المحلي للأرض، إلا أن هناك عدداً من الإمكانيات الأخرى التي يمكنها أن تقدم إلى هذا الجزء من شبكة النفاذ نمطاً من الخدمة، مثل الخدمة الثابتة أو الخدمة المتنقلة ونطاق تردد أيضاً. وسيتوقف اختيار التطبيق على عدد من العوامل، منها معدل المعطيات والقدرة اللازمة، ومدى الخدمة المطلوب من المحطة الأرضية الجماعية، وتقاسم التردد، والتنسيق مع خدمات أخرى، والقيود التنظيمية. ولما كانت كل واحدة من الشبكات المحلية للأرض الموصولة إلى الإنترنت عبر نفس الساتل هي شبكة مستقلة بذاتها، فقد يحدث أن تستخدم مناطق مختلفة توزيعات تردد مختلفة موزعة للخدمة الثابتة و/أو للخدمة المتنقلة، وقد يكون ذلك حلاً مناسباً عندما تكون منطقة خدمة الساتل تمتد إلى عدة بلدان متجاورة مثلاً.

2 اعتبارات خاصة بنطاقات التردد

فيما يخص تحديد نطاقات التردد الموزعة للخدمة الثابتة الساتلية المناسبة لهذا التطبيق، فإن الفقرة الفرعية الأولى من الفقرة 1.1 في الملحق 1 تنطبق هنا أيضاً، ولكن الأمر يختلف في هذه الحالة من حيث أن استخدام مجموعتي النطاقات الموزعة للخدمة الثابتة الساتلية عند الترددات 6/4 GHz و14/11 GHz ليست مقيدة بالحاجة إلى استعمال محطات أرضية هوائياتها صغيرة جداً. فالمحطات الأرضية الجماعية يمكنها من حيث المبدأ استعمال هوائيات من أي أبعاد كانت، على الرغم من أنه ليس اقتصادياً أبداً استخدام هوائيات كبيرة الأبعاد جداً لتقوم بهذا الدور.

ويوجد في الفقرة 2.1 من الملحق 1 تحليل للاستعمال الحالي للنطاقات الساتلية، أدّى إلى الاستنتاج بأن التوزيعات الحالية للخدمة الثابتة الساتلية في النطاقات 30/20 GHz هي أقل كثافة استعمال بكثير من التوزيعات التي جرت في الترددات الأخفض منها، كما ونشهد حالياً تطوراً بسيطاً في الخدمة الثابتة الساتلية للتوزيعات في النطاقات 50/40 GHz.

وفي ضوء ما تقدم فإن هذا الملحق يقدم مثالاً على نظام قائم على المحطات الأرضية الجماعية، ويعطي معلمات لتنفيذه في النطاقات 30/20 GHz، ولتنفيذه كذلك في النطاقات 14/11 GHz. ومع ذلك تجدر الملاحظة إلى أن تنفيذه على الصعيد

العالمي في المستقبل القريب يبدو أنه يبين أن استخدام نطاقات الترددات العالية يخلق مشاكل عند تقاسم الترددات أقل مما تخلقها نطاقات الترددات المنخفضة.

3 الخصائص التقنية الممكنة

1.3 معمارية النظام

يوضح الشكل 11 معمارية النظام في هذا المثال، وفيه تظهر أربع حزم ساتلية ثنائية الاتجاهات وثنائية الأقطاب، تستخدم عرض نطاق كلياً قدره 500 MHz للوصلات الصاعدة مع 500 MHz للوصلات الهابطة (أي 125 MHz للوصلة الصاعدة و125 MHz للوصلة الهابطة في كل حزمة). وكل حزمة تتحمل أربع محطات أرضية محلية جماعية في استقطاب أول مع أربع محطات أخرى في استقطاب ثانٍ معامد، وبذلك تصل المحطات الأرضية الثماني عبر ساتل إلى محطة أرضية مركزية لأغراض التوصيل بالإنترنت. وهكذا يوفر الساتل النفاذ إلى الإنترنت لجماعات محلية عددها 32 جماعة.

2.3 الأنظمة الراديوية المحلية للأرض

يمكن أن تكون كل محطة أرضية محلية مصحوبة بنظام راديوي للأرض مجهز ليخدم عدداً من المشتركين ضمن نصف قطر يساوي 3 km تقريباً. ويتوقف عدد المستعملين الذين يمكن تخديمهم في أي لحظة على معدل البتات المستعمل وعلى عوامل النشاط على توصيلاتهم. ويبلغ عامل النشاط حوالي 1 : 30 للمستعملين الأفراد الخصوصيين، وهو يبلغ 1 : 10 لتطبيقات الأعمال التجارية. ويتغير عرض النطاق المستعمل إلى حد كبير، ممتداً من تطبيقات الرسائل النصية القصيرة إلى المؤتمرات المرئية. ووصف الخدمة "بالإنترنت عريض النطاق" يغطي عادة سرعات تبدأ من 256 kbit/s حتى تصل إلى عدة وحدات من Mbit/s، غير أن الحد الأدنى يتزايد بسرعة بعد بضعة أشهر قليلة حين تبلغ توقعات المستعملين حد النضوح. فقد كان من المفروض مثلاً أن 100 مستعمل تجاري موصولين بنفس الوقت يرغبون بالعمل بمعدل 2 Mbit/s أثناء 10% من الوقت، وهذا يعني تقديم 20 Mbit/s لتأمين الخدمة، وتيسر 6 Mbit/s إضافية لكي يجري تقاسمها بين 30 × 23 (مستعملون بمعدل 256 kbit/s في المعدل 6 Mbit/s) ≅ 700. وعليه تكون السعة تساوي 100 مستعمل تجاري مضافاً إليهم 700 مستعمل خصوصي في نفس الوقت، أو إذا روعيت الاعتبارات التجارية لنقل 150 + 1 000. ومع ذلك، إذا رغب أحد المستعملين إطلاق تطبيقات شرهة جداً لعرض النطاق، مثل التلفزيون في الوقت الفعلي، فإنه يستطيع التقاط نسبة كبيرة من السعة المتوفرة، ما لم يكن مشغّل الشبكة يفرض إجراءات تقاسم معينة. وهذه هي قضية خاصة بإدارة الشبكة لا تدخل في مجال هذه الدراسة.

ولأغراض هذا الملحق أخذ المثال مؤلفاً من 200 مشترك يستخدمون كل شبكة محلية بواقع عامل نشاط وسطي قدره 13%، بحيث يكون 13 مشتركاً منهم قادرين على الإرسال بنفس الوقت بمعدل معطيات قدره 2 Mbit/s، ويكون 13 آخرون قادرين على الاستقبال بنفس الوقت بالمعدل 2 Mbit/s في نطاق الخدمة الثابتة 4 GHz. ويمكن إذا لزم الأمر السماح لبعض المشتركين بالإرسال والاستقبال بنفس الوقت بالمعدل 2 Mbit/s أو بمعدل بتات أعلى من ذلك، ولكن عدد المشتركين النشيطين المخدومين بنفس الوقت يصبح عندئذ أقل بكثير من 26 مشتركاً. وعلى العكس من ذلك إذا كان بعض المشتركين يستخدمون معدلات بتات تقل عن 2 Mbit/s، يكون عدد المشتركين النشيطين المخدومين بنفس الوقت أكبر بكثير من 26 مشتركاً.

وقد افترض في هذا المثال أن وصلات المشتركين في الشبكات المحلية للأرض (التي قد تكون شبكات من نقطة إلى عدة نقاط) هي وصلات نفاذ متعدد بتقسيم التردد (FDMA)، وأن تشكيلها هو إبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK) مع معدل قدره 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي. وفي كل مطراف جماعي (أي المحطة المركزية للأرض ومعها المحطة الأرضية المحلية)، تكون الإشارات الخارجة (أي 13 بمعدل 2 Mbit/s) معددة الإرسال رقمياً في إشارة واحدة معدلها 26 Mbit/s لإرسالها إلى الأمام نحو الساتل، بينما الإشارات الداخلة (أي 13 بمعدل 2 Mbit/s) يزال تعدد إرسالها من الإشارة التي معدلها 26 Mbit/s المستقبلة من الساتل.

3.3 الوصلات الساتلية

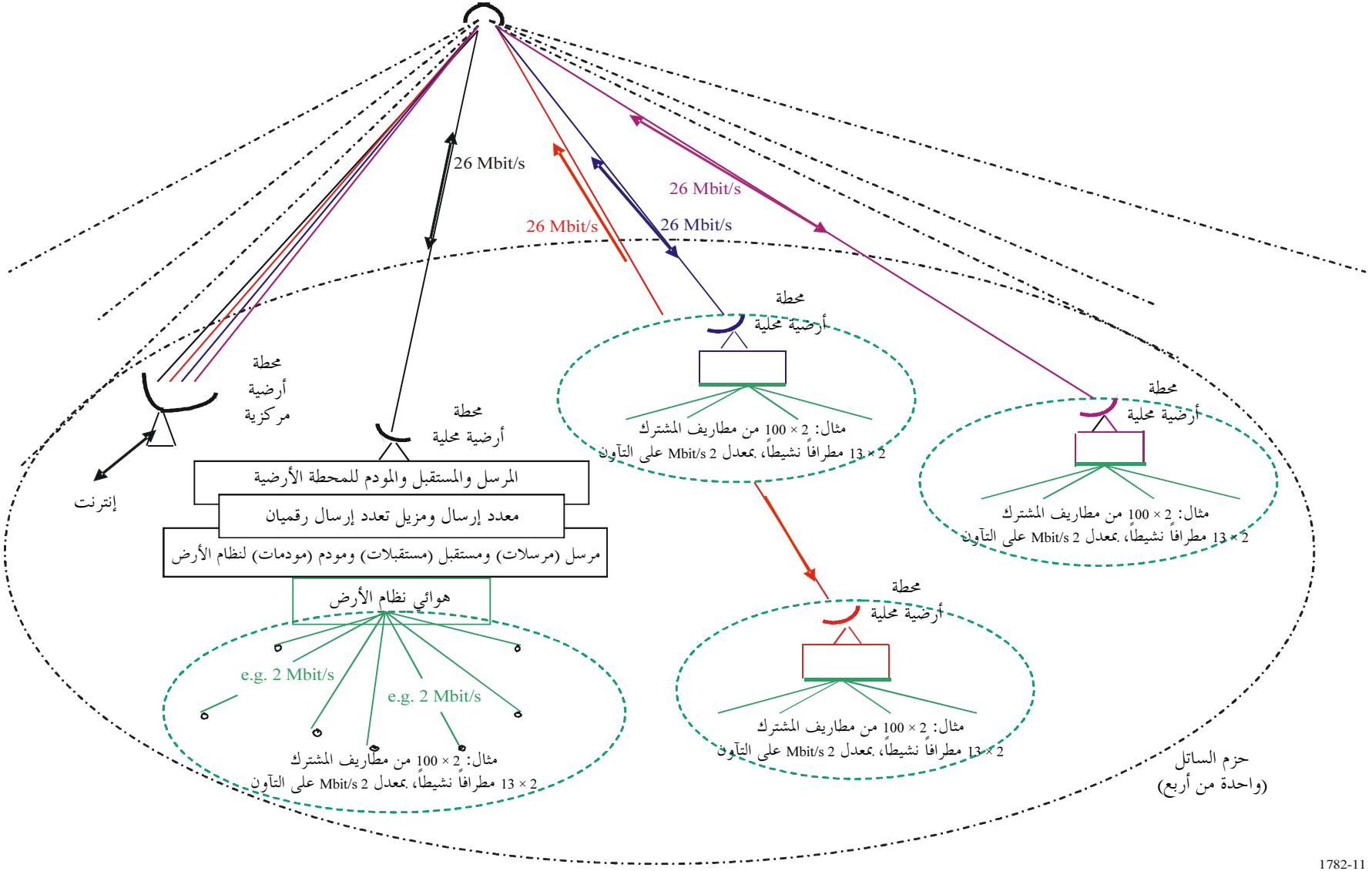
لقد افترض أيضاً أن الموجات الحاملة في الوصلات الصاعدة والهابطة بين كل محطة أرضية جماعية والساتل تستخدم التشكيل بالإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK) مع المعدل 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي (FEC)، ثم تتحول في الساتل من وإلى موجات حاملة بتشكيل السعة التربيعي–16 (16-QAM) للوصلات بين الساتل والمحطة الأرضية المركزية. ولما كان لا يوجد إلا محطة أرضية مركزية واحدة لكل حزمة (أو يحتمل أن تكون محطة أرضية مركزية واحدة لكل ساتل تقع حيث تتراكب الحزم الأربع)، فقد يركب فيها هوائي كبير يكفي لتوفير النسب *C/N* المطلوبة للوصلات الصاعدة والهابطة من الموجات الحاملة 16-QAM. ويمكن أن تعالج في المحطة الأرضية المركزية قطارات البتات بالمعدل 26 Mbit/s لتحوّل إلى الأنساق اللازمة للتوصيل من الإنترنت وإليها.

4.3 التغطية

يبين الشكل 12 أنه إذا كانت حزم الساتل الأربع (ثنائية الاتجاهات وثنائية الاستقطاب) مصممة لتكون فتحاتها عند نصف القدرة تساوي حوالي 3°، ولكي يمكن تسديدها بحيث تتطابق رقعها في نقطة واحدة على خط الاستواء، فإنها قد تستطيع مجتمعة تغطية مساحة كلية تشبه المساحة 10 000 000 km^2 المستعملة كأساس لحسابات السعة في الملحق 1 (انظر الشكل 6 في ذلك الملحق). ويبين الشكل 12 أيضاً مديات التردد التي يجب أن تغطيها كل واحدة من الحزم الأربع، إذا كان النظام ينفذ في النطاقات 30/20 GHz أو في النطاقات 14/11 GHz. وكما هو مشروح في الملحق 1 فإن هوائيات الساتل يمكن تصميمها بحيث تبقى رقع حزمها دائرية ومتساوية في أقطارها (1 884,6 km على سطح الأرض) في أي اتجاه تسدد إليه نحو الأسفل إلى سطح الأرض، بزوايا ارتفاع دنيا تساوي 17° عند النطاقات 30/20 GHz أو 10° عند النطاقات 14/11 GHz.

الشكل 11

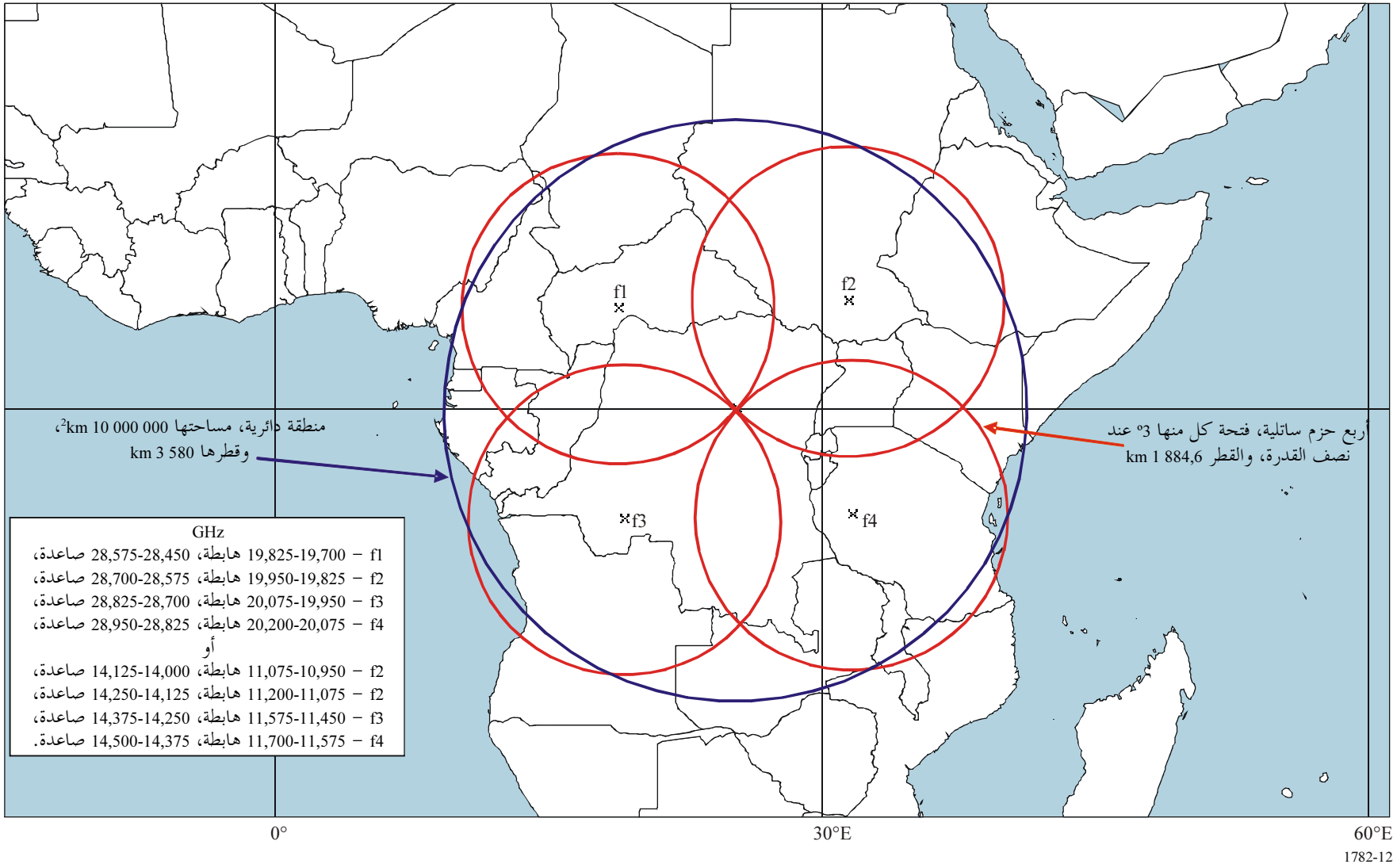
مثال على معمارية النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق عن طريق شبكات راديوية محلية للأرض مع ساتل



1782-11

الشكل 12

مثال على ترتيبة حزم ساتلية توفر النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق عن طريق ساتل مع شبكة راديوية محلية للأرض



5.3 ترتيبة الحمولة المفيدة للساتل

يمثل الشكل 13 الترتيبة المعتزمة للحمولة المفيدة للساتل، ويرى فيه أن عدد المرسلات–المستجيبة اللازم لاستعمال كامل النطاق الذي عرضه 500 MHz للوصلات الصاعدة والهابطة مع الاستقطابين، يبلغ 64 مرسلاً–مستجيباً. كما يرى فيه أيضاً أنه بفضل التجهيزات المستعملة لتحويل التدفق الخارج بمعدل 26 Mbit/s، من التشكيل QPSK إلى التشكيل 16-QAM وبالعكس بشأن التدفق الداخل، أصبح استعمال عرض النطاق أكثر فعالية مما لو استعملت مرسلات–مستجيبة لا تزيل تشكيل الإشارة. وفي التشكيل بالإبراق بزحزحة الطور رباعي الحالة (QPSK) مع المعدل 3/4 لتصحيح الأخطاء الأمامي، يكون عرض نطاق الإرسال للموجة الحاملة ذات المعدل 2 Mbit/s حوالي: $2 \times 1/2 \times 4/3 \times 1{,}2 = 1{,}6$ MHz، وعرض النطاق للموجة الحاملة ذات المعدل 26 Mbit/s يكون حوالي: $26 \times 1/2 \times 4/3 \times 1{,}2 = 20{,}8$ MHz. وإذا عرفت عتبة التيسر بأنها النقطة التي يبلغ فيها معدل الخطأ في البتات (BER) 1×10^{-6}، تكون النسبة *C/N* الكلية المطلوبة لهذه الموجات الحاملة في ظروف الخبو حوالي 8,5 dB، بحيث إذا أخذت بالحسبان الضوضاء في بقية أجزاء الوصلة وأخذ كذلك التداخل الخارجي، يلزم أن تصمم كل قناة لتكون النسبة *C/N* مع الخبو تساوي على الأقل 9,5 dB. وينطبق ذلك على أشد الوصلات حرجاً في أي سلسلة أي في الوصلة من مطراف المشترك إلى المطراف الجماعي في اتجاه الخروج، وأما في اتجاه الدخول فتكون هي الوصلة الهابطة من الساتل إلى المحطة الأرضية المحلية. وينبغي تصميم الوصلات الأخرى لكي تلبي عتبات *C/N* أعلى من ذلك، حتى يحد من تأثيرها في الأداء من طرف إلى طرف.

أما في تشكيل الاتساع التربيعي–16 (16-QAM)، فيكون عرض النطاق للموجة الحاملة ذات المعدل 26 Mbit/s حوالي: $26 \times 1/4 \times 1{,}2 = 7{,}8$ MHz. وهذا يتيح لعرض نطاق قدره 125 MHz لكل حزمة أن يتحمل لكل استقطاب أربع موجات حاملة ترددها 20,8 MHz مع أربع موجات حاملة ترددها 7,8 MHz، مع نطاقات حارسة ما بين الموجات الحاملة تساوي تقريباً 8,5%. ومع ذلك، لما كان تشكيل كل موجة حاملة ترددها 7,8 MHz هو التشكيل 16-QAM، إذاً يجب أن تصمم بحيث تكون عتبة التيسر *C/N* حوالي 25 dB (ليكون $\text{BER} = 1 \times 10^{-6}$) في ظروف الخبو.

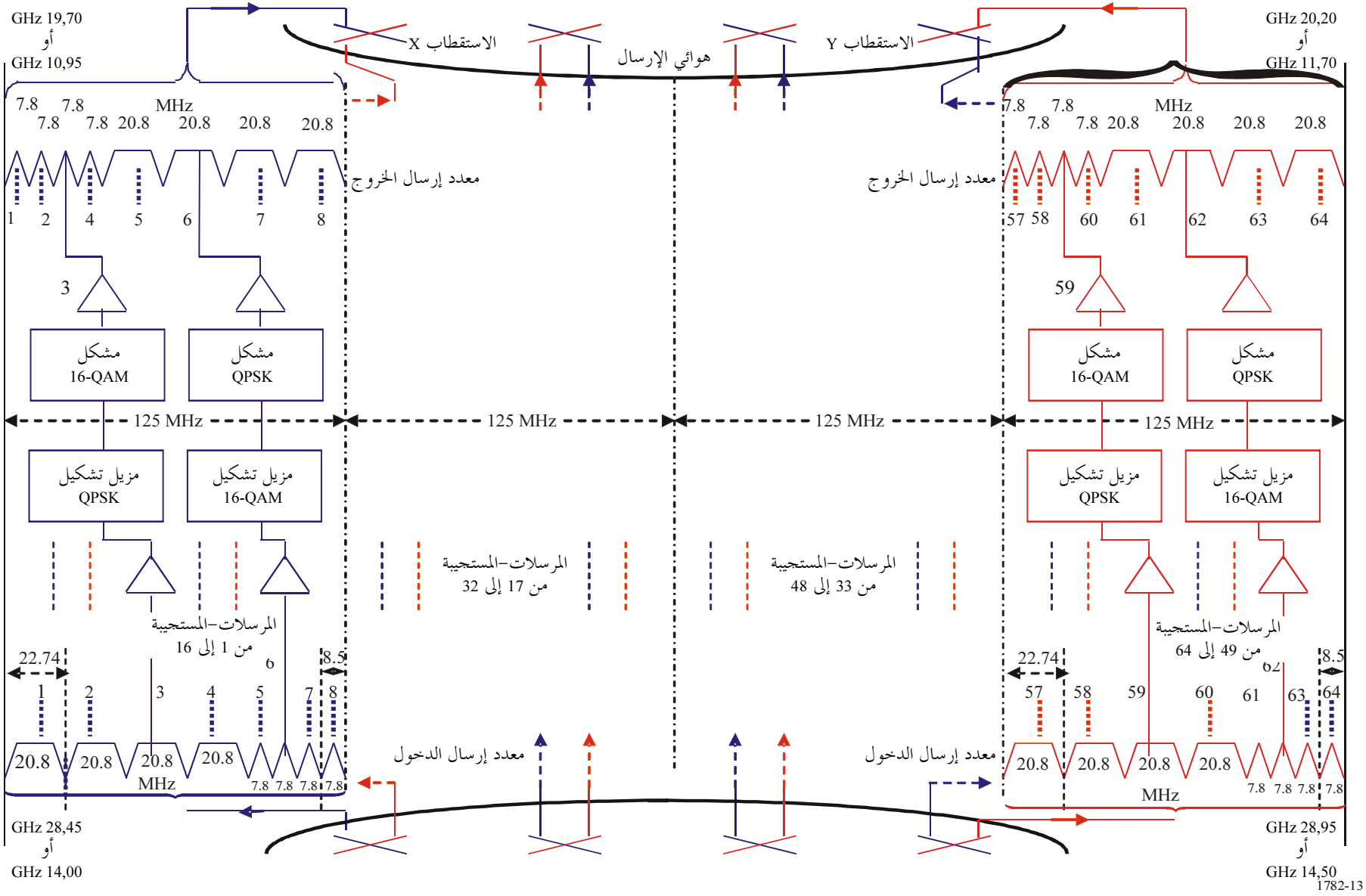
إن التحويل ما بين التشكيل QPSK مع FEC والتشكيل 16-QAM يضيف بعض التعقيد إلى حمولة الساتل النافعة، ولكن ليس إلى الحد الذي تضيفه المعالجة الكاملة على المتن. ولا تتيح حمولة نافعة مماثلة مبنية على مرسلات–مستجيبة "شفافة" ("أدلّة موجية مَحْنيَّة") إلا حوالي ثلثي السعة.

6.3 موازنات الوصلة

استناداً إلى الفقرات السابقة، تعطى المعلمات الأساسية للوصلات الراديوية المحلية للأرض بالتردد 4 GHz، وللوصلات الساتلية في مجموعتي النطاقات 30/20 GHz و14/11 GHz الخياريتين، بموازنات الوصلات التالية:

الشكل 13

ترتيبة للحمولة النافعة في ساتل من أجل توفير النفاذ إلى الإنترنت عريض النطاق عن طريق ساتل مع شبكة راديوية محلية للأرض



1.6.3 الوصلات المحلية للأرض

الوصلة من مطراف المشترك إلى المحطة الأرضية المحلية في النطاق GHz 4

$$P_T + G_T - 20\log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10\log(BT) - (-228.6) = C/N \text{ dB} \quad (2)$$

حيث:

P_T = 3 dBW (2 W)

G_T = 0 dBi (اتجاهية ضعيفة)

$d \geq$ 3 000 m

f = 4 000 000 000 Hz

F = 20 dB (مع خبو وسد)

G_R = 10 dBi (جميع السموت)

B = 1 600 000 Hz

T = 4 000 K، وعليه يكون:

C/N = 9,5 dB.

الوصلة من المحطة الأرضية المحلية إلى مطراف المشترك في النطاق GHz 4

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 5,4 dBW (3,5 W)

G_T = 10 dBi (جميع السموت)

$d \geq$ 3 000 m

f = 3 750 000 000 Hz

F = 20 dB (مع خبو وسد)

G_R = 0 dBi (اتجاهية ضعيفة)

B = 1 600 000 Hz

T = 4 000 K، وعليه يكون:

C/N = 12,5 dB.

2.6.3 الوصلات بين المحطة الأرضية المحلية والساتل

الوصلة الصاعدة من المحطة الأرضية المحلية في نطاق الترددات GHz 30 الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 24 dBW (251 W)

G_T = 53,63 dBi (قطر الهوائي 2 m عند التردد 28,45 GHz)

$d \geq$ 39 853 746 m (زاوية الارتفاع الصغرى 17°)

f = 28 450 000 000 Hz

F = 11 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 34 dBi (حافة حزمة الساتل المساوية 3° عند نصف القدرة)

B = 20 800 000 Hz

T = 1 000 K، وعليه يكون:

C/N = 12,5 dB.

الوصلة الصاعدة من المحطة الأرضية المحلية في نطاق التردد 14 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 16,7 dBW (47 W)

G_T = 47,63 dBi (هوائي قطره 2 m عند التردد 14,25 GHz)

$d \geq$ 40 583 982 m (زاوية الارتفاع الصغرى 10°)

f = 14 250 000 000 Hz

F = 4,5 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 34 dBi (حافة حزمة الهوائي المساوية 3° عند نصف القدرة)

B = 20 800 000 Hz

T = 800 K، وعليه يكون:

C/N = 12,5 dB.

الوصلة الهابطة إلى المحطة الأرضية المحلية في نطاق التردد 20 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 13 dBW (20 W)

G_T = 34 dBi (حافة حزمة الهوائي مساوية 3°)

d = 39 583 746 m (زاوية الارتفاع الصغرى 17°)

f = 19 700 000 000 Hz

F = 7 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 50,44 dBi (هوائي قطره 2 m عند التردد 19,7 GHz)

B = 20 800 000 Hz

T = 300 K، وعليه يكون:

C/N = 10,7 dB.

الوصلة الهابطة إلى المحطة الأرضية المحلية في نطاق التردد 11 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

P_T = 7,8 dBW (6 W)

G_T = 34 dBi (حافة حزمة الهوائي المساوية 3°)

d = 40 583 982 m (زاوية الارتفاع الصغرى 10°)

f = 10 950 000 000 Hz

F = 3,5 dB (خبو لأقل من 1% من الوقت)

G_R = 45,34 dBi (هوائي قطره 2 m عند التردد 10,95 GHz)

B = 20 800 000 Hz

T = 200 K، وعليه يكون:

C/N = 10,7 dB.

3.6.3 الوصلات بين المحطة الأرضية المركزية والساتل

الوصلة الصاعدة من المحطة الأرضية المركزية إلى الساتل في نطاق التردد 30 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 24,7 dBW (295 W)

G_T = 63,88 dBi (هوائي قطره 6,5 m عند التردد 28,45 GHz)

d = 38 377 622 m (زاوية الارتفاع 32,7°)

f = 28 450 000 000 Hz

F = 16 dB (خبو لأقل من 0,1% من الوقت)

G_R = 36 dBi (ضمن 1° من محور حزمة الساتل)

B = 7 800 000 Hz

T = 1 000 K، وعليه يكون:

C/N = 25,0 dB.

الوصلة الصاعدة من المحطة الأرضية المركزية إلى الساتل في نطاق التردد 14 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 14,3 dBW (26,9 W)

G_T = 57,86 dBi (هوائي قطره 6,5 m عند التردد 14,25 GHz)

d = 38 656 773 m (زاوية الارتفاع 29,5°)

f = 14 250 000 000 Hz

F = 6,5 dB (خبو لأقل من 0,1% من الوقت)

G_R = 36 dBi (ضمن 1° من محور حزمة الساتل)

B = 7 800 000 Hz

T = 800 K، وعليه يكون:

C/N = 25,0 dB.

الوصلة الهابطة إلى المحطة الأرضية المركزية في نطاق التردد 20 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 15,4 dBW (35 W)

G_T = 36 dBi (ضمن 1° من محور حزمة الساتل)

d = 38 377 622 m (زاوية الارتفاع 32,7°)

f = 19 700 000 000 Hz

F = 12 dB (خبو لأقل من 0,1% من الوقت)

G_R = 60,68 dBi (هوائي قطره 6,5 m عند التردد 19,7 GHz)

B = 7 800 000 Hz

T = 300 K، وعليه يكون:

C/N = 25,0 dB.

الوصلة الهابطة إلى المحطة الأرضية المركزية في نطاق التردد 11 GHz الموزع للخدمة الثابتة الساتلية

كما في المعادلة (2)، حيث:

P_T = 9,7 dBW (9,3 W)

G_T = 36 dBi (ضمن 1° من محور حزمة الساتل)

d = 38 656 773 m (زاوية الارتفاع 29,5°)

f = 10 950 000 000 Hz

F = 8 dB (خبو لأقل من 0,1% من الوقت)

G_R = 55,58 dBi (هوائي قطره 6,5 m عند التردد 10,95 GHz)

B = 7 800 000 Hz

T = 200 K، وعليه يكون:

C/N = 25,0 dB.

4 سعة كل ساتل (C_S)

كما يتضح من الشكلين 11 و13، فإن كل واحد من المرسلات–المستجيبة التي عددها 64 مرسلاً–مستجيباً في هذا المثال يعمل بأسلوب الموجة الحاملة الواحدة، ويرسل موجة حاملة معدلها 26 Mbit/s. ولذلك تكون السعة الكلية لكل ساتل هي $C_S = 64 \times 26 = 1\,664$ Mbit/s.

وفي أسلوب العمل على أساس الموجة الحاملة الواحدة لكل مرسل–مستجيب، لا يُطلب أي تخفيض، وهكذا فإن موازنات الوصلات المذكورة أعلاه تبين أن هذه المرسلات–المستجيبة يكفي أن تقدم قدرة 35 W عند حد الإشباع في نظام يعمل في النطاقات 30/20 GHz، وأن تقدم قدرة 9,3 W عند حد الإشباع في نظام يعمل في النطاقات 14/11 GHz. وتكون متطلبات القدرة في المراحل التي تسبق مرحلة الخروج تكون صغيرة نسبياً. وهكذا بافتراض أن كفاءة تحويل القدرة تبلغ 33%، فإن القدرة الأولية الكلية اللازمة للحصول على الحمولة النافعة ستكون حوالي $(35 \times 64)/0{,}33 = 6{,}8$ kW للساتل الذي يعمل في النطاقات 30/20 GHz، أو ستكون حوالي $(9{,}3 \times 64)/0{,}33 = 1{,}8$ kW للساتل الذي يعمل في النطاقات 14/11 GHz.

وهكذا فإن إدخال تعدد إرسال مشدد وإمكانيات تخزين دارئ مؤقت للمعطيات في كل موقع لمحطة أرضية جماعية، سيسمح بزيادة عدد المستعملين النهائيين الذين يمكن أن تتحملهم مثل هذه الشبكة إلى أقصى حد.

5 السعة الكلية الكامنة (C_T)

كما هو محسوب في الفقرة 3 من الملحق 1، فإن زوايا الارتفاع الصغرى المفترضة (17° للتشغيل في المدى 30/20 GHz و10° للتشغيل في المدى 14/11 GHz) تؤدي إلى مديات خطوط الطول التالية للسواتل التي تخدم المنطقة المرجعية الدائرية التي مساحتها 10 000 000 km^2 المبينة في الشكل 12:

- في النطاقات 30/20 GHz، من 23,4° غرباً إلى 74,3° شرقاً، يكون مدى خطوط الطول 97,7°؛
- وفي النطاقات 14/11 GHz، من 30,1° غرباً إلى 81,0° شرقاً، يكون مدى خطوط الطول 111,1°.

وباستخدام الطريقة المشروحة في الشكل 7 والنص المصاحب، فإن المباعدة الصغرى من خطوط الطول بين السواتل التي هي من النمط المشروح في هذا الملحق، لكي يحتفظ بالتداخل الناشئ بين السواتل المتجاورة منخفضاً بالقدر الكافي، هي من الناحية التقنية تقل عن درجة واحدة في الحالتين. وإذا أخذت بالحسبان عوامل أخرى، مثل إمكانية التحكم في السواتل عملياً، فإن المباعدة 2° هي المباعدة الصغرى التي تسمح بها سلطات الترخيص للسواتل المتجاورة المشتركة في التردد وفي التغطية، وعليه تعتبر هذه القيمة هي القيمة المناسبة لاعتمادها هنا. وهكذا فإن العدد الكلي من الأنظمة العاملة في النطاقات 30/20 GHz والمشروح نمطها في هذا الملحق والتي يمكنها تخديم المنطقة المرجعية تخديماً متآوناً، حُسِب ليكون 48 نطاقاً، وعدد الأنظمة العاملة في النطاقات 14/11 GHz حُسِب ليكون 55 نطاقاً.

وبالنتيجة فإن السعة الكلية الكامنة التي يمكن أن تقدمها الأنظمة المشروح نمطها هنا، للمساحة الاستوائية البالغة 10 000 000 km^2، مستخدمة عرض نطاق قدره 500 MHz للوصلة الصاعدة وعرض نطاق قدره 500 MHz للوصلة الهابطة، تحسب لتكون: 48 × 1 664 Mbit/s = 79,872 Gbit/s لمثال النطاقات 30/20 GHz و55 × 1 664 Mbit/s = 91,52 Gbit/s لمثال النطاقات 14/11 GHz. ومع ذلك، نظراً إلى الحاجة لتقاسم الترددات مع الأنظمة القائمة في الخدمة الثابتة الساتلية، يبدو أن جزءاً من هذه السعة يحتمل ألا يكون تطبيقه ممكناً في المستقبل المنظور، وخاصة في مجال نطاقات الترددات المنخفضة.