التوصيـــة ITU-R S.1061-1*

استخدام استراتيجيات وتقنيات ترتيبات مضادة للخبو في الخدمة الثابتة الساتلية

(2007-1994)

مجال التطبيق

الأنظمة الساتلية واحدة من أكثر الأساليب فعالية لتوفير خدمات متعددة الوسائط عالية السرعة. ويستدعي استعمال نطاقات تردد أعلى نظراً لمحدودية طيف التردد الراديوي والطلب على خدمات عالية السرعة استراتيجيات ترتيبات مضادة تتسم بالكفاءة للتغلب على التوهين الناجم عن المطر في الوصلة الساتلية. وتقدم هذه التوصية لمحة عامة عن هذه الأساليب وتصف بإيجاز كيفية التخطيط لاستعمال الترتيبات المضادة للخبو في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS).

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن الضغط الذي يمارسه تزايد طلب الخدمات الساتلية على طيف التردد الراديوي المحدود يؤدي إلى استعمال نطاقات ترددات أعلى؛

ب) أن أحد المآخذ الرئيسية المرتبطة بالأنظمة الساتلية عالية التردد هو التوهين الكبير للإشارة بسبب المطر؛

ج) أنه قد يصعب تحقيق أداء القناة الساتلية كما تحددها التوصيات ITU-R S.353 وITU-R S.522 وITU-R S.614 وITU-R S.1062 وITU-R S.1420 وITU-R S.1711 وITU-R S 579 وITU-R S.1424، بشكل اقتصادي، باللجوء إلى هامش القدرة فقط؛

د) أن عدة أنظمة قد وضعت لمواجهة التوهين بالمطر ذات أداء ودرجة من التعقيد بحيث تتعلق إمكانية تطبيقها بنمط الشبكة المعنية،

توصـــي

1. بأن تُتخذ المواد المقدمة في الملحق 1 بمثابة إرشادات لتخطيط استخدام تقنيات ترتيبات مضادة للخبو في الخدمة الثابتة الساتلية.

الملاحظة 1 – تجدر الإشارة إلى أن التقنيات المعنية قد تستعمل جمعاً شريطة ألا يوجد تعارض أساسي فيما بينها.

* أدخلت لجنة الدراسات 4 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية في عام 2001 وفقاً لأحكام القرار ITU-R 44 (RA-2000).

الملحق 1

الترتيبات المضادة للخبو في أنظمة الاتصالات الساتلية

1. التشغيل باختلاف المواقع

1.1 اعتبارات عامة تتعلق بالتصميم

لا يتقرر الأداء المطلوب للمحطات الأرضية بالتنوع بحكم المناخ المطري فحسب بل بحكم تشكيلة التنوع أيضاً. ويتميز النوع الأول من التشكيلات بالتنوع المتوازن (التنوع بواسطة محطتين أرضيتين ذات أداء متساوٍ). أما التشكيلة الثانية فهي التنوع غير المتوازن. ويكون أداء المحطة الأرضية الأولى (المحطة الرئيسية) في هذه التشكيلة عالٍ بما يكفي لتنقيص متطلبات أداء المحطة الأخرى (المحطة الفرعية) تنقيصاً ملموساً. ويرتأى هذا النمط من التشكيل بتنوع غير متوازن عندما يجهز هوائي المحطة الرئيسية بنظام نطاقات تغذية متعددة الترددات مثل النطاق GHz 6/4 والنطاق GHz 14/11 و/أو عندما ينبغي أن تبسط المحطة الفرعية لأسباب تقنية وتشغيلية.

ويلخص الجدول 1 نتائج حسابات اعتيان قطر الهوائي وأقصى قدرة إرسال مطلوبة لوصلات التنوع المتوازن عند زوايا ارتفاع منخفضة. وتعطى تقديرات لوصلتين مفترضتين بالتنوع: Yamaguchi-Hofu (A) (مسافة التنوع = 20 km) و(B) Yamaguchi-Hamada (100 km)، كلتاهما في اليابان.

ويبين هذا الجدول أن قطري الهوائي المطلوبين للوصلة FM عند GHz 14/11 (GHz 14 للوصلة الصاعدة و11 GHz للوصلة الهابطة) يساويان 28 m و19 m للحالتين (A) و(B) على التوالي. وإذا أمكن زيادة قطر المحطة الرئيسية بالنسبة إلى هاتين القيمتين يصبح قطر الهوائي المطلوب للمحطة الفرعية أصغر. وتشتق القيم المبينة في هذا الجدول بواسطة معلمات الوصلة المحددة لسواتل Intelsat-V، ومن ثم يمكن أن تتعرض للتغيير عندما تختلف معلمات الوصلة عن المعلمات المستعملة هنا.

الجـــدول 1

حسابات اعتيان للأداء المطلوب في وصلات التنوع المتوازن
عند زوايا ارتفاع منخفضة (GHz 14/11)

الموقـــع	(A) Yamaguchi-Hofu		(B) Yamaguchi-Hamada	
زاوية الارتفاع (درجات)	9,1	9,1	9,1	8,4
مسافة التنوع (km)	20		100	
FM قطر الهوائي المطلوب (m) قدرة الإرسال المطلوبة[1] (W) (القيمة القصوى)	28/32 730		19/22 510	
[2]TDMA قطر الهوائي المطلوب (m) قدرة الإرسال المطلوبة (W) (القيمة القصوى)	17/19 530		11/12 400	

(1) القيم المحددة لموجة حاملة FDM-FM (25 MHz) من 792 قناة.

(2) القيم لتشكيل رباعي الطور CPSK بمعدل 120 Mbit/s مع تصحيح أمامي للأخطاء.

الفرضيات:

التردد: 14,5 GHz (الوصلة الصاعدة)/11,7 GHz (الوصلة الهابطة)

الموقع المداري للساتل: 63° شرقاً، 0° شمالاً

القدرة e.i.r.p. للساتل: 41,1 dBW

يقدر قطر الهوائي لحالتين:

T_s = 50 K و T_s = 150 K

T_s: درجة حرارة الضوضاء لهوائي المحطة الأرضية

كفاءة هوائي المحطة الأرضية: 65%

وتستند هذه التقديرات إلى إحصاءات معدلات الأمطار لهذه المواقع.

تختلف طرائق حساب الأداءات المطلوبة (قطر الهوائي والقدرة e.i.r.p.) من أجل المحطات الأرضية بالتنوع وفقاً لتشكيلات التنوع. وينبغي أن تعتمد الحسابات، لدى تصميم وصلة بالتنوع المتوازن، على التوزيع المشترك لاحتمالات التوهين بالمطر في الموقعين، بينما ينبغي في حالة تشكيلة التنوع غير المتوازن أن يحدد التوزيع الزمني التراكمي للتوهين بالمطر واحتمالات التوهين المشروطة.

ويكون الاحتمال المشروط $P(L''/L')$ هو احتمال أن يتجاوز التوهين بالمطر عند موقع المحطة الفرعية القيمة L'' عندما يتجاوز التوهين بالمطر في الموقع الرئيسي قيمة L'.

ويحتاج إجراء تقديرات يعوَّل عليها للشروط المطلوبة للمحطات الأرضية إلى إحصائيات موثوقة على أساس قياسات للانتشار طويلة الأجل.

2.1 عملية التبديل عند تنوع المواقع

ينبغي لدى تنفيذ محطات أرضية بالتنوع إيلاء عناية لعملية التبديل نظراً لاحتمال حدوث خسارة في الإشارة لمدة قصيرة أو تراكب بسبب الفرق في طول المسير بين طرق التنوع أو بسبب انقطاع في طور الموجة الحاملة.

وفيما يتعلق بالإرسالات التماثلية مثل الإرسالات FM-FDMA فإن التبديل في الإرسال يسبب بالضرورة انقطاعاً في طور الموجة الحاملة ينتج عنه تموّر في الإشارة عند خرج مزيل التشكيل في محطات الاستقبال الأرضية. ويمكن تجنب تموّر الإشارة بسبب التبديل عند محطة الاستقبال الأرضية من خلال ضبط دقيق لطول المسير الكهربائي لكل وصلة تنوع تقاس من جهاز التبديل إلى الساتل.

ويمكن، في الإرسالات الرقمية، تجنب تموّر الإشارة حتى في حالة عملية التبديل عند محطة الإرسال الأرضية من خلال إدراج فواصل زائفة في تتابع إشارة الإرسال وإجراء التبديل أثناء الفاصل الزائف. وينبغي أن تستبعد الفواصل الزائفة في محطات الاستقبال الأرضية سواء تم التبديل أم لم يتم.

ويمكن أن يحقق الإرسال TDMA أفضل تبديل انتقالي في مرحلتي الإرسال والاستقبال لنظام التنوع. وتدرج الفواصل الزائفة لأن الإرسال TDMA يشغل جزءاً فقط من الرتل TDMA. وتكون مزيلات التشكيل TDMA قادرة، إضافة إلى ذلك، على استقبال موجات حاملة بأسلوب الرشقات والطور غير المتماسك. ومن ثم فإن عدم تماسك الطور في الموجات الحاملة TDMA لا يسبب أية صعوبات، والمشكلة الوحيدة التي قد يطرحها التشغيل بتنوع المواقع في الإرسال TDMA هي ضرورة التحكم في توقيت الإرسال حتى في الإرسال الأولي الصادر عن المحطة الاحتياطية. ويمكن أن يحل ذلك سواء من خلال الإرسال المستمر لرشقة زائفة من المحطة الاحتياطية أم من خلال الحصول من الساتل على بيانات لقياس المسافة دقيقة إلى حد كاف. ويعتبر ذلك ممكناً عندما يستخدم النظام TDMA تزامن العروة المفتوحة. ويمكن، في الإرسال TDMA، أن تسوى أطوال مسير طرق التنوع باستعمال توقيت الاستقبال لإشارات تزامن الرتل. كما يمكن أن يسوى توقيت استقبال الإشارات على طريقي التنوع تسوية أوتوماتية من خلال التحكم في خط التأخر المتغير المدرج في إحدى طريقي التنوع. وقد تم اختبار نظام تجريبي يستعمل تقنية الرشقة الزائفة.

ينبغي، فيما يتعلق بانتقاء الطريق أثناء التشغيل بالتنوع، أن تقاس جودة الإرسال لطرق التنوع. ولأن تأثير التنوع قد يتعرض للانحطاط تبعاً لطريقة قياس جودة الوصلة، ينبغي الانتباه إلى انتقاء مدة القياس والدقة الممكنة.

3.1 وصلة التوصيل البيني بالتنوع

ثمة عامل يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار، وهو أن الدارة الافتراضية المرجعية التي حددها القطاع ITU-R في التوصية ITU-R S.352، والمسير الرقمي الافتراضي المرجعي المعرف في التوصية ITU-R S.521، يتضمنان وصلات التوصيل البيني بالتنوع (DIL) مع نقطة التبديل بالتنوع، وأية تجهيزات إضافية مطلوبة للتشكيل/إزالة التشكيل. وهذا يعني أن على موازنات ضوضاء النظام أن تتضمن كل تأثيرات الوصلات DIL.

1.3.1 التشكيلة الأساسية

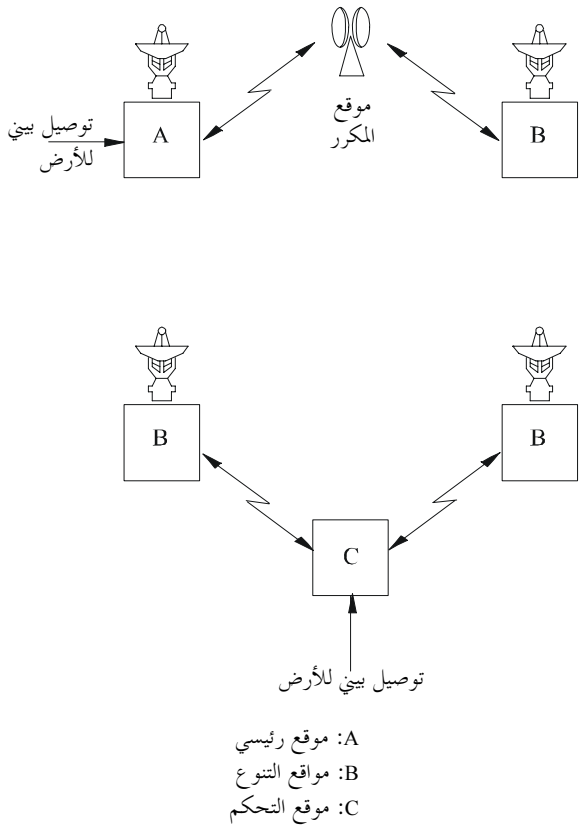
1.1.3.1 الجوانب المادية

يمكن اعتبار عدد من التشكيلات الخاصة المختلفة والنظر إلى الأسباب التي تدعو إلى تفضيل إحدى هذه التشكيلات. ويتناول هذا الملحق تشكيلتين منها ويعرض وصفاً لهما (انظر الشكل 1):

- موقع رئيسي يتضمن أجهزة التبديل بالتنوع والسطح البيني للأرض. ويوصل موقع التنوع من خلال وصلة DIL بموجة صغرية ذات قفزتين تستعمل مكرراً نشيطاً أو منفعلاً. (يفترض أن هناك موقع مكرر لأن احتمال الرؤية المتبادلة في مواقع التنوع يبقى ضعيفاً)؛
- موقعا تنوع مزدوج وموقع تحكم منفصل مع السطح البيني وأجهزة التبديل بالتنوع، ويوصل كل موقع بموقع التحكم عبر موجة صغرية بقفزة واحدة.

الشـــكل 1

تشكيلات التنوع



ويمكن أيضاً أن تستعمل وصلات الكبل أو الدليل الموجي من أجل الوصلات DIL. وعندما تستعمل التقنيتان FDM-FM وTDM (FDMA أو TDMA) في محطة أرضية، يحتاج الأمر عادة إلى وصلتين موازيتين.

2.1.3.1 الشروط المطلوبة للتشكيل

من الضروري، عندما تستعمل التقنية FDM-FM، أن يصار إلى إعادة للتشكيل لأن تشكيل الوصلة الساتلية وتشكيلات النطاق الأساسي تختلف في العادة عن تلك المستعملة تقليدياً في أنظمة الأرض. ويكمن الفرق الرئيسي في ترزيم القنوات. وتركَّب عادة القنوات في نظام الأرض داخل نطاق أساسي أو عدة نطاقات أساسية في كل اتجاه وتستخدم دليل تشكيل منخفض نسبياً. وتنقسم هذه النطاقات الأساسية للمحطة الأرضية إلى عدة نطاقات أساسية للإرسال متعددة المقاصد وهي تختلف عن النطاقات الأساسية في نظام الأرض وتستخدم دليل تشكيل مختلف. وتكون نطاقات الاستقبال الأساسية أكثر عدداً ويمكن أن تتكون من بضع قنوات يجب أن يعاد تركيبها داخل النطاقات الأساسية لنظام الأرض. وتتطلب هذه العملية تجهيزات للتشكيل وإزالة التشكيل في موقع المحطة الأرضية الرئيسية وفي موقع التنوع حيث يستعمل التصميم التقليدي للوصلة DIL. ويمكن أن تنفذ كل التشكيلات بواسطة تقنية إعادة التشكيل على أن يتوفر جهاز رديف في موقع التنوع.

وثمة تقنية بديلة تستعمل في نظام الأرض تقنيات التشكيل نفسها التي تستعمل في النظام الساتلي. ويبدو أن هذه التقنية ممكنة التطبيق مع أنها غير تقليدية. وهي تسمح بتوفير تكلفة جهاز إعادة التشكيل، ربما مع بعض التكلفة الإضافية بالنسبة إلى نظام الأرض، مع أن من الممكن تحقيق بعض التوفير في هذا العنصر كذلك. وتطبق هذه التقنية على التشكيلة الثانية في الشكل 1 فقط. وعندما تستعمل التقنية TDM (FDMA أو TDMA)، يمكن أن تطبق إحدى التقنيتين. وينفذ التبديل بالتنوع فيما بين

الرشقات في حالة الإرسال TDMA (انظر الفقرة 2.1). ويمكن أن يستعمل التشكيل نفسه على الوصلة DIL مثلما يستعمل في النظام الساتلي مع أن معدلات المعطيات لا تكون في العادة معدلات نظام راديوي رقمي تقليدي للأرض.

2.3.1 العوامل التقنية

1.2.3.1 انتقاء الترددات

يتطلب انتقاء الترددات لوصلة موجة صغرية DIL دراسة دقيقة من أجل التأكد من تحقق الأداء الإجمالي المطلوب. وتعرض النصوص ذات الصلة الصادرة عن لجنة الدراسات 5 للاتصالات الراديوية معلومات عن انتشار الموجات الصغرية في نظام للأرض.

2.2.3.1 الشروط الخاصة بعرض النطاق

يمكن أن يرتبط عرض النطاق المطلوب لتنفيذ وصلة DIL بعرض نطاق المحطة الأرضية بعامل قد يساوي 1 أو أقل وذلك يعتمد على استعمال إعادة التشكيل أم عدمه. وإذا استعمل تحويل التردد فقط عندئذ يجب أن تكون شروط عرض النطاق MHz من أجل MHz. ويمكن، من خلال إعادة التشكيل، أن تتحقق كثافة أكبر للقنوات باستخدام دلائل تشكيل FM أصغر مقابل قدر أكبر من سطح بيني بتعدد الإرسال.

3.2.3.1 التوهين بسبب المطر

ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار عوامل أخرى هي التوهين بالمطر وخصائص تنوع المواقع وكلاهما يرتبط بظاهرة هطول الأمطار، ويفضل المناخ الجاف. ويتوقف تأثير التنوع على المباعدة بين المواقع. ويتوقع أن تساوي المباعدة الاسمية km 16 تقريباً. ويفترض أن أفضل توجيه لخط يوصل بين المواقع هو أن يكون متعامداً مع اتجاه نماذج الطقس السائدة لأنه لا يتوقع أن تؤثر أشد شروط التوهين في الموقعين في آن معاً، ويمكن الحصول على أقصى شروط للاستقبال بالتنوع. وينبغي أن تؤخذ في الاعتبار تأثيرات المناخ في وصلات الموجات الصغرية DIL إذا ما استخدمت لهذه الوصلات ترددات أعلى، رغم أن هذا الاعتبار ينبغي أن يكون ثانوياً.

4.2.3.1 تغييرات في تأخر الإرسال العائد إلى التبديل بالتنوع

ثمة عامل آخر ذو أهمية يرتبط بتأخر الإرسال التفاضلي بين إشارات التنوع عند وصولها إلى نقطة التبديل.

3.3.1 اعتبارات عامة

ثمة جانبان خاصان مهمان في وصلات التوصيل البيني بالتنوع (DIL).

- المساهمة في موازنات الضوضاء الكلية للنظام،
- المساهمة في الانقطاعات التي تحدث في النظام.

وتدرس هذه المواضيع هنا بهدف تحديد تأثيرات المعلمات المهمة وعلاقاتها المتبادلة مع أجزاء الوصلات الساتلية في النظام.

ويمكن أن تصمم وصلة التنوع على أساس أمرين. فإذا تم اختيار طريقة إعادة التشكيل عندئذ يمكن استعمال التصميمات التقليدية للمرحلات الراديوية. أما إذا تم اختيار نظام التحويل، عندئذ يمكن أن يتبع التصميم مخططاً مختلفاً ويكون مماثلاً جداً لتصميم إرسال النظام الساتلي. ويجب أن تؤخذ في الاعتبار في الأداء الإجمالي هوامش الخبو مساهمات الضوضاء. وبالنسبة إلى الحالة الخاصة التي تستعمل فيها الترددات نفسها للوصلة DIL وللنظام الساتلي، ينبغي أن تؤخذ أيضاً في الاعتبار ضوضاء التداخل.

1.3.3.1 موازنات الضوضاء في التشكيل FDM-FM

ينبغي أن تكون مساهمات الوصلة DIL في الضوضاء الإجمالية للدارة الافتراضية المرجعية صغيرة إلى حد معقول من أجل المحافظة على أداء النظام وفقاً للتوصية ITU-R S.353.

ويبدو معقولاً الافتراض بأن مساهمة الضوضاء للوصلة DIL هي جزء من موازنة المحطة الأرضية (500 1 pW0p، في العادة)، لأن الوصلة DIL توفر جزءاً من وظيفة المحطة الأرضية العادية. وينبغي أن تبقى هذه المساهمة عند سوية منخفضة بما يكفي كي لا تتجاوز قيمة 500 1 pW0p الإجمالية. وسوف يساهم خبو الوصلة DIL في موازنة الضوضاء الإجمالية للوصلة لأجل قصير.

ويتعلق عدد مكونات الضوضاء الصادرة عن الوصلة DIL بتشكيلة التنفيذ وبنطاقات التردد المستعملة. وهذه المكونات هي:

أ) *الضوضاء الحرارية*

تكون قدرة الضوضاء في التصميمات التقليدية ITU-R الخاصة بالمرحلات الراديوية بقيمة 1 إلى 3 pW0p لكل km أو أقل للقفزة الواحدة، ويمكن الحفاظ عليها عند قيمة 10 pW0p أو أقل. وتكون المساهمات الصغيرة أيضاً في بعض التصميمات الخاصة والمركبات المتغيرة زمنياً والتي تعود إلى الخبو بسبب تعدد المسيرات والتوهين بالمطر كبيرة نسبياً ولكن يمكن الحفاظ عليها ضمن قيم معقولة في حالة القفزات القصيرة. وترتبط الضوضاء الحرارية على أساس ديسبل مقابل ديسبل بعمق الخبو مهما كانت آليته.

ب) *الضوضاء الأساسية الملازمة*

وهي ضوضاء في النطاق الأساسي وتطبق على مخططات إعادة التشكيل فقط. وتعتبر سويات للضوضاء من 50 إلى 100 pW0p عادية للنطاقات الأساسية ظهراً لظهر. وتراعي موازنة الضوضاء العادية لمحطة أرضية مساهمة من هذا النوع بينما يضيف مخطط لإعادة التشكيل مساهمة ثانية.

ج) *التداخل*

يمكن أن تظهر في بعض الحالات مساهمة صغيرة جداً من التداخل الصادر عن أنظمة أخرى بالموجات الصغرية تعمل في نطاقات الترددات نفسها. ويمكن أن تعتبر هذه المساهمة غير ذات أهمية. ويتوقع في الحالة الخاصة التي يعاد فيها استعمال التردد نفسه أن تظهر مساهمات للتداخل في الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة. وتقدر للتشغيل العادي قيم في حدود 10 إلى 100 pW0p. ويمكن، إضافة إلى ذلك، أن تصاحب بعض حالات الخبو زيادات في هذه الضوضاء لفترات قصيرة جداً إلى جانب الضوضاء الحرارية. ولا يتطلب هذا المخطط إعادة التشكيل، وهكذا تزال كل الضوضاء الإضافية المقترنة بما جاء في البند ب).

د) *التشكيل البيني*

يتضمن تصميم إعادة التشكيل زوجاً إضافياً من مشكل ومزيل التشكيل ومضخمات التردد الوسيط بينما يتكون تصميم التمويل يتكون بكامله من التجهيزات التقليدية للمحطة الأرضية، ومن ثم يساهم في إنتاج ضوضاء للتشكيل البيني منخفضة جداً.

يمثل الجدول 2 موازنة ممكنة للضوضاء:

الجـــدول 2

عينات لموازنات ضوضاء – ظروف الفضاء الحر				
	إعادة التشكيل (قفزتان)		**تحويل التردد (قفزة واحدة)**	
	منخفضة (pW0p)	**مرتفعة (pW0p)**	**منخفضة (pW0p)**	**مرتفعة (pW0p)**
ضوضاء حرارية	2	20	1	10
تشكيل بيني في النطاق الأساسي	50	100	–	–
تداخل	–	–	10	100
تشكيل بيني (RF)	100	200	20	50
المجموع (pW0p)	152	320	31	160

2.3.3.1 موازنة الأخطاء في الإرسال TDMA

ينبغي لمساهمات الوصلة DIL في معدل الأخطاء الإجمالي للمسير الرقمي الافتراضي المرجعي أن يكون منخفضاً بما يكفي للمحافظة على أداء النظام طبقاً لأحكام هذه التوصية.

وتجدر الإشارة إلى أن الأخطاء جمعية في حالة وصلة إعادة التشكيل DIL بينما تكون تأثيرات الضوضاء جمعية في حالة تحويل التردد.

3.3.3.1 اعتبارات تتعلق بالتردد

يمكن استخلاص خصائص التوهين بدلالة التردد والمناخ وطول المسير في أثناء هطول الأمطار من تصميمات الموجات الصغرية التقليدية. ويعتبر التوهين بالمطر والخبو بسبب تعدد المسيرات حادثين مستقلين – وهما في الحقيقة حادثان يستثني أحدهما الآخر.

ونظراً إلى أن المباعدة المتوقعة بين محطتين أرضيتين تعملان بالتنوع هي في حدود 16 إلى 24 km ولما كان من المتوقع كذلك أن يكون وجود مكرر أو موقع مشترك ضرورياً، فيحتمل ألا يتجاوز طول المسير الفردي للوصلة DIL مسافة 16 km. ويمكن عادة جعل هوامش هذا الطول من المسير مرتفعة بما يكفي لتخفيض الانقطاعات قصيرة الأجل إلى أقل من 0,001% من الوقت.

2 التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة

1.2 مقدمة

يمكن استعمال التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة (UPC) كوسيلة لتخفيض تأثير التوهين على الوصلة الصاعدة في نطاقات التردد الأعلى (في النطاقين GHz 14/11 وGHz 30/20، على سبيل المثال). وقد تفيد هذه التقنية في تحقيق كفاءة تشغيل نظام اتصالات ساتلي وفي تخفيض التداخل في الوصلات الساتلية الأخرى والوصلات للأرض من خلال تقليص القدرة e.i.r.p. في ظروف سماء صافية.

2.2 تنفيذ التحكم في القدرة UPC

ثمة طرائق مختلفة لتحقيق التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة (UPC)، والطرائق الأكثر استعمالاً هي:

1.2.2 طريقة التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة (UPC) بالعروة المفتوحة

طريقة التحكم UPC بالعروة المفتوحة طريقة تستعمل فيها إشارة صوة من الساتل من أجل قياس التوهين بالمطر على الوصلة الهابطة: ونظراً إلى الارتباط بين التوهين بالمطر على الوصلة الصاعدة والتوهين بالمطر على الوصلة الهابطة، يستعمل هذا القياس من أجل تقدير سوية التوهين بالمطر على الوصلة الصاعدة، ومن ثم قيم التحكم UPC. وتصادف أكثر قيم التوهين المتوقعة القيم الفعلية، إلا أن بعض القيم تختلف بسبب شروط البيئة المحيطة مثل سرعة الريح أو التوزيع الحجمي لقطرات المطر. ويبين الجدول 3 مثالاً للأخطاء المحتملة في تقدير التوهين على الوصلة الصاعدة (GHz 14) انطلاقاً من قياس على الوصلة الهابطة (GHz 11).

وقد استثنيت بعض الأخطاء المحتملة لأنها صغيرة جداً تستعصي التقدير (مثل أخطاء تتبع الهوائيات وأخطاء تسديد الهوائيات وأخطاء التشديد المسبق والانحطاط في كسب الهوائي وتأثيرات الانكسار عند زوايا منخفضة الارتفاع والتقلبات السريعة في معدل هبوط الأمطار). واستثنيت أيضاً مصادر الأخطاء من نمط نادر جداً (مثل تراكم الثلج المبلل على الهوائي، والعطل في دارتي التحكم أو القياس). ويحتمل أن تزيد تركيبات مختلفة من هذه المصادر الإضافية للأخطاء من سوية القدرة التراكمية على الوصلة الصاعدة.

الجـــدول 3

مثال لأخطاء محتملة في تقدير التوهين على الوصلة الصاعدة (GHz 14)
انطلاقاً من قياس على الوصلة الهابطة (GHz 11)

أ) *توهين على الوصلة الصاعدة بأقل من dB 1,0*			
	زاوية الارتفاع		
	°5	°15	°25
خطأ الجهاز[1]	0,725	0,725	0,725
توهين بسبب الجليد	0,05	0,05	0,05
بخار الماء/تأثير الانتشار	0,20	0,10	0,05
السوية في ظروف سماء صافية	0,10	0,10	0,10
أقصى خطأ على الوصلة الصاعدة (dB)	±1,075	±0,975	±0,925
ب) *توهين على الوصلة الصاعدة من 1إلى dB 6*			
	زاوية الارتفاع		
	°5	°15	°25
خطأ الجهاز[1]	0,725	0,725	0,725
توهين بسبب الجليد	0,05	0,05	0,05
توزيع حجمي لقطرات المياه	0,10	0,075	0,05
بخار الماء/تأثير الانتشار	0,20	0,10	0,05
السوية في ظروف سماء صافية	0,10	0,10	0,10
خطأ الاستقطاب	0,10	0,075	0,05
خطأ في طول المسير	0,20	0,10	0,05
طبقة الانصهار	0,05	0,05	0,05
أقصى خطأ على الوصلة الصاعدة (dB)	±1,525	±1,275	±1,125
ج) *توهين على الوصلة الصاعدة بأكثر من dB 6*			
	زاوية الارتفاع		
	°5	°15	°25
خطأ الجهاز[1]	0,725	0,725	0,725
توهين بسبب الجليد	0,05	0,05	0,05
توزيع حجمي لقطرات المياه	0,20	0,15	0,10
بخار الماء/تأثير الانتشار	0,10	0,075	0,05
السوية في ظروف سماء صافية	0,10	0,10	0,10
خطأ الاستقطاب	0,20	0,15	0,10
خطأ في طول المسير	0,40	0,25	0,15
طبقة الانصهار	0,05	0,05	0,05
أقصى خطأ على الوصلة الصاعدة (dB)	±1,825	±1,550	±1,325

[1] يقدر خطأ الجهاز بقيمة ±0,725 dB المفترض أعلاه على أساس خطأ من ±0,5 dB يلاحظ عند 11,7 GHz (على الوصلة الهابطة)، ويفترض عامل تدريج بقيمة 1,45 يتراوح بين11,7 GHz و14 GHz. وتم التوصل إلى خطأ بمقدار ±0,5 dB انطلاقاً من البيانات المتيسرة، ومن الضروري أن يصار إلى تحقق لاحق من خلال قياسات إضافية.

2.2.2 طريقة التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة (UPC) بالعروة المغلقة

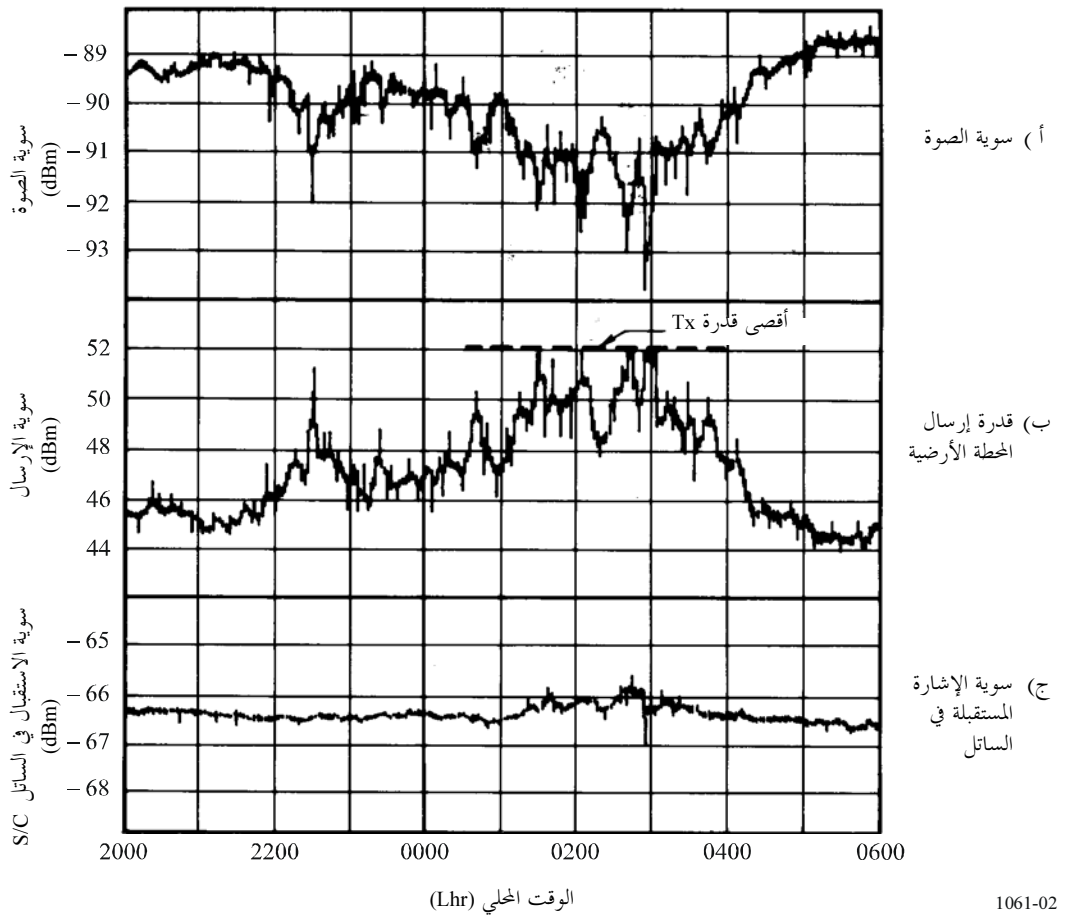
طريقة التحكم UPC بالعروة المغلقة طريقة تقارن فيها إشارة الصوة الساتلية مع النسبة *C/N* أو *S/N* في عروة الرجعة لإشارة دلالية أو إشارة قناة خاصة. وهكذا يمكن أن يحدد التوهين بالمطر على الوصلة الصاعدة وقيمة التحكم UPC تحديداً دقيقاً جداً. إلا أن من مآخذ هذه المقاربة ضرورة وجود قنوات منفصلة للتحكم إضافة إلى قناة الاتصال.

3.2 تجربة التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة (UPC)

يبين الشكل 2 نتائج تجربة لتحكم UPC بالعروة المفتوحة يستعمل النطاق GHz 30/20. وتتحدد القيم UPC في هذه التجربة من خلال قيم التوهين على الوصلة الهابطة. ويبين الشكل 2 أ) سوية الصوة، والشكل 2 ب) سوية قدرة إرسال مضخم القدرة HPA، والشكل 2 ج) سوية الاستقبال في الساتل. وكما يبدو، من الممكن الحفاظ على التغير في قيم النسبة الكلية *C/N* ضمن حدود dB 1 (ذروة إلى ذروة) إلا في خلال الفترة التي تتجاوز فيها قدرة الإرسال المطلوبة أقصى قدرة للإرسال.

الشـــكل 2

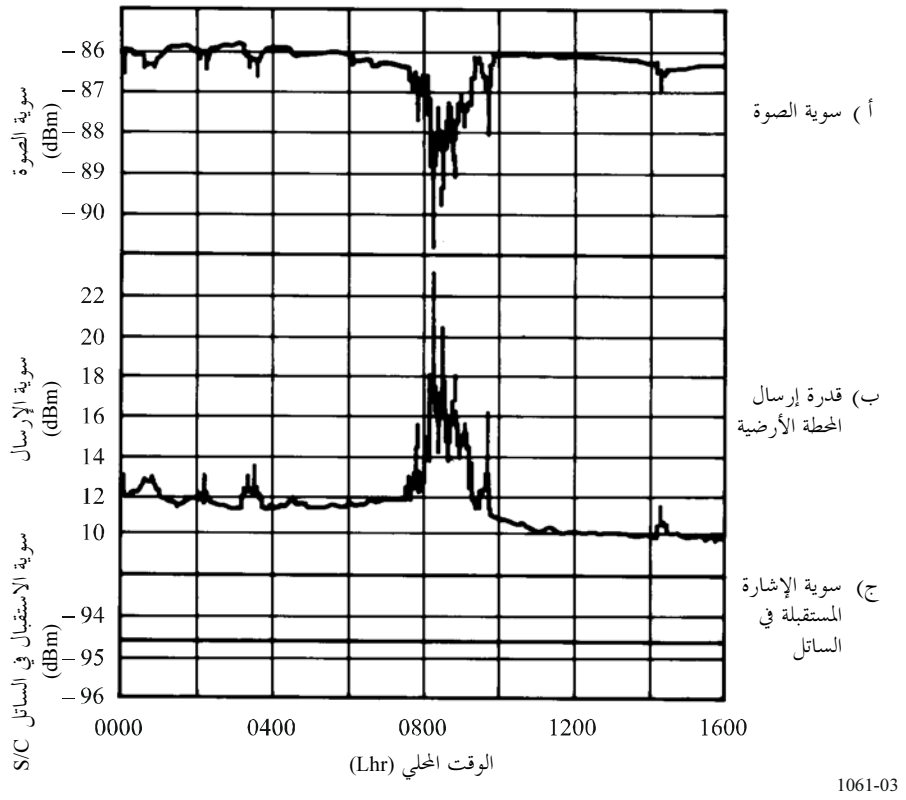
نتائج تجريبية للتحكم UPC بالعروة المفتوحة



وأجريت أيضاً تجربة للتحكم UPC بالعروة المغلقة عند النطاق GHz 30/20، يبين الشكل 3 نتائجها. وأبقي خطأ الضبط ضمن حدود dB 0,3 (ذروة إلى ذروة).

الشـــكل 3

نتائج تجريبية للتحكم UPC بالعروة المغلقة



4.2 تحكم UPC بالعروة المفتوحة باستخدام مقياس إشعاع

يمكن تحقيق تحكم للقدرة على الوصلة الصاعدة باستخدام مقياس إشعاع لقياس الطاقة التي يرسلها المطر على طول مسير الانتشار نحو الساتل. ولا حاجة إلى أي إشارة صوة أو إشارة دليلة. كما تلغى الأخطاء التي تسببها مستقبلات الصوى مثل تغير الكسب بتغير درجة حرارة المضخمات LNA، وغير ذلك.

وقد درس عدة باحثين العلاقة القائمة بين التوهين بسبب الهواطل على مسير مائل ودرجة حرارة الهوائي. ويتميز التوهين على المسير المحسوب من خلال قياسات درجة حرارة الهوائي عموماً بدقة أفضل من 0,5 dB لتوهين يقل عن 6 dB (عند 12 GHz في كندا). ولا يتوقع أن تزيد القدرة على الوصلة الصاعدة عملياً إلى أكثر من 6 dB بكثير. وهكذا يمكن استعمال مقياس الإشعاع من أجل حساب التوهين على المسير عبر كامل المدى الذي يتسم بأهمية عملية.

ويحدث عبور الشمس لأيام عدة بجوار الاعتدالين عندما يكون قوس ميل الشمس قريباً من قوس ميل الساتل. وتحسب زاويتا رؤية الشمس والساتل مراراً من أجل التمييز بين الزيادات في درجة الحرارة والزيادات العائدة إلى التوهين بالمطر في أوقات أخرى. وعندما تكون المباعدة الزاوية بين محور هوائي مقياس الإشعاع والشمس أصغر من زاوية مختارة، يفترض أن الزيادة في درجة حرارة الهوائي تعود إلى الشمس ويمنع التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة.

لقد وضع نظام تحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة عند النطاق 14/12 GHz يقيس فيه مقياس الإشعاع درجة حرارة الهوائي في نطاق من الترددات تحت نطاق الوصلة الصاعدة، ويحسب التوهين على المسير عند تردد الوصلة الصاعدة المرغوب فيه ويتحكم في شدة الإشارة المطبق في التردد المتوسط (IF) على المحوال رافع التردد. وتقاس درجة حرارة الهوائي في نمط جديد من مقياس الإشعاع. ويختلف مبدأ التشغيل اختلافاً جذرياً عن مقياس الإشعاع Dicke التقليدي ويعطي قياساً مستقراً

جداً لدرجة حرارة الهوائي. ويقع كامل مقياس الإشعاع داخل أسطوانة تركب عند البؤرة الرئيسية لعاكس مكافئي. ولما كان ينبغي لتردد مقياس الإشعاع أن يختلف عن تردد الوصلة الصاعدة، بحيث لا يستطيع مقياس الإشعاع كشف الطاقة المرسلة التي ينثرها المطر إلى الخلف على طول المسير، يستخدم تردد لمقياس الإشعاع بقيمة 13,3 GHz.

وقد أجريت، في تجربة تستعمل النظام الموضح أعلاه، مقارنة بين شدة الإشارة بعروة الرجعة مع شدة الإشارة المستقبلة في صوة الساتل. وكان ثمة ارتباط جيد بين شدة الإشارتين يشير إلى أن شدة الإشارة على الوصلة الصاعدة كما يستقبلها الساتل شبه ثابتة ومستقلة عن التوهين بسبب المطر. وسوف تكتسب تجربة تشغيلية إضافية بحكم نظامي التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة اللذين يجري الآن تركيبهما في كندا.

5.2 الخلاصة

يعتبر التحكم UPC إحدى أهم التقنيات الخاصة بإنشاء أنظمة اتصالات ساتلية في نطاقات التردد العالية. ويسمح استخدام هذا التحكم UPC في نطاقات التردد العالية بتنقيص التداخل بين أنظمة ساتلية مجاورة وشبكات للأرض. وينتج عن ذلك استخدام فعال لمدار السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض وتحقيق تشغيل فعال للأنظمة.

ومن الضروري أن يصار إلى إجراء دراسات أكثر تفصيلاً من أجل تحديد طرائق للتحكم UPC أكثر دقة.

3 أنظمة إرسال متغيرة

1.3 مقدمة

يمكن تحسين أداء أنظمة الاتصالات الرقمية الساتلية بتنقيص معدل إرسال المعلومات تنقيصاً تكييفياً عندما تكون ظروف الانتشار سيئة. ويمكن استعمال معلمات متغيرة (إيقاع الميقاتية وعدد حالات الطور) في التشكيل PSK ومعدل التشفير المتغير للتصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) من أجل إرسال المعلومات بمعدل متغير. وطبقت أيضاً طريقة تزامن كلي لإشارة PSK أزيل تشكيلها على نظام TDMA بمعدل إرسال متغير.

وتجدر الإشارة إلى أن الخدمات العمومية قد لا تكون قادرة على التعرض إلى تنقيص في معدل إرسال المعلومات وأن إجراءات أخرى مضادة للخبو قد تكون ضرورية في هذه الحالات.

2.3 أنظمة تشكيل متغيرة

لقد طورت عدة أنواع من المودمات PSK عامة الأغراض. ولهذه المودمات أساليب تشغيل مختلفة بتشكيل PSK من رتبة M وإيقاع ميقاتية الإرسال فيها متغايرة باستمرار. ويمكن تطبيقها على الإشارة بأسلوب الرشقة.

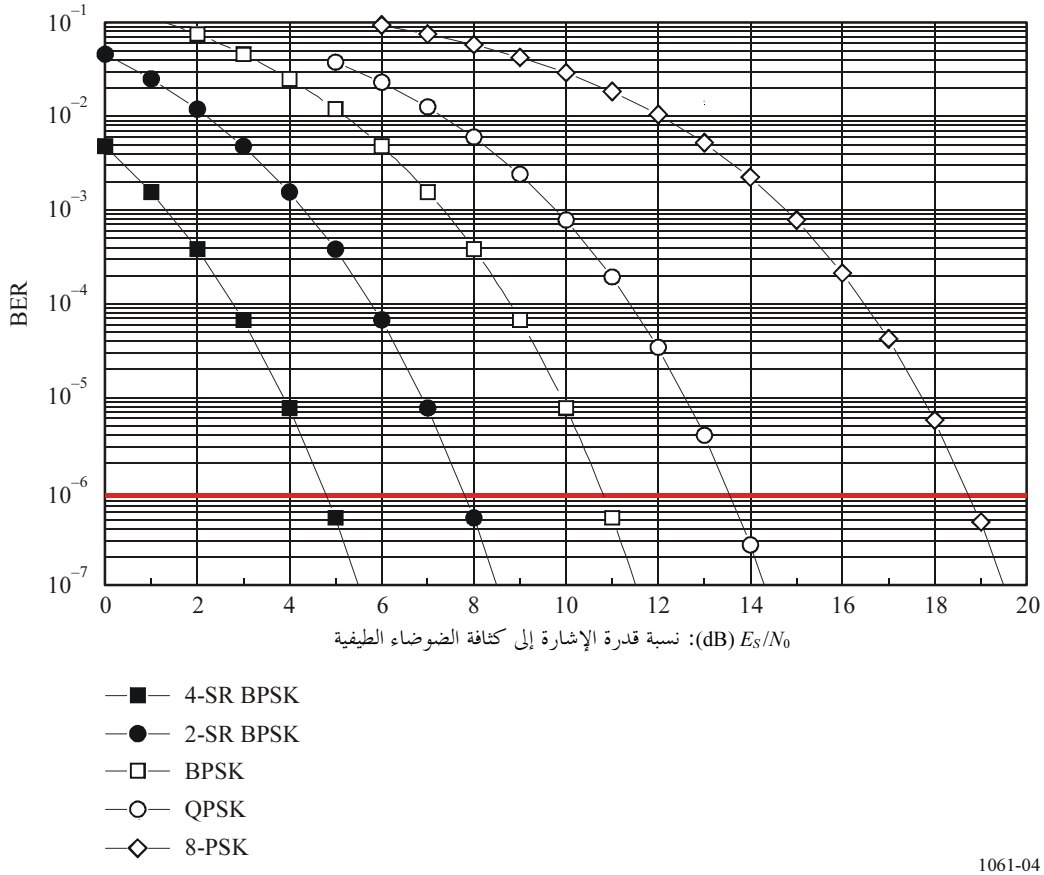
عندما تكون نسبة تنقيص معدل الإرسال γ، تمثل العبارة التالية تحسين النسبة C/N:

$$\Delta(C/N) = -10 \log \gamma \quad \text{dB} \tag{1}$$

يبيّن الشكل 4 أداء معدل أخطاء البتات (BER) لمخططات تشكيل PSK من رتبة M في قناة ضوضاء غوسية بيضاء إضافية (AWGN). وفي الشكل، يشير تعبير N SR إلى تكرار الرمز بمقدار N مرة. وكما يبدو في الشكل، فإن تكرار الرمز مرتين بحكم اختزال المعدل بمقدار النصف يؤدي إلى تحسين بمقدار 3 dB في النسبة C/N. ويؤدي تغيير مخطط التشكيل من 8-PSK إلى QPSK إلى تحسين C/N بنحو 5 dB ومن QPSK إلى BPSK إلى تحسين بنحو 3 dB عند BER = 10^{-6}.

الشـــكل 4

أداء معدل أخطاء البتات (BER) لمخططات تشكيل PSK من رتبة *M*
في قناة ضوضاء غوسية بيضاء إضافية (AWGN)



وقد وضع مؤخراً المعهد الأوروبي لمعايير الاتصالات المعيار ETSI DVB-S2 (الإذاعة الفيديوية الرقمية – بنية أرتال الجيل الثاني وتشفير القنوات وأنظمة التشكيل للخدمات الإذاعية التفاعلية وجمع الأخبار وغيرها من التطبيقات الساتلية في النطاق العريض) الذي حدد فيه أساليب التشفير والتشكيل التكيفية (ACM) في التشغيل. وقد استعملت لمخططات التشكيل أساليب QPSK و8-PSK و16-APSK و32-APSK.

3.3 نظام تشفير تكييفي

إن الشفرات التلافيفية المتقطعة المتوائمة مع المعدل (RCPC)، مع تشفير ريد–سولومون (RS) السلسالي أو دونه، واحدة من أكثر مخططات التشفير شيوعاً. ومن الممكن أيضاً استعمال مخططات تشفير متوائمة المعدل (RC) وُضعت مؤخراً، بما في ذلك الشفرات الدوامة التلافيفية والشفرات الدوامة الفدرية، استعمالاً يتسم بالكفاءة. وأحد هذه الشفرات كودك عام الأغراض له معدل تشفير قابل للانتقاء.

وتمثل المعادلة التالية تحسين النسبة C/N عندما يطبق جهاز كودك على نظام لإرسال المعلومات بمعدل متغير:

$$\Delta(C/N) = 10 \log (R_o / R_a) + G_a - G_o \quad \text{dB} \tag{2}$$

حيث:

R_o: معدل التشفير

G_o: كسب التشفير من أجل التشغيل في ظروف سماء صافية

G_a، R_a: مثلما جاء أعلاه لكن من أجل التشغيل في طقس ممطر.

يضم الجدول 4 أمثلة لتحسين النسبة *C/N* باستعمال مختلف مخططات التشفير التكييفية. ويستخدم المخطط B في هذا الجدول في ظروف المطر والمخطط A في ظروف السماء الصافية. وكسب التشفير في هذا الجدول هو الكسب مقارنة بمخطط BPSK غير المشفّر عندما يكون معدل أخطاء البتات (BER) بمقدار 1×10^{-6}. والشفرات السلسالية والشفرات الدوامة متوائمة المعدل في هذا الجدول هي مخططات تصحيح أمامي للأخطاء (FEC) موصوفة في التوصية ITU-R BO.1724.

الجـــدول 4

تحسين النسبة *C/N* باستعمال مختلف مخططات التشفير التكييفية

المخطط	المخطط A (كسب التشفير)	المخطط B كسب التشفير	فرق كسب التشفير (B-A) (dB)	كسب من تغيير المعدل (dB)	مجموع التحسينات (dB)
شفرات RCPC	1/2 تلافيفي (dB 5,5)	7/8 تلافيفي (dB 3,5)	2,0	2,5	4,5
	1/2 تلافيفي (dB 5,5)	3/4 تلافيفي (dB 4,5)	1,0	1,8	2,8
	3/4 تلافيفي (dB 4,5)	7/8 تلافيفي (dB 3,5)	1,0	0,7	1,7
شفرات سلسالية	1/2 تلافيفي RS (204,188) (dB 6,7)	1/2 تلافيفي (dB 5,5)	1,2	0,4	1,6
	1/2 تلافيفي RS (71,55) (dB 6,2)	1/2 تلافيفي (dB 5,5)	0,7	1,5	2,2
شفرات دوامة متوائمة المعدل	1/3 دوامة (dB 9,0)	1/2 دوامة (dB 8,8)	0,2	0,8	1,0
	1/3 دوامة (dB 9,0)	2/5 دوامة (dB 8,4)	0,6	1,8	2,4
	1/3 دوامة (dB 9,0)	3/4 دوامة (dB 6,9)	2,1	3,5	5,6
	1/3 دوامة (dB 9,0)	6/7 دوامة (dB 9,0)	3,3	4,1	7,4

4.3 نظام إرسال بمعدل متغير باستعمال تقنيات تمديد الطيف والتزامن الكلي

ثمة طريقة أخرى تقع داخل فئة معدل الإرسال المتغير حيث يخلط تدفق من بتات البيانات في النطاق الأساسي (بتات معلومات أو بتات تصحيح الأخطاء) بواسطة شفرة شبه ضوضاء (PN) بمعدل ثابت للميقاتية ثم يخضع لتشكيل PSK. ويمكن تغيير معدل الإرسال بتغيير نسبة معدل بتات البيانات ومعدل الميقاتية لشفرة شبه الضوضاء. وينبغي أن تكون النسبة المختارة $1/n$ حيث n عدد صحيح إيجابي. ويصار إلى إزالة تشكيل الإشارة المخلوطة بواسطة الإبراق بزحزحة الطور (PSK) وبمعدل ميقاتية شفرة شبه الضوضاء. وتكشف بتات بيانات النطاق الأساسي بعد تزامن شفرة شبه الضوضاء.

وقد طبقت هذه التقنية على نظام TDMA بمعدل إرسال متغير حيث يتغير معدل الإرسال تغيراً تكيفياً مع كل رشقة TDMA. وقد أثبتت بعض التجارب أن الانحطاط في أداء معدل الخطأ في البتات هو بأقل من 2 dB بالنسبة إلى الأداء النظري في قناة غوسية عندما يشغل النظام TDMA بمعدل $8/n$ Mbit/s (n = 1، 2، 4، 8، 16، 32).

ويمكن أن تعتبر هذه التقنية بمثابة تشكيل وإزالة للتشكيل يسمحان بتغيير معدلات الإرسال بواسطة ميقاتية ثابتة أو معدل تشفير متغير مع كسب للتشفير بقيمة 0 dB.

5.3 خوارزميات التحكم

تستخدم تقنية الإرسال التكيفي المستعملة للتغلب على التوهين بالمطر مخططا إرسال تتسم بالكفاءة من حيث استعمال الطيف في ظروف السماء الصافية وتتحول إلى المخططات التي تتسم بالكفاءة من حيث القدرة في ظروف المطر. وبما أن عملية التحول تشتمل على تحري تاريخ نوعية الإشارة المتلقاة وعلى التنبؤ بنوعية الإشارة عند نقطة الاعتيان التالية، فإن الأمر يحتاج إلى طريقة تحكم ذكية. وتتكون آلية التحكم من عملية التقدير، والتنبؤ بنسبة الإشارة إلى الضوضاء، *(S/N)*، وانتقاء النسق الراديوي. وتكمن مهمة انتقاء النسق الراديوي في تخصيص مخططات الإرسال المناسبة تكيفياً، مثل مخططات التشفير والتشكيل، إلى جانبي الإرسال والاستقبال على السواء.

1.5.3 تقدير نوعية الإشارة

من الضروري جداً تقدير نوعية القناة بغية تخصيص مخططات الإرسال تكيفياً تبعاً لظروف القناة. ومن الأساليب الممكنة لتحقيق ذلك ما يُعرف باسم "طريقة المتوسط" لتقدير نسبة الإشارة إلى الضوضاء *S/N* في الرموز المتلقاة في نظام PSK من رتبة *M*. ويجري تقييم مخطط تواتر الرمز المتلقى ثم يقوم مخطط التقدير بتقدير النسبة *S/N* من التجميعة الخطية للتواتر على أساس عوامل ترجيح مناسبة. ويمكن حساب تواتر توزيع الرموز المتلقاة بحساب عدد الرموز في كل مستوى من مستويات التكمية. ولدى تحديد عوامل ترجيح مناسبة لتواتر التوزيع يمكن الحصول على واحدة من خصائص التقدير المطلوبة. وهي تتناقص بمعدل رتيب كلما ازدادت النسبة *S/N*، أي:

$$L_w = f(S/N) \tag{3}$$

حيث L_w التجميعة الخطية لتواتر التوزيع على أساس عوامل الترجيح. ونظراً لصعوبة وتعقيد حل مقلوب الدالة f^{-1} للحصول على قيمة *S/N* من L_w يمكن اللجوء إلى جدول مرجعي.

2.5.3 التنبؤ بنوعية الإشارة

يحتاج الأمر إلى نظام تكيفي لمعاوضة الخبو بالمطر وذلك للتنبؤ سلفاً بمقدار التوهين بالمطر أو بنوعية الإشارة على أن يؤخذ في الحسبان وقت الانتشار ذهاباً وإياباً. ويشمل تفاوت النسبة *S/N* في وصلة ساتلية تفاوت التوهين بالمطر والتلألؤ السريع نسبياً. وتفاوت *S/N* بسبب التلألؤ أسرع بكثير عموماً من سرعة استجابة نظام التكيف، ومن ثم يتعين على مخطط التنبؤ أن يفرز هذه التفاوتات السريعة. ويمكن استعمال أي مخطط تنبؤ يتألف من أربع وظائف وهي: ترشيح تمرير منخفض (LPF) متقطع الزمن، وتنبؤ الخبو بالمطر، وتصحيح متوسط خطأ تفاوت *S/N*، وتخصيص هامش تنبؤ ثابت/متغير هجين.

ويُستخدم الترشيح LPF في مخطط التنبؤ لإزالة التفاوت السريع في النسبة *S/N*. ثم يتنبأ المخطط بسوية الإشارة، γ_{t+p}، بعد زمن من التنبؤ، *p*، من سويات الإشارة السابقة باستعمال الترشيح التراجعي الخطي النوعي.

$$\widetilde{y}_{t+p} = \sum_{i=0}^{n-1} w_{i,t} y_{t-i} \tag{4}$$

حيث:

n: زمن الرصد

γ_t: حاصل LPF.

ومن أبسط تطبيقات ما تقدم استعمال قيمتين بوزن ثابت لنهايتين في فترة الرصد، وهما $w_{0,t} = p/(n-1) + 1$ و$w_{n-1,t} = -p/(n-1)$ وافتراض أن التفاوت المقبل لسوية الإشارة سيبقى مثلما كان التفاوت السابق. وتعرف هذه الطريقة بأسلوب التنبؤ على أساس المنحدر (SBP). ومن ناحية أخرى، يمكن استخدام أوزان متفاوتة باستعمال خوارزميات التنبؤ بالترشيح الكيفي (AFP) من قبيل متوسط التربيع الأدنى (LMS) أو التربيع الأدنى التكراري (RLS). وفي هذه الحالة يجري تحديث الأوزان لكل عملية اعتيان.

ويشمل تصحيح الخطأ المتوسط لتفاوت *S/N* على هامش لمعاوضة خطأ التنبؤ. وهذا الهامش ضروري بسبب عملية الترشيح للتفاوت السريع لسوية الإشارة في مخطط التنبؤ، وهو مجموع هامش ثابت وهامش متغير يستخرج من الانحراف المعياري لأخطاء التنبؤ.

3.5.3 انتقاء الأنساق الراديوية

في حالة معاوضة المطر التكيفية، يحتاج الأمر إلى خوارزمية، في الوقت الفعلي لانتقاء مخطط إرسال ملائم يتسم بأفضل كفاءة طيفية وبأفضل أداء عند مستوى التوهين قيد النظر. وفي الوقت ذاته، ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار عملية التحويل الناتجة في رأسية عرض النطاق بحكم تبادل معلومات التحكم. وتنتقي الخوارزمية التالية مخطط إرسال، *d*، بمعدل صبيب أقصى عند نسبة *S/N* راهنة، بحيث:

$$\arg\max_{d}\left(\sum_{k=0}^{N-1}\lambda^{k} S_d(t-k)\right) \qquad \text{for } d \in \{0,1,\ldots,d_{\max}-1\} \tag{5}$$

حيث:

d_{max}: عدد مخططات الإرسال المتاحة

$S_d(t)$: صبيب معايير بمعدل بيانات مخطط الإرسال d.

ويُحسب الصبيب بالمعادلة $S_d(t) = 1 - P_d(\gamma(t))$، حيث $P_d(\gamma(t))$ هي قيمة BER للنسبة *S/N* المتنبأ بها، $\gamma(t)$. وعندما تكون $P_i(\gamma(t))$ أكبر من BER تُستبدل BER بقيمة 1 بغية تغريم المخطط المنتقي. ولكي يؤخذ تخلف الزمن في الحسبان تجري مراكمة قيمة الصبيب للفترة السابقة بطول N وتكون λ عامل الترجيح. ويكون عامل الترجيح هذا متناسب عكساً مع منحدر *S/N* الراهن كما يلي:

$$\lambda = \frac{1}{x\left|\Delta\gamma(t)\right|+1} \tag{6}$$

حيث:

$\Delta\gamma(t)$: منحدر S/N الراهن

x: معلمة لضبط حساسية λ إزاء المنحدر.

وبارتفاع سوية *S/N* قد تتحول الخوارزمية فوراً إلى مخطط بمعدل بيانات أعلى للحفاظ على أعلى قدر من الصبيب لمراعاة BER المطلوب. ولكن في هذه الحالة قد يحدث انقطاع في الخدمة إذا انحدرت *S/N* بسرعة دون سوية معينة. وقد تستعمل الخوارزمية مؤقت احتجاز لمنع ذلك. وهي لا تتحول إلى مخطط الإرسال بمعدل بيانات أعلى إلا إذا كان المخطط منتقى باستمرار لفترة محددة مسبقاً.

6.3 الخلاصـــة

تناقش ثلاثة أنواع من تقنيات الإرسال بمعدل متغير باعتبارها طرائق تحافظ على جودة الإشارة لنظام اتصالات رقمي ساتلي عندما تكون شروط الانتشار سيئة.

أما تقنية معدل التشكيل المتغير التي تستخدم مشفر إبراق بزحزحة الطور ومخطط تشفير متغير المعدل والتي تستعمل شفرات متغيرة المعدل فهي مناسبة لنظام اتصالات بسيط مع تجهيزات اقتصادية نسبياً و/أو تجهيزات محطات أرضية بسيطة.

وفي نظام إرسال بمعدل متغير تؤدي خوارزمية التحكم دوراً هاماً جداً في الارتقاء بأداء النظام. وقد نوقشت خوارزمية تحكم تتألف من تقدير نوعية الإشارة والتنبؤ بنوعية الإشارة وانتقاء النسق الراديوي.

4 الإجراءات المضادة للخبو باستخدام تقنيات المنافذ المتعددة بتقسيم زمني (FCM-TDMA)

1.4 مقدمـــة

تعتبر التقنية FCM-TDMA طريقة لمواجهة التأثيرات الحادة للهواطل عند الترددات العالية. وتمثل نظاماً تكيفياً يوزع مورداً زمنياً إضافياً إلى الموجات الحاملة المعرضة للخبو في شبكة TDMA وتوفر بذلك معدلاً مقبولاً من الأخطاء رغم انحطاط النسبة *C/N* الذي يحدث أثناء الخبو.

ويتضمن نظام FCM-TDMA جزءاً من الرتل الذي يسمى بالمورد المتقاسم وهو متيسر للموجات الحاملة المعرضة للخبو. وهذا يعني أن كفاءة الرتل ومن ثم سعة نظام FCM-TDMA أقل مما هي عليه في نظام TDMA تقليدي مكافئ في ظروف السماء الصافية. ولا تكون فترة الرتل عادة عنصراً متغيراً ولكن أي رشقات تتعرض للخبو تتمدد زمنياً داخل الرتل. وهذا يعني أن الرشقة تحافظ على عدد بتات المعلومات نفسه (من المستعمل) عندما تمدد وبهذا لا يتغير معدل المعلومات. ومن ثم فإن هذه التقنية مناسبة بشكل خاص للشبكات/الخدمات العمومية المبدلة حيث قد لا تكون تقنيات إرسال المعلومات بمعدل متغير (انظر الفقرة 3) مناسبة.

ويكفي أن تمدد كل رشقة إلى الدرجة اللازمة لمواجهة الخبو الذي يحدث على مسير معيّن سواء كان ذلك على الوصلة الصاعدة أم على الوصلة الهابطة أو على الاثنتين معاً من أجل تأمين أقصى كفاءة للنظام.

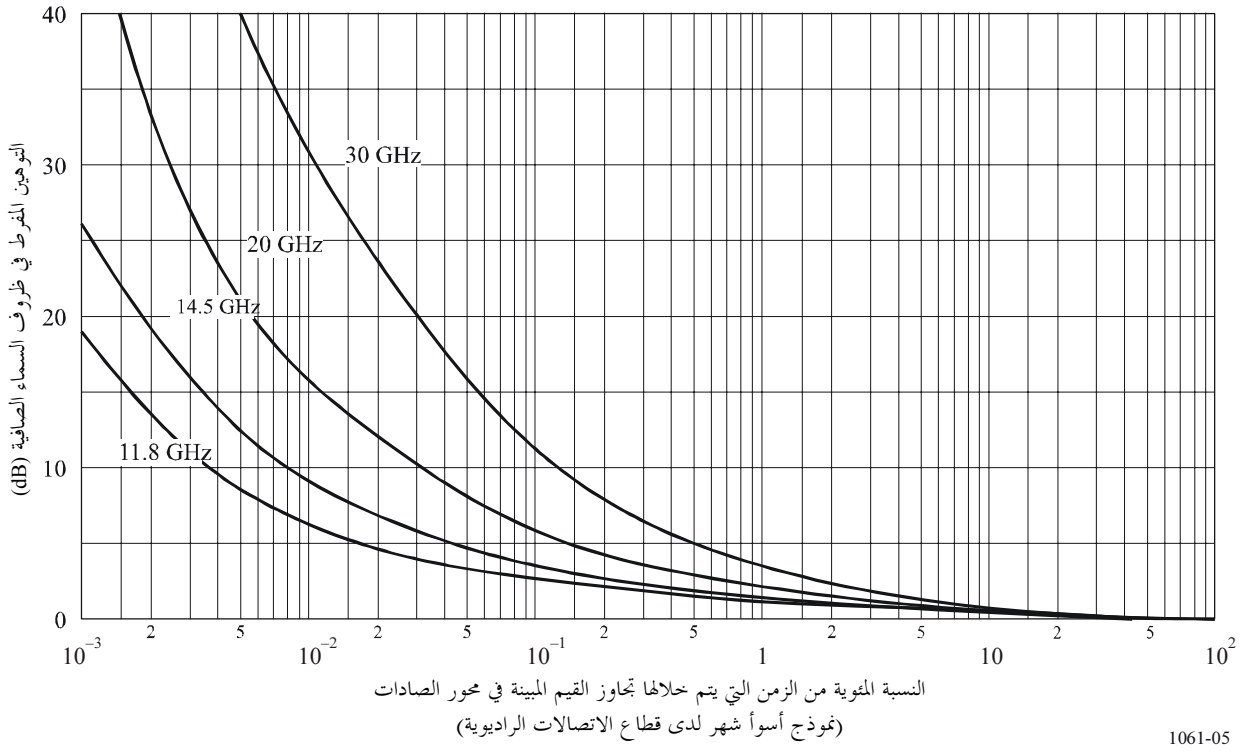
2.4 إحصاءات زمانية مكانية عن الخبو الجوي عند GHz 20/30

لقد تمت سلسلة من القياسات طوال 43 شهراً في Martlesham Heath، الساحل الشرقي، المملكة المتحدة (المنطقة المناخية E التي حددها قطاع الاتصالات الراديوية) عند GHz 14/12 وزاوية ارتفاع من 30° نحو الساتل OTS2. وتم تدريج نتائج هذه القياسات في الموقع الواحد إلى GHz 30/20 باستعمال نسب تدريج الترددات التي وضعها قطاع الاتصالات الراديوية، وهي ملخصة في الشكل 5 الذي يقدم إحصاءات التوهين للشهر الأسوأ. وقد صمم على أساس هذه القياسات نموذج للحاسوب للتنبؤ بإحصائيات الخبو الذي يحدث في آن معاً على وصلتين أو أكثر في كل منطقة تغطية الساتل، على افتراض أن كل الوصلات لها نفاذ إلى الموارد الاحتياطية وذلك بهدف تقدير تحسن تيسر الوصلة الذي قد يوفره نظام تكييفي TDMA.

وتمت نمذجة خبو يحدث في آن معاً في عدد n من المحطات داخل منطقة دائرية قطرها d، وأخذ لذلك عدد n من النقاط من قاعدة البيانات المقيسة (المذكورة أعلاه) خلال فترة زمنية t يربط فيها بين t وd عامل بمقدار 30 km/h يقابل سرعة الريح "الفعلية" السائدة في المملكة المتحدة أثناء فترات هطول الأمطار. ثم جمعت إحصاءات طويلة الأمد بواسطة تحريك هذه النافذة بعرض t عبر كامل قاعدة بيانات الفترة البالغة 43 شهراً وتحول إلى إحصاءات الشهر الأسوأ وفقاً لنموذج قطاع الاتصالات الراديوية.

الشـــكل 5

منحنيات التوهين النمطية بدلالة تيسر الموقع الواحد



لقد بُذلت جهود كبيرة لمقارنة هذا النموذج مع قياسات مباشرة عبر مسافات معروفة للتحقق من صلاحية عامل التحويل 30 km/h وأجريت المقارنة مع:

- نموذج هودج Hodge لتنوع المواقع (حتى 10 km)،
- الترابط بين معدلات هطول الأمطار (حتى 400 km)،
- بيانات مكتب الأرصاد الجوية (حتى 200 1 km).

وكان ثمة توافق جيد بين البيانات والنماذج المذكورة أعلاه والنموذج المستخدم وعامل التحويل بقيمة 30 km/h للمسافات الأطول من 10 km.

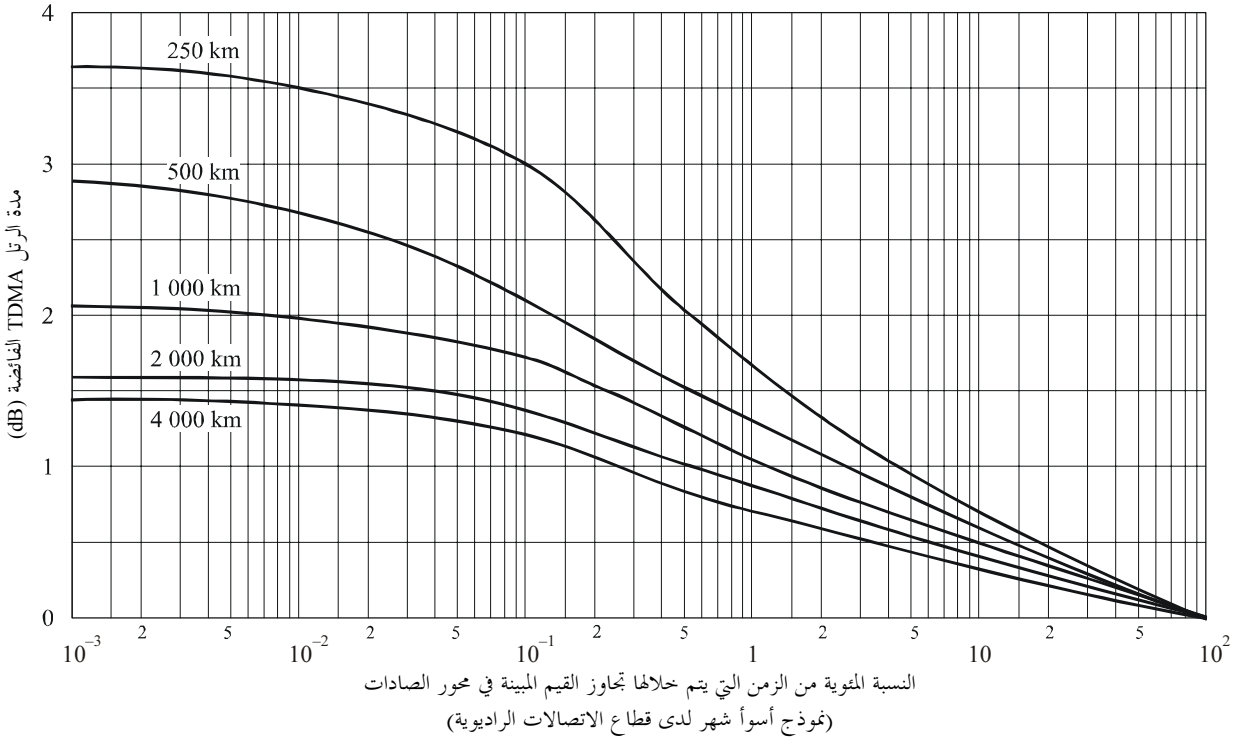
واستخدم النموذج لتجميع إحصاءات مدة الرتل الاحتياطي TDMA المطلوبة عند الساتل من أجل الحفاظ على نسبة E_b/N_0 كافية في الوصلات الهابطة عند 20 GHz نحو شبكات افتراضية تتضمن أعداداً مختلفة من المحطات الأرضية.

وقد تبين أنه إذا كانت مدة الرتل في المورد الاحتياطي كافية للحفاظ على الانقطاعات المبينة في الشكل 6 دون نسبة 0,01%، فإن الانقطاعات في الموقع الواحد المبينة في الشكل 5 سوف تهيمن على مجمل الانقطاعات.

وثمة تقنيات مختلفة لتعويض الخبو على الوصلات الصاعدة (مثل تغير المعدل) قد تكون جديرة بالاهتمام تبعاً لطوبولوجيا الشبكة.

الشـــكل 6

منحنيات نموذجية لقدرة الساتل الفائضة وفقاً لتيسر النظام



100 محطة في مناطق مختلفة الأقطار وتردد 20 GHz وسوية قطع في محطة واحدة بمقدار 1,5 dB

1061-06

3.4 طرائق استخدام رشقة ممددة لتوفير سوية معينة من المناعة من الضوضاء

هناك طرق عديدة لاستخدام الوقت الإضافي الذي يوفره فاصل زمني ممدد لتوفير درجة أعلى من المناعة ضد الضوضاء. وفيما يلي بعض الأمثلة:

أ) *تصحيح أمامي للأخطار (FEC)*

يمكن استخدام معدلات مختلفة في رأسية التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) على مراحل وفقاً لازدياد الخبو، ويمدد الفاصل الزمني وفقاً للحاجة.

ب) *تخفيض معدل البيانات المرسلة*

يمكن تخفيض معدل البيانات المرسلة والحفاظ على معدل المعلومات نفسه بزيادة طول الرشقة. وبتخفيض معدل البيانات المرسلة يمكن أيضاً تخفيض عرض نطاق الضوضاء عند المستقبل مما يزيد من المناعة من الضوضاء.

ج) *تكرار بيانات المستعمل داخل الرشقة*

يمكن تكرار رشقة تتعرض للخبو عدة مرات واستخدام مزيل تشكيل متطور لتفسير الإشارة المستقبلة بأخذ القيمة المتوسطة لكل رمز.

ولكل التقنيات المذكورة أعلاه تأثيرات في تصميم المودم وينبغي الحرص على تزامن الميقاتية والموجة الحاملة أثناء الخبو. وإضافة إلى ذلك، إذا تغير معدل الرموز (وأدى ذلك إلى تغيير في الطيف وفي كثافة تدفق القدرة بين الرشقات) فقد يكون هنالك أيضاً تأثيرات تتعلق بالتداخل.

ويتفاوت عمق الخبو الذي يمكن مواجهته وفقاً للطريقة المستعملة ووفقاً لدرجة تطور المودم. ويفضل عملياً النظام المركب FCM-TDMA حيث يمكن، على سبيل المثال، استعمال التصحيح FEC مع أي من الطرائق الأخرى المذكورة، وهناك ما يؤيد استعمال تصحيح FEC دائم في الطريقة ج).

4.4 التحكم في النظام

تتطلب الأنظمة FCM-TDMA بروتوكولات وآليات تحكم متينة من أجل التعرف إلى بداية الخبو وإلى سويته على أي مسير وتحديد الرشقات التي يتعين تمديدها وبأي مقدار ومن أجل تنفيذ هذه التمديدات إلى جانب أي مراجعة للجدول الزمني للعمليات.

5.4 الاستنتاجات

يجب أن يصمم النظام FCM-TDMA وفقاً للحاجة. وهناك عدة معلمات للنظام يجب تحديدها ومنها مثلاً أقصى تمديد تحتاجه رشقة معينة وحجم خطوة التمديد ووقت التنفيذ أو رد الفعل بالنسبة إلى بدء الخبو، والنسبة المئوية من الرتل الواجب تخصيصها كمورد مشترك، وغير ذلك. ويتعلق تحديد حجم هذه المعلمات بطبيعة الشبكة والمنطقة المناخية وأقصى عمق للخبو ينبغي مواجهته وعدد الموجات الحاملة ومزيج معدل البيانات التي تحملها.

ويمكن أيضاً ضم النظام FCM-TDMA إلى أنظمة أخرى لمواجهة الخبو، إذ يمكن مثلاً استحداث بروتوكولات FCM-TDMA تتناول التحكم في القدرة على الوصلة الصاعدة، أو جمع النظام FCM-TDMA مع نظام بتنوع التردد حيث ترسل الرشقات التي تتعرض إلى خبو شديد في رتل TDMA بديل بتردد أدنى.

وقد أجريت دراسات مكثفة في المملكة المتحدة لنمذجة إحصاءات "مكانية زمانية" وإثبات جدوى تقنية TDMA تكييفية تستعمل طرائق تكرار البيانات. ومع أن ذلك، قد يتطلب تشغيل مزيل التشكيل بنسب E_b/E_0 منخفضة جداً أثناء فترات الخبو، فقد نجحت تجارب أجريت في مختبر بنسب E_b/N_0 منخفضة تصل إلى –8 dB. إلا أن دراسات إضافية ضرورية في مجال النمذجة والتجهيزات بهدف تطوير نظام عملي الاستعمال.

5 تقنية تنوع التردد

1.5 مقدمة

تنوع التردد ثنائي النطاق عبارة عن إجراء تكيفي مضاد للخبو الناجم عن التوهين بسبب المطر ويطبق في حالة السواتل التي تعمل داخل نطاقين من الترددات، وعموماً داخل نطاق ترددات عالية، مثل النطاق GHz 30/20، ونطاق ترددات منخفضة، مثل النطاق CHz 14/11 أو GHz 6/4.

وتسيّر الحركة عادة عبر نطاق الترددات العالية GHz 30/20 حيث يتيسر عرض نطاق كبير. وعندما لا يكون هامش القدرة على وصلة معينة تعمل في النطاق GHz 30/20 كافياً للتغلب على التوهين بسبب المطر تبدَّل الحركة على هذه الوصلة إلى نطاق الترددات الأدنى الأقل تأثراً بالمطر.

وتدعى السعة الاحتياطية المتيسرة عند نطاق الترددات المنخفضة، التي تتقاسمها المحطات التي تحتاج في وقت معين إلى حماية من الخبو، المورد المتقاسم أو النطاق الاحتياطي.

ويوفر تنوع التردد ثنائي النطاق كسباً كبيراً في القدرة المكافئة، إذ إن مدة الانقطاع المقبولة بالنسبة إلى انقطاع إجمالي معين مطلوب، تزداد في الوصلة التي تستخدم نطاق ترددات عالية (GHz 30/20) زيادة ملموسة بحيث يمكن تقبّل درجة أعلى من التوهين على الوصلة.

ويشكل استعمال مجموعة من القنوات الاحتياطية عموماً حلاً يتسم بالكفاءة نظراً إلى ضآلة عدد الوصلات وسطياً التي تتطلب سعة احتياطية في آن معاً.

تقدم الفقرة 2.5 تحليلاً نظرياً لنظام بتنوع الترددات يهدف إلى تقدير عدد القنوات الاحتياطية اللازمة لمواجهة الخبو في شبكة ساتلية.

أما الفقرة 3.5، فتقدم بعض المشكلات الناجمة عن تصميم نظام التحكم للإجراءات التكيفية المضادة للخبو.

وأخيراً، تتناول الفقرة 4.5 تأثيرات مختلف إجراءات التبديل على الأداء وذلك من خلال محاكاة النظام على أساس سلسلة من أوقات التوهين عند GHz 11,6 مقيسة على امتداد 4 سنوات.

2.5 تحليل النظام

تؤخذ، على سبيل المثال، شبكة اتصالات ساتلية تتألف من N محطة، كنظام TDMA مثلاً يعمل عادة عند نطاق الترددات GHz 30/20 لكن بسعة احتياطية متيسرة عند نطاق ترددات أدنى (GHz 14/11 أو GHz 6/4). يحدث انقطاع في الوصلة بين محطتين A وB عندما يصادف في A أو في B خبو يفوق قيمة عتبة محددة ولا تتيسر في هذه اللحظة أي سعة احتياطية. ويحدث ذلك عندما تكون القنوات الاحتياطية قد خصصت لحماية وصلات أخرى تتعرض للخبو بحيث لا يمكن الاستجابة لأي طلب آخر.

ويحتاج تقدير احتمالات الانقطاع العائد إلى التوهين بسبب المطر إلى إحصاءات مشتركة بشأن الخبو في مواقع المحطات N. ويتعلق ذلك بالتشكيلة الجغرافية الخاصة للشبكة. ويستعمل نموذج بسيط لأغراض التحليل العام.

يسمى P المتوسط السنوي لاحتمالات الانقطاع في محطة معينة (يفترض للتبسيط، حتى لو لم يكن ضرورياً، بأن قيمة P مساوية للعدد N من المحطات). ويجب أن يؤخذ في الاعتبار أن ظواهر الخبو في مواقع مختلفة ليست مستقلة عموماً بسبب الترابط من حيث الزمن (وفقاً للفصول) ومن حيث المكان (جغرافياً). ويفترض أن احتمالات الخبو المشروطة عند المحطة B (الحدث F_B)، على أساس أن المحطة A تتعرض للخبو (الحدث F_A) ليست مجرد p كما يحدث في حالة الاستقلالية الإحصائية، وإنما تزداد بمقدار $\alpha\,\beta$.

$$P(F_B/F_A) = \alpha\,\beta\,p \tag{7}$$

ويسمى عامل الارتباط الفصلي α بينما β هو عامل الارتباط الجغرافي. ويفترض أن العامل β يساوي الواحد عندما تتباعد المحطتان A وB بمسافة كبيرة، وإلا فيكون العامل β أكبر لأن الارتباط بين معدل الهواطل في مختلف المواقع قد يستمر بين مواقع متباعدة مئات الكيلومترات.

وإذا أردنا تعميم المعادلة (7) فيمكن التعبير عن الاحتمالات المشتركة للخبو عند المحطات 1، 2، ...، M والمشروطة بالحدث F_A، على النحو التالي:

$$P(F_1, F_2, ..., F_M/F_A) = (\alpha\,\beta)^M P(F_1) \ldots P(F_M) = (\alpha\,\beta\,p)^M \tag{8}$$

ويمكن، بناء على هذا النموذج، تقدير احتمالات الانقطاع عند المحطة A، $P(OUT_A)$، بحساب احتمالات عدم تيسر أي سعة احتياطية عندما يحدث الخبو في A. وإذا كانت السعة الاحتياطية تتألف من عدد k من القنوات الاحتياطية عند نطاق ترددات منخفض، عندئذ يمكن استخلاص احتمالات الانقطاع عند محطة معينة A باستعمال المعادلة (8) كما يلي:

$$P(OUT_A) = p\sum_{j=k}^{N-1} \frac{j+1-k}{j+1} \binom{N-1}{j} (\alpha\,\beta\,p)^j\,(1-\alpha\,\beta\,p)^{N-1-j} \tag{9}$$

حيث:

k: العدد الكلي للقنوات الاحتياطية المتيسرة.

ويمثل العامل $(j+1-k)/(j+1)$ احتمال عدم تخصيص أي قناة احتياطية من المجموعة إلى المحطة A عندما يطلب عدد j من المحطات التي تتعرض للخبو ($j \geq k$)، إضافة إلى المحطة A، قناة احتياطية. وتجدر الإشارة إلى أن احتمالات الانقطاع بالنسبة إلى الوصلة (A، B) تساوي تقريباً ضعف احتمالات الانقطاع عند المحطة A (أو B) إذا كانت احتمالات الخبو عند A وB في آن معاً

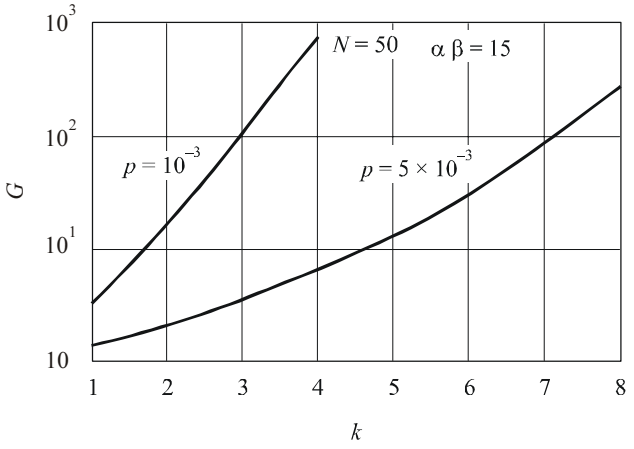
أقل بكثير من احتمال الخبو عند A (أو B). ويبين الشكل 7، على سبيل المثال، عامل تخفيض الانقطاعات (النسبة بين احتمالات الانقطاع بتنوع التردد واحتمالات الانقطاع دون هذا التنوع) بدلالة عدد القنوات الاحتياطية k في حالة معينة، وتحديداً عندما تكون $N = 50$، و$\alpha\beta = 15$. وتقابل المنحنيات قيمتين من قيم p، احتمالات الانقطاع عندما لا يكون النظام محمياً بواسطة تنوع التردد. ويتعلق الاحتمال p بهامش القدرة في مرسل المحطة. ويتعلق احتمال تجاوز توهين معين A بالتردد كما يتعلق بحالة الأرصاد الجوية في موقع كل محطة. وتقوم الحسابات في هذا المثال على افتراض الدالة التالية للتوهين إزاء التوزيع التراكمي:

$$A = A_{0,01}\, 0{,}12 p^{-(0{,}546 - 0{,}043 \log p)} \quad \text{dB} \tag{10}$$

حيث p احتمال تجاوز التوهين A (كنسبة مئوية لسنة متوسطة). وتمثل $A_{0,01}$ التوهين الذي يتم تجاوزه خلال نسبة 0,01% من الزمن والذي يتعلق بحالة الأرصاد الجوية للمحطة وزاوية ارتفاع المسير وتردد الوصلة الراديوية أرض–فضاء. وكمثال عددي أخذت وصلة معينة عند 30 GHz تبين أن قيمة $A_{0,01}$ فيها تساوي 28,5 dB. ومن الواضح أنه كلما زادت قيمة العامل $\alpha\beta$ زادت كمية السعة الاحتياطية اللازمة لتوفير التيسر المطلوب. ويظهر في المثال الوارد أعلاه (N = 50 محطة و$\alpha\beta$ = 15)، انطلاقاً من المعادلة (9) وبالنسبة إلى وصلة عند 30 GHz تكون فيها $p = 5 \times 10^{-3}$، أن احتمالات الانقطاع في تقنية تنوع التردد هي بأقل من 2×10^{-4} إذا استعملت سعة احتياطية $k = 6$. وتصمم الوصلة في هذه الحالة على أساس هامش من القدرة يقابل $p = 5 \times 10^{-3}$، أي 4,9 dB. ومن أجل الحصول على النتائج نفسها بالنسبة إلى الانقطاع دون حماية تنوع التردد يحتاج الأمر إلى هامش من القدرة بقيمة 21,7 dB وفقاً للمعادلة (10). ويلاحظ أن هامش القدرة المطلوب دون تنوع التردد كبير جداً. وإضافة إلى التكاليف المتزايدة للوصلة، فإن هذه القدرة الإضافية الهائلة قد تسبب أيضاً تداخلات لوصلات راديوية أخرى.

الشـــكل 7

عامل تخفيض الانقطاعات G بدلالة عدد القنوات الاحتياطية k



p: احتمالات الانقطاع دون تنوع التردد

1061-07

3.5 تشغيل نظام التحكم التكيفي ونتائج المحاكاة

لقد أجري التحليل السابق لأداء الأنظمة بتنوع التردد بالنسبة إلى الحالة المثالية التي يتم فيها التبديل من الأسلوب العادي إلى الأسلوب المدعوم (والعكس بالعكس) فوراً. ولا يمكن تجاهل وقت الاستجابة في نظام فعلي تكيفي لمواجهة الخبو، لا سيما عندما يكون تخصيص السعة الاحتياطية وفقاً للطلب. ويعود التأخر في إطلاق الإجراء المضاد للخبو أو في العودة إلى الحالة الأولية بالدرجة الأولى إلى الانتشار عبر الوصلة الفضائية (من مطراف إلى المحطة الرئيسية ومن المحطة الرئيسية إلى المطراف) كما يتوقف على البروتوكول المستعمل.

ويتطلب النظام التكيفي لكشف حالات الخبو والتصدي لها قياس الأحوال الآنية للقناة إما بمراقبة التوهين مباشرة أو بتقدير معدل الخطأ في البتات. ونظراً إلى تأخر إطلاق نظام التصدي للخبر ينبغي له أن يأخذ في الاعتبار الخصائص الدينامية للخبر، لا سيما معدل التغيير ووجود تموّرات سريعة فيه بهدف التنبؤ بتجاوز سوية التوهين S المقابلة لأدنى جودة مقبولة والتمكن من إنشاء الإجراء المضاد للخبو في الوقت المناسب.

وأبسط طريقة لتحقيق ذلك هي بدء إجراء الإطلاق عندما يصل التوهين إلى السوية $M - S = S_1$، حيث M هامش مناسب يجري اختياره بالنسبة إلى المعدل الإحصائي لتغير التوهين. وفيما يتعلق بمعدل تغير التوهين هنالك بعض البيانات التجريبية تتناول النطاق GHz 14/11.

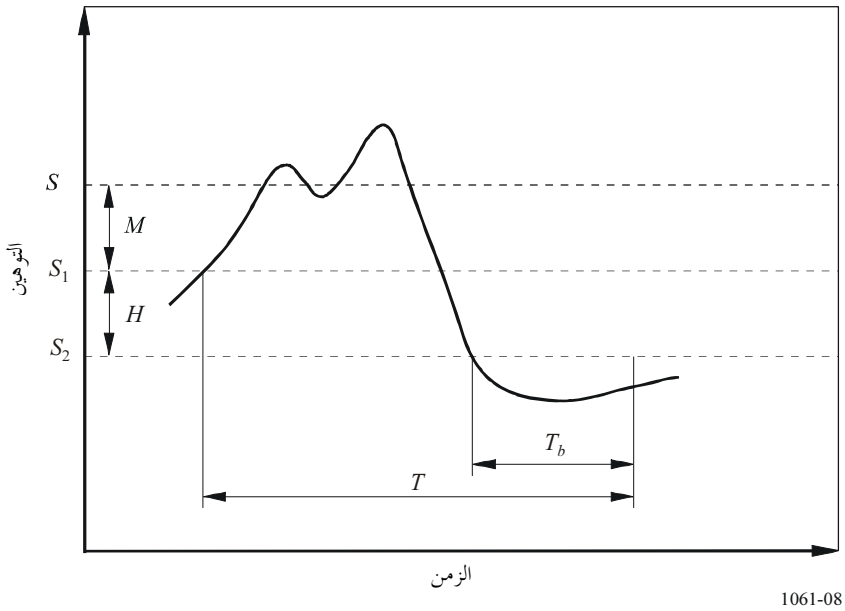
وتجنباً لحالات الانقطاع أثناء فترة الإطلاق، ينبغي أن تكون قيمة M كبيرة نسبياً، ولكن يحتمل من ناحية أخرى أن يؤدي الإفراط في قيمة M إلى قصور في كفاءة استعمال الإجراء المضاد للخبو. ويعني حدوث إنذارات خاطئة أن الموارد المتقاسمة سوف تستخدم لوقت أطول مما هو ضروري، وقد يسبب ذلك حالات من الانقطاع في حالة تزامن الطلب على السعة الاحتياطية.

وجرى تحليل أداء إجراء التبديل هذا ومقارنته بالأداء عندما تقدر سوية التوهين بناء على عينات التوهين السابقة. ودرست أيضاً خوارزميات للتنبؤ بالتوهين بسبب المطر في الوقت الفعلي مبنية على الارتداد الخطي. وإذا كانت خوارزمية الارتداد قادرة على التنبؤ بمتوسط ميل التوهين، فإنها غير قادرة على التنبؤ بتموّرات الخبو السريعة جداً. ولهذا فقد تم الحصول على النتائج المقدمة بتطبيق خوارزمية الارتداد على أعداد مختلفة من العينات السابقة وإضافة قيمة تخالف ثابتة إلى القيمة المتنبأ بها لتعويض التموّرات السريعة جداً. ويؤخذ في الاعتبار الخط الموازي الذي يمر عبر العينة الأخيرة إضافة إلى خط الارتداد لأنه يحسّن أداء التنبؤ.

ويجب أيضاً أن يبذل اهتمام خاص لوجود تراوحات في التوهين سريعة جداً وذلك عند اختيار قطع الإجراء المضاد للخبو عندما يزول. ويستحسن في التطبيق العملي أن يصار إلى ترشيح ذبذبات التوهين بإبقاء النظام ضمن شروط الحماية (تطبيق الإجراء المضاد للخبو) بينما يتراوح التوهين حول العتبة $M - S = S_1$. ويمثل M هامش مقاومة التراوحات السريعة عند استعمال خوارزمية الارتداد. ويكمن الحل في إدخال عامل تخلف H، أي قطع الإجراء المضاد للخبو عندما يتدنى التوهين تحت السوية $H - S_1 = S_2$. ويمكن أن يؤخر قطع الإجراء المضاد للخبو لفترة T_b تختار اختياراً مناسباً، وذلك بهدف تأمين حماية إضافية ضد التراوحات السريعة. ولا يطبق القطع إلا إذا بقي التوهين باستمرار تحت السوية S_2 في خلال الفترة T_b (الشكل 8). ويعني الحل الذي يقضي بإدخال هامش M عند إطلاق الإجراء، وعامل تخلف H وتأخر T_b عند القطع تخفيضاً في كفاءة النظام بالنسبة إلى النظام ذي التحكم المثالي، حيث $T_b = H = M = 0$، لأن الوصلة التي تتعرض للخبو تستعمل السعة الاحتياطية لفترة أطول.

الشـــكل 8

تعريف معلمات تميز إجراء التبديل بين الأسلوب العادي والأسلوب المساعد أو العكس بالعكس



لقد أخذت معلمتان في الاعتبار من أجل تحليل أداء أنظمة التحكم المختلفة ومقارنتها. المعلمة الأولى تتمثل في النسبة المئوية من حالات حدوث الإطلاق أثناء فترة الإطلاق بالنسبة إلى عدد المرات التي يتوفر فيها للوصلة التي تتعرض للخبو إجراء مضاد للخبو. أما المعلمة الثانية فهي كفاءة النظام المحددة بعامل الاستعمال $U = (T_{tot} - T_{ideal}) / T_{ideal}$ حيث T_{tot} هو الزمن الكلي لاستعمال سعة الاحتياط في النظام وحيث T_{ideal} زمن استعمال السعة الاحتياطية في نظام تحكم مثالي.

وتمت محاكاة تصرف النظام باستعمال سلسلة من زمن التوهين عند 11,6 GHz مقيسة بواسطة الساتل Sirio طوال أربع سنوات (من عام 1979 إلى عام 1982) في محطة في منطقة Spino d'Adda شمالي إيطاليا. ويمكن التعويل على النتائج التي تمّ التوصل إليها لأن كمية البيانات التجريبية المتوفرة كبيرة جداً.

وعلى الرغم من أن تحليل إجراء التبديل مبني على سلسلة زمن التوهين عند 11,6 GHz فإن نتائج المحاكاة توفر أيضاً تقديراً جيداً للأداء الإحصائي للتبديل عند 20 و30 GHz مثلما يوضح أدناه.

وعند استكمال النتائج التجريبية المتعلقة بالتوهين بالمطر خارجياً انطلاقاً من الترددات المنخفضة إلى الترددات الأعلى، ينبغي أن تراعى ظاهرتان على الأقل: التوهين نتيجة الماء الجوي والتلألؤ العائد إلى الانتشار عبر مسيرات متعددة (المرتبط بالتغيرات السريعة في دليل الانكسار المكافئ الناجمة عن الهواء والانتشار بالماء الجوي).

وكان الاستكمال الخارجي لقياسات التوهين بسبب المطر الذي موضع الدراسة وتتوفر الآن معادلات مناسبة للاستكمال الخارجي. ونظراً لعدم فصل التوهين والتلألؤ عند تردد واحد في البيانات المستكملة خارجياً، فإن هذه المعادلات التجريبية تستكمل خارجياً تأثيرات الظاهرتين عند تردد أعلى.

ويتيسر حالياً استكمال خارجي للترددات في الوقت الفعلي ولكن لا يمكن استكمال النتائج الإحصائية للتبديل خارجياً إلاّ عند عتبات ثابتة في النطاق 11,6 GHz نحو العتبات المقابلة عند 20 أو 30 GHz. وقد يتضح أن هذه النتائج صالحة أيضاً، على الصعيد الإحصائي، عند هذه الترددات العالية. ولكن هذه الترددات ليست عالية إلى حد يكفي بحيث تبدي ظواهر مادية غير متوقعة، وذلك وفقاً للنتائج القليلة المعروفة حتى الآن. والأسس المادية للتوهين بالمطر معروفة جيداً وتتوافق التجارب إلى حد بعيد مع إحصاءات التوهين المتنبأ بها لأجل طويل. كما أن الأسس المادية للتلألو في الجو الصافي أو في الجو "الرطب"

معروفة جيداً نظرياً والنماذج مثبتة تجريبياً. ويمكن أن تستكمل النتائج التجريبية المتعلقة بطيف قدرة التلألو عند 11,6 GHz استكمالاً خارجياً بواسطة نماذج بسيطة إلى ترددات عالية. فإذا أخذنا على سبيل المثال أبعاد الهوائيات وترددات تجربة تنوع التردد المخطط لها في الساتل الأوروبي Olympus، فإن متوسط طيف قدرة التلألؤ يتناقص إزاء التردد f وفقاً للقانون النظري $f^{-8/3}$، ابتداء من 0,5 Hz تقريباً عند 20 GHz و0,6 Hz تقريباً عند 30 GHz. وتصبح هذه البيانات 1,6 Hz و2 Hz، على التوالي في 95% من الحالات. أما عند 12,5 GHz فيكون الترددان المقابلان نحو 0,4 Hz و1,3 Hz.

ويتزايد اتساع التلألؤ، إحصائياً، أقل بكثير من التوهين بالمطر. ويتزايد الانحراف النمطي للتلألؤ، بالنسبة إلى مسير معين وشروط مادية مماثلة، بمقدار $f^{7/12}$ فقط بينما يتزايد التوهين بالمطر بمقدار $f^{1,76}$ عموماً. ومن ثم يتوقع ألاّ يختلف السلوك الدينامي الكلي عند 20 و30 GHz كثيراً عن السلوك المقيس عند 11,6 GHz بعد تدريج عتبات التوهين نحو الأعلى.

4.5 نتائج المحاكاة

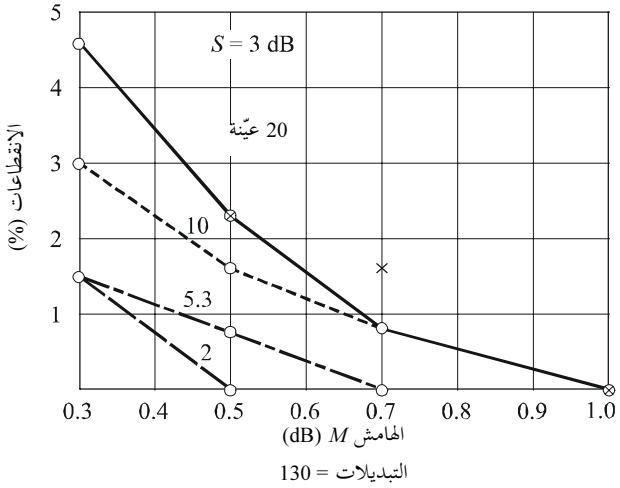
لقد تم الحفاظ على عتبة S_2 ثابتة للقطع وذلك بهدف مقارنة النسبة المئوية من الانقطاعات أثناء مختلف إجراءات التحكم على أساس العدد نفسه من إجراءات التبديل المطبقة. ويبين الشكلان 9 و10 نتائج عمليات المحاكاة المطبقة على أساس عتبة انقطاع $S = 3$ dB وتأخر إطلاق $T_c = 2$ s وعتبة قطع من $S_2 = 1{,}8$ dB وفاصل زمني $T_b = 20$ s. وعتبة الانقطاع S المختارة هي العتبة التي تم تجاوزها وفقاً لمقدار 10^{-3} من الاحتمالات عند 11,6 GHz في محطة Spino d'Adda والتي تقابل 8 dB تقريباً عند 20 GHz.

وترتكز خوارزمية التنبـــؤ إلى العينات 20 و10 و5 و3 و2 الأخيرة وتستخدم هامشاً ضد التراوحات السريعة يساوي 0,3 dB أو 0,5 dB أو 0,7 dB أو 1 dB. وإذا كانت سوية التوهين، المتوقعة على أساس زمن استباق يساوي 2 s (تأخر الإطلاق) زائد وقت حراسة يساوي 1 s (تردد اعتيان التوهين) تتجاوز العتبة S عندئذ يبدأ إجراء الإطلاق. أما فيما يتعلق بالخوارزمية التي تستعمل العتبة المحددة مسبقاً، فقد اعتبرت العتبة S_1 مساوية لقيم 2,5 dB و2,3 dB و2 dB التي تقابل معدلات تغير التوهين المسموح به بمقدار 0,25 dB/s و0,35 dB/s و0,5 dB/s.

وتوحي النتائج بأن النظام الذي يطبق خوارزمية العتبة المحددة مسبقاً يوفر الأداء نفسه تقريباً الذي يوفره النظام الذي يطبق التنبؤ المبني على العينات العشرين الأخيرة. وفيما يتعلق بالنسبة المئوية للانقطاعات، فإن أفضل أداء يتحقق بتطبيق التنبؤ الخاص بالتوهين بناء على العينتين الأخيرتين فقط على أن يضاف هامش بمقدار 0,5 dB ضد التلألؤ. ومن الواضح، على العكس من ذلك، أن تخفيض عدد العينات السابقة المستعملة للتنبؤ يزيد من وقت استعمال الإجراءات المضادة للخبو لأن عدداً أكبر من الإنذارات الخاطئة قد يحدث. ويتزايد العامل U حتى 1,2 تقريباً، مما يعني أن وقت استعمال الإجراء المضاد للخبو يساوي أكثر من ضعف وقت الاستعمال الكلي في الحالة المثالية. وإذا كانت السعة الاحتياطية المتيسرة صغيرة وكان عدد المحطات الأرضية التي تتقاسمها كبيراً، فقد يكون من المناسب أن تطبق الخوارزمية التي تحسن كفاءة النظام حتى ولو زادت من عدد الانقطاعات القصيرة أثناء فترة الإطلاق. وتعود أيضاً أوقات الاستعمال الطويلة للإجراءات المضادة للخبو إلى القيمة العالية لعاملَيْ التخلفية H (0,7 dB) والتأخر T_b (20 s) اللذين يدرجان في الإجراء من أجل استعادة شروط الإرسال العادية. ويبين الشكل 11 نتائج المحاكاة المطبقة لتقدير تأثير تخفيض التأخر T_b المحدد في الأصل عند قيمة 20 s. وقد طبقت خوارزمية التنبؤ باستعمال العينتين الأخيرتين فقط مع مراعاة هامش ضد التراوحات بقيمة 0,5 dB وتخلفية $H = 0{,}2$ dB. ويلاحظ أن هذه القيمة للتخلفية وتأخراً T_b يساوي 10 s يكفيان لمواجهة التراوحات السريعة مواجهة فعالة بتخفيض العامل U من 1,2 إلى 0,8.

الشـــكل 9

النسبة المئوية من الانقطاعات المتوقعة أثناء وقت الإطلاق بدلالة هامش الاستباق

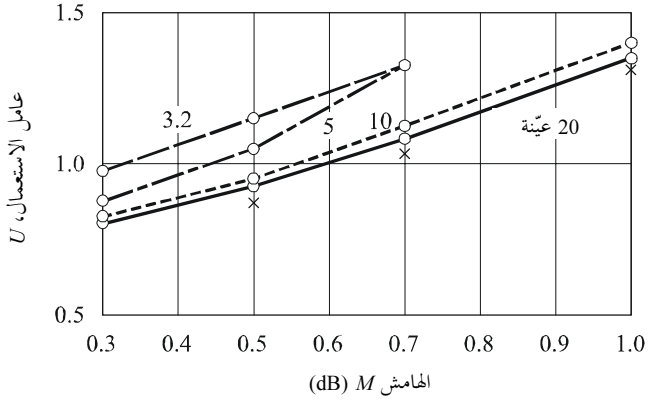


تبين النقطتان x النتائج المحققة عندما تطبق خوارزمية عتبة ثابتة محددة مسبقاً. وتمثل المنحنيات الأخرى النتائج المحققة عندما تطبق خوارزمية تنبؤ خطية على أساس العدد المبين من العينات السابقة.

1061-09

الشـــكل 10

عامل الاستعمال *U* بدلالة هامش الاستباق



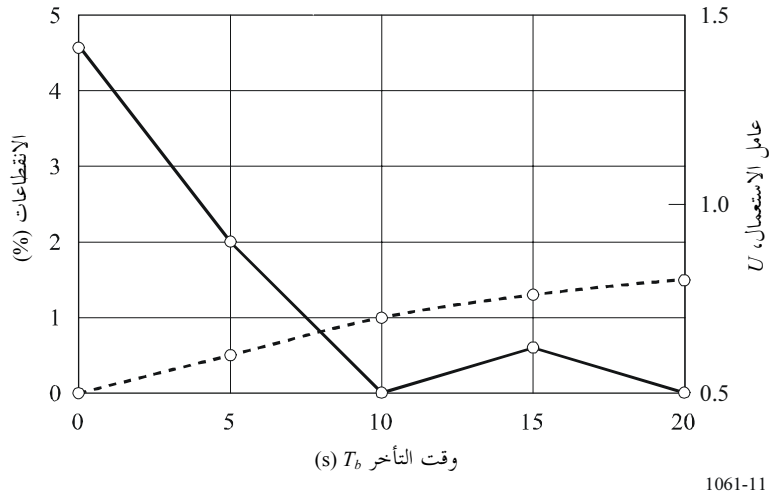
تبين النقطتان x النتائج المحققة عندما تطبق خوارزمية عتبة ثابتة محددة مسبقاً. وتمثل المنحنيات الأخرى النتائج المحققة عندما تطبق خوارزمية تنبؤ خطية على أساس العدد المبين من العينات السابقة.

1061-10

وتبين نتائج المحاكاة طبيعة تطور وقت التوهين أثناء هطول الأمطار وبالتالي صعوبة وضع طرائق تنبؤ جيدة. ويبدو أن أبسط التقنيات وأمتنها تتمثل في تحديد هامش استباق ثابت باتساع مناسب. ولا يمكن لخوارزميات التنبؤ المدروسة هنا أن تحسن الأداء الإجمالي (مقيساً على أساس عدد الانقطاعات وعامل الاستعمال) تحسناً ملموساً بالمقارنة مع الخوارزمية التي تستعمل هامش الاستباق. ويمكن، في كل الأحوال، الموازنة بين عدد الانقطاعات (أي الجودة) وقيمة عامل الاستعمال (أي التيسر). وتعتمد هذه الموازنة بالطبع على الشروط الخاصة المطلوبة من نظام الاتصالات.

الشـــكل 11

**النسبة المئوية من الانقطاعات أثناء وقت الإطلاق (الخط المتصل)
وعامل الاستعمال *U* (الخط المتقطع) بدلالة وقت التأخر T_b.
ويرتكز التنبؤ الخطي على العينتين السابقتين
ويساوي الهامش إزاء التراوحات dB 0,5**



5.5 الاستنتاجات

تتسم طريقة تنوع التردد ثنائي النطاق بفعالية خاصة عندما يتطلب الأمر سويات منخفضة من احتمالات الانقطاع.

ويوفر تنوع التردد ثنائي النطاق هوامش قدرة مكافئة كبيرة وكمية محدودة من السعة الاحتياطية المتيسرة. ويتوقف عدد القنوات الاحتياطية اللازمة أيضاً على خصائص ارتباط عمليات التوهين إزاء المواقع المختلفة للمحطات.

6 قائمة المختصرات

ACM	أسلوب التشفير والتشكيل التكيفي *(Adaptive coding and modulation)*
AFP	التنبؤ بأسلوب الترشيح التكيفي *(Adaptive filtering prediction)*
AWGN	ضوضاء غوسية بيضاء إضافية *(Additive white gaussian noise)*
BER	معدل الخطأ في البتات *(Bit-error rate)*
BPSK	إبراق ثنائي بزحزحة الطور *(Binary phase shift keying)*
C/N	نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء *(Carrier-to-noise ratio)*
CPSK	إبراق متماسك بزحزحة الطور *(Coherent phase shift keying)*
DIL	وصلات التوصيل البيني بالتنوع *(Diversity interconnection links)*
DVB	إذاعة فيديوية رقمية *(Digital video broadcasting)*
DVB-S2	نظام إذاعة فيديوية رقمية للإذاعة الساتلية حسب المواصفة EN 302 307 *(DVB system for satellite broadcasting as specified in EN 302 307)*
e.i.r.p.	قدرة مشعة مكافئة متناحية *(Equivalent isotropically radiated power)*
E_b/N_0	نسبة قدرة البتات إلى كثافة الضوضاء الطيفية *(Bit energy to noise spectral density ratio)*

ETSI	المعهد الأوروبي لمعايير الاتصالات *(European Telecommunications Standard Institute)*
FCM-TDMA	الإجراءات المضادة للخبو باستعمال النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن *(Fade countermeasures using time division multiple access)*
FDM-FM	الإرسال المتعدد بتقسيم التردد – تشكيل التردد *(Frequency division multiplexing-frequency modulation)*
FEC	تصحيح أمامي للأخطاء *(Forward-error correction)*
FM	تشكيل التردد *(Frequency modulation)*
FM-FDMA	تشكيل التردد – النفاذ المتعدد بتقسيم التردد *(Frequency modulation-frequency division multiple access)*
HPA	مضخم عالي القدرة *(High power amplifier)*
LMS	متوسط تربيع أدنى *(Least mean square)*
LNA	مضخم ضوضاء منخفضة *(Low noise amplifier)*
LPF	مرشاح تمرير منخفض *(Low-pass filter)*
PN	ضوضاء كاذبة *(Pseudo noise)*
PSK	إبراق بزحزحة الطور *(Phase shift keying)*
QPSK	إبراق رباعي بزحزحة الطور *(Quadrature phase shift keying)*
RCPC	(شفرة) تلافيفية متقطعة متوائمة مع المعدل *(Rate compatible punctured convolutional)*
RF	تردد راديوي *(Radio frequency)*
SCPC	قناة واحدة لكل موجة حاملة *(Single channel per carrier)*
S/N	نسبة الإشارة إلى الضوضاء *(Signal-to-noise ratio)*
SBP	تنبؤ على أساس المنحدر *(Slope based prediction)*
SR	تكرار الرمز *(Symbol repetition)*
TDM	إرسال متعدد بتقسيم الزمن *(Time division multiplexer)*
TDMA	نفاذ متعدد بتقسيم الزمن *(Time-division multiple-access)*
UPC	التحكم في قدرة الوصلة الصاعدة *(Uplink power control)*
8-PSK	إبراق ثماني بزحزحة الطور *(8-ary phase shift keying)*
16-APSK	تشكيل وإبراق سداسي عشر بزحزحة الطور *(16-ary amplitude and phase shift keying)*
32-APSK	تشكيل وإبراق ثاني وثلاثين بزحزحة الطور *(32-ary amplitude and phase shift keying)*

_____