

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.531-13
(2016/09)

معطيات الانتشار الأيونوسفيري
وطرائق التنبؤ المطلوبة من أجل
تصميم الخدمات والأنظمة الساتلية

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية

تمهيد

يضمطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

| العنوان | السلسلة |
|---|----------|
| البث الساتلي | BO |
| التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية | BR |
| الخدمة الإذاعية (الصوتية) | BS |
| الخدمة الإذاعية (التلفزيونية) | BT |
| الخدمة الثابتة | F |
| الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة | M |
| انتشار الموجات الراديوية | P |
| علم الفلك الراديوي | RA |
| أنظمة الاستشعار عن بُعد | RS |
| الخدمة الثابتة الساتلية | S |
| التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية | SA |
| تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة | SF |
| إدارة الطيف | SM |
| التجميع الساتلي للأخبار | SNG |
| إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت | TF |
| المفردات والمواضيع ذات الصلة | V |

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني
جنيف، 2017

التوصية ITU-R P.531-13

معطيات الانتشار الأيونوسفيري وطرائق التنبؤ المطلوبة من أجل تصميم الخدمات والأنظمة الساتلية

(المسألة 218/3 ITU-R)

(1978-1990-1992-1994-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2013-2016)

مجال التطبيق

تصف التوصية ITU-R P.531 طريقة تقدير آثار الانتشار الأيونوسفيري على المسارات أرض-فضاء في الترددات الواقعة بين 0,1 و12 GHz. وفيما يلي الآثار التي قد يتعرض لها المسير أرض-فضاء عند اختراق الإشارة للأيونوسفير:

- دوران الاستقطاب (دوران فاراداي) وسببه تفاعل الموجة الكهرومغناطيسية مع الوسيط المتأين في المجال المغناطيسي للأرض على طول المسير؛
- تأخر زمرة الإشارة وتقدم الطور الناجمان عن المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) المتراكم على طول المسير؛
- التغير السريع في اتساع وطور الإشارة (الالتماع) الناتج عن البنى الصغيرة غير المنتظمة في الأيونوسفير؛
- تغير في اتجاه زاوية الوصول الناجم عن الانعراج؛
- آثار دوبلر الناجمة عن دورانات الاستقطاب غير الخطية والتأخيرات الزمنية.

وتصلح المعطيات والطرائق التي يرد وصفها في هذه التوصية لتطبيقها من أجل التخطيط للأنظمة الساتلية وفق أمدية الصلاحية الواردة في الملحق 1.

مصطلحات أساسية: الانتشار عبر طبقة الأيونوسفير، الالتماع، تأخر الزمرة

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- (أ) أن الأيونوسفير يتسبب في آثار انتشار كبيرة عند ترددات تصل إلى 12 GHz على أقل تقدير؛
- (ب) أن الآثار قد تكون مهمة جداً من أجل خدمات مدار الساتل غير المستقر بالنسبة إلى الأرض تحت 3 GHz؛
- (ج) أنه قد قدمت معطيات اختبارية و/أو أنه قد أعدت طرائق نمذجة تتيح التنبؤ بمعلمات الانتشار الأيونوسفيري الضرورية للتخطيط للأنظمة الساتلية؛
- (د) أن من الممكن أن تؤثر الآثار الأيونوسفيرية على تصميم أنظمة راديوية تتضمن مركبات فضائية؛
- (هـ) أنه قد تبين أن هذه المعطيات والطرائق قابلة للتطبيق، في نطاق التغير الطبيعي لظاهرة الانتشار، عند التخطيط للأنظمة الساتلية،

توصي

1 بضرورة اعتماد المعطيات المعدة والطرائق الموضوعية كما ورد في الملحق 1 من أجل التخطيط للأنظمة الساتلية في كل من أمدية الصلاحية المحددة في هذا الملحق.

الملحق 1

1 مقدمة

يعالج هذا الملحق آثار الانتشار الأيونوسفيري على المسيرات أرض-فضاء. ومن وجهة نظر تصميم النظام، يمكن أن يلخص تأثير الآثار الأيونوسفيرية على النحو التالي:

- أ) إن المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) المجمع على طول مسير إرسال الخدمة المتنقلة الساتلية (MSS) الذي يخترق الأيونوسفير يتسبب في دوران استقطاب (دوران فارداي) الموجة الحاملة للخدمة MSS وتأخر الإشارة وفي تغير الاتجاه الظاهر للوصول نتيجة للانعكاس؛
- ب) حدوث بقع أيونوسفيرية عشوائية موضعية توصف عادة بالشذوذ الأيونوسفيري وتؤدي بدورها إلى دوران مفرط ودوران عشوائي وإلى تأخر لا يمكن وصفه إلا بشكل احتمالي؛
- ج) نظراً إلى أن عمليات الدوران وحالات التأخر الراجعة إلى الكثافة الإلكترونية لا تتوقف على التردد غير الخطي، فإن الظواهر الموصوفة في إطار أ (و ب) تؤدي إلى التشتت أو تشوه سرعة الزمرة للموجات الحاملة للخدمة MSS؛
- د) إضافة إلى ذلك فإن الشذوذ الأيونوسفيري الموضعي يسلك سلوك العدسات المتقاربة والمتباعدة التي تركز وتزيل التركيز عن الموجات الراديوية. ويشار إلى مثل هذه الآثار عموماً بأنها الالتماعات التي تؤثر على الاتساع وزاوية وصول إشارة الخدمة MSS.

ونظراً إلى الطبيعة المعقدة لفيزياء الأيونوسفير، فليس من الممكن دائماً أن تلخص بسرعة وبصيغ تحليلية بسيطة معلمات النظام التي تتأثر بالآثار الأيونوسفيرية كما لوحظت أعلاه. ويعد عرض المعطيات ذات الصلة على شكل جداول و/أو رسوم بيانية مع تقديم بيانات على سبيل الوصف أو التحديد أفضل طريقة لتقديم هذه الآثار بالنظر إلى جميع الأغراض العملية.

وينبغي، عند النظر في آثار الانتشار بغية تصميم الخدمة MSS على ترددات أقل من 3 GHz، الاعتراف بأن:

- هـ) ما يسمى عادة بآثار الانتشار فضاء-أرض الناتجة عن الظواهر الجوية المائية ليست مهمة بالنسبة إلى الآثار الواردة في (و ح)؛
- و) آثار المسيرات المتعددة على مقربة من السطح لها دائماً أهمية حاسمة عند وجود عوائق طبيعية أو اصطناعية و/أو زوايا ارتفاع منخفضة؛
- ز) آثار المسيرات المتعددة على مقربة من السطح تتغير من منطقة إلى أخرى وهي لا تسيطر بالتالي على التصميم الإجمالي لنظام الخدمة MSS حين يتعين التعامل مع عوامل الانتشار على الصعيد العالمي؛
- ح) الآثار الأيونوسفيرية هي آثار الانتشار التي ينبغي مراعاتها عند تصميم نظام الخدمة MSS على الصعيد العالمي.

2 الخلفية

يتألف الأيونوسفير الأرضي الذي يسببه الإشعاع الشمسي من عدة أقاليم من التأين. ومن أجل كل أهداف الاتصالات العملية، فقد حددت أقاليم الأيونوسفير D و E و F وأقاليم التأين العليا بوصفها تساهم في المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) بين المطاريف الساتلية والأرضية.

وفي كل إقليم، لا يكون الوسيط المتأين متجانساً في الفضاء أو مستقراً في الزمن. وعموماً يكون للتأين الخلفي تغيرات منتظمة إلى حد ما يومية وفصلية ودورية شمسية كل 11 عاماً ويتوقف بشكل كبير على المواقع الجغرافية والنشاط المغنطيسي الأرضي. وإضافة إلى التأين الخلفي، هناك دائماً بنى صغيرة عالية الدينامية وغير مستقرة بالنسبة إلى الأرض وتعرف بأنها شاذة. ويؤدي التأين الخلفي

والشدوذ كلاهما إلى انحطاط الموجات الراديوية. إضافة إلى ذلك، يتسبب كل من التأين الخلفي والشدوذ في جعل المؤشر الانكساري أكثر اعتماداً على التردد أي أن يصبح الوسط مشتتاً.

3 الانحطاطات الأولية الراجعة إلى التأينات الخلفية

إن عدداً من الآثار مثل الانكسار والتشتت وتأخر الزمرة يكون متناسباً من حيث الحجم مباشرة مع المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) كما يتناسب دوران فاراداي تقريباً مع المساهمات من أجزاء مختلفة من مسير الإشعاع كما يقدر بواسطة المكون الطولي من المجال المغنطيسي. وهكذا تتيح معرفة المحتوى TEC إجراء تقدير كمي للعديد من الآثار الأيونوسفيرية المهمة.

1.3 المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC)

إن المحتوى TEC الذي يعين بواسطة N_T يمكن تحديده قيمته بالمعادلة لتالية:

$$(1) \quad N_T = \int_s n_e(s) ds$$

حيث:

s : مسير الانتشار (m)

n_e : تركيز الإلكترونات (el/m^3).

وحتى حين يكون مسير الانتشار المحدد معروفاً، يكون تحديد قيمة N_T صعباً لأن n_e تتعرض لتغيرات يومية وفصلية ودورية شمسية. ومن أجل أغراض النمذجة، تذكر عادة قيمة المحتوى TEC مرتبطة بمسير سمت له تقاطع مستعرض يبلغ 1 m^2 . ويمكن أن يتغير المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) لهذا العمود الرأسي بين 10^{16} و $10^{18} \text{ el}/\text{m}^2$ بحيث تظهر الذروة خلال جزء الإضاءة الشمسية من النهار.

ومن الممكن تقدير قيمة المحتوى TEC إما باتباع عملية تستند إلى الأيونوسفير المرجعي الدولي (IRI) (IRI-2012) أو باتباع عملية أكثر مرونة تصلح أيضاً لتقييم المحتوى TEC المائل بالاستناد إلى طريقة NeQuick2 v.P531-12. ويرد فيما يلي عرض للعمليات.

1.1.3 الطريقة المستندة إلى الأيونوسفير المرجعي الدولي (IRI-2012)

إن الأيونوسفير المعياري الشهري المتوسط هو النموذج IRI-2012 (نموذج الأيونوسفير المرجعي الدولي لـ COSPAR-URSI (IRI-2012)). ومن الممكن خلال فترات النشاط الشمسي المنخفض أو المعتدل أن تستخدم تقنيات رقمية من أجل التوصل إلى قيم لأي موقع أو زمن أو مجموعة من الارتفاعات التي قد تصل إلى 2000 km . وفي ظل ظروف النشاط الشمسي العالي، يمكن أن تظهر بعض المشاكل فيما يتعلق بقيم المحتوى الإلكتروني المستخلصة من IRI-2012. ولأسباب كثيرة يكفي تقييم المحتوى الإلكتروني عن طريق مضاعفة أقصى كثافة للإلكترونات مع قيمة ثخانة طبقة معادلة 300 km .

2.1.3 الطريقة المستندة إلى NeQuick2

يعبر عن توزيع الكثافة الإلكترونية المتاحة عن طريق النموذج بدالة متصلة تتسم أيضاً بالاتصال في حالة جميع المشتقات الأولى المكانية. وهي تتألف من جزأين: الجزء الأدنى (أدنى من الحد الأقصى للطبقة F2)، والجزء الأعلى (أعلى من الحد الأقصى للطبقة F2). ويحسب أقصى ارتفاع للطبقة F2 بناء على قيم $M(3000)F2$ والنسبة $foF2/foE$ (انظر التوصية ITU-R P.1239).

ويوصف الجزء الأدنى بطبقات شبه إستانينية تمثل E و F1 و F2. أما الجزء الأعلى من الطبقة F فهو بدوره طبقة شبه إستانينية بمعلمة للشحانة تتوقف على الارتفاع. ويعطي النموذج NeQuick2 v.P531-12 كثافة الإلكترونات والمحتوى الإلكتروني الإجمالي بطول مسيرات عشوائية من الأرض إلى الساتل أو من الساتل إلى الساتل.

ويعد برنامج الحاسوب وملفات المعطيات المرتبطة به من النواتج الرقمية المكتملة لهذه التوصية وهي متاحة في الملف [R-REC-P.531-13-201609-I!!ZIP-E](#) (Part 1).

2.3 دوران فاراداي

إن الموجة المستقطبة خطياً تتعرض عند انتشارها عبر الأيونوسفير لدوران مستوى استقطابها تدريجياً بسبب وجود المجال المغنطيسي الأرضي ولا تنحني وسيط البلازما. ويتوقف مقدار دوران فاراداي θ على تردد الموجة الراديوية وعلى قوة المجال المغنطيسي وعلى الكثافة الإلكترونية للبلازما على النحو التالي:

$$(2) \quad \theta = 2,36 \times 10^{-14} \frac{B_{av} N_T}{f^2}$$

حيث:

θ : زاوية الدوران (rad)

B_{av} : الشدة المتوسطة للمجال المغنطيسي الأرضي ($\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ أو Teslas)

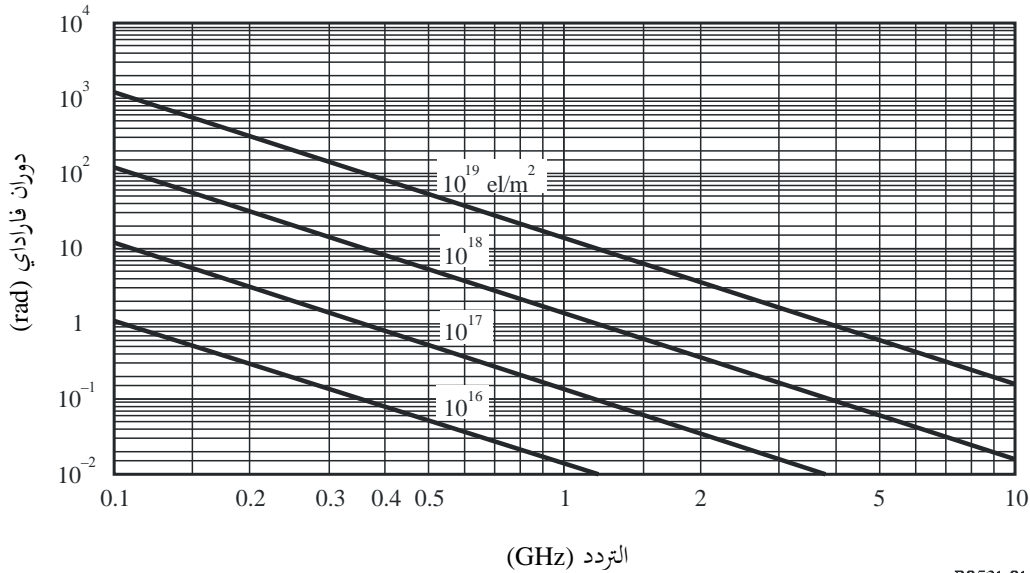
f : التردد (GHz)

N_T : TEC ($\text{electrons} \cdot \text{m}^{-2}$).

ترد في الشكل 1 القيم النمطية لـ θ .

الشكل 1

دوران فاراداي كدالة للمحتوى TEC والتردد



P0531-01

وبناءً على ذلك، يكون دوران فاراداي متناسباً بصورة عكسية مع مربع التردد كما يكون متناسباً مباشرة مع الحاصل المتكامل للكثافة الإلكترونية ومكون المجال المغنطيسي للأرض على طول مسير الانتشار. ويتراوح متوسط قيمته عند تردد معين وفقاً لنمط يومي وفصلي ودوري شمسي منتظم من الممكن التنبؤ به. وبالتالي يمكن التعويض عن المكون العادي لدوران فاراداي بواسطة تكييف يدوي لزاوية انحناء الاستقطاب عند هوائيات المحطة الأرضية. إلا أن من الممكن أن تظهر انحرافات كبيرة عن هذا النمط المنتظم خلال نسب مئوية صغيرة من الزمن كنتيجة للعواصف المغنطيسية الأرضية، كما قد تظهر إلى مدى أقل اضطرابات أيونوسفيرية

متنقلة كبيرة. ولا يمكن التنبؤ بهذه الانحرافات بشكل مسبق. وقد أرجعت التغييرات الحادة والسريعة لزوايا دوران فاراداي عند إشارات الموجات المترية إلى تآكل قوي وسريع على التوالي عند مواقع على مقربة من ذرى الشذوذ المداري. ويرتبط تمييز الاستقطاب المتقاطع في حالة الهوائيات المتراصفة (XPD (dB) بزوايا دوران فاراداي θ عن طريق العلاقة:

$$(3) \quad XPD = -20 \log (\tan \theta)$$

3.3 تأخر الزمرة

يؤدي وجود جزئيات مشحونة في الأيونوسفير إلى بطء انتشار الإشارات الراديوية على طول المسير ويسمى التأخر بالنسبة لزمّن الانتشار في الفضاء الحر الذي يشار إليه عادة بـ t بتأخر الزمرة. وهو عامل مهم يجب مراعاته في حالة أنظمة الخدمة MSS. وبطريقة مماثلة، يتقدم الطور بنفس المقدار. ويمكن حساب هذه الكمية كما يلي:

$$(4) \quad t = 1,345 N_T / f^2 \times 10^{-7}$$

حيث:

t : التأخر الزمني (s) بالنسبة للانتشار في فراغ

f : تردد الانتشار (Hz)

N_T : تحدد على طول مسير الانتشار المائل.

ويتضمن الشكل 2 رسماً بيانياً يمثل تأخر الزمرة t ، في مقابل التردد f بالنسبة لعدة قيم للمحتوى الإلكتروني على طول مسير الشعاع. في حالة نطاق للترددات يقرب من 1 600 MHz يتراوح تأخر زمرة الإشارات بين حوالي 0,5 و 500 ns إذا تراوح المحتوى الإلكتروني الإجمالي بين 10^{16} و 10^{19} el/m². ويبين الشكل 3 النسبة المئوية السنوية من ساعات النهار التي يتجاوز خلالها التأخر الزمني 20 ns في فترة من النشاط الشمسي المرتفع نسبياً.

4.3 التشتت

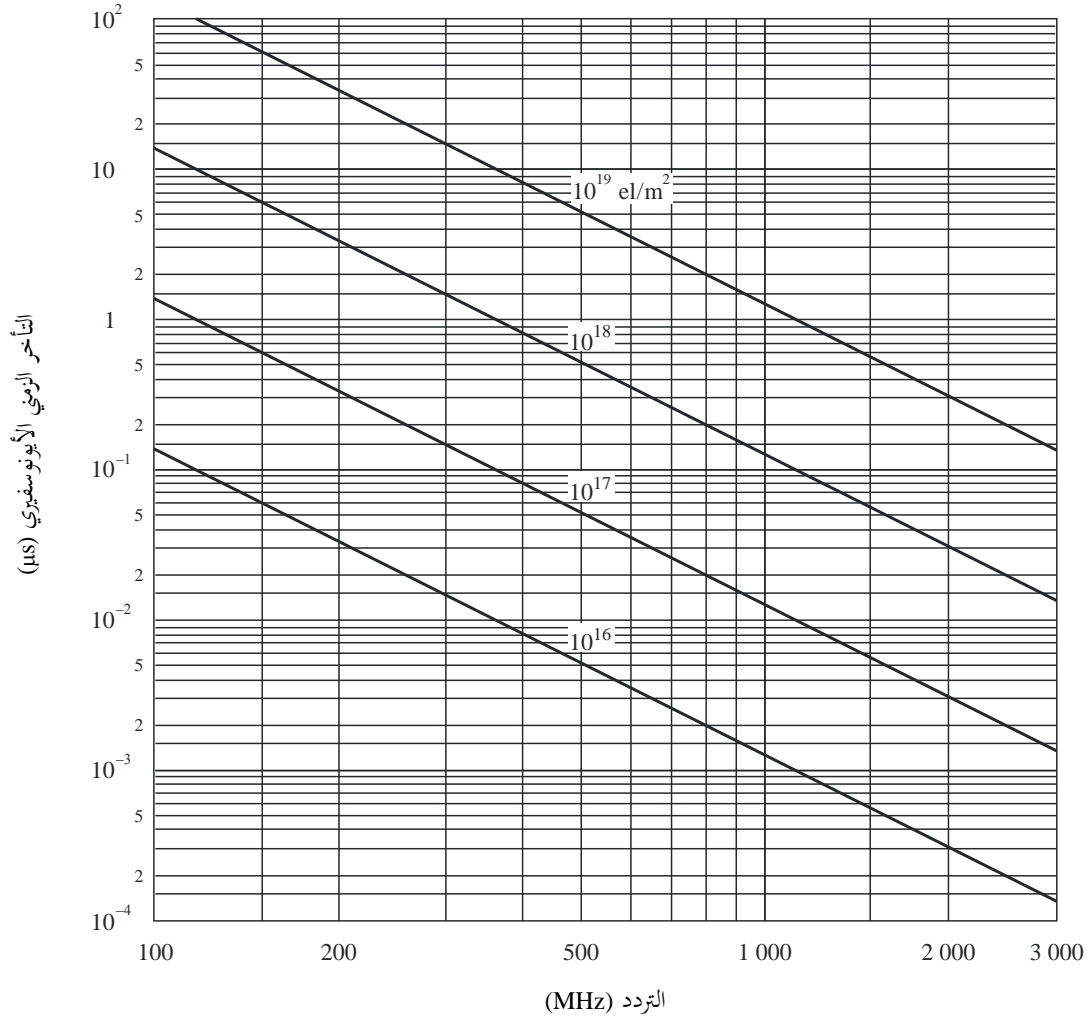
حين تشغل الإشارات العابرة للأيونوسفير نطاقاً عريضاً للترددات، فإن تأخر الانتشار (الذي يتوقف على التردد) يؤدي إلى التشتت. وتكون المهلة التفاضلية عبر عرض النطاق متناسبة مع الكثافة الإلكترونية على طول مسير الإشعاع. وفي حالة عرض نطاق ثابت، يكون التشتت النسبي متناسباً على نحو عكسي مع تكعيب التردد. ويتعين بالتالي مراعاة هذا الأثر في حالة الأنظمة التي تنطوي على الإرسالات عريضة النطاق التي تعمل بالموجات المترية وربما بالموجات الديكامترية. ومثال ذلك أنه كما يرد في الشكل 4 إذا بلغ المحتوى الإلكتروني المتكامل 5×10^{17} el/m²، فإن إشارة بطول نبضي قدره 1 μ s تتعرض لتأخر تفاضلي قدره 0,02 μ s، عند 200 MHz في حين أن التأخر عند 600 MHz لن يتجاوز 0,00074 μ s (انظر الشكل 4).

5.3 معدل تغير المحتوى TEC

إن معدل تغير المحتوى الإلكتروني TEC المشاهد في حالة ساتل في مداره يرجع في جانب منه إلى تغير اتجاه مسير الشعاع كما يرجع في جانب آخر إلى تغير في الأيونوسفير نفسه. وفي حالة ساتل يتحرك على ارتفاع 22 000 km عابراً منطقة الشفق، رصد معدل أقصى للتغير بلغ $0,7 \times 10^{16}$ el/m²/s. ولأغراض الملاحة، يقابل معدل التغير هذا سرعة ظاهرة تبلغ 0,11 m/s.

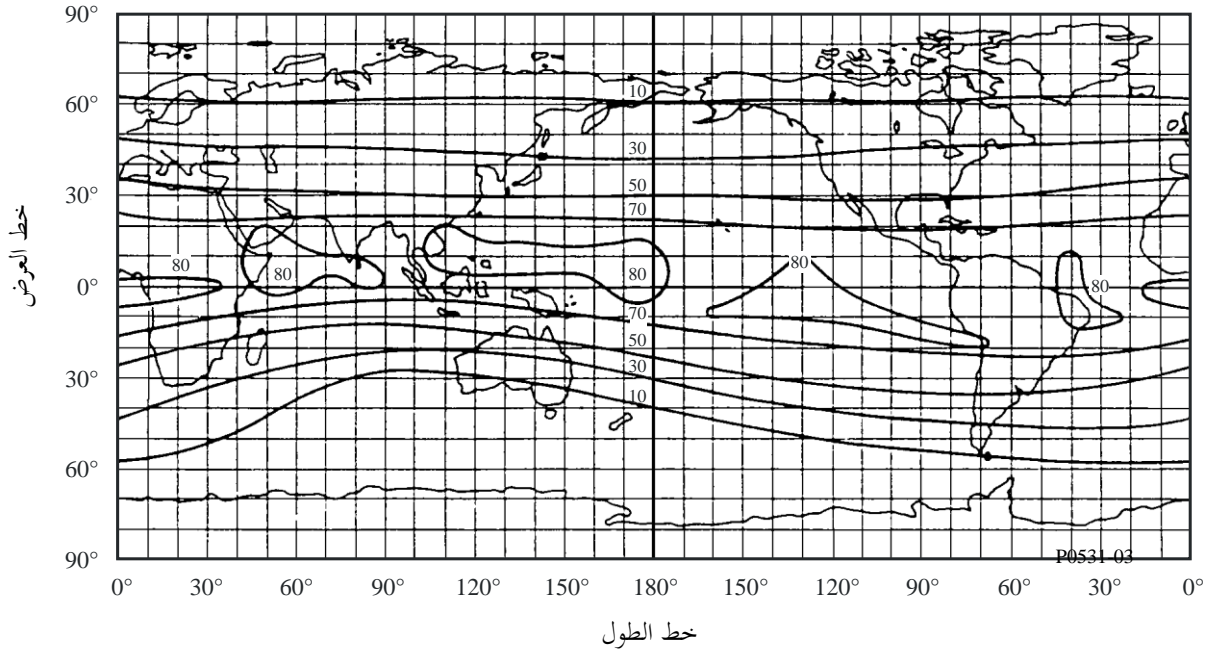
الشكل 2

التأخر الزمني الأيونوسفيري في مقابل التردد بالنسبة لعدة قيم للمحتوى الإلكتروني



الشكل 3

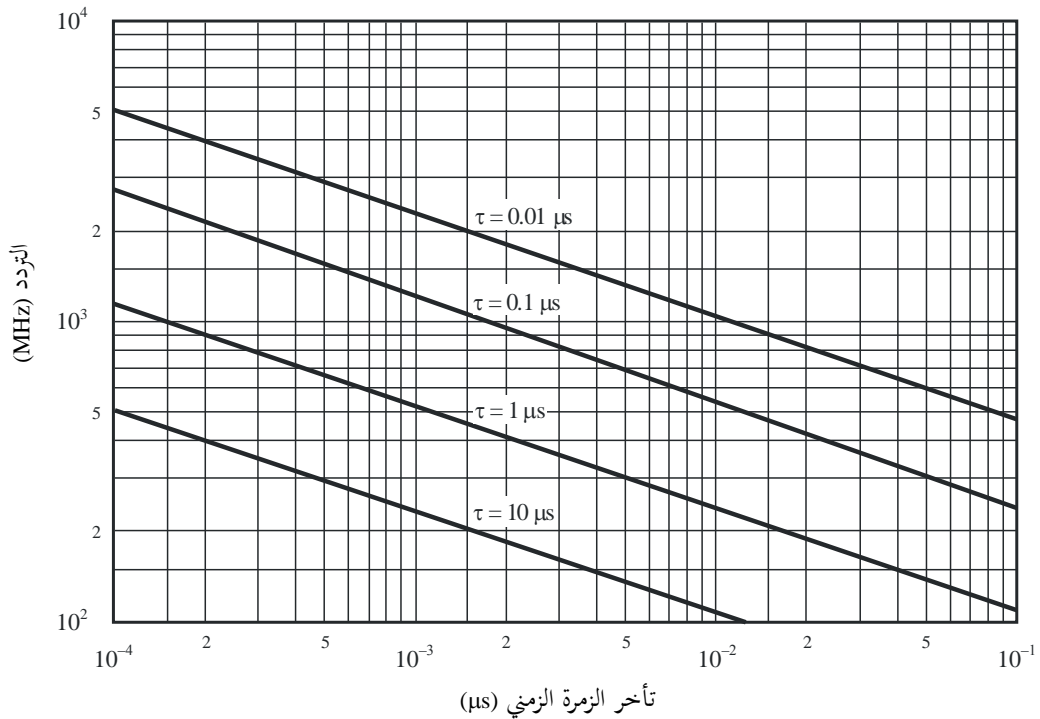
أكفة النسبة المئوية للمتوسط السنوي لعدد ساعات النهار التي يتجاوز خلالها التأخر الزمني في حالة ورود رأسي عند 1,6 GHz 20 ns (عدد البقع الشمسية = 140)



P0531-03

الشكل 4

الفارق في التأخر الزمني بين الترددات الدنيا والعليا لطيف نبضة يبلغ عرضها τ وتنتشر في الأيونوسفير على مسير وحيد الاتجاه



$$\int n_e ds = 5 \times 10^{17} \text{ el/m}^2$$

P0531-04

4 الانحطاط الرئيسي نتيجة لحالات الشدوذ

1.4 الالتماع

يتسبب الالتماع الأيونوسفيري في أحد أهم الاضطرابات على طول مسير الانتشار عبر الأيونوسفير في حالة الإشارات التي تقل عن 3 GHz. ويمكن رصد آثار الالتماع الأيونوسفيري من وقت لآخر حتى في مدى يصل إلى 10 GHz. وتنتج الالتماع عن تراوحت مؤشرات الانكسار الذي يسببه عدم تجانس الوسيط. أو في المستقبل فُتظهر الإشارة اتساعاً سريعاً وتراوحت طور وتغيرات في خصائص اتساق الوقت فيها. ويحدث عن طريق آليات الانتشار والانعراج بصفة خاصة أن تتسبب بنى صغيرة غير منتظمة في كثافة التأين في ظواهر التماعية تحل فيها محل الإشارة الثابتة عند المستقبل إشارة يتغير اتساعها وطورها والاتجاه الظاهر لوصولها. وتؤثر جوانب عدة من الالتماع على أداء النظام تأثيراً يختلف باختلاف تشكيله. والمعلمة الأشيع استخداماً في تمييز تقلبات الشدة هي مؤشر الالتماع S_4 الذي يحدد عن طريق المعادلة (5):

$$(5) \quad S_4 = \left(\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \right)^{1/2}$$

حيث I هي شدة الإشارة (التناسبية مع جذر اتساع الإشارة) بينما تشير العلامة $\langle \rangle$ إلى المتوسط.

ويرتبط مؤشر الالتماع S_4 بتقلبات الشدة من ذروة-إلى-ذروة. وتتوقف العلاقة الدقيقة بين مؤشر الالتماع، S_4 ، والتقلبات من ذروة إلى أخرى على توزيع الشدة. وعلى خوارزمية معالجة الشدة المتعلقة بعملية حساب الدليل S_4 . ويوصف توزيع الشدة على أفضل وجه بواسطة توزيع Nakagami في حالة مدى واسع من قيم S_4 .

ويمكن تصنيف قوة اللمعان الأغراض التبسيط في ثلاثة أنواع: منخفضة أو معتدلة أو مرتفعة. وتعادل القيم المنخفضة $S_4 > 0,3$ ، والمعتدلة من 0,3 إلى 0,6 والمرتفعة $S_4 < 0,6$.

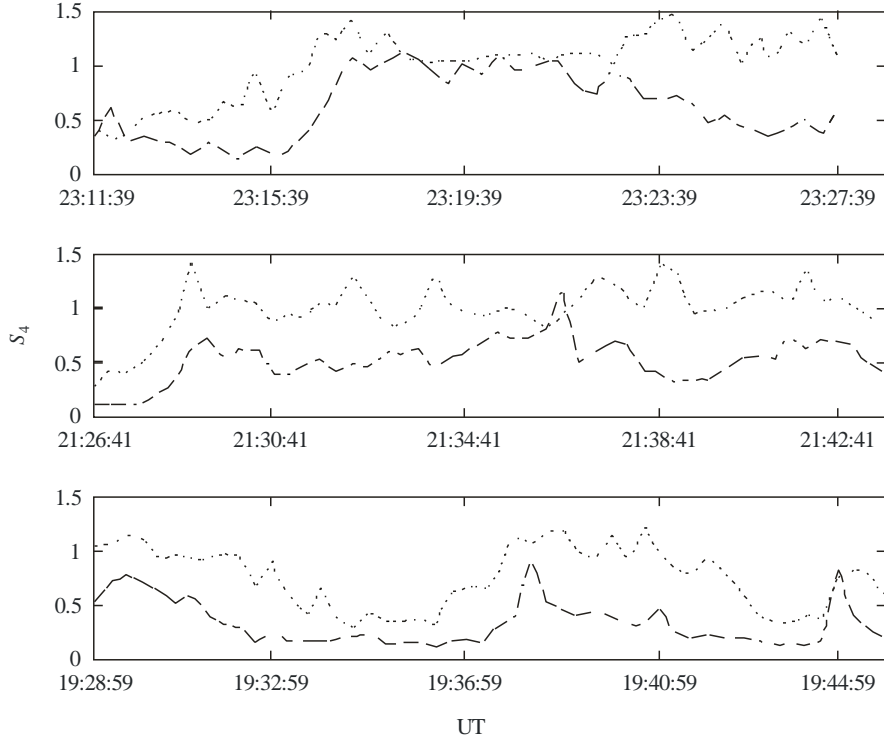
ويظهر المؤشر S_4 في الحالتين المنخفضة والمعتدلة اعتماداً دائماً على التردد $f^{-\nu}$ علماً بأن ν تساوي 1,5 في معظم عمليات الرصد متعدد الترددات. كما أن الاتساع في حالات القيم المنخفضة يتبع توزيعاً لوغاريتمياً عادياً.

وفي حالة القيم المرتفعة، رصد تناقص العامل ν . وذلك بسبب تشبع اللمعان الناجم عن التأثير القوي للانتشار المتعدد. وعندما تقترب S_4 من 1,0، فإن التوزيع يقترب من توزيع رايلي (Rayleigh). وقد يحدث من وقت إلى آخر أن تزيد S_4 عن 1 بحيث تصل قيمتها إلى 1,5. ويبين الشكل 5 مثلاً لتبعية المؤشر S_4 للتردد في الموجات VHF و UHF في ثلاث محطات للمنطقة الشفقية المنخفضة والمعتدلة والمرتفعة الالتماع.

تتبع التماع الطور التوزيع الغوسي بمتوسط صفر. ويستعمل الانحراف المعياري لوصف التماع الطور (σ_ϕ). ومعظم عمليات الرصد في المناطق الاستوائية بالنسبة إلى القيم المنخفضة والقيم المعتدلة تشير إلى أن طور الالتماع وكثافته مترابطان ارتباطاً وثيقاً وأن المؤشر S_4 والقيمة σ_ϕ (عند ما يعبر عنها بالراديان) لهما نفس القيمة.

الشكل 5

مؤشرات التماع جرى قياسها في كيرونا (a) ولوليا (b) وكوككولا (c) عند التردد 150 MHz (خط النقط) و 400 MHz (خط الشرطات) وسجلت من سواتل المدار القطبي LEO Tsykada في ظروف جوية سيئة في 30 أكتوبر 2003



P.0531-05

ومن الناحية التجريبية، يقدم الجدول 1 طريقة عملية في التحويل بين قيم S_4 والتقلبات التقريبية من ذروة-إلى-ذروة P_{fluc} (dB)، وذلك عندما لا يزيد الدليل S_4 عن 1,0. ومن الممكن التعبير عن هذه العلاقة على نحو تقريبي كما يلي:

$$(6) \quad P_{fluc} = 27,5 S_4^{1,26}$$

حيث $1,0 \geq S_4 \geq 0,0$.

الجدول 1

جدول التحويل التجريبي لمؤشرات الالتماع

| P_{fluc} (dB) | S_4 |
|--------------------|-------|
| 1,5 | 0,1 |
| 3,5 | 0,2 |
| 6 | 0,3 |
| 8,5 | 0,4 |
| 11 | 0,5 |
| 14 | 0,6 |
| 17 | 0,7 |
| 20 | 0,8 |
| 24 | 0,9 |
| 27,5 | 1,0 |

ويمكن لأي دراسات لاحقة تغيير صلاحية المعادلة (6) ومداها.

2.4 اعتماد الالتماعات على الجغرافيا والاعتدال والشمس

هناك، من الناحية الجغرافية، منطقتان للالتماع الشديد: الأولى عند خطوط العرض العالية والأخرى متمركزة عند $\pm 20^\circ$ من خط الاستواء المغنطيسي كما يتضح من الشكل 6. ولقد تم رصد الالتماع حاد يصل إلى ترددات بالميجا هرتز في هذين القطاعين في حين أن الالتماع في خطوط العرض الوسطى يؤثر أساساً على إشارات الموجات المترية. وفي كل القطاعات الاستوائية، يوجد نشاط أقصى واضح في ساعات الليل كما هو مبين أيضاً في الشكلين 6 و7. وفي حالة الالتماع المداري بالجيجا هرتز، رصد نشاط أقصى على مقربة من الاعتدال الربيعي ونشاط مرتفع عند الاعتدال الخريفي.

وتقع حادثة الالتماع النمطية بعد الغروب الأيونوسفيري وقد تستغرق الحادثة ثلاثين دقيقة أو عدة ساعات. وفي حالة المحطات الاستوائية خلال سنوات النشاط الشمسي الأقصى، يظهر الالتماع الأيونوسفيري كل مساء تقريباً بعد غروب الشمس، وعندئذ تتجاوز التقلبات من الذروة إلى الذروة في مستوى الإشارة البالغ 4 GHz، 10 dB.

3.4 نموذج الالتماع الأيونوسفيري

يحسن من أجل التنبؤ بشدة الالتماع الأيونوسفيري على المسيرات من الأرض إلى الفضاء استخدام نموذج الالتماع الأيونوسفيري العالمي (GISM). ويتيح هذا النموذج التنبؤ بقيمة المؤشر S_4 وعمق خبو الاتساع وقيم جذر متوسط التربيع لزحزحة الطور والانحرافات الزاوية بسبب الالتماع حسب مواقع الساتل والمحطات الأرضية والتاريخ والتوقيت وتردد التشغيل. ويرتكز النموذج على طريقة الغزلة متعددة الأطوار. وقد حددت للمعلمات الرئيسية الداخلية للنموذج القيم الفرضية التالية:

— منحني طيف الشدة، $3 = p$

— متوسط حجم حالات الشدوذ $L_0 = 500 \text{ km}$

— الانحراف النمطي لتقلبات الكثافة الإلكترونية $\sigma_{Ne} = 0,2$.

ويراعى انحاء الأشعة، وتحسب خصائص الأيونوسفير البعيد في برنامج فرعي يستخدم النموذج الأيونوسفيري NeQuick. وتعد شفرة المصدر الخاصة بالنموذج GISM وبرنامج من النواتج الرقمية المكتملة لهذه التوصية وهي متاحة في الملف

4.4 الإحصائيات الآنية وسلوك الطيف

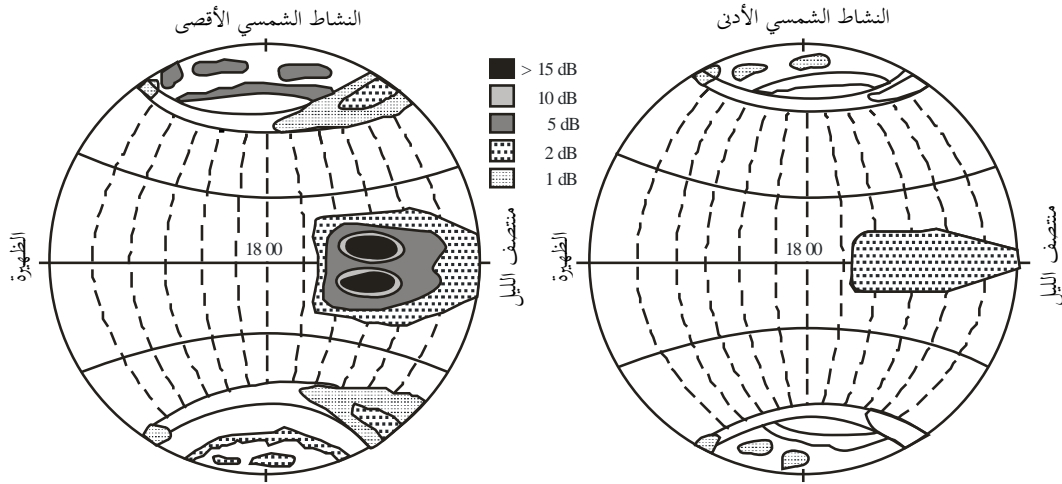
1.4.4 الإحصائيات الآنية

من المعتقد أن دالة كثافة Nakagami تصف بطريقة مرضية المعلمات الإحصائية للتغير الآني للاتساع أثناء حدوث ظاهرة الالتماع الأيونوسفيري. وتعرض دالة الكثافة لشدة الإشارة كما يلي:

$$(7) \quad p(I) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} I^{m-1} \exp(-mI)$$

الشكل 6

عمق الخبو الناتج عن الالتماع (المتناسب مع كثافة التوقيط) في النطاق GHz 1.5 خلال سنوات النشاط الشمسي الأقصى والأدنى

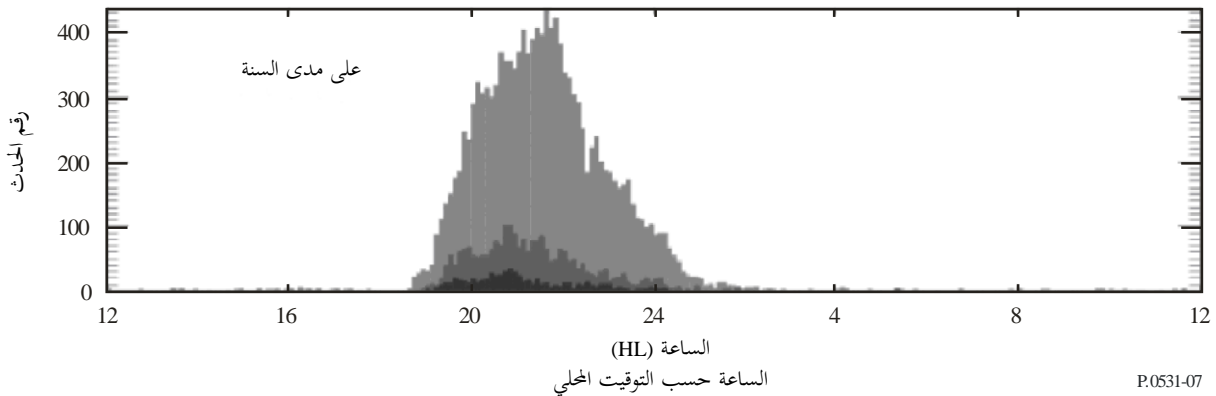


P.0531-06

الشكل 7

توزيع أحداث الالتماع على مدى سنة في كاين من 6 يونيو إلى 7 يوليو؛ مستوى المؤشر S_4 منخفض (في الأعلى) ومعتدل (في الوسط) ومرتفع (في الأسفل) وفي زوايا ارتفاع $< 20^\circ$

كاين: بيانات من 6 يونيو إلى 7 يوليو
مستوى S_4 : (0,4-0,25)، (0,4، 0)، (0,55 < 0,55)
زاوية الارتفاع $< 20^\circ$ ، بعد تصحيح متعدد المسارات



P.0531-07

حيث تكون علاقة "المعامل" m Nakagami بمؤشر الالتماع S_4 كما يلي:

$$(8) \quad m = 1/S_4^2$$

وعند صياغة المعادلة (7) تتم معايرة متوسط مستوى شدة I بحيث يبلغ 1,0. ويسهل إلى حد كبير حساب الكسر الزمني الذي تكون الإشارة خلاله أعلى أو أدنى من عتبة ما لأن دالة التوزيع التي تقابل كثافة Nakagami يعبر عنها بصيغة محدودة كما يلي:

$$(9) \quad P(I) = \int_0^I p(x) dx = \frac{\Gamma(m, mI)}{\Gamma(m)}$$

حيث يكون كل من $\Gamma(m, mI)$ و $\Gamma(m)$ دالة غاما غير الكاملة ودالة غاما، على التوالي. وباستعمال المعادلة (9)، يكون بالإمكان حساب الكسر الزمني الذي تكون الإشارة خلاله أعلى أو أدنى من عتبة ما خلال حدث أيونوسفيري. ومثال ذلك أن الكسر الزمني الذي تكون الإشارة خلاله دون المتوسط بمقدار يفوق X dB يعبر عنه بواسطة $P(10^{-X/10})$ بينما يعبر عن الكسر الزمني الذي تكون الإشارة خلاله فوق المتوسط بمقدار يفوق Y dB بواسطة $1 - P(10^{Y/10})$.

2.4.4 سلوك الطيف

يتراوح معدل خبو الالتماع الأيونوسفيري من حيث الخصائص الزمنية بين 0,1 و 1 Hz. وكنتيجة لذلك تتضمن أطراف القدرة مدى واسعاً من المنحنيات من f^1 إلى f^6 كما تبين من عمليات رصد مختلفة. ويعرض الشكل 8 سلوكاً نمطياً للطيف ويوصى بالمنحنى f^3 كما يظهر في الشكل في تطبيقات الأنظمة عندما لا تتوافر نتائج القياس المباشر. وتمثل هذه القيمة أحداث التماع تتراوح بين منخفضة ومعتدلة.

يختلف تردد القطع باختلاف التماع الاتساع والتماع الطور كما يبين الشكل 9. ويمثل التماع الطور مكونات تردد منخفض أكثر حدة من التماع الاتساع.

5.4 الاعتبارات الهندسية

1.5.4 الاعتماد على زاوية السم

في معظم النماذج تبدو S_4^2 متناسبة مع قاطع زاوية السم i لمسير الانتشار. ومن المعتقد أن العلاقة صالحة طالما كانت $i \approx 70^\circ$ لمستوى الالتماع المنخفض والمعتدل. أما إذا كانت الزاوية أكبر من ذلك، فيحسن استخدام علاقة تقترن بقدرة $\sec i$ تتراوح بين 1/2 و 1.

2.5.4 الاعتماد على الفصل وخط الطول

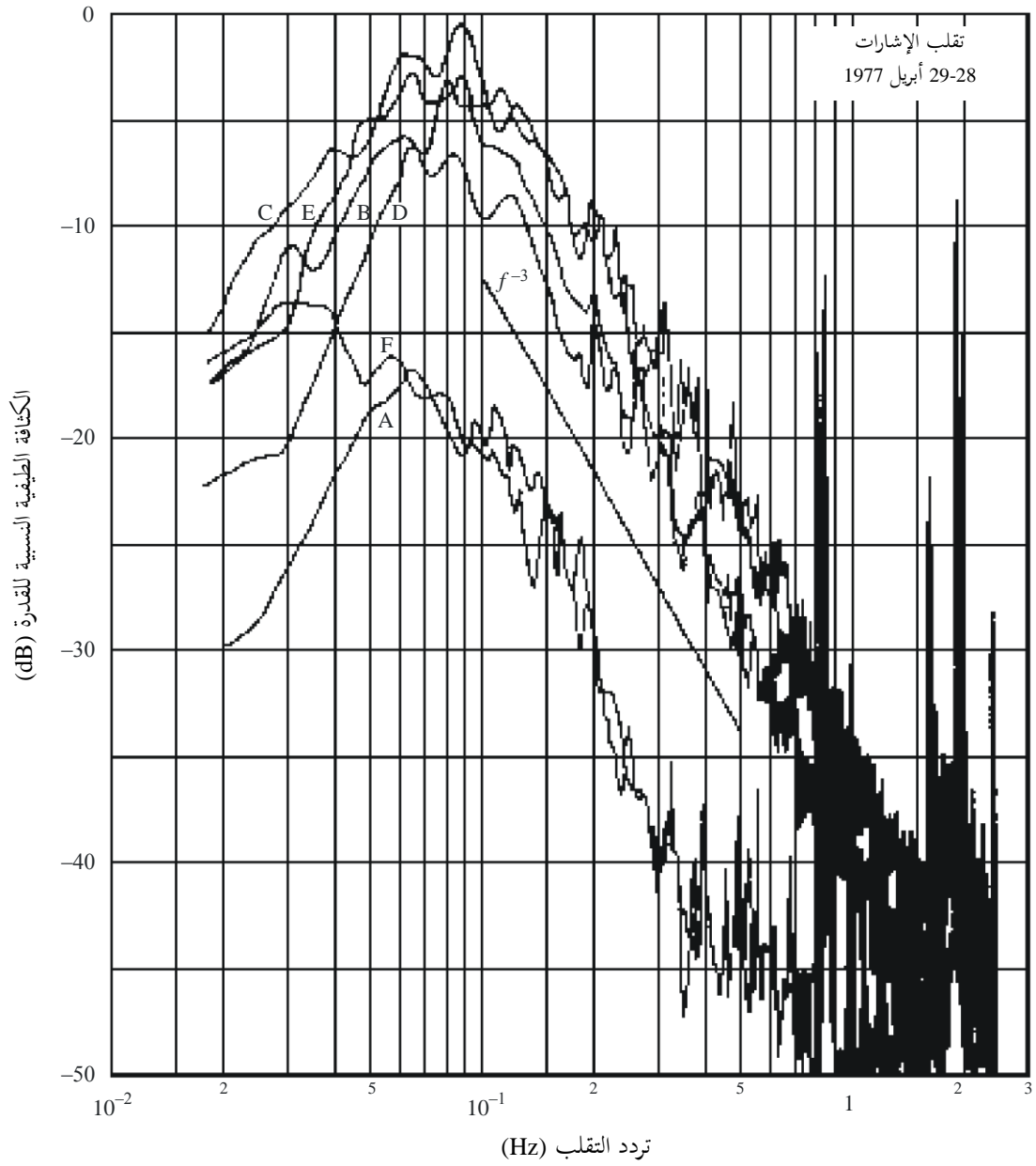
يعتمد احتمال ظهور الالتماع ومقدار S_4 على خط الطول والفصل توقعاً يمكن معلمته بواسطة الزاوية β المبينة في الشكل 9b وهي الزاوية الواقعة بين منهي غروب الشمس وخط الزوال المغنطيسي المحلي عند أوج خط المجال الذي يمر عبر مسار ارتفاع الشذوذ. وتبين دالة التوزيع في حالة الاعتماد على خط الطول والفصل كما يلي:

$$(10) \quad S_4 \propto \exp \left[-\frac{\beta}{W} \right]$$

حيث تكون W ثابت توزيع يتوقف على الموقع وعلى اليوم التقويمي من السنة. ومثال ذلك أن من الممكن باستخدام المعطيات المتاحة من تانغوا وكوجالين نمذجة القيمة الرقمية لثابت التوزيع كما هو مبين في الشكل 10.

الشكل 8

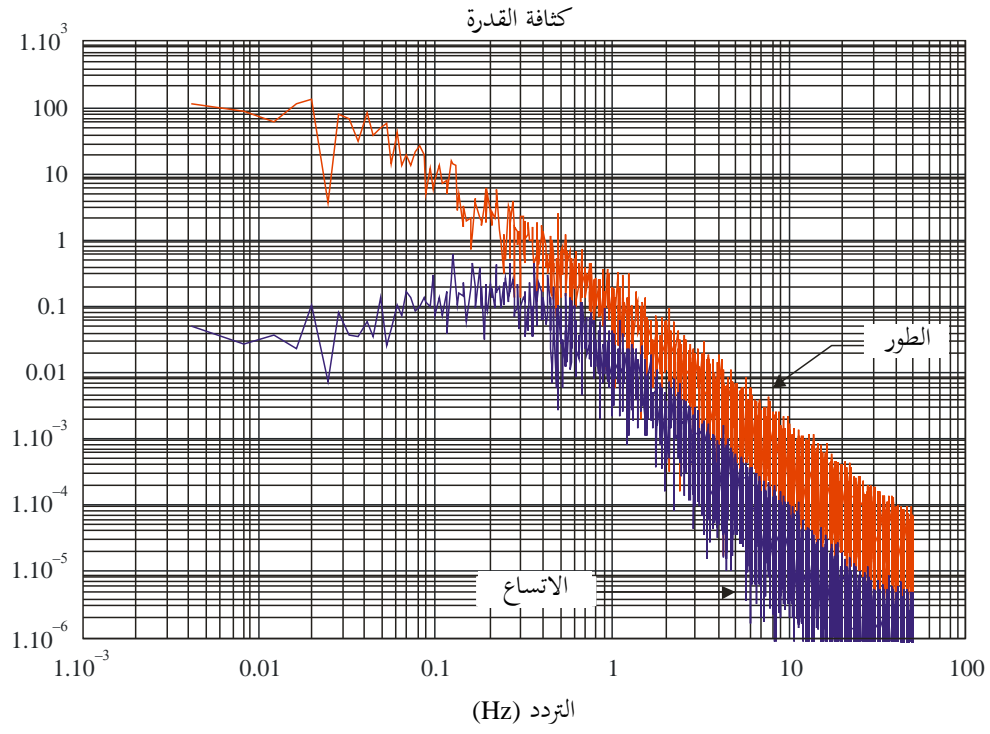
تقديرات الكثافة الطيفية للقذرة في حالة ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض (إنتلسات IV) عند 4 GHz



رصدت ظاهرة الانتماع خلال مسائي 28 و 29 أبريل 1977 في محطة الأرض في تايبيه

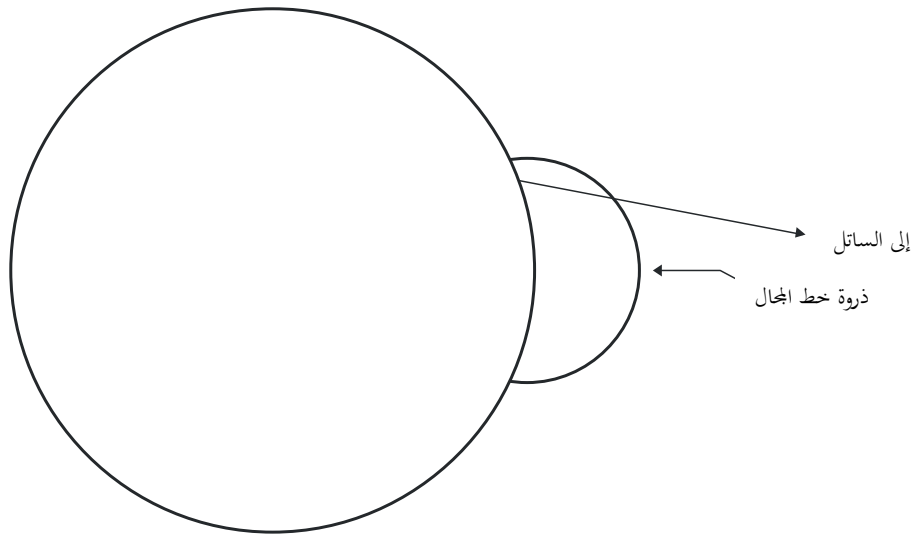
- :A 30 دقيقة قبل ظهور الظاهرة
:B في البداية
:C بعد ساعة
:D بعد ساعتين
:E بعد ثلاث ساعات
:F بعد أربع ساعات

الشكل 9
الشدة العادية وطيف الطور



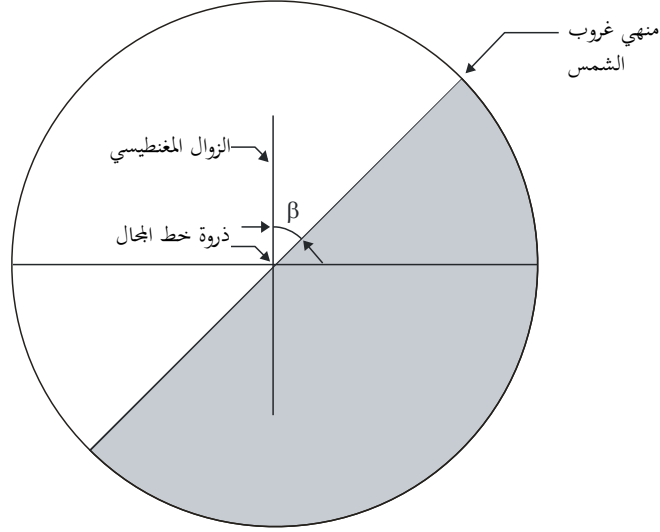
الشكل 9a

تقاطع مسير الانتشار مع خط من المجال المغنطيسي عند ارتفاع الإقليم F



الشكل 9b

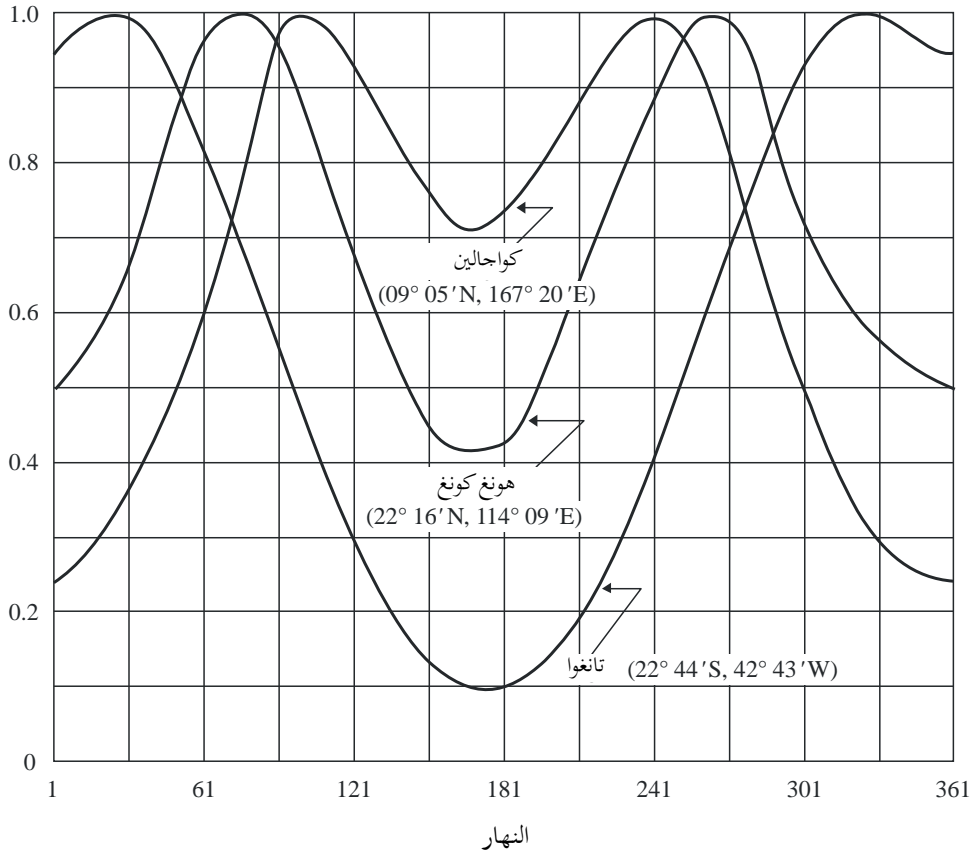
الزاوية بين خط الزوال المغنطيسي المحلي عند ذروة خط المجال
المبين في الشكل 9a ومنهي غروب الشمس



P0531-09b

الشكل 10

دوال التوزيع الفصلية في حالة المحطات الموجودة في قطاعات مختلفة من خط الطول



P0531-10

6.4 الإحصائيات التراكمية

عند تصميم أنظمة الاتصالات الراديوية الساتلية وتقدير تقاسم الترددات، لا يهتم مهندسو الاتصالات بانحطاط النظم وتداخلها خلال حدث ما فحسب، بل يهتمون أيضاً بإحصائيات الحدوث التراكمية في الأجل الطويل. وفي حالة أنظمة الاتصالات التي تتضمن ساتلاً مستقراً بالنسبة إلى الأرض، وهو ما يعد أبسط تشكيل لنظام راديوي، يوصى بالشكلين 11 و 12 لتقدير وتدرج إحصائيات الحدوث. وتمثل أرقام البقع الشمسية المذكورة متوسط عدد البقع الشمسية خلال 12 شهراً.

ومن الممكن استخلاص التوزيع التراكمي طويل الأجل، $P(I)$ ، لشدة الإشارة بالنسبة لمتوسط قيمتها من الإحصائيات التراكمية طويلة الأجل، $F(\xi)$ ، للتقلب من الذروة إلى الذروة، ξ ، وذلك مثل الإحصاءات المبينة في الشكل 11 كما يلي:

$$(11) \quad P(I) = \sum_{i=0}^n f_i P_i(I)$$

حيث تكون:

$$(11a) \quad f_0 = F(\xi < \xi_1)$$

$$(11b) \quad f_i = F(\xi_i \leq \xi < \xi_{i+1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$(11c) \quad f_n = F(\xi \geq \xi_n)$$

و ξ_1 و ξ_n هما القيمتان القصوى والدنيا على التوالي للتقلب من الذروة إلى الذروة، وتكون n هي رقم الفترة ξ التي تم استخدامها:

$$P_i(I) = \Gamma(m_i, m_i I) / \Gamma(m_i) \quad (11d)$$

$$(11e) \quad m_i = 1/S_{4i}^2$$

$$(11f) \quad S_{40} = \left[\frac{1}{27,5} \cdot \frac{\xi_1}{2} \right]^{1/1,26}$$

$$(11g) \quad S_{4i} = \left[\frac{1}{27,5} \cdot \frac{\xi_i + \xi_{i+1}}{2} \right]^{1/1,26} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$(11h) \quad S_{4n} = \left[\frac{1}{27,5} \cdot \frac{\xi_{n-1} + 3\xi_n}{4} \right]^{1/1,26}$$

ويبين الشكل 12 مثلاً للتوزيع التراكمي طويل الأجل لشدة الإشارة والذي يستخلص من المنحنى P6 في الشكل 11.

7.4 حدوث الالتماع الأيونوسفيري وخبو المطر في آن معاً

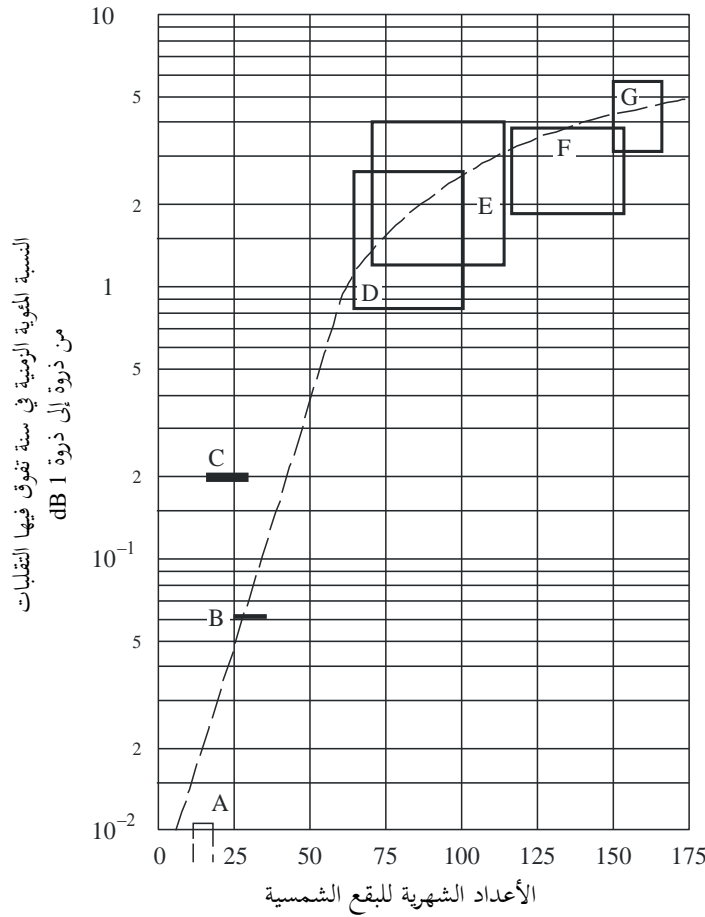
يعد الالتماع الأيونوسفيري والخبو الناتج عن المطر عاملي انحطاط يرجعان إلى مصدرين ماديين مختلفين تمام الاختلاف. ولكن قد يحدث في المناطق المدارية خلال السنوات التي يكون فيها عدد البقع الشمسية عالياً أن يكون لوقوع الظاهرتين في وقت واحد نسبة مئوية زمنية سنوية ذات أهمية بالنسبة لتصميم الأنظمة. ولقد بلغ زمن الحدوث الآني المتراكم 0,06% سنوياً كما لوحظ عند 4 GHz في محطة الأرض في جوتيلوهار بإندونيسيا.

وللأحداث المتأونة توقعات كثيراً ما تكون شديدة الاختلاف عن الأحداث التي لا تنطوي إلا على عامل انحطاط واحد؛ فإما الالتماع أو المطر. وفي حين أن الالتماع الأيونوسفيري وحده لا يشكل ظاهرة لإزالة الاستقطاب وأن الخبو بسبب المطر لا يشكل بمفرده عامل تقلب في الإشارة (ولو أنه قد يسبب تقلبات استقطاب خفيفة للالتماع من معتدلة إلى قوية)، فإن الأحداث المتأونة تؤدي إلى قدر كبير من تقلبات الإشارة في قناة الاستقطاب المتقاطع. وهناك حاجة للتعرف على هذه الأحداث المتأونة في حالة التطبيقات على الأنظمة الراديوية من الساتل إلى الأرض التي تتطلب درجة عالية من التيسر.

ويرد وصف التنبؤ بالخبو الناجم عن المطر في التوصية ITU-R P.618.

الشكل 11

تأثير الرقم الشهري المتوسط للبقع الشمسية على الالتماع الأيونوسفيرية الاستوائية عند 4 GHz



تبين المربعات أممية التغيرات خلال سنة
في حالة موجات حاملة مختلفة

- :A 1976-1975، هونغ كونغ والبحرين، 15 موجة حاملة
- :B 1974، لونغويلو، موجة حاملة واحدة
- :C 1977-1976، تايبيه، موجتان حاملتان
- :D 1971-1970، 12 محطة، < 50 موجة حاملة
- :E 1978-1977، هونغ كونغ، 12 موجة حاملة
- :F 1979-1978، هونغ كونغ، 10 موجات حاملة
- :G 1980-1979، هونغ كونغ، 6 موجات حاملة

8.4 نموذج الالتماع بالوحدات GHz

يمكن أن تستخدم الخطوات التالية من أجل تقييم آثار الالتماع التي يمكن توقعها في حالة ما:

الخطوة 1: يقدم الشكل 12 إحصائيات لأحداث التماع في مسيرات أيونوسفيرية مدارية: تقلبات الاتساع من ذروة إلى ذروة P_{fluc} (dB)، من أجل استقبال 4 GHz من سواتل في الشرق عند زوايا ارتفاع تبلغ حوالي 20° (المنحنيات P بخط متصل) وفي الغرب عند زاوية ارتفاع تبلغ حوالي 30° (المنحنيات I بخط منقط). وتعطى المعطيات بالنسبة لأوقات مختلفة من السنة وأعداد مختلفة من البقع الشمسية.

الخطوة 2: نظراً إلى أن الشكل 12 يتعلق بتردد قدره 4 GHz، فإن من الممكن الحصول على القيم الخاصة بترددات أخرى عن طريق ضرب هذه القيم في $(f/4)^{-1.5}$ حيث تمثل f التردد المعني (GHz).

الخطوة 3: يمكن عن طريق الشكل 5 تقدير P_{fluc} بحسب الموقع الجغرافي والحدوث اليومي تقديراً كيفياً.

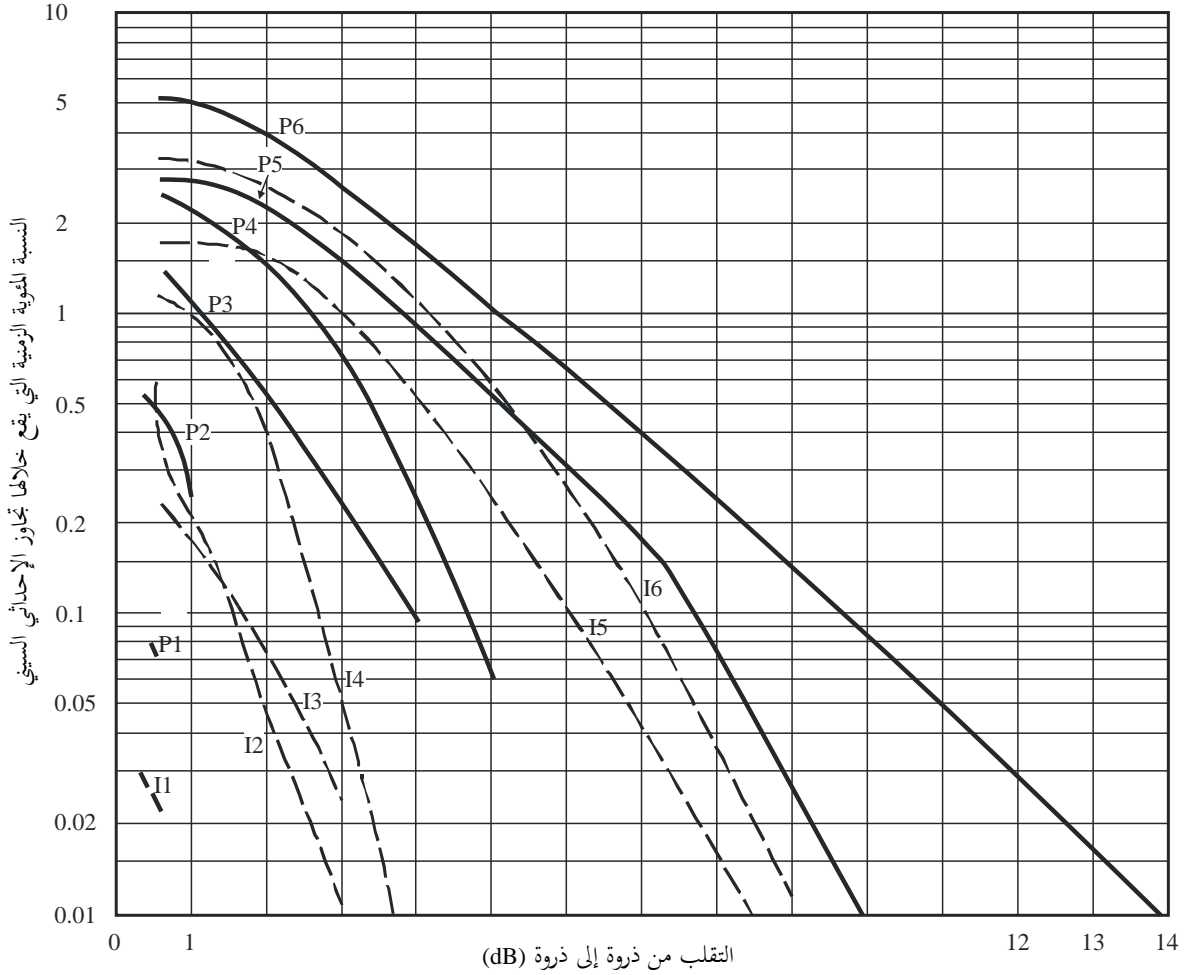
الخطوة 4: لما كان المتغير P_{fluc} عنصراً واحداً في حسابات ميزانية الوصلة، فإنه يرتبط بضعف الإشارة L_p وفقاً للعلاقة

$$L_p = P_{fluc} / \sqrt{2}$$

الخطوة 5: يرد في الفقرة 1.4 تعريف مؤشر الالتماع S_4 ، وهو المعلمة الأشيع استعمالاً لوصف الالتماع. ويمكن الحصول عليه من P_{fluc} باستخدام الجدول 1.

الشكل 12

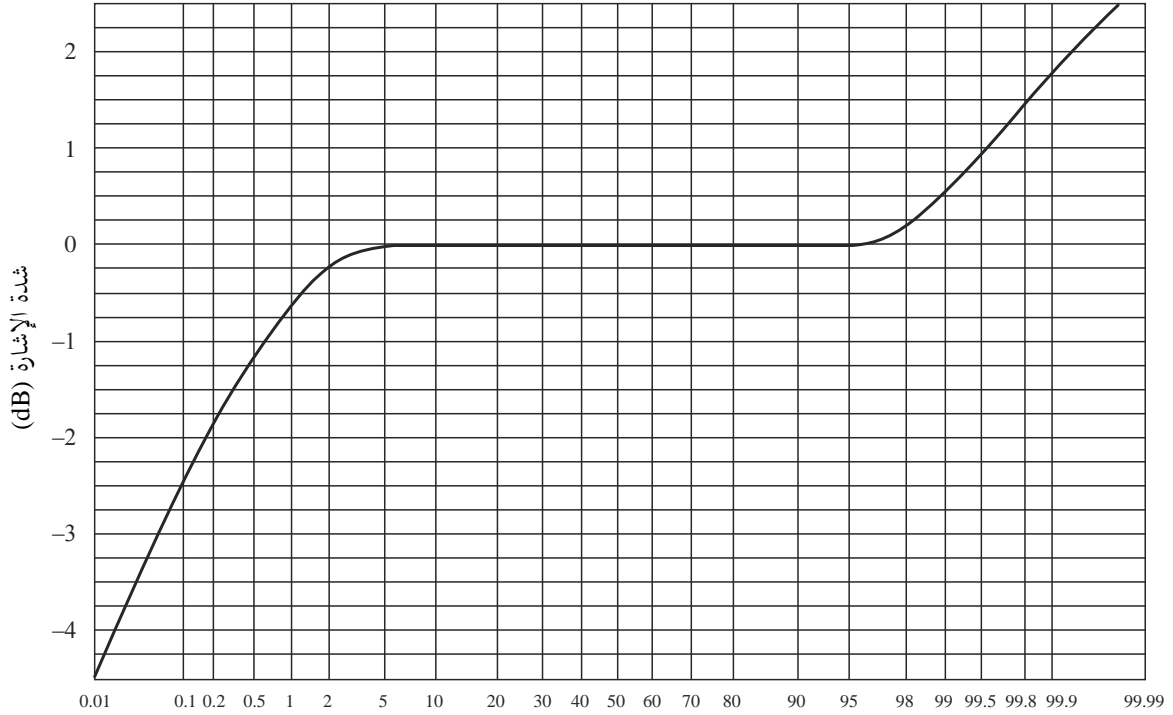
الإحصائيات السنوية للتقلبات من ذروة إلى ذروة المرصودة في محطة الأرض في هونغ كونغ (المنحنيات I1 و P1 و I6-I3 و P3-P6) ومحطة الأرض في تايبيه (المنحنيات P2 و I2)



| عدد البقع الشمسية | الفترة | المنحني |
|-------------------|--------------|---------|
| 15-10 | مارس 76-75 | P1 و I1 |
| 26-12 | يونيو 77-76 | P2 و I2 |
| 70-20 | مارس 78-77 | P3 و I3 |
| 110-44 | أكتوبر 78-77 | P4 و I4 |
| 160-110 | نوفمبر 79-78 | P5 و I5 |
| 165-153 | يونيو 80-79 | P6 و I6 |

الشكل 13

مثال للإحصائيات التراكمية طويلة الأجل لشدة الإشارة (4 GHz، ارتفاع 20°)



النسبة المئوية الزمنية التي لا يقع خلالها تجاوز للإحداثي الصادي

P.0531-13

5 الامتصاص

من الممكن عندما لا تتوفر المعلومات المباشرة تقدير الخسارة الناجمة عن الامتصاص الأيونوسفيري بناء على النماذج المتاحة في الوقت الحاضر طبقاً للعلاقة f^2/f_i في حالة الترددات التي تفوق 30 MHz حيث تكون i هي الزاوية السمتية لمسار الانتشار في الأيونوسفير. وفي حالة المناطق المدارية والواقعة على منتصف خط الطول، فإن الموجات الراديوية التي تفوق 70 MHz تكفل اختراق الأيونوسفير دون قدر كبير من الامتصاص.

وتدل القياسات في وسط خطوط الطول أن الامتصاص عند 30 MHz في حالة عبور الأيونوسفير في اتجاه واحد في ظل ورود رأسي يتراوح عادة في الأحوال العادية بين 0,2 و 0,5 dB. ومن شأن الامتصاص أن يزيد خلال الاندفاعات الشمسية، ولكنه يقل عندئذ عن 5 dB. ومن الممكن أن يتعزز الامتصاص عند خطوط العرض المرتفعة بسبب القلنسوة القطبية أو أحداث شفقية. وتحدث هاتان الظاهرتان في فترات عشوائية وتستمر لفترات مختلفة، وتتوقف آثارها على مواقع المطاريف وارتفاع زاوية المسير. وبناء على ذلك، ينبغي للتوصل إلى أنجح تصميم للنظم معالجة هاتين الظاهرتين بطريقة إحصائية على أن يراعى أن مدد الامتصاص الشفقي تصل إلى ساعات بينما تصل في حالة القلنسوة القطبية إلى أيام.

1.5 الامتصاص الشفقي

ينتج الامتصاص الشفقي عن زيادات في التركيز الإلكتروني في الإقليمين D و E تقع نتيجة لورود إلكترونات نشطة. ويتم رصد الامتصاص على مدى يتراوح بين 10° و 20° لخط العرض المركز على مقربة من خط عرض أقصى حدوث للشفق البصري. ويحدث الامتصاص كسلسلة من تعزيزات الامتصاص المنفصلة تكون مدة كل منها قصيرة نسبياً أي من عدة دقائق إلى عدة ساعات مع

مدة متوسطة تبلغ 30 دقيقة، وتتسم ببنية زمنية غير منتظمة. وتتكون التعزيزات الليلية عادة من ارتفاعات سريعة سلسلة وانخفاضات ضعيفة. ويبين الجدول 2 مقادير نمطية عند 127 MHz.

الجدول 2

الامتصاص الشفقي عند 127 MHz (dB)

| زاوية الارتفاع | | النسبة المئوية الزمنية |
|----------------|-----|---------------------------|
| °5 | °20 | |
| 2,9 | 1,5 | 0,1 |
| 1,7 | 0,9 | 1 |
| 1,4 | 0,7 | 2 |
| 1,1 | 0,6 | 5 |
| 0,4 | 0,2 | 50 |

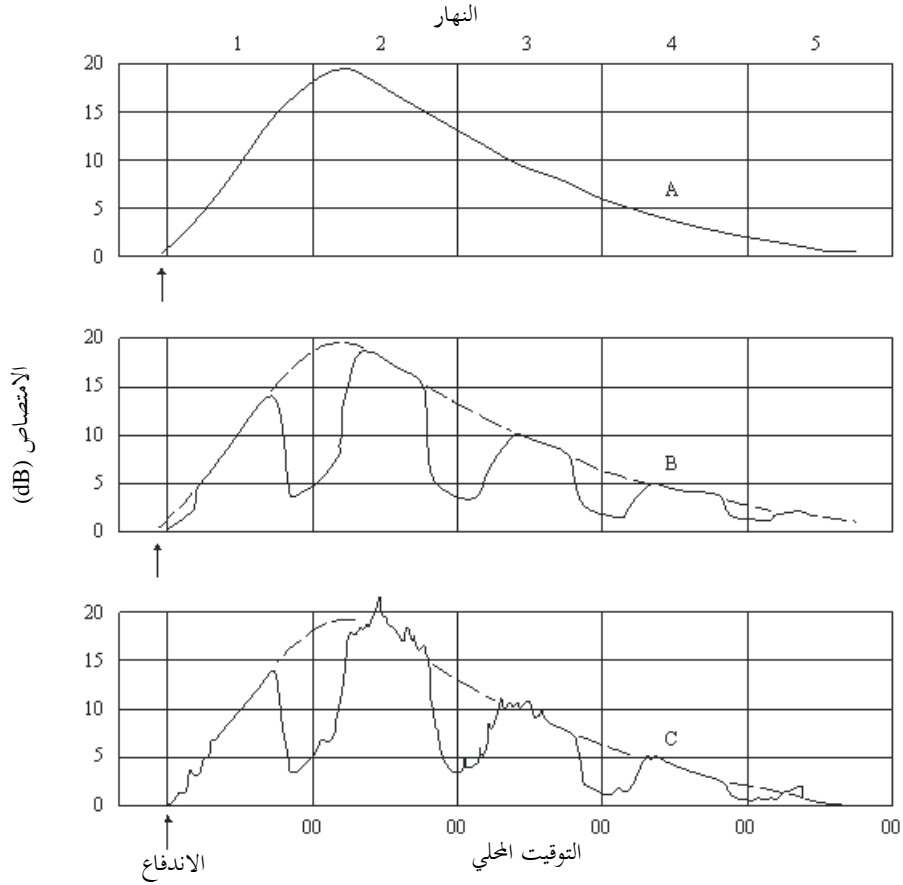
2.5 الامتصاص في حالة القلنسوة القطبية

إن الامتصاص في حالة القلنسوة القطبية الذي قد يحدث في فترات النشاط الشمسي المرتفع يقع عند خطوط عرض مغنطيسية أرضية أعلى من 64°. ويحدث الامتصاص نتيجة للتأين على ارتفاعات تفوق 30 km تقريباً. وهو يظهر على شكل أحداث منفصلة وإن تداخلت في بعض الأحيان وتقترن في جميع الحالات تقريباً بأحداث شمسية منفصلة. ويدوم الامتصاص فترة طويلة ويمكن رؤيته فوق القلنسوات القطبية المضاءة بالشمس. ويحدث امتصاص القلنسوة القطبية عادة خلال ذروة دورة البقع الشمسية حيث من الممكن أن يكون هناك من 10 إلى 12 حدثاً سنوياً. ومن الممكن أن يدوم مثل هذا الحدث لعدة أيام، وهو ما يتعارض مع الامتصاص الشفقي الذي غالباً ما يكون في موقع محدد مع تغيرات لا تدوم إلا دقائق.

ومن السمات المهمة لحدوث الامتصاص في حالة القلنسوة القطبية الانخفاض الكبير فيه خلال ساعات الظلام مع افتراض معدل معين لإنتاج الإلكترونات. ويمثل الشكل 14 نموذجاً افتراضياً للتغير اليومي للامتصاص عند القلنسوة القطبية عقب اندفاع شمسي كبير، وهو يستند إلى عمليات رصد بمقياس العتامة عند خطوط عرض مختلفة.

الشكل 14

نموذج افتراضي يبين الامتصاص عند القلنسوة القطبية بعد اندفاع شمسي كبير
كما يمكن توقع رصده بمقاييس العتامة عند 30 MHz تقريباً



- A: خطوط عرض مرتفعة - 24 ساعة من ضوء النهار
B: خطوط عرض مرتفعة - فترتان متساويتان من النهار والليل
C: خطوط عرض مرتفعة - منطقة شفقية

ITU-R P.531-13

6 ملخص

يتضمن الجدول 3 تقديرات للقيم القصوى للأثار الأيونوسفيرية عند تردد قدره 1 GHz. ويفترض أن المحتوى الإلكتروني الرأسي الإجمالي للأيونوسفير هو عمود قدره 10^{18} el/m². وتفترض كذلك زاوية ارتفاع تبلغ 30°. والقيم المبينة خاصة بانتشار الموجات في اتجاه واحد عبر الأيونوسفير.

الجدول 3

الآثار الأيونوسفيرية القصوى المقدرة عند 1 GHz مع افتراض زوايا ارتفاع قدرها حوالي 30° في حالة الانتشار في اتجاه واحد

| التغير بحسب التردد | المقدار | الأثر |
|--------------------|--------------------|--|
| $1/f^2$ | °108 | دوران فاراداي |
| $1/f^2$ | μs 0,25 | مدة الانتشار |
| $1/f^2$ | mrad 0,17 > | الانكسار |
| $1/f^2$ | 0,2 دقيقة من القوس | التغير في اتجاه الوصول |
| $\sim 1/f^2$ | dB 0,04 | الامتصاص (الامتصاص في حالة القلنسوة القطبية) |
| $\sim 1/f^2$ | dB 0,05 | الامتصاص (الشفقي + الامتصاص في حالة القلنسوة القطبية) |
| $1/f^2$ | dB 0,01 > | الامتصاص (في منتصف خط العرض) |
| $1/f^3$ | ns/MHz 4-0 | التشتت |
| انظر الفقرة 4 | انظر الفقرة 4 | الالتماع |