

## التوصية ITU-R P.531-9

## معطيات الانتشار الأيونوسفيري وطرائق التنبؤ المطلوبة

## من أجل تصميم الخدمات والأنظمة الساتلية

(المسألة ITU-R 218/3)

(1978-1990-1992-1994-1997-1999-2001-2003-2005-2007)

## مجال التطبيق

تصف التوصية ITU-R P.531 طريقة تقدير آثار الانتشار الأيونوسفيري على المسارات أرض-فضاء في الترددات الواقعة بين 0,1 و 12 GHz. وفيما يلي الآثار التي قد يتعرض لها المسير أرض-فضاء عند اختراق الإشارة للأيونوسفير:

- دوران الاستقطاب (دوران فارداي) وسببه تفاعل الموجة الكهرمغناطيسية مع الوسيط المتأين في المجال المغناطيسي للأرض على طول المسير؛
  - تأخر زمرة الإشارة الناجم عن المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) المتراكم على طول المسير؛
  - التغير السريع في اتساع وطور الإشارة (الانتماع) 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.

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة 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 بمعلومات الانتشار الأيونوسفيري الضرورية للتخطيط للأنظمة الساتلية؛
- د) أن من الممكن أن تؤثر الآثار الأيونوسفيرية على تصميم وأداء الشبكة الرقمية متكاملة الخدمات (ISDN) وأنظمة راديوية أخرى 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 بأن تعتمد 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 المقدمة

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 بالشدوذ 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، ونظراً إلى أنه يبدو أن الشدوذ الأيونوسفيري الموضعي يدخل مسير الوصلة ويخرج منه، وهو ما يتسبب في آثار دوبلر، فإن الظواهر الموصوفة في إطار (أ) و(ب) تؤدي إلى التشتت أو تشوه سرعة الزمرة للموجات الحاملة للخدمة (MSS)؛
- (د) إضافة إلى ذلك فإن الشدوذ الأيونوسفيري الموضعي يسلك سلوك العدسات المتقاربة والمتباعدة التي تركز وتزيل التركيز عن الموجات الراديوية. ويشار إلى مثل هذه الآثار عموماً بأنها الالتامعات 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) 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 والشذوذ كلاهما إلى انحناءات الموجات الراديوية. إضافة إلى ذلك، يتسبب كل من التأين الخلفي والشذوذ في جعل المؤشر الانكساري أكثر توقفاً على التردد أي أن يصبح الوسط تشتتياً.

### 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 TEC

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

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

حيث:

$s$ : مسير الانتشار (m)

$n_e$ : تركيز الإلكترونات ( $\text{el}/\text{m}^3$ )

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 بمسار سمته له تقاطع مستعرض يبلغ 1 m<sup>2</sup>. ويمكن أن يتغير المحتوى الإلكتروني الإجمالي (TEC) لهذا العمود الرأسي بين 10<sup>16</sup> و 10<sup>18</sup> el/m<sup>2</sup> بحيث تظهر الذروة خلال جزء الإضاءة الشمسية من النهار.

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

#### 1.1.3 الطريقة المستندة إلى الأيونوسفير المرجعي الدولي

إن الأيونوسفير المعياري الشهري المتوسط هو النموذج IRI-95 (نموذج الأيونوسفير المرجعي الدولي لـ COSPAR-URSI). 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-95. 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 NeQuick

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 إبيستائنية تمثل E و F1 و F2. أما الجزء الأعلى من الطبقة F فهو بدوره طبقة شبه إبيستائنية بمعلمة للشخانة تتوقف على الارتفاع. ويعطي النموذج NeQuick كثافة الإلكترونات والمحتوى الإلكتروني الإجمالي بطول مسيرات عشوائية من الأرض إلى الساتل أو من الساتل إلى الساتل.

ويمكن الحصول على برنامج الحاسوب وملفات المعطيات المرتبطة به من مكتب الاتصالات الراديوية.

## 3.1.3 دقة النموذجين

ترد التقديرات الخاصة بنموذجي NeQuick و IRI في وثائق منشورة مع قاعدة معطيات الانتشار عبر الأيونوسفير على الجزء المخصص من موقع قطاع الاتصالات الراديوية على شبكة الويب للجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية.

## 2.3 دوران فاراداي

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

$$(2) \quad \theta = 2.36 \times 10^2 B_{av} N_T f^{-2}$$

حيث:

$\theta$ : زاوية (الدوران)

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

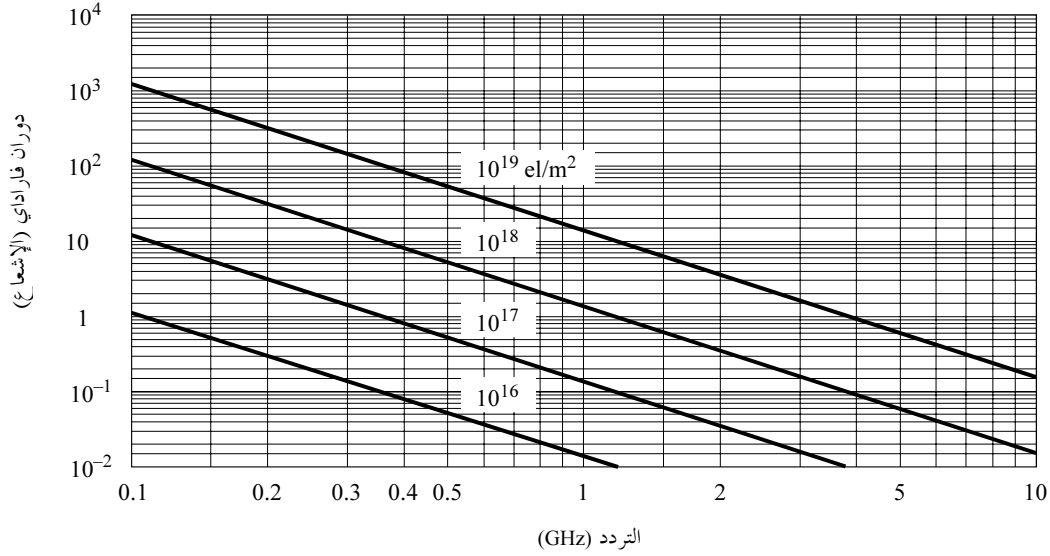
$N_T$ : TEC ( $electrons \cdot m^{-2}$ )

$f$ : التردد (GHz)

ترد في الشكل 1 القيم النمطية ل  $\theta$ .

## الشكل 1

## دوران فاراداي كدالة للمحتوى TEC والتردد



0531-01

وبناء 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 متقلبة كبيرة. ولا يمكن التنبؤ بهذه الانحرافات بشكل مسبق. وقد أرجعت التغيرات الحادة والسريعة لزاوية دوران فاراداي عند إشارات الموجات المترية إلى تلافؤ قوي وسريع على التوالي عند مواقع على مقربة من ذرى الشذوذ المداري.

ويرتبط تمييز الاستقطاب المتقاطع في حالة الهوائيات المتراصفة (XPD (dB) بزاوية دوران فاراداي  $\theta$  عن طريق العلاقة:

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

## 3.3 تأخر الزمرة

يؤدي وجود جزيئات مشحونة في الأيونوسفير إلى ببطء انتشار الإشارات الراديوية على طول المسير ويسمى التأخر بالنسبة لزمن الانتشار في الفضاء الحر الذي يشار إليه عادة بـ  $t$  بتأخر الزمرة. وهو عامل مهم يجب مراعاته في حالة أنظمة الخدمة MSS. ويمكن حساب هذه الكمية كما يلي:

$$(4) \quad t = 1.345 N_T / f^2 \times 10^{-7}$$

حيث:

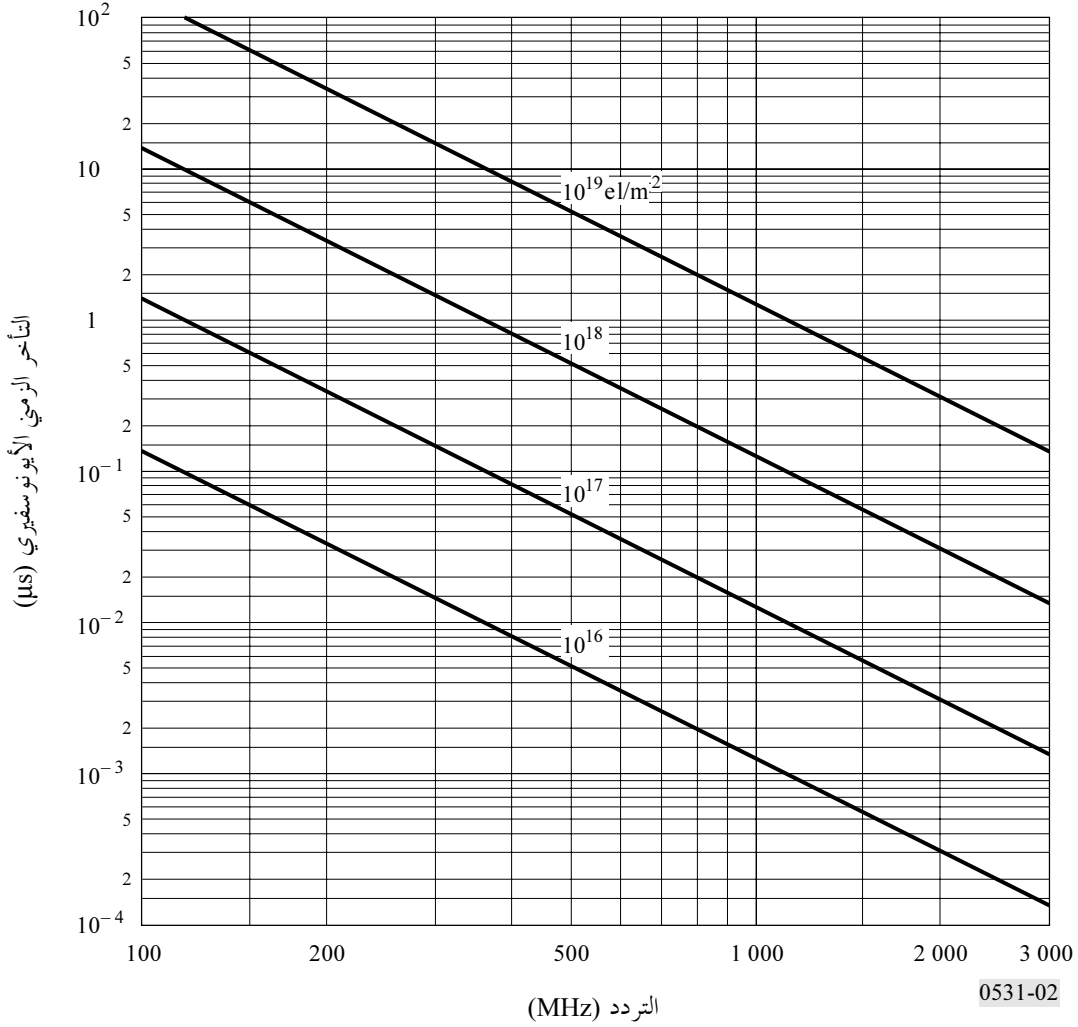
$t$ : التأخر الزمني (s) بالنسبة للانتشار في فراغ (s)

$f$ : 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.

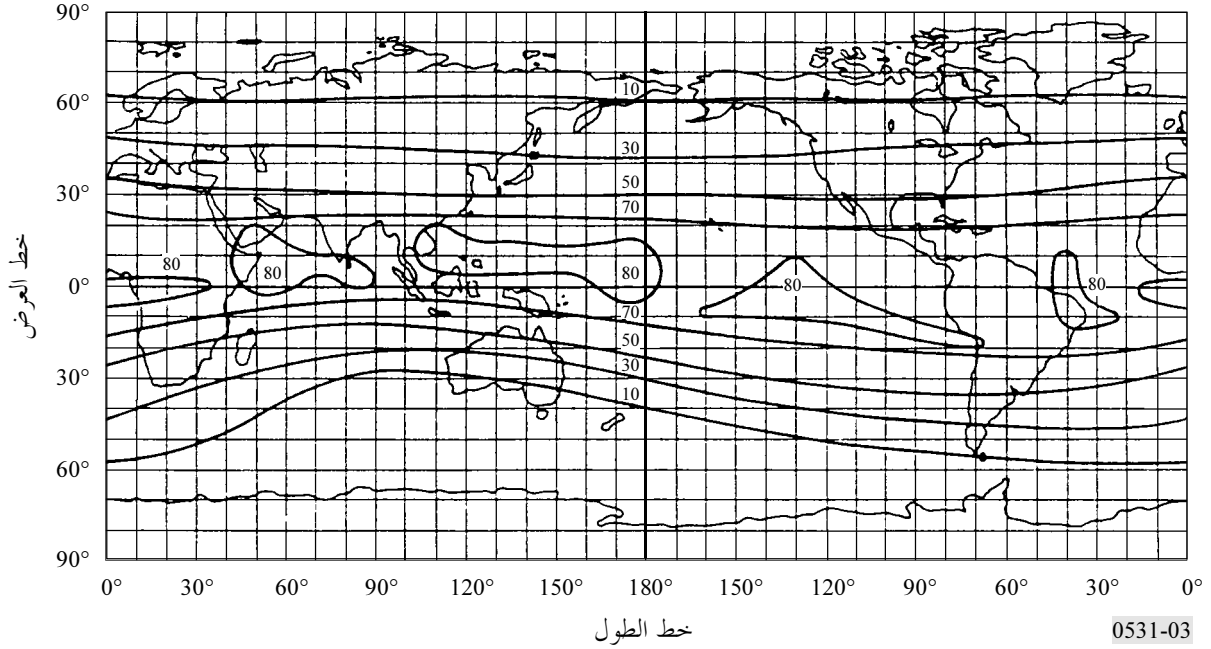
الشكل 2  
التأخر الزمني الأيونوسفيري في مقابل التردد بالنسبة لعدة قيم للمحتوى الإلكتروني



في حالة نطاق للترددات يقترب من 1 600 MHz يتراوح تأخر زمرة الإشارات بين حوالي 0,5 و 500 ns إذا تراوح المحتوى الإلكتروني الإجمالي بين 10<sup>16</sup> و 10<sup>19</sup> el/m<sup>2</sup>. ويبين الشكل 3 النسبة المئوية السنوية من ساعات النهار التي يتجاوز خلالها التأخر الزمني 20 ns في فترة من النشاط الشمسي المرتفع نسبياً.

## 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)



## 3.4 التشتت

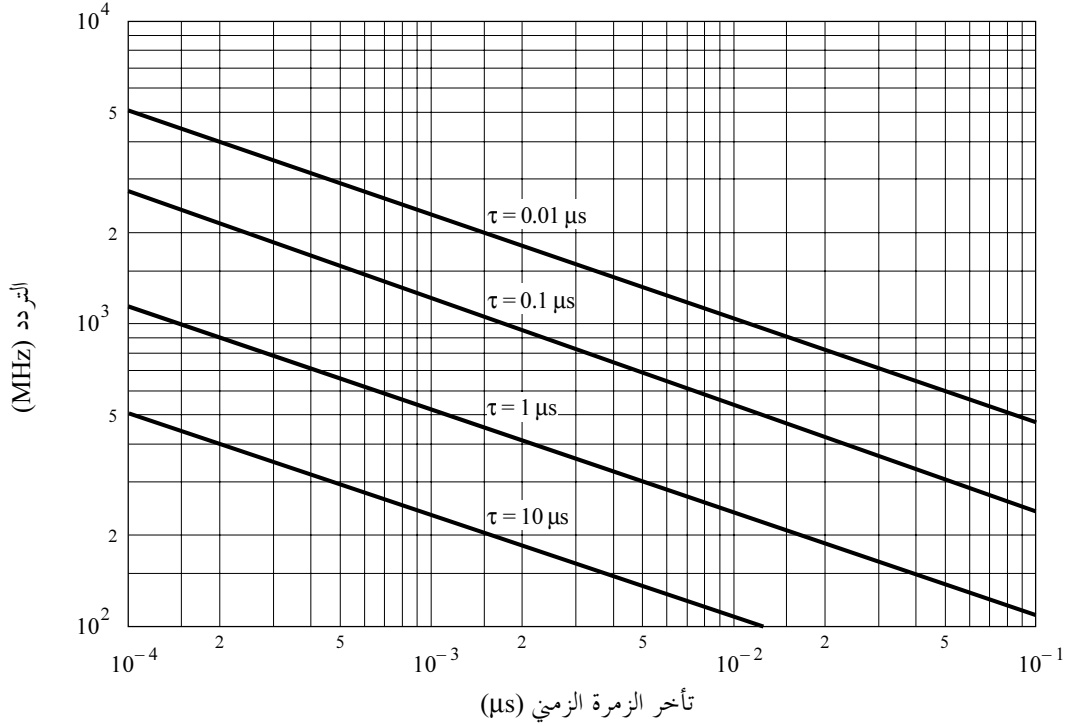
حين تشغل الإشارات العابرة للأيونوسفير نطاقاً عريضاً للترددات فإن تأخر الانتشار (الذي يتوقف على التردد) يؤدي إلى التشتت. وتكون المهلة التفاضلية عبر عرض النطاق متناسبة مع الكثافة الإلكترونية على طول مسير الإشعاع. وفي حالة عرض نطاق ثابت يكون التشتت النسبي متناسباً على نحو عكسي مع تكعيب التردد. ويتعين بالتالي 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  $5 \times 10^{17} \text{ m}^2/\text{el}$ ، فإن إشارة بطول نبضي قدره 1  $\mu\text{s}$  تتعرض لتأخر تفاضلي قدره 0,20  $\mu\text{s}$  عند 200 MHz في حين أن التأخر عند 600 MHz لن يتجاوز 0,00074  $\mu\text{s}$  (انظر الشكل 4).

## 3.5 معدل تغير المحتوى TEC

إن معدل تغير المحتوى الإلكتروني TEC المشاهد في حالة سائل في مداره يرجع في جانب منه إلى تغير اتجاه مسير الشعاع كما يرجع في جانب آخر إلى تغير في الأيونوسفير نفسه. وفي حالة سائل يتحرك على ارتفاع 22 000 km عابراً منطقة الشفق، رصد معدل أقصى للتغير بلغ  $0,7 \times 10^{16} \text{ s}^2/\text{m}^2/\text{el}$ . ولأغراض الملاحظة، يقابل معدل التغير هذا سرعة ظاهرة تبلغ 0,11 s/m.

الشكل 4

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



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

0531-04

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. ويحدث عن طريق آليات الانتثار والانعراج بصفة خاصة أن تتسبب بنى صغيرة غير منتظمة في كثافة التأين في ظواهر التماعية تحل فيها محل الإشارة الثابتة عند المستقبل إشارة بتغير 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 بينما تشير العلامة  $\langle \rangle$  إلى المتوسط.

ويرتبط مؤشر الالتماع  $S_4$  بتقلبات الشدة من ذروة إلى ذروة. وتتوقف العلاقة الدقيقة على توزيع الشدة. ويوصف توزيع الشدة على أفضل وجه بواسطة توزيع Nakagami في حالة مدى واسع من قيم  $S_4$ . 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. ويعود ذلك إلى التركيز الموجي الذي تتسبب فيه حالات الشدوذ. وعندما تقل قيمتها عن 0,6، يلاحظ أن المؤشر  $S_4$  له علاقة  $f^{-\nu}$



متسقة حيث يكون  $\nu$  مؤشراً طيفياً قيمته 1,5 في معظم عمليات الرصد متعدد الترددات في نطاقات الموجات المترية والديكامترية. إلا أن كثيراً من عمليات الرصد الاستوائية في ترددات بالجيغاهرتز تدل على قيم أعلى من 1,5 للمؤشر الطيفي. فإذا زادت قوة الالتماع، بحيث يتجاوز  $S_4$ ، 0,6 انخفض المؤشر الطيفي، وهو ما يرجع إلى إشباع الالتماع لخبو رايلي بسبب التأثير الكبير للانتشار المتعدد.

ومن الناحية التجريبية يقدم الجدول 1 طريقة عملية في التحويل بين قيم  $S_4$  والتقلبات التقريبية من ذروة إلى ذروة ( $P_{fluc}$  dB). ومن الممكن التعبير عن هذه العلاقة على نحو تقريبي كما يلي:

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

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

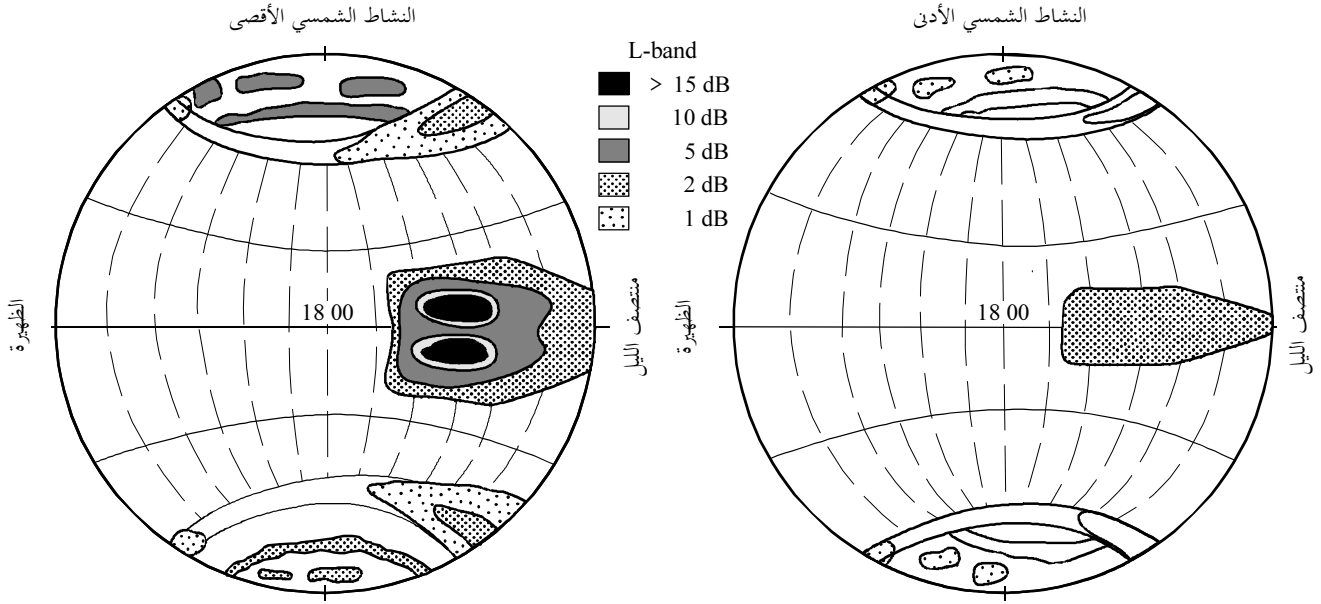
#### 2.4 اعتماد الالتماع على الجغرافيا والاعتدال والشمس

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 5. ولقد تم رصد التماع حاد يصل إلى ترددات بالمليغاهرتز في هذين القطاعين في حين أن الالتماع في خطوط العرض الوسطى يؤثر أساساً على إشارات الموجات المترية. وفي كل القطاعات يوجد نشاط أقصى واضح في ساعات الليل كما هو مبين أيضاً في الشكل 5. وفي حالة الالتماع المداري بالجيغاهرتز رصد نشاط أقصى على مقربة من الاعتدال الربيعي ونشاط مرتفع عند الاعتدال الخريفي.

وفيما يتعلق بالخصائص الزمنية يتراوح معدل خبو الالتماع الأيونوسفيري بين 0,1 و 1 Hz تقريباً. 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.

الشكل 5

عمق الخبو الناتج عن الالتماع (المتناسب مع كثافة التثقيط) في النطاق L خلال سنوات النشاط الشمسي الأقصى والأدنى



0531-05

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 لزحزة الطور والانحرافات الزاوية بسبب الالتماع حسب مواقع الساتل والمحطات الأرضية والتاريخ والتوقيت وتردد التشغيل. ويرتكز النموذج على طريقة الغرلة متعددة الأطوار. وقد حددت للمعلمات الرئيسية الداخلية للنموذج القيم الفرضية التالية:

- منحني طيف الشدة،  $p = 3$
- متوسط حجم حالات الشذوذ  $L_0 = 500 \text{ km}$
- الانحراف النمطي لتقلبات الكثافة الإلكترونية  $\sigma_{N_e} = 0.2$ .

ويراعى انحناء الأشعة، وتحسب خصائص الأيونوسفير البعيد في برنامج فرعي يستخدم النموذج الأيونوسفيري NeQuick. وتتاح شفرة المصدر الخاصة بنموذج الالتماع الأيونوسفيري العالمي مع الوثائق ذات الصلة على الجزء المخصص من موقع قطاع الاتصالات الراديوية على شبكة الويب للجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية.

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:

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

حيث تكون علاقة "المعامل  $m$  Nakagami. مؤشر 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  $\Gamma(m)$  و  $\Gamma(m, mI)$  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  $X$  dB يعبر عنه بواسطة  $P(10^{10/X})$  بينما يعبر عن الكسر الزمني الذي تكون الإشارة خلاله فوق المتوسط بمقدار  $Y$  dB بواسطة  $1 - P(10^{10/Y})$ .

#### 2.4.4 سلوك الطيف

لما كان من المعتقد أن الالتماعات الأيونوسفيرية تحدث بسبب حالات شذوذ مستقرة نسبياً لمؤشر الانكسار وتنتقل أفقياً عبر الموجات الراديوية، فإن أطيف القدرة الفضائية والزمانية تتربط بواسطة سرعة الانسياب. وتعتمد العلاقة الفعلية على تركيب الشذوذ (أطيف القدرة) وعدد من العوامل المادية الأخرى. وكنتيجة لذلك تتضمن أطيف القدرة مدى واسعاً من المنحنيات من  $f^1$  إلى  $f^6$  كما تبين من عمليات رصد مختلفة. ويعرض الشكل 6 سلوكاً نمطياً للطيف ويوصى بالمنحنى  $f^3$  كما يظهر في الشكل في تطبيقات الأنظمة عندما لا تتوافر نتائج القياس المباشر.

#### 5.4 الاعتبارات الهندسية

##### 1.5.4 الاعتماد على زاوية السمات

في معظم النماذج تبدو  $S_4^2$  متناسبة مع قاطع زاوية السمات  $i$  لمسير الانتشار. ومن المعتقد أن العلاقة صالحة طالما كانت الزاوية أقل من  $70^\circ$  تقريباً. 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

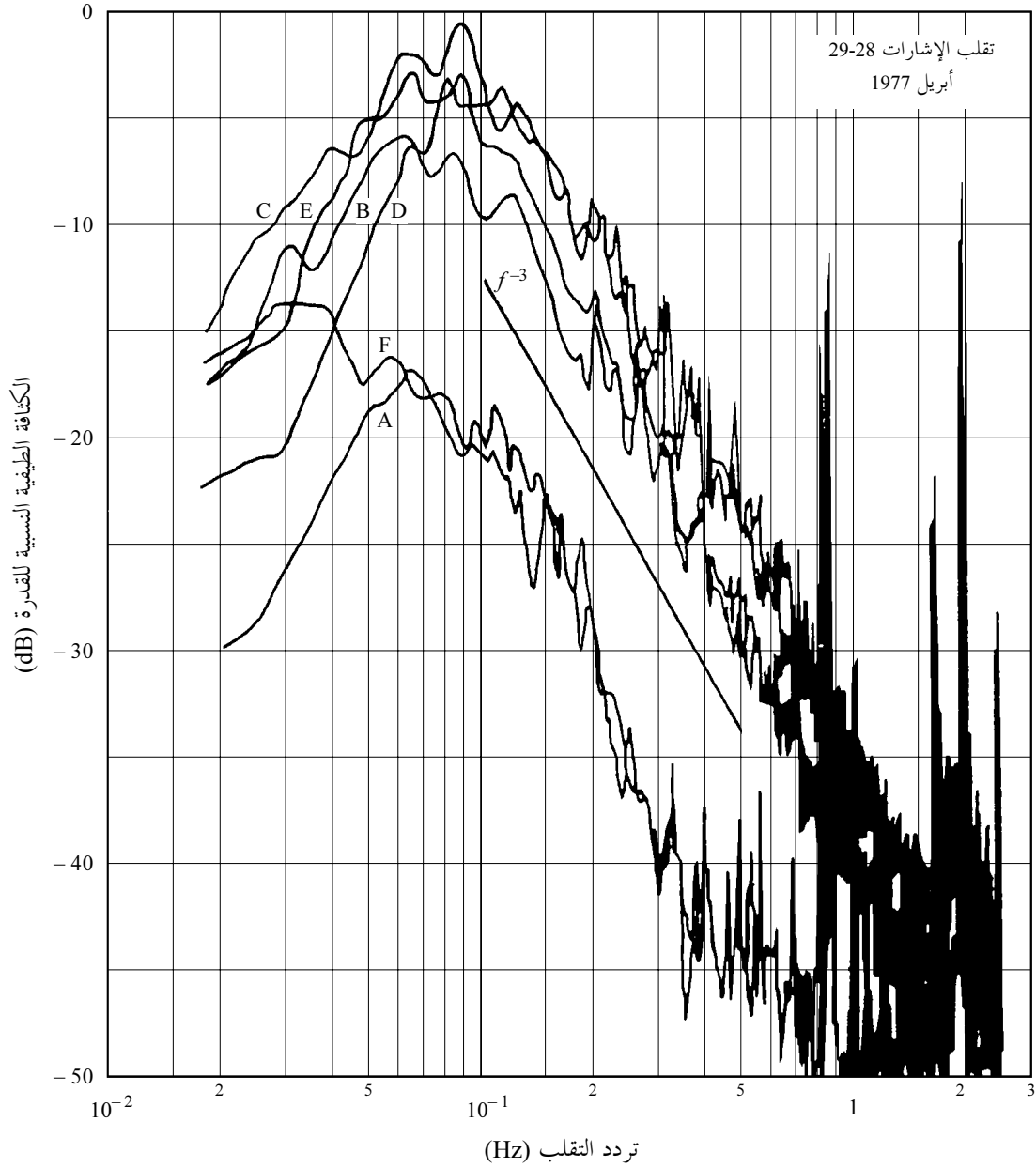
يعتمد احتمال ظهور التماع ومقدار  $S_4$  على خط الطول والفصل توقعاً يمكن معلمته بواسطة الزاوية  $\beta$  المبينة في الشكل 7b وهي الزاوية الواقعة بين منهي غروب الشمس وخط الزوال المغنطيسي المحلي عند أوج خط المجال الذي يمر عبر مسار ارتفاع الشذوذ. وتبين دالة التوزيع في حالة الاعتماد على خط الطول والفصل كما 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 8.

الشكل 6

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



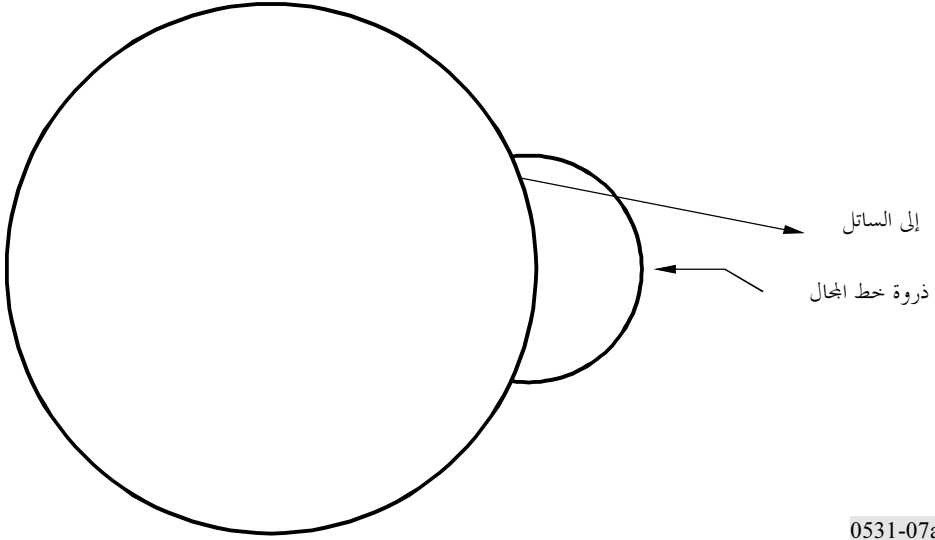
رصدت ظاهرة الالتماع خلال مسائي 28 و 29 أبريل 1977 في محطة الأرض في تايبيه

0531-06

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

الشكل 7a

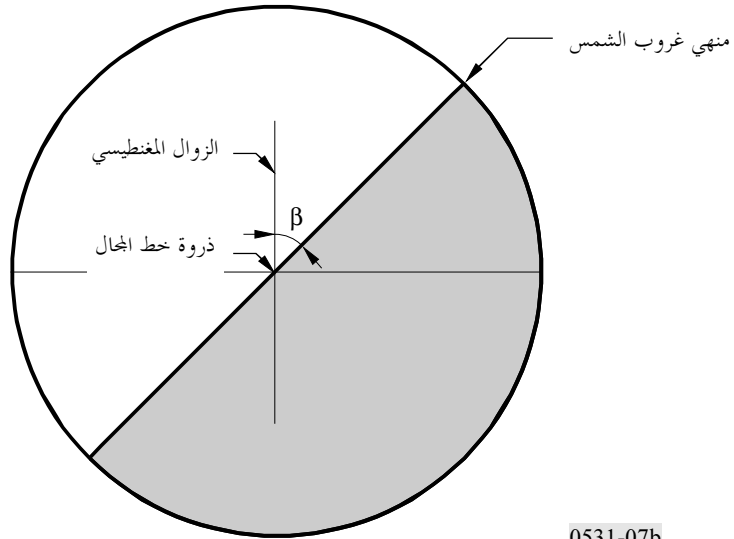
تقاطع مسير الانتشار مع خط من المجال المغنطيسي عند ارتفاع الإقليم F



0531-07a

الشكل 7b

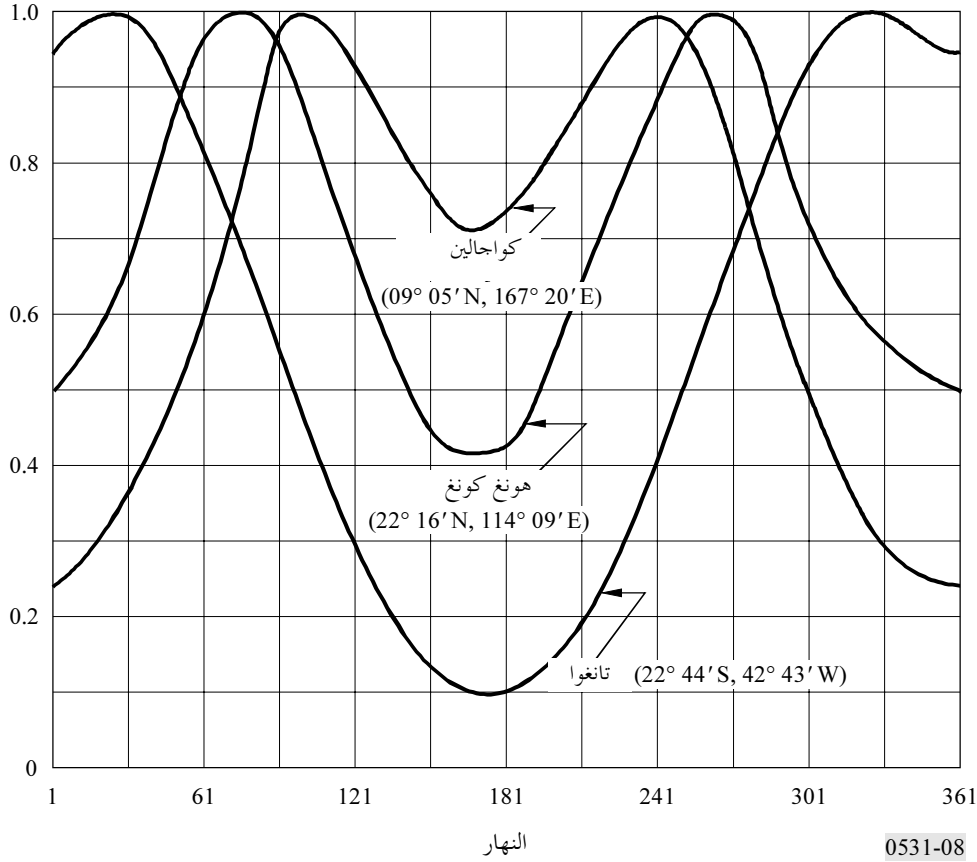
الزاوية بين خط الزوال المغنطيسي المحلي عند ذروة خط المجال المبين في الشكل 7a ومنهني غروب الشمس



0531-07b

الشكل 8

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



6.4 الإحصائيات التراكمية

عند تصميم أنظمة الاتصالات الراديوية الساتلية وتقدير تقاسم الترددات لا يهتم مهندسو الاتصالات بأخطاط 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 9 و 10 لتقدير وتدرج إحصائيات الحدوث. وتمثل أرقام البقع الشمسية المذكورة متوسط عدد البقع الشمسية خلال 12 شهراً.

ومن الممكن استخلاص التوزيع التراكمي طويل الأجل،  $(I)P$ ، لشدة الإشارة بالنسبة لمتوسط قيمتها من الإحصائيات التراكمية طويلة الأجل،  $F(\xi)$ ، للتقلب من الذروة إلى الذروة،  $\xi$ ، وذلك مثل الإحصاءات المبينة في الشكل 10 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  $\xi_n$  و  $\xi_1$  هما القيمتان القصوى والدنيا على التوالي للتقلب من الدورة إلى الدورة، وتكون  $n$  هي رقم الفترة  $\xi$  التي تم استخدامها:

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

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

$$(11f) \quad S_{40} = \left[ \frac{1}{27.5} \cdot \frac{\xi_1}{2} \right]^{1/1.26}$$

$$(11g) \quad S_{4i} = \left[ \frac{1}{27.5} \cdot \frac{\xi_i + \xi_{i+1}}{2} \right]^{1/1.26} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$(11h) \quad S_{4n} = \left[ \frac{1}{27.5} \cdot \frac{\xi_{n-1} + 3\xi_n}{4} \right]^{1/1.26}$$

ويبين الشكل 11 مثلاً للتوزيع التراكمي طويل الأجل لشدة الإشارة والذي يستخلص من المنحنى P6 في الشكل 10.

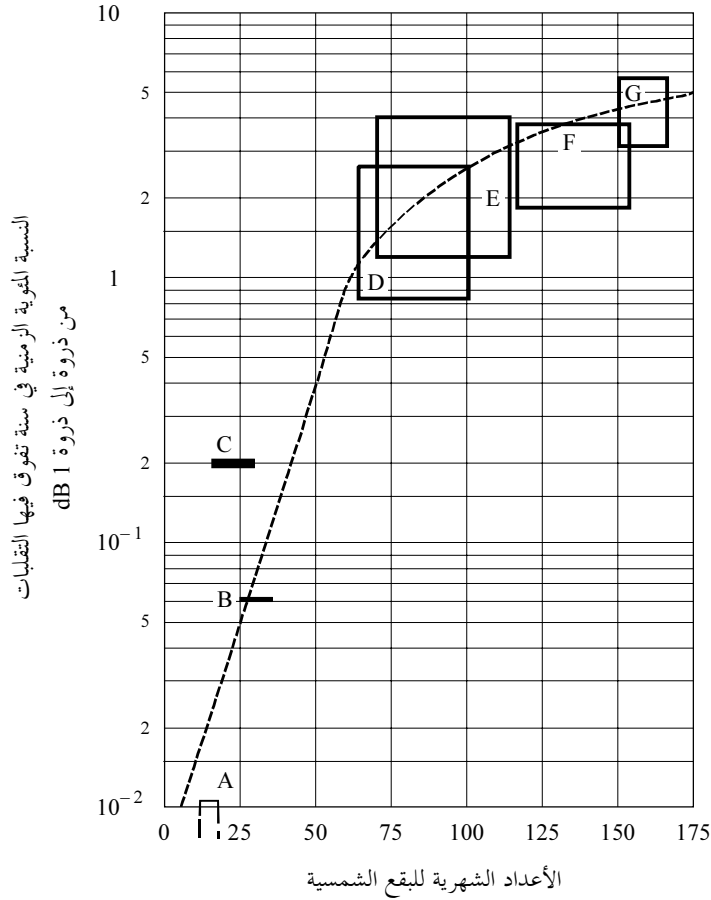
#### 7.4 حدود الالتماع الأيونوسفيري وخبو المطر في آن معاً

يعد الالتماع الأيونوسفيري والخبو الناتج عن المطر عاملي انحطاط يرجعان إلى مصدرين ماديّين 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 0,60% سنوياً كما لوحظ عند 4 GHz في محطة الأرض في جوتيلوهار بإندونيسيا. وهي قيمة عالية بدرجة غير مقبولة بالنسبة للتطبيقات من نوع ISDN.

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، 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.

الشكل 9

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 : 1975-1976، هونغ كونغ والبحرين، 15 موجة حاملة
- B : 1974، لونغويلو، موجة حاملة واحدة
- C : 1976-1977، تايبيه، موجتان حاملتان
- D : 1970-1971، 12 محطة، < 50 موجة حاملة
- E : 1977-1978، هونغ كونغ، 12 موجة حاملة
- F : 1978-1979، هونغ كونغ، 10 موجات حاملة
- G : 1979-1980، 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 10 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 10 يتعلق بتردد قدره 4 GHz، فإن من الممكن الحصول على القيم الخاصة بترددات أخرى عن طريق ضرب هذه القيم في  $(4/f)^{1.5}$  حيث تمثل  $f$  التردد المعني (GHz).

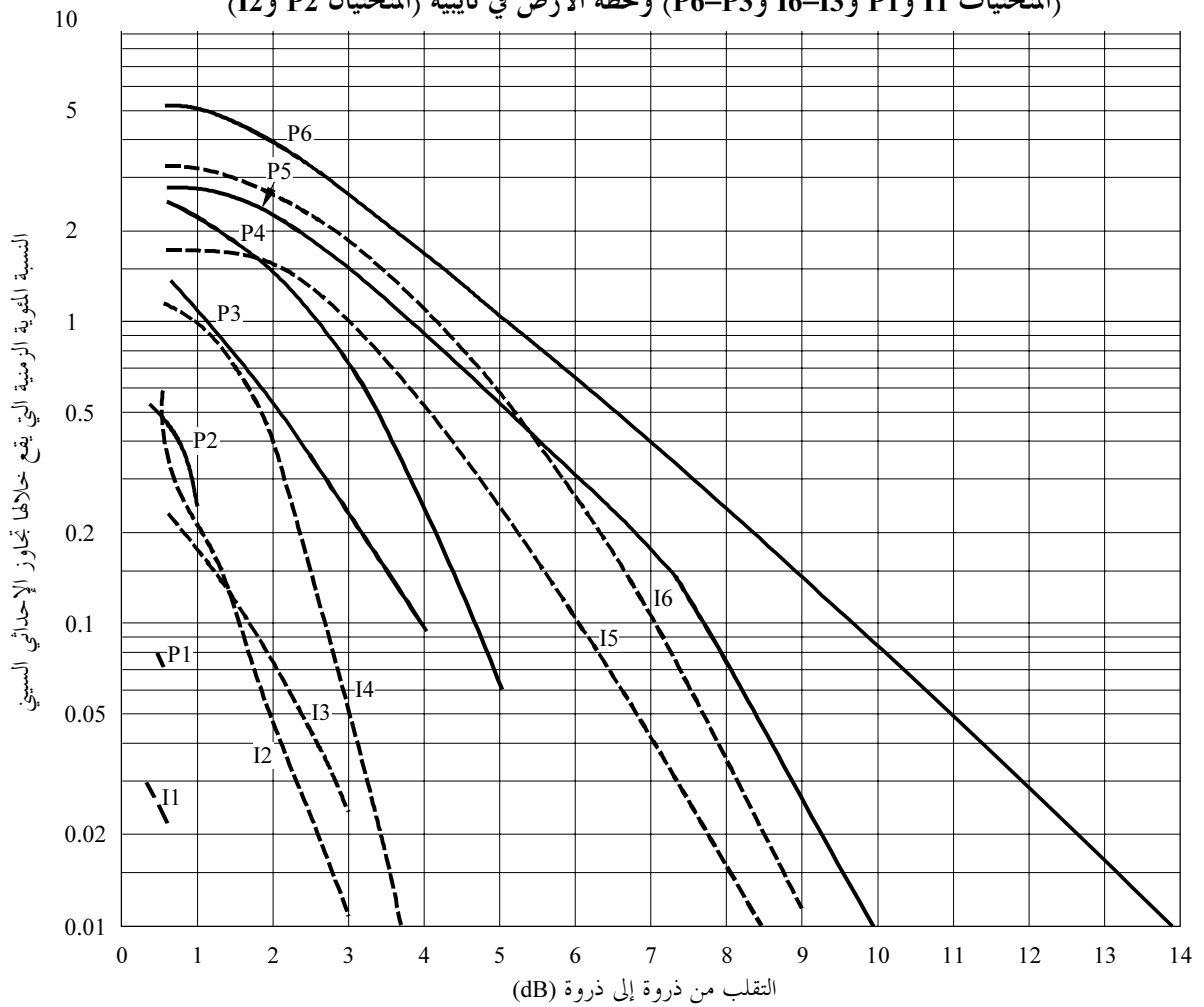
الخطوة 3: يمكن عن طريق الشكل 5 تقدير  $P_{fluc}$  بحسب الموقع الجغرافي والحدوث اليومي تقديراً كفيماً.

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 10

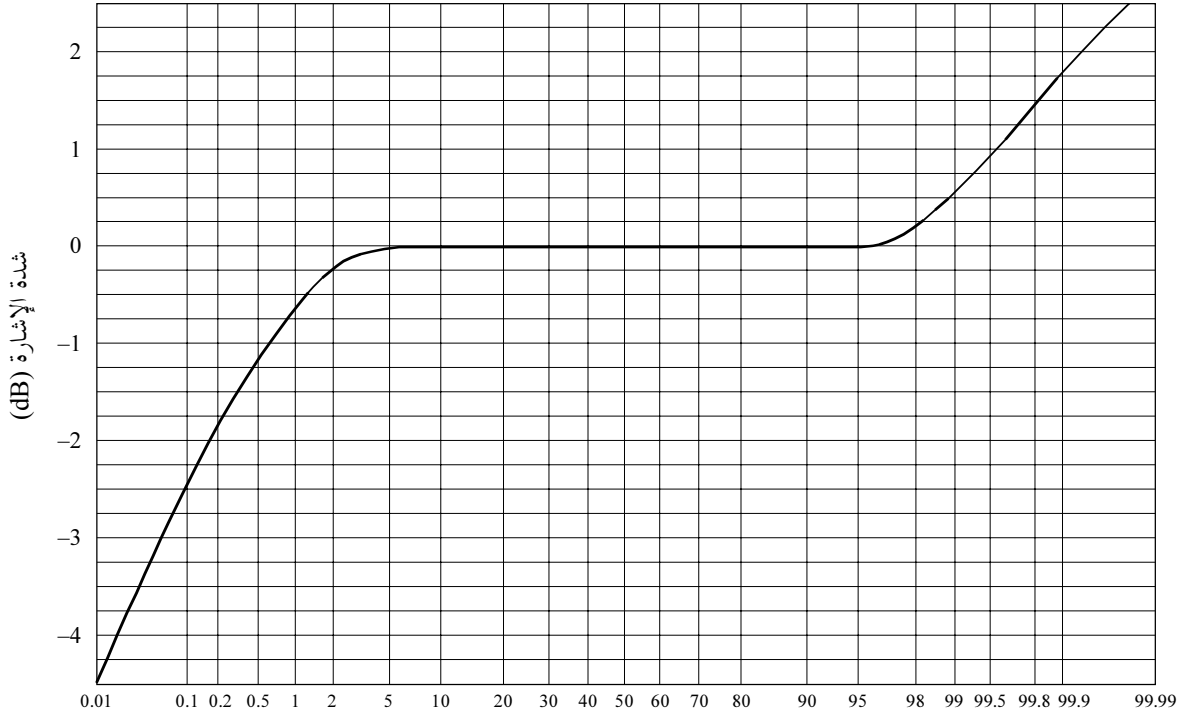
الإحصائيات السنوية للتقلبات من ذروة إلى ذروة المرصودة في محطة الأرض في هونغ كونغ (المنحنيات I1 و P1 و I3-I6 و P3-P6) ومحطة الأرض في تايبيه (المنحنيات P2 و I2)



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

## الشكل 11

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



النسبة المئوية الزمنية التي لا يقع خلالها تجاوز للإحداثي الصادي

0531-11

## 5 الامتصاص

من الممكن عندما لا تتوفر المعلومات المباشرة تقدير الخسارة الناجمة عن الامتصاص الأيونوسفيري بناء على النماذج المتاحة في الوقت الحاضر طبقاً للعلاقة  $f^2(f)(sec\ i)$  في حالة الترددات التي تفوق 30 MHz حيث تكون  $i$  هي الزاوية السمتية لمسير 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 الانفجاعات 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 أنجع 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 المتوية 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

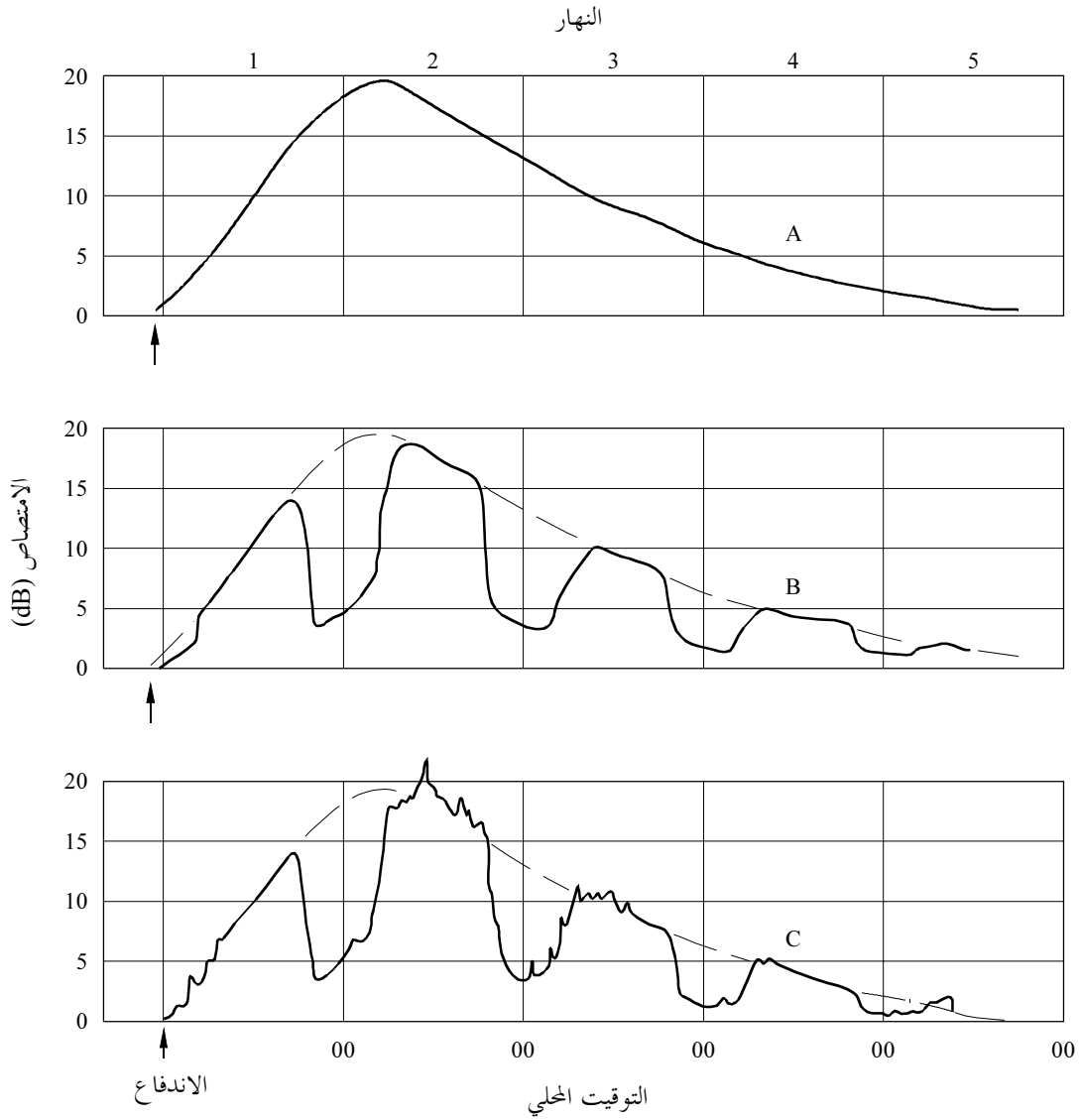
## 2.5 الامتصاص في حالة القلنسوة القطبية

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 وتقترب 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 12 نموذجاً افتراضياً للتغير اليومي للامتصاص عند القلنسوة القطبية عقب اندفاع شمسي كبير، وهو يستند إلى عمليات رصد بمقياس العتامة عند خطوط عرض مختلفة.

الشكل 12

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

0531-12

## ملخص 6

يتضمن الجدول 3 تقديرات للقيم القصوى للآثار الأيونوسفيرية عند تردد قدره 1 GHz. ويفترض أن المحتوى الإلكتروني الرأسي الإجمالي للأيونوسفير هو عمود قدره  $10^{18} \text{ m/el}^2$ . وتفتقر كذلك زاوية ارتفاع تبلغ  $30^\circ$ . 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
$1/f^2$	mrاد 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