التوصية ITU-R P.1623-1

# طريقة التنبؤ بديناميات الخبو على المسيرات أرض–فضاء

(المسألة ITU-R 201/3)

(2005- 2003)

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

*إذ تضع في اعتبارها*

أ ) أن هناك مجموعة من مختلف خدمات الاتصالات الراديوية تتطلب تلبية أهداف التصميم فيها الحصول على المعلومات المتصلة بديناميات أحداث الانقطاع؛

ب) أن تقييم المعلمات المتصلة باحتمال العطب، من أجل توفير خدمة على درجة من الجودة والموثوقية، يستوجب معرفة احتمال حدوث حالات الخبو التي تدوم فترة معينة؛

ج ) أن تقييم المعلمات الداخلية في عروة التحكم في تقنية تخفيف الخبو (FMT) (التي تستعمل لتحسين جودة الخدمة وموثوقيتها)، يستوجب معرفة احتمال حدوث ميل الخبو المقابل لعتبة توهين معينة؛

د ) أن هناك حاجة إلى توفير معلومات هندسية لحساب المعطيات الإحصائية لمدة الخبو والفاصل الزمني بين مدد الخبو وميل الخبو،

*توصي*

**1** بتطبيق الطرائق الموصوفة في الفقرة 2.2 من الملحق 1 لحساب المعطيات الإحصائية لمدة الخبو العائد إلى مجموع تأثيرات الخبو (الغازات والسحب والأمطار) والتلألؤ على المسيرات أرض–فضاء؛

**2** بتطبيق الطرائق الموصوفة في الفقرة 2.3 من الملحق 1 لحساب المعطيات الإحصائية لميل الخبو العائد إلى التوهين على المسيرات أرض–فضاء.

## الملحق 1

### 1 مقدمة

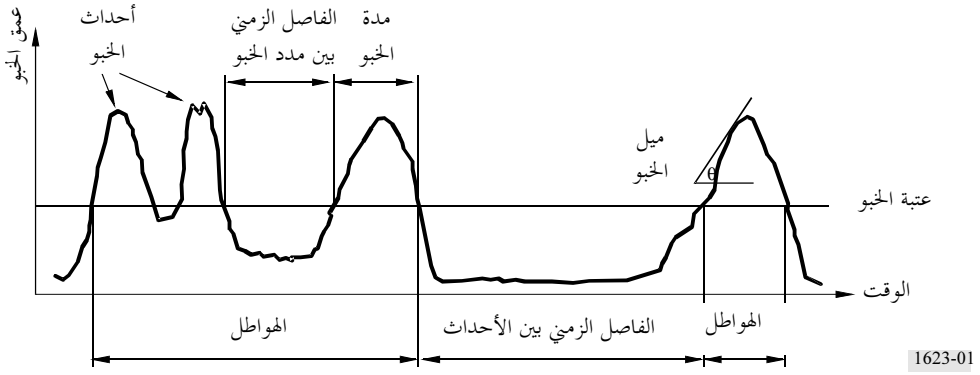
تتسم الخصائص الدينامية للخبو العائد إلى الانتشار الجوي بالأهمية عند تصميم مجموعة من مختلف أنظمة الاتصالات لاستغلال سعة الأنظمة على النحو الأمثل واستيفاء معايير الجودة والموثوقية. ومن أمثلة ذلك الشبكات الثابتة التي تتضمن جزءاً فضائياً والأنظمة التي تطبق تقنيات تخفيف الخبو أو تقاسم الموارد.

ويمكن تحديد عدة مقاييس زمنية ومن المفيد الحصول على معلومات إحصائية عن ميل الخبو ومدته والفاصل الزمني بين مدد الخبو وذلك بالنسبة إلى سوية توهين معينة (انظر الشكل 1).

وتُعرّف مدة الخبو بالفاصل الزمني الذي يتجاوز فيه التوهين عتبة معينة، بينما يُعرّف الفاصل الزمني بين مدد الخبو بالفاصل الزمني الذي يكون فيه التوهين أقل من هذه العتبة ذاتها. ويعرّف ميل الخبو بأنه معدل تغير التوهين بمرور الوقت.

الشكل 1

**الخصائص الدينامية لأحداث الخبو**




ومن العوامل الهامة في سياق معايير التيسر التمييز بين أحداث الخبو التي تقل مدتها أو تزيد عن 10 ثوانٍ. ولا بد أيضاً من معرفة توزيع مدد الخبو بدلالة عمق الخبو ليتسنى تطبيق مفاهيم التنبؤ بالخطر عند توفير خدمات الاتصالات.

إضافة إلى ذلك، يجب توفر المعلومات اللازمة عن ميل الخبو المتوقع لتقييم معدل التتبع الأدنى المطلوب لنظام تخفيف الخبو.

## 2 مدة الخبو والفواصل الزمنية بين مدد الخبو

### 1.2 متطلبات معلومات مدة الخبو

مدة الخبو معلمة هامة يجب مراعاتها عند تصميم نظام ما وذلك لأسباب عدة:

- انقطاع النظام وعدم تيسره: تعطي الإحصاءات المتعلقة بمدة الخبو بعض المعلومات عن عدد أحداث الانقطاع ومدته وعن عدم تيسر النظام بسبب الانتشار على وصلة معينة وخدمة معينة؛
- تقاسم موارد النظام: من الضروري أن يكون لدى المشغل فكرة عامة عن المدة الإحصائية لحدث معين لكي يتسنى له تخصيص الموارد لمستعملين آخرين؛
- تقنية تخفيف الخبو: مدة الخبو هامة لتحديد المدة الإحصائية لاستبقاء نظام معين في أسلوب التعويض قبل أن يعود إلى الأسلوب الاسمي؛
- تشفير النظام وتشكيله: مدة الخبو معلمة أساسية في اختيار شفرات تصحيح الأخطاء الأمامي وأفضل نظام للتشكيل. وفي حالة نظام للاتصالات الساتلية لا ينتج عن قناة الانتشار أخطاء مستقلة بل مجموعات من الأخطاء. وتؤثر مدة الخبو تأثيراً مباشراً في اختيار نظام التشفير (حجم كلمة الشفرة للشفرات الكاملة وتشذير الشفرات السلسالية إلخ.).

### 2.2 طريقة التنبؤ بمدة الخبو

يمكن وصف مدة الخبو بواسطة دالّتين من دالاّت التوزيع التراكمي:

1 $P(d > D|a > A)$: احتمال حدوث خبو تكون مدته $d$ أطول من $D$ (s)، مع توهين $a$ أعلى من $A$ (dB). ويمكن تقدير هذا الاحتمال باستعمال نسبة عدد أحداث الخبو الذي تكون مدته أطول من $D$ إلى العدد الكلي لأحداث الخبو الملحوظ والذي يتجاوز توهينه العتبة $A$.

2 $F(d > D|a > A)$: الاحتمال التراكمي للتجاوز أو ما يعادل الكسر الكلي (بين 0 و1) لوقت الخبو العائد إلى مدد الخبو $d$ التي تكون أطول من $D$ (s)، عندما يكون التوهين $a$ أعلى من $A$ (dB). ويمكن تقدير هذا الاحتمال باستعمال نسبة وقت الخبو الكلي بسبب مدد الخبو التي تكون أطول من $D$ عندما يتم تجاوز العتبة $A$ ، إلى وقت التجاوز الكلي الذي يتم فيه تجاوز العتبة.

وبالنسبة إلى فترة مرجعية معينة، يقدر عدد أحداث الخبو الذي تكون مدته أطول من $D$ بضرب احتمال الحدوث $P(d > D|a > A)$ بالعدد الكلي لأحداث الخبو الذي يتجاوز العتبة $N_{tot}(A)$. وعلى غرار ذلك، تقدر المدة الإجمالية للتجاوز الناتج عن الخبو الذي تكون مدته أطول من $D$ بضرب الفترة الزمنية $F(d > D|a > A)$ بالفترة الزمنية الكلية التي يتم فيها تجاوز العتبة، $T_{tot}(A)$.

يشمل النموذج المكوّن من مركّبتين والمذكور هنا دالة توزيع لوغاريتمي عادي للخبو طويل المدة ودالة توزيع تشبه القانون الأسي للخبو قصير المدة. وتقدّر القيمة الحدية بين هذين النوعين من الخبو بمدة العتبة $D_t$ المحسوبة في هذا النموذج. وينطبق نموذج التوزيع بالقانون الأسي على مدد الخبو التي تفوق ثانية واحدة. أما أحداث الخبو التي تكون مدته أقصر، فلا تساهم في الوقت الكلي للانقطاع بشكل ملحوظ.

وفيما يلي تقدير للمعلمات اللازمة للنموذج وتعريف للنموذج المكوّن من مركّبتين فيما يتعلق بدالتي التوزيع، أي احتمال الحدوث $P$ واحتمال التجاوز (أو الفترة الزمنية) $F$.

ينطبق هذا النموذج أساساً على مدد الخبو التي تفوق ثانية واحدة.

المعلمات التالية مطلوبة بمثابة دخل في النموذج:

$f$: التردد (GHz): 10-50 GHz

$\varphi$: زاوية الارتفاع (بالدرجات): 5°-60°

$A$: عتبة التوهين (dB).

ويتم الحساب التدرجي لتوزيع مدد الخبو كالآتي:

*الخطوة 1*: حساب متوسط المدة $D_0$ للتوزيع اللوغاريتمي العادي للفترة الزمنية للخبو العائد إلى الخبو طويل المدة عندما يكون التوهين أعلى من $A$، بالصيغة التالية:

$$D_0 = 80\,\varphi^{-0.4}\,f^{1.4}\,A^{-0.39} \quad \text{s} \tag{1}$$

*الخطوة 2*: حساب الانحراف المعياري $\sigma$ للتوزيع اللوغاريتمي العادي للفترة الزمنية للخبو العائد إلى الخبو طويل المدة بالصيغة التالية:

$$\sigma = 1.85\,f^{-0.05}\,A^{-0.027} \tag{2}$$

*الخطوة 3*: حساب الأس $\gamma$ للتوزيع بالقانون الأسي للفترة الزمنية للخبو العائد إلى الخبو قصير المدة بالصيغة التالية:

$$\gamma = 0.055\, f^{0.65}\, A^{-0.003} \tag{3}$$

*الخطوة 4*: حساب القيمة الحدية $D_t$ بين الخبو قصير المدة والخبو طويل المدة بالصيغة التالية:

$$D_t = D_0\, \mathrm{e}^{p_1\sigma^2 + p_2\sigma - 0.39} \quad \text{s} \tag{4}$$

حيث:

$$p_1 = 0.885\gamma - 0.814 \tag{5}$$

$$p_2 = -1.05\gamma^2 + 2.23\gamma - 1.61 \tag{6}$$

*الخطوة 5*: حساب متوسط المدة $D_2$ للتوزيع اللوغاريتمي العادي لاحتمال حدوث الخبو طويل المدة بالصيغة التالية:

$$D_2 = D_0 \cdot \mathrm{e}^{-\sigma^2} \quad \text{s} \tag{7}$$

*الخطوة 6*: حساب الفترة الزمنية $k$ الناتجة عن الخبو الذي تقل مدته عن $D_t$ بالصيغة التالية:

$$k = \left[ 1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2}\,(1-\gamma)\, Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t \gamma\, Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1} \tag{8}$$

حيث:

Q: دالة التوزيع التراكمي المعياري لمتغير بتوزيع عادي:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}x^2}\, \mathrm{d}x \tag{9}$$

*الخطوة 7*: حساب احتمال حدوث خبو مدته $d$ أطول من $D$ مع خبو $a$ أعلى من $A$ بالصيغة التالية:

$$P(d > D | a > A) = D^{-\gamma} \qquad \text{من أجل } 1 \le D \le D_t \tag{10}$$

$$P(d > D | a > A) = D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\dfrac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}{Q\left(\dfrac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \qquad \text{من أجل } D > D_t \tag{11}$$

*الخطوة 8*: حساب الاحتمال التراكمي للتجاوز، أي الفترة الزمنية الكلية للخبو العائد إلى الخبو الذي تكون مدته $d$ أطول من $D$ بالصيغة التالية:

$$F(d > D | a > A) = \left[ 1 - k \left( \frac{D}{D_t} \right)^{1-\gamma} \right] \qquad \text{من أجل } 1 \le D \le D_t \tag{12}$$

$$F(d > D | a > A) = (1 - k) \cdot \frac{Q\left( \frac{\ln(D) - \ln(D_0)}{\sigma} \right)}{Q\left( \frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma} \right)} \qquad \text{من أجل } D > D_t \tag{13}$$

*الخطوة 9*: يمكن عند اللزوم، حساب العدد الكلي للخبو الذي تكون مدته $d$ أطول من $D$ فيما يتعلق بعتبة $A$ معينة بالصيغة التالية:

$$N(D, A) = P(d > D | a > A) \times N_{tot}(A) \tag{14}$$

وكذلك يحسب الوقت الكلي للخبو العائد إلى الخبو الذي تكون مدته $d$ أطول من $D$ فيما يتعلق بعتبة $A$ معينة بالصيغة التالية:

$$T(d > D | a > A) = F(d > D | a > A) \times T_{tot}(A) \quad \text{s} \tag{15}$$

بالنسبة إلى الفترة المرجعية المعنية، حيث $T_{tot}(A)$ مجموع الفترة الزمنية التي يتم فيها تجاوز العتبة $A$ و$N_{tot}(A)$ العدد الكلي لأحداث الخبو حيث يتم تجاوز المدة الدنيا وقدرها ثانية واحدة. ويمكن الحصول على هذه المعلمات على النحو التالي:

ينبغي الحصول على $T_{tot}(A)$ من المعطيات المحلية. وإذا لم توفر معطيات إحصائية لفترة طويلة، يمكن إجراء تقييم استناداً إلى التوصية ITU-R P.618. وفي هذه الحالة، يتمثل الإجراء في حساب دالة التوزيع التراكمي للتوهين الكلي واستخلاص النسبة المئوية للوقت الذي تم فيه تجاوز عتبة التوهين $A$ المعنية، ثم المدة الكلية للتجاوز ذات الصلة فيما يتعلق بالفترة المرجعية المعنية.

وبعد الحصول على القيمة $T_{tot}(A)$، يتم حساب $N_{tot}(A)$ على النحو التالي:

$$N_{tot}(A) = T_{tot}(A) \cdot \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{1 - \gamma}{D_t^{1-\gamma}} \tag{16}$$

وقد تم اختبار هذه الطريقة استناداً إلى مصرف المعطيات بشأن مدد الخبو للجنة الدراسات 3 التابعة لقطاع الاتصالات الراديوية وذلك فيما يتعلق بترددات تتراوح بين 11 و50 GHz وزوايا ارتفاع تتراوح بين 6° و60°. وقد تم الحصول على متوسط حسابي للخطأ اللوغاريتمي (نسبة مدة الخبو المتوقع إلى مدة الخبو المقيس من أجل سوية الاحتمال ذاتها) قدره 30% فيما يتعلق بمدد الخبو التي تقل عن 10 ثوان ومتوسط يتراوح بين -25% و-80% فيما يتعلق بمدد الخبو التي تزيد عن 10 ثوان. وفيما يتعلق بالانحراف المعياري، يلاحظ أنه يتراوح بين 80% و150% الأمر الذي يوضح قابلية التغير الطبيعي الشديد لهذه المعلمة.

### 3.2 الفواصل الزمنية بين مدد الخبو

إلى جانب المعطيات الإحصائية المتعلقة بمدة الخبو، من المفيد أيضاً تحديد خصائص الفاصل الزمني بين حالتي خبو متتاليتين والمعروف بالفاصل بين مدد الخبو. وعندما تصبح سوية الإشارة المستقبَلة أدنى من العتبة الهامشية عقب الانقطاع، من الضروري أن يدرك المشغل، من الناحية الإحصائية، متى سيحدث انقطاع آخر.

تبين النتائج التجريبية أن الفواصل بين أحداث الخبو يمكنها أن تتبع التوزيع اللوغاريتمي العادي. إلا أن الفواصل بين أحداث الخبو قصيرة المدة الناتجة عن التلألؤ التروبوسفيري قد تتبع القانون الأسي شأنها في ذلك شأن أحداث الخبو قصير المدة.

## 3 ميل الخبو

### 1.3 المعلومات التي يجب الحصول عليها بشأن ميل الخبو

من الضروري التمكن من تكمية ميل الخبو فيما يتعلق بأنظمة الاتصالات الساتلية التي يحتمل أن تستعمل تقنيات تخفيف الخبو. ومن المفيد معرفة ميل الخبو للإشارة المستقبَلة من أجل تصميم عروة تحكم قادرة على تتبع تغيرات هذه الإشارة، أو التنبؤ بصورة أفضل بظروف الانتشار على المدى القصير. وفي كلتا الحالتين، فإن المعلومة ذات الصلة هي ميل المكونة بتغير بطيء للإشارة مما يقتضي ترشيح التلألؤ والتغيرات السريعة للتوهين بالمطر.

### 2.3 طريقة التنبؤ بميل الخبو

يعتمد توزيع احتمال ميل الخبو على المعلمات المناخية، وتوزيع حجم قطرات المطر، وبالتالي على نوعية المطر. وسرعة الرياح الأفقية المتعامدة مع المسير معلمة مناخية هامة أخرى تحدد السرعة التي يمر بها المظهر الجانبي الأفقي للمطر عبر مسير الانتشار. ومن المتوقع أيضاً أن ينخفض ميل الخبو عند سوية توهين معينة بارتفاع طول المسير، ويعزى ذلك إلى تأثير التمليس لدى جمع إسهامات المطر المختلفة، وبالتالي يزداد الميل كلما ازدادت زاوية الارتفاع على مسير أرض–فضاء.

وعلاوة على ذلك، تؤثر المعلمات الدينامية (أو الثوابت الزمنية) لنظام الاستقبال في ميل الخبو المقيس. وفي حالة زيادة وقت التكامل لمستقبل ما، تنخفض التغيرات الآنية للخبو وتنتشر عبر مدة أطول.

ويعتمد التوزيع المتوقع لميل الخبو على سوية التوهين $A(t)$ وعلى طول الفاصل الزمني $\Delta t$. ويعتمد أيضاً على تردد القطع عند 3 dB لمرشاح التمرير المنخفض الذي يستخدم لإزالة التلألؤ التروبوسفيري والتغيرات السريعة للتوهين بالمطر من الإشارة. وتبين النتائج التجريبية أن تردد القطع عند 3 dB البالغ 0,02 Hz يسمح بترشيح التلألؤ والتغيرات السريعة للتوهين بالمطر بصورة صحيحة. وفي حالة عدم ترشيح التلألؤ والتغيرات السريعة للتوهين بالمطر، تُظهر الإشارة ذبذبات قوية ولن يتمكن النموذج من التنبؤ إلا بالذبذبات الناتجة عن التوهين بالمطر. وفي هذه الحالة يكون تردد القطع المطلوب عند الدخل هو تردد الاعتيان.

في النموذج، يُعرّف ميل الخبو $\zeta$ عند نقطة معينة من الزمن من خلال المعطيات المرشحة بواسطة الصيغة التالية:

$$\zeta(t) = \frac{A\left(t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - A\left(t - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{\Delta t} \quad \text{dB/s} \tag{17}$$

يصلح النموذج لمديات المعلمات التالية:

- ترددات تتراوح بين 10 و30 GHz
- زوايا ارتفاع تتراوح بين 10° و50°.

المعلمات التالية مطلوبة بمثابة دخل في النموذج:

$A$: سوية التوهين (dB): 0-20 dB

$f_B$: تردد القطع عند 3 dB لمرشاح التمرير المنخفض (Hz): 0,001-1 Hz

$\Delta t$: طول الفاصل الزمني الذي يحسب خلاله ميل الخبو (s): 2-200 s

يتم الحساب التدريجي لتوزيع ميل الخبو على النحو التالي:

*الخطوة 1*: حساب الدالة $F$ التي تمثل الاعتماد على طول الفاصل الزمني $\Delta t$ وعلى تردد القطع $f_B$ عند 3 dB لمرشاح التمرير المنخفض:

$$F(f_B,\Delta t)=\sqrt{\frac{2\pi^2}{\left(1/f_B^b+(2\Delta t)^b\right)^{1/b}}} \tag{18}$$

حيث $b$ = 2,3.

*الخطوة 2*: حساب الانحراف المعياري $\sigma_\zeta$ لميل الخبو المشروط عند سوية توهين معينة:

$$\sigma_\zeta = s\,F(f_B,\Delta t)A \qquad \text{dB/s} \tag{19}$$

حيث $s$ معلمة تعتمد على المناخ وزاوية الارتفاع؛ وتكون $s$ = 0,01 قيمة متوسطة شاملة تطبق في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية عند زوايا ارتفاع تتراوح بين 10° و50°.

*الخطوة 3أ*: حساب الاحتمال المشروط (دالة كثافة الاحتمال) عندما يساوي ميل الخبو $\zeta$ من أجل قيمة توهين معينة $A$:

$$p(\zeta\,|\,A)=\frac{2}{\pi\sigma_\zeta\,(1+(\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2} \tag{20}$$

*الخطوة 3 ب*: عند اللزوم، حساب الاحتمال المشروط (دالة التوزيع التراكمي التكميلي) عندما يتجاوز ميل الخبو $\zeta$ من أجل قيمة توهين معينة $A$:

$$P(\zeta\,|\,A)=\frac{1}{2}-\frac{(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi(1+(\zeta/\sigma_\zeta)^2)}-\frac{\arctan(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi} \tag{21}$$

أو حساب $P(|\zeta|\,|A)$، الاحتمال المشروط عندما تتجاوز القيمة المطلقة لميل الخبو $\zeta$ من أجل قيمة توهين معينة $A$:

$$P(|\zeta|\,|A)=\int_{-\infty}^{-\zeta}p(x|A)\,dx+\int_{\zeta}^{\infty}p(x|A)\,dx=1-\frac{2(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi\left(1+(|\zeta|/\sigma_\zeta)^2\right)}-\frac{2\arctan(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi} \tag{22}$$

وقد تم اختبار النموذج الوارد في المعادلة (22) باستعمال المعطيات المتراوحة بين 12,5 GHz و50 GHz . وقد أظهرت النتائج توافقاً جيداً مع شكل دالة التوزيع التراكمي لميل الخبو وكذلك مع تغيرات هذا التوزيع بتغير عتبة التوهين $A$ والفاصل الزمني $\Delta t$ و تردد القطع $f_B$ عند 3 dB لمرشاح التمرير المنخفض.