

التوصية ITU-R P.682-2

معطيات الانتشار المطلوبة لتصميم أنظمة الاتصالات المتنقلة للطيران أرض-فضاء

(المسألة ITU-R 207/3)

(1990-1992-2007)

مجال التطبيق

تشرح هذه التوصية آثار الانتشار ذات الأهمية الخاصة للأنظمة المتنقلة الساتلية للطيران. وتعرف التوصية انخطاطات الانتشار الأيونوسفيرية والتروبوسفيرية وتمت الإشارة إلى توصيات قطاع الاتصالات الراديوية التي تقدم توجيهات بشأن هذه الآثار. كما ترد نماذج للتنبؤ بآثار الانتشار التي تنجم عن تعدد مسير الإشارة والانتشار من سطح الأرض.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- أ) أنه للتخطيط المناسب للأنظمة المتنقلة للطيران أرض-فضاء من الضروري توفر معطيات انتشار وطرائق تنبؤ مناسبة؛
 - ب) أن طرائق التوصية ITU-R P.618 يوصى بها لتخطيط أنظمة الاتصالات أرض-فضاء؛
 - ج) أن هناك حاجة إلى تطوير المزيد من طرائق التنبؤ لتطبيقات خاصة بالأنظمة الساتلية المتنقلة للطيران لإعطاء دقة ملائمة لكل ظروف التشغيل؛
 - د) أن هناك مع ذلك طرائق تضمن دقة كافية لكثير من التطبيقات،
- توصي

1 باعتبار الطرائق الواردة في الملحق 1 للاستعمال الحالي في تخطيط أنظمة الاتصالات المتنقلة للطيران أرض-فضاء، إضافة إلى الطرائق الموصى بها في التوصية ITU-R P.618.

الملحق 1

1 المقدمة

تختلف آثار الانتشار في الخدمة المتنقلة للطيران الساتلية عن تلك الموجودة في الخدمة الثابتة الساتلية والخدمات المتنقلة الساتلية الأخرى لأن:

- هوائيات صغيرة تُستعمل على متن الطائرات، وجسم الطائرة يمكن أن يؤثر في أدائها؛
- السرعة المرتفعة للطائرات تسبب تمديدات دوبلرية واسعة؛
- مطاريف الطائرات يجب أن تأوي مدى دينامياً واسعاً في الإرسال والاستقبال؛
- اعتبارات سلامة الطائرات تتطلب تكاملية عالية للاتصالات، مما يجعل حتى انخطاطات الانتشار قصيرة المدى مهمة جداً، ويجب الحفاظ على اعتمادية الاتصالات على الرغم من الانعراجات المائلة والعمليات ثلاثية الأبعاد.

يناقش هذا الملحق المعطيات والنماذج المطلوبة على وجه التحديد لتمييز انعطافات المسير، أي:

- الآثار التروبوسفيرية، بما فيها التوهين الغازي، والتوهين بالسحب والمطر، والتوهين بالضباب، والانكسار والتألول؛
- الآثار الأيونوسفيرية مثل التألول؛
- آثار الانعكاس السطحي (مسيرات متعددة)؛
- الآثار البيئية (حركة الطائرة وحالة البحر ونمط سطح الأرض).

يمكن أن تُشغل الأنظمة الساتلية المتنقلة للطيران على نطاق عالمي، بما في ذلك مسيرات الانتشار عند زوايا منخفضة الارتفاع. لقد تم إجراء عدة قياسات لمعلومات الانتشار عبر مسيرات متعددة فوق البر والبحر. في بعض الحالات، تُستعمل المحاكاة المخبرية لمقارنة المعطيات المقيسة والتحقق من المعلومات النموذجية. وتُدرس الإشارة المستقبلية من حيث مكوناتها المحتملة: موجة مباشرة تخضع للآثار الجوية، وموجة منعكسة، عموماً تحتوي أساساً على مكونة متناثرة.

هناك حالياً اهتمام باستعمال الترددات القريبة من 1,5 GHz للأنظمة الساتلية المتنقلة للطيران. بما أن معظم التجارب أُجريت في هذا النطاق، فإن المعطيات في هذه التوصية تنطبق أساساً على هذه الترددات. ومع نضج أنظمة الطيران، يُتوقع أن يتم استعمال ترددات أخرى.

2 الآثار التروبوسفيرية

يمثل ارتفاع الهوائي معلمة مهمة فيما يخص الخدمات الطيرانية. يمكن تقدير التوهين التروبوسفيري بواسطة الطرائق الواردة في التوصية ITU-R P.618.

يمكن أن تتأثر الإشارة المستقبلية بالانكسار واسع المدى والتألولات الناتجة عن الاضطراب الجوي على حد سواء. وتنخفض هذه الآثار بالنسبة للطائرات عند ارتفاعات عالية.

3 الآثار الأيونوسفيرية

تُناقش الآثار الأيونوسفيرية على المسيرات الماثلة في التوصية ITU-R P.531. تكون هذه الظواهر مهمة لعدة مسيرات عند الترددات تحت حوالي 10 GHz، خاصة في حدود $\pm 15^\circ$ من خط الاستواء المغنطيسي الأرضي، ونسبة أقل في حدود المناطق الشفقية والقلنسوات القطبية. وتبلغ الآثار الأيونوسفيرية ذروتها بالقرب من السوية القصوى للكلف الشمسي.

لن تنخفض الانعطافات الناتجة عن الأيونوسفير بالنسبة للارتفاعات النمطية المستعملة بواسطة الطائرات. تتضمن التوصية ITU-R P.680 وصفاً موجزاً للآثار الأيونوسفيرية ذات الأهمية الخاصة للأنظمة الساتلية المتنقلة. بالنسبة لمعظم إشارات الاتصالات، من المحتمل أن يكون التألول الأيونوسفيري هو أشد انعطاف. ويقدم الجدول 1 من التوصية ITU-R P.680 تقديرات لأقصى آثار أيونوسفيرية متوقعة عند ترددات تصل حتى 10 GHz لمسيرات عند زاوية ارتفاع 30° .

4 الخبو الناتج عن الانعكاس السطحي والانتشار

1.4 اعتبارات عامة

يختلف الخبو عبر مسيرات متعددة الناتج عن الانعكاسات السطحية للأنظمة الساتلية المتنقلة للطيران عن الخبو للأنظمة الساتلية المتنقلة الأخرى لأن سرعات وارتفاعات الطائرات أكبر بكثير من سرعات وارتفاعات منصات متنقلة أخرى. يمكن تحليل خصائص الخبو لأنظمة الطيران بإجراءات شبيهة بإجراءات الأنظمة البحرية الموصوفة في التوصية ITU-R P.680، مع الاعتناء بأخذ كروية الأرض في الحسبان، مما يصبح ذا دلالة مع زيادة ارتفاع الهوائي فوق السطح العاكس.

2.4 الخبو الناتج عن انعكاسات سطح البحر

يمكن تحليل خصائص الخبو بالنسبة لأنظمة الطيران باتباع إجراءات مماثلة لتلك الخاصة بالأنظمة البحرية المشروحة في التوصية ITU-R P.680 مع إيلاء عناية كافية لكروية الأرض والتي يكون تأثيرها واضحاً مع زيادة ارتفاع الهوائي فوق السطح العاكس.

1.2.4 تأثير ارتفاع الهوائي وكسب الهوائي

توفر الطريقة البسيطة التالية، القائمة على نموذج نظري، تقديرات تقريبية للقدرة عبر مسيرات متعددة أو عمق الخبو المناسب للتطبيقات الهندسية.

يتمثل الإجراء فيما يلي:

المدى المنطبق:

التردد: GHz 2-1

زاوية الارتفاع: $\theta_i \leq 3^\circ$ و $G(1,5\theta_i) \leq 10$ dB

حيث $G(\theta)$ هي مخطط هوائي الفص الرئيسي المعطى بواسطة:

$$(1) \quad G(\theta) = -4 \times 10^{-4} (10^{G_m/10} - 1) \theta^2 \quad \text{dB}$$

حيث:

G_m : قيمة الكسب الأقصى للهوائي (dB)

θ : الزاوية المقيسية انطلافاً من محور التسديد (بالدرجات).

الاستقطاب: الاستقطابان الدائري والأفقي؛ الاستقطاب العمودي لـ $\theta_i \leq 8^\circ$

حالة البحر: ارتفاع الموجة من 1 إلى 3 أمتار (مكونة غير متسقة مطورة كلياً).

المرحلة 1: حساب زوايا تماس نقطة الانعكاس المرآوي، θ_{sp} ، والأفق، θ_{hr} ، بواسطة:

$$(2a) \quad \theta_{sp} = 2\gamma_{sp} + \theta_i \quad \text{درجات}$$

$$(2b) \quad \theta_{hr} = \cos^{-1} [R_e / (R_e + H_a)] \quad \text{درجات}$$

حيث:

$$H_a / \tan \theta_i \cdot 10^{-3} \times 7,2 = \gamma_{sp}$$

$$R_e: \text{نصف قطر الأرض} = 6371 \text{ km}$$

$$H_a: \text{ارتفاع الهوائي (km)}$$

المرحلة 2: تحديد كسب الهوائي النسبي G في الاتجاه المتوسط بين النقطة المرآوية والأفق. يُحسب كسب الهوائي النسبي تقريباً بواسطة المعادلة (1) حيث $\theta = \theta_i + (\theta_{sp} + \theta_{hr})/2$ (بالدرجات).

المرحلة 3: حساب معامل انعكاس فرينل للبحر:

$$(3a) \quad R_H = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\eta} - \cos^2 \theta_i}{\sin \theta_i + \sqrt{\eta} - \cos^2 \theta_i} \quad (\text{استقطاب أفقي})$$

$$(3b) \quad R_V = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}}{\sin \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}} \quad (\text{استقطاب عمودي})$$

$$(3c) \quad R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad (\text{استقطاب دائري})$$

$$\eta = \epsilon_r(f) - j60 \lambda \sigma(f)$$

حيث:

$\epsilon_r(f)$: السماحية النسبية للسطح عند التردد f (من التوصية ITU-R P.527)

$\sigma(f)$: إيصالية (S/m) السطح عند التردد f (من التوصية ITU-R P.527)

λ : طول الموجة في الفضاء الحر (m).

المرحلة 4: حساب عامل التصحيح C_θ (dB):

$$(4) \quad C_\theta = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta_{sp} \geq 7^\circ \\ \theta_{sp} - 7) / 2 & \text{for } \theta_{sp} < 7^\circ \end{cases}$$

المرحلة 5: حساب عامل التباعد D (dB) الناتج عن انحناء الأرض:

$$(5) \quad D = -10 \log \left[1 + \frac{2 \sin \gamma_{sp}}{\cos \theta_{sp} \sin (\gamma_{sp} + \theta_i)} \right]$$

المرحلة 6: متوسط القدرة غير المتماثلة للموجات المنعكسة من البحر بالنسبة للموجة المباشرة، P_r ، يُعطى بواسطة:

$$(6) \quad P_r = G + R + C_\theta + D \quad \text{dB}$$

حيث:

$$|R_i| R = 20 \log$$

مع $R_H = R_i$ أو R_V أو R_C من المعادلات (3).

المرحلة 7: بافتراض توزيع ناكاغامي-رايس، يُقدر عمق الخبو انطلاقاً من:

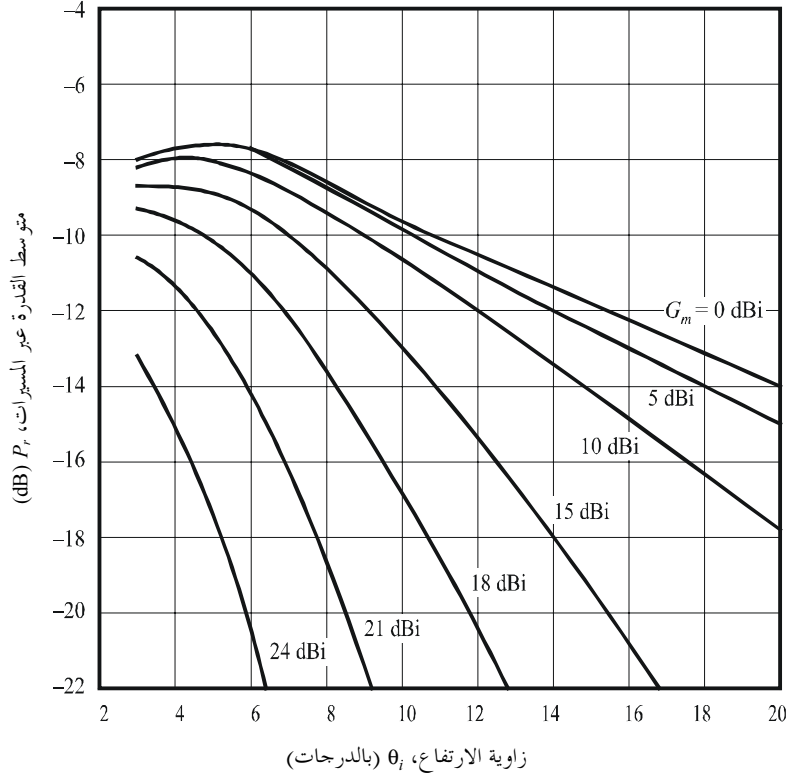
$$(7) \quad A + 10 \log (1 + 10^{P_r/10})$$

حيث A هي الاتساع (dB) مقروءة من إحدائية الشكل 1 من التوصية ITU-R P.680.

يبين الشكل 1 أذناه متوسط القدرة عبر مسيرات متعددة للمكونة غير المتماثلة المحصل عليها بواسطة الطريقة السابقة بدلالة زاوية الارتفاع لمختلف الكسوب. بالمقارنة مع حالة الأنظمة المتنقلة البحرية الساتلية (الشكل 2 من التوصية ITU-R P.680)، يمكن رؤية أن قدرة الموجة المنعكسة P_r للأنظمة المتنقلة الساتلية للطيران تُخفض بما قدره 1 إلى 3 dB عند الزوايا منخفضة الارتفاع.

الشكل 1

متوسط القدرة عبر مسيرات متعددة بالنسبة لقدرة الإشارة المباشرة بدلالة
زاوية الارتفاع لمختلف كسب الهوائي



0682-01

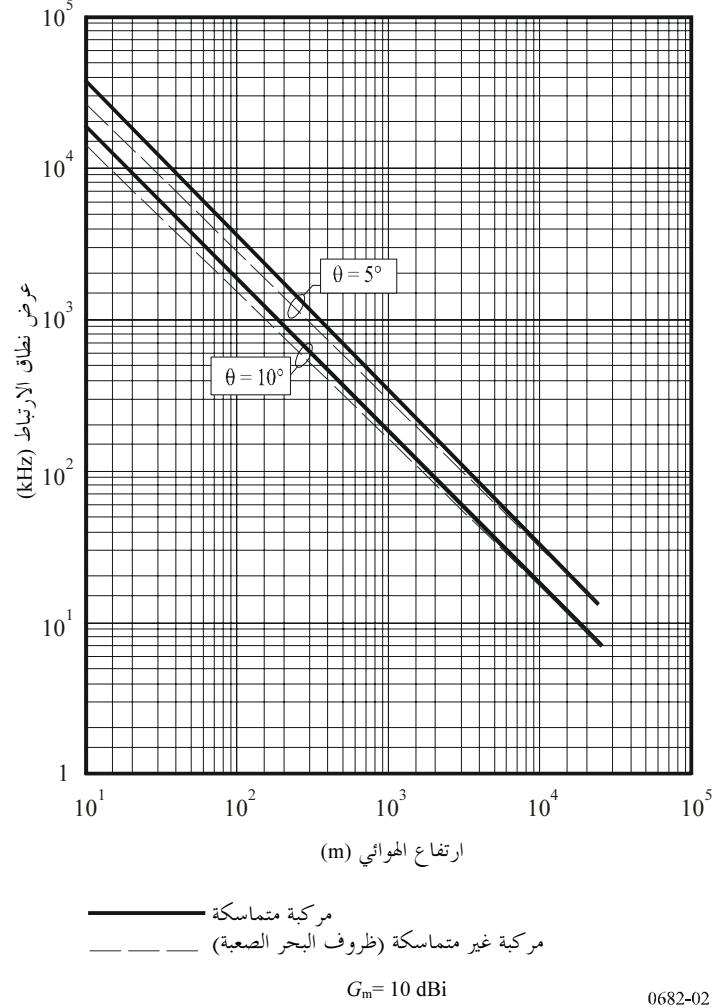
الملاحظة 1 - أظهرت الدراسات التحليلية والتجريبية أنه، بالنسبة للموجات ذات الاستقطاب الدائري عند أو بجوار 1,5 GHz وكسب هوائي 7 dB، يكون عمق الخبو عبر مسيرات متعددة لظروف البحر الصعبة يساوي حوالي 8 إلى 11 dB لارتفاعات الطائرات المنخفضة والمتوسطة وحوالي 7 إلى 9 dB للارتفاعات العالية (فوق 2 km). ويكون عمق الخبو عبر مسيرات متعددة أدنى بحوالي 2 dB بالنسبة لكسب هوائي 15 dB.

2.2.4 وقت الانتشار وعرض نطاق الارتباط

تتكون الإشارة المستقبلية من الموجات المباشرة والمنعكسة. وبما أن وقت انتشار المكونة المنعكسة أطول من وقت انتشار المكونة المباشرة، فإن الإشارة المركبة المستقبلية يمكن أن تخضع لحالات خبو انتقائي الترددات. ينخفض ارتباط الإشارات مع زيادة تباعد الترددات. ويكون توقف الارتباط على كسب الهوائي صغيراً بالنسبة للكسب تحت 15 dB. ويبين الشكل 2 العلاقة بين ارتفاع الهوائي وعرض نطاق الارتباط، المعرفة هنا كفصل الترددات الذي يكون معامل الارتباط الخاص به بين موجتين راديويتين يساوي $0,37 (1/e)$. ينخفض عرض نطاق الارتباط مع زيادة ارتفاع الهوائي، فيصبح حوالي 10 إلى 20 kHz (وقت تأخر من 6 إلى 12 μs) لهوائي عند ارتفاع 10 km. هكذا فإن الخبو بسبب تعدد المسيرات لأنظمة الطيران يمكن أن تكون لها خصائص انتقائية للترددات.

الشكل 2

عرض نطاق الارتباط بدلالة ارتفاع الهوائي
لكسب هوائي يبلغ 10 dBi



3.4 قياسات آثار المسيرات المتعددة الناتجة عن الانعكاس على البحر

تم إجراء تجارب عديدة في نطاق 1,5 إلى 1,6 GHz. ويرد تلخيص لهذه القياسات في هذا القسم لتطبيقها على تصميم الأنظمة.

يلخص الجدول 1 معلومات تعدد المسيرات المحيطية الملاحظة في القياسات، أُضيفت إليها القيم المحصل عليها بواسطة نموذج تحليلي. وتمديد تأخرات الانتشار المدلول عليها في الجدول هي المظاهر الجانبية الزمنية لقدرة الإشارة ذات القدرة المنتشرة الواصلة إلى المستقبل. وعرض نطاق الارتباط الوارد في الجدول 1 هو عرض نطاق ذو 3 dB لوظيفة الارتباط الذاتي للتردد (تحويل فورييه لطيف التأخرات). يُحدد التمديد بالآثر الدوبلري انطلاقاً من عرض الكثافة الطيفية للقدرة الدوبلرية. ووقت فك الارتباط هو العرض ذو 3 dB لوظيفة الارتباط الذاتي الزمني (تحويل فورييه العكسي للطيف الدوبلري).

الجدول 1

معلومات المسيرات المتعددة المحصل عليها انطلاقاً من القياسات المحيطية

القيمة النمطية عند زاوية ارتفاع محددة			المدى المقيس	المعلنة
°30	°15	°8		
1- 3,5-	1- 9-	2,5- 14-	0,5- إلى 5,5- 2,5- إلى 15-	قدرة تعدد المسيرات المقيسة (dB) الاستقطاب الأفقي الاستقطاب العمودي
0,8 3,2	0,8 3,2	0,6 2,8	1,8-0,25 5,6-2,2	تمديد تأخر الانتشار ⁽¹⁾ (μs) قيمة 3 dB قيمة 10 dB
200	200	160	380-70	عرض نطاق الارتباط ⁽²⁾ 3 dB قيمة (kHz)
140 350	70 180	5 44 (3)40	190-4 350-13	التمديد الدوبلري ⁽¹⁾ (Hz) في المستوي الرئيسي قيمة 3 dB قيمة 10 dB
190 470	110 280	79 180 (3)80	240-79 560-180	في المستوي المتقاطع قيمة 3 dB قيمة 10 dB
2,2	3,2	7,5	10-1,3	وقت فك الارتباط ⁽²⁾ (ms) قيمة 3 dB

(1) ثنائي الأطراف.

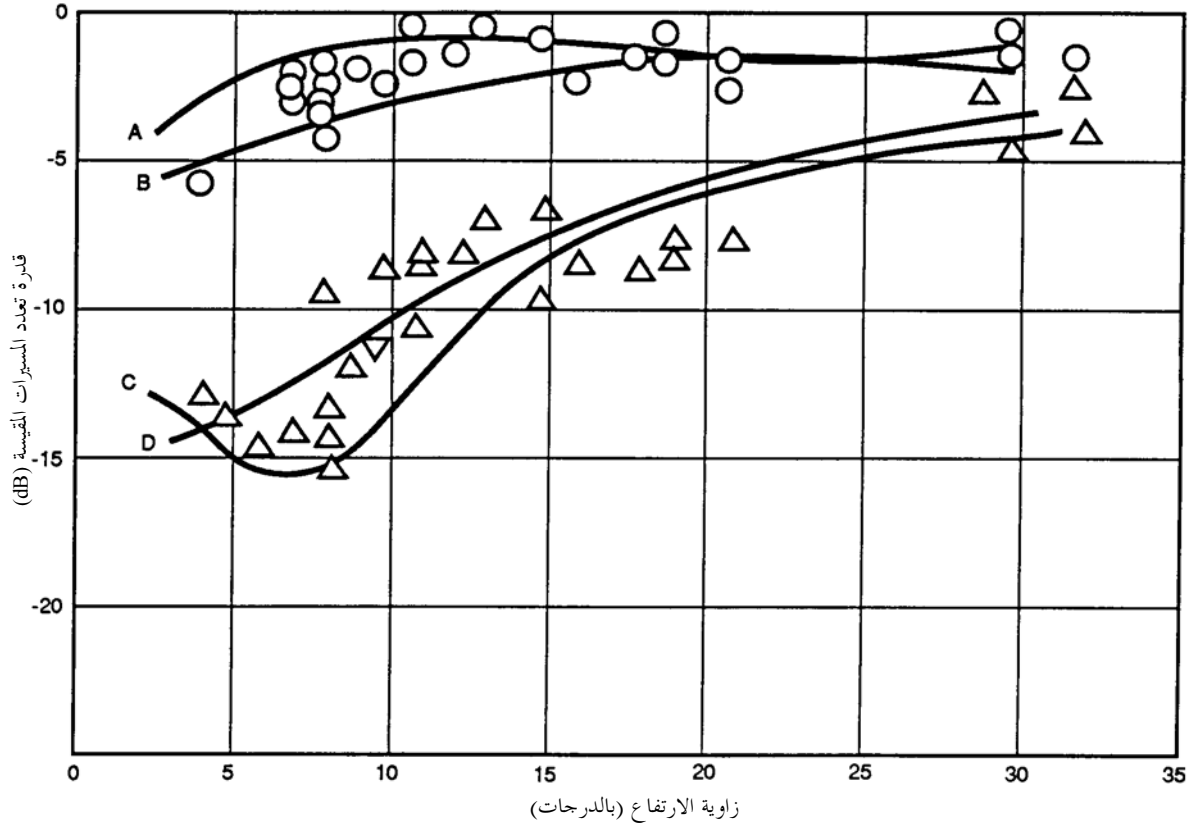
(2) أحادي الطرف.

(3) معطيات من نموذج تعدد مسيرات لطائرة على ارتفاع 10 km وسرعة الطائرة تبلغ 1 000 km/h.

يعطي الشكل 3 قدرة تعدد المسيرات المقيسة لاستقطابي الهوائي الأفقي والعمودي لحالات البحر الهادئة والهائجة بدلالة زاوية الارتفاع، مع التنبؤات المشتقة من نموذج بصريات مادي. يكون لحالة البحر أهمية أقل لزوايا الارتفاع فوق حوالي 10°. وإن التوافق بين المعاملات المقيسة وتلك المتنبأ بها للأرض المنبسطة الملساء المعدلة بواسطة عامل التباعد الناتج عن كروية الأرض، يزيد مع زيادة هدوء البحر.

الشكل 3

قدرة تعدد المسيرات المقيسة المحيطية إزاء زاوية الارتفاع عند 1,6 GHz



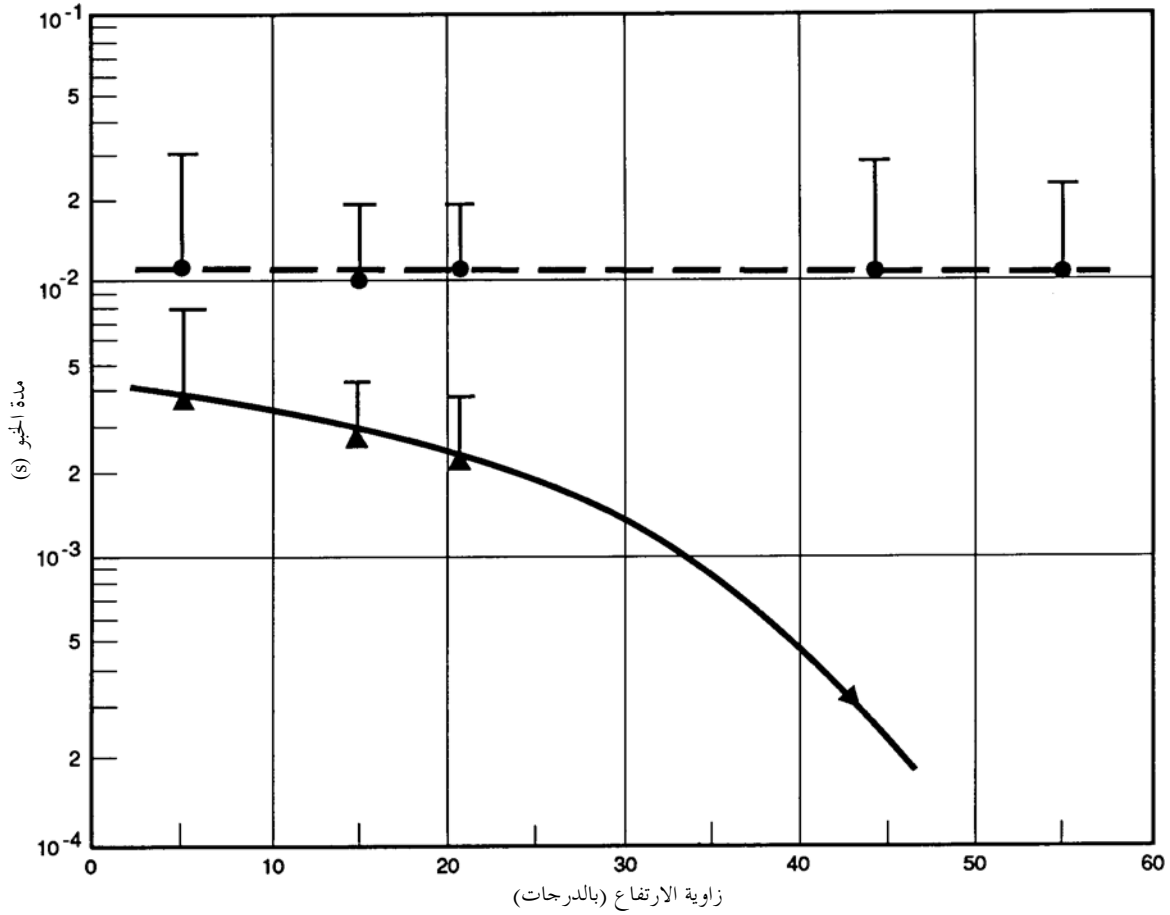
- O : قياسات الاستقطاب الأفقي
 Δ : قياسات الاستقطاب العمودي
 المنحنيات : A : التنبؤ بالاستقطاب الأفقي، بحر هادئ
 B : التنبؤ بالاستقطاب الأفقي، بحر هائج
 C : التنبؤ بالاستقطاب العمودي، بحر هادئ
 D : التنبؤ بالاستقطاب العمودي، بحر هائج

0682-03

تم تجميع معطيات تعدد المسيرات بسلسلة من القياسات المتنقلة الساتلية للطيران التي أجريت فوق المحيط الأطلسي وأجزاء من أوروبا. يبين الشكل 4 الانحرافين المتوسط والمعياري المقيسين لفترات خبو ذي 1,6 GHz بدلالة زاوية الارتفاع لهذه التحليقات. (تم استعمال هوائي ذي ثنائيات أقطاب متقاطعة بكسب يبلغ 3,5 dBi لتجميع المعطيات. حلقت الطائرة عند ارتفاع اسمي يبلغ 10 km وبسرعة اسمية بالنسبة للأرض تبلغ 700 km/h).

الشكل 4

مدة الخبو بدلالة زاوية الارتفاع للاستقطاب الدائري عند 1,6 GHz
(كسب الهوائي = 3,5 dBi)؛ معطيات مجمعة فوق المحيط الأطلسي وأوروبا الغربية



●: المتوسط مع عتبة 0 dB
▲: المتوسط مع عتبة -5 dB
T: الانحراف المعياري مضاف

0682-04

4.4 قياسات آثار المسيرات المتعددة الناتجة عن الانعكاس على الأرض

يقدم الجدول 2 معلومات انتشار عبر مسيرات متعددة مقيسة خلال تحليقات فوق الأرض؛ تكون تعاريف المعلومات مماثلة لتلك التي تنطبق على الجدول 1. والإشارات التي تنتشر عبر مسيرات متعددة فوق الأرض كثيرة التغير. ولم يتم تحديد أي تأثير منتظم لزاوية الارتفاع، ربما بسبب طبيعة الأرض شديدة التغيرة (تم تجميع المعطيات على تربة رطبة وجافة والأراضي السبخة والتلج المبلل والجاف والجليد والبحيرات، إلخ).

الملاحظة 1 - معدل الأخطاء غير القابل للتخفيض؛ يؤدي الخبو الناتج عن تعدد المسيرات في القنوات المتنقلة إلى معدل أخطاء غير قابل للتخفيض لا يمكن تعويضه بزيادات في قدرة الإشارة المباشرة. تظهر المحاكاة أن معدل الأخطاء غير القابل للتخفيض يكون أعلى لقناة ساتلية متنقلة للطيران منه لقناة ساتلية متنقلة برية.

الجدول 2

المعلومات المتعلقة بالانتشار عبر مسيرات متعددة فوق الأرض

المعلمة	المدى المقيس	القيمة النمطية
قدرة تعدد المسيرات المقيسة (dB) الاستقطاب الأفقي الاستقطاب العمودي	18- إلى 2 21- إلى 3	9- 13-
تمديد تأخر الانتشار ⁽¹⁾ (μs) قيمة 3 dB قيمة 10 dB	1,2-0,1 3-0,2	0,3 1,2
عرض نطاق الارتباط ⁽²⁾ (kHz) قيمة 3 dB	3 000-150	600
التمديد الدوبلري ⁽¹⁾ (Hz) قيمة 3 dB قيمة 10 dB	140-20 500-40	60 200
وقت فك الارتباط ⁽²⁾ (ms) قيمة 3 dB	10-1	4

⁽¹⁾ ثنائي الأطراف.

⁽²⁾ أحادي الطرف.

5.4 نموذج مسيرات متعددة لطائرة أثناء الاقتراب فوق الأرض وأثناء الهبوط

يجب بحث المسيرات المتعددة ذات التأخير القصير في أنظمة الاتصالات والملاحة للطيران خاصة بالنسبة للإشارات عريضة النطاق. وتنتج الانعكاسات على هيكل الطائرة تداخلات كبيرة. وعلى وجه الخصوص، خلال الاقتراب النهائي وعندما يكون تيسر الاتصالات والاعتمادية وكذلك دقة الملاحة وسلامتها من الأمور الهامة، فإن الانعكاس الأرضي والانعكاس على جسم الطائرة يولدان آثار انتشار واضحة. وعلى الرغم من أن النموذج يستهدف في الأساس التطبيقات الملاحية، فإنه بالطبع يمكن استعماله مع أي إشارة ساتلية.

ومع ذلك، ونتيجة للاستعمال المتوقع الأولي، فإنه يفترض أن يكون الهوائي على قمة مقصورة القيادة (حيث يوضع هوائي الملاحة عادةً). ومن المقرر استعمال النموذج الكامل كمضاهي إحصائي. وحيث إنه من المتوقع أن تكون عروض نطاقات الانعكاسات صغيرة جداً، فإن العملية لن تنتج إحصائيات كافية أثناء زمن الاقتراب البالغ 200 ثانية. ولمضاهاة خطأ ملاحي صالح إحصائياً، يجب استعمال النموذج لعدد كبير من حالات الاقتراب. ويجب توسيط نتائج المضاهاة لهذه الاقترابات للحصول على الخطأ الملاحي الأدنى والأقصى والمتوسط.

1.5.4 الآثار الفيزيائية

تنقسم ظروف الانتشار عبر مسيرات متعددة لطائرة مستقبلة إلى قسمين رئيسيين:

- هيكل الطائرة؛

- الانعكاس الأرضي.

ويحدث هيكل الطائرة انعكاسات كبيرة من على جسم الطائرة فقط (عندما يكون الهوائي منصوباً على قمة مقصورة القيادة). وينتج عن هذا الانعكاس ذو التأخير القصير جداً اختلافاً زمنياً صغيراً ويسود القناة.

ولم يتلاحظ وجود انعكاس قوي من الجناح (عندما يكون الهوائي منصوباً على قمة مقصورة القيادة). وينتج عن الانعكاس الأرضي اختلافاً زمنياً كبيراً ويكون بإزاحة دوبلرية طبقاً لمعدل اقتراب الطائرة من الأرض.

2.5.4 المدى الصالح للنموذج

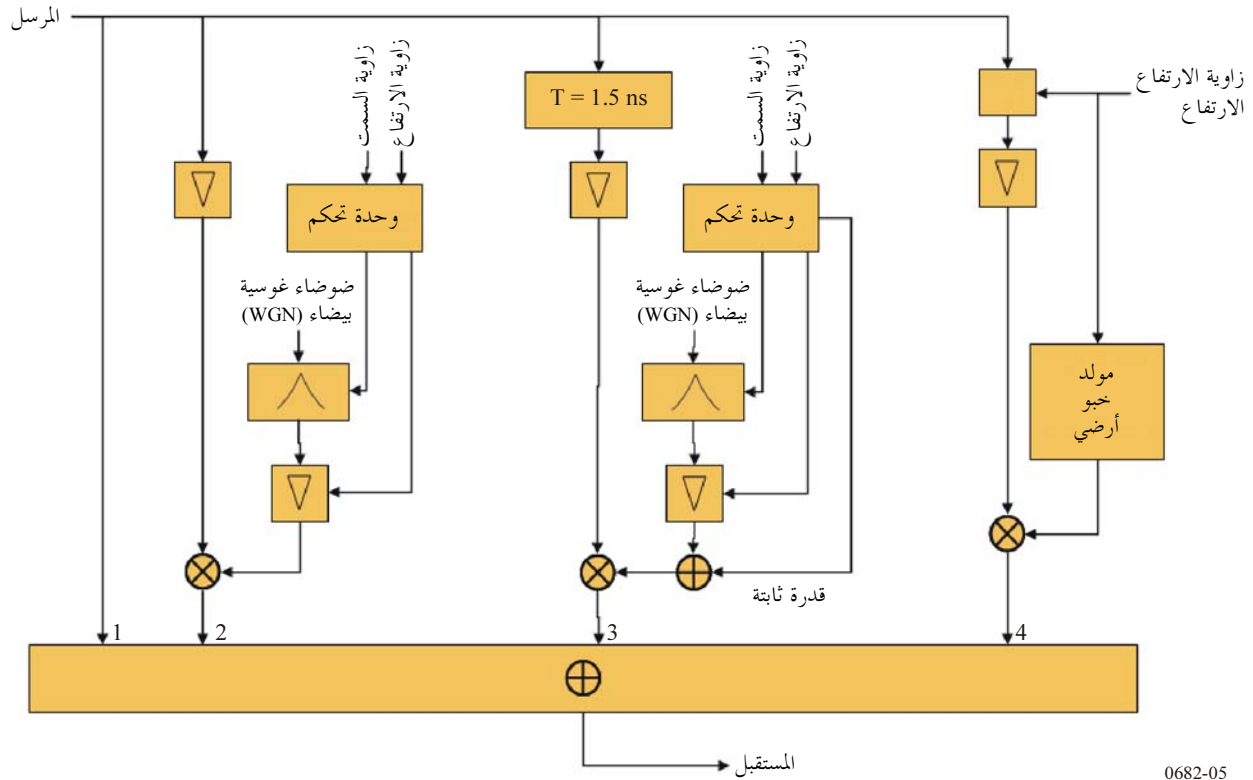
يمكن استعمال النموذج لترددات بين 1 و 3 GHz. ويمكن لسمت الساتل أن يتراوح بين 10° و 170° و 190° و 350°. ويمكن لزاوية الارتفاع للساتل أن تتراوح بين 5° و 75°.

3.5.4 النموذج

1.3.4.5 نظرة عامة

الشكل 5

نموذج كامل لقناة للطيران



يبين الشكل 5 نموذج كامل للطيران للاقترب النهائي. ويمثل الفرع الأول (الفرع 1) الإشارة المباشرة يليه الجزء الخاص بالخبو الأرضي الذي يُمثل نموذج تشكيل خط البصر (الفرع 2). ويتكون الفرع الثالث (الفرع 3) من عملية الخبو ذي المسيرات المتعددة لجسم الطائرة والتي يحدث لها تأخير بمقدار 1,5 ns. والفرع الأخير (الفرع 4) هو الرجوع الأرضي الذي يتوقف تأخيرته على زاوية الارتفاع والارتفاع.

ومعلومات الدخل المتغيرة مع الزمن لهذا النموذج هي:

- زاوية سمت الساتل، $\varphi(t)$ ؛
- زاوية ارتفاع الساتل، $\theta(t)$ ؛
- ارتفاع الطائرة (فوق سطح الأرض، $h(t)$ ، حيث ترمز t إلى الزمن.

وعلاوة على ذلك يحتاج النموذج إلى معرفة هندسة الطائرة وديناميات الطيران. وتقدم معاملات تجريبية لأنماط الطائرات التالية:

- Vereinigte Flugzeugwerke VFW 614 (ATTAS)، حيث تمثل طائرة صغيرة
- الايرباص A340، حيث تمثل طائرة تجارية كبيرة.

يراعى تأثير زاويتي السمات والارتفاع لعمليات الخبو ذي المسيرات المتعددة المبينة في الشكل أعلاه "كوحدة تحكم" من خلال دالة متعددة الحدود مستعملة في المعادلة (10). فضلاً عن ذلك، فإن تأخير الانعكاس الأرضي دالة في زاوية الارتفاع والارتفاع؛ انظر المعادلة (15).

ولعمليات الخبو والفدرات المتغيرة مع الزمن معلمات دخل لضبط النموذج مع المواقع المختلفة للساتل (زاويتا الارتفاع والسمات). وتعتمد عمليات الخبو المختلفة بشكل كبير على نمط الطائرة.

الجدول 3

معلمات نموذج القناة - نظرة عامة

عرض النطاق الدوبلري (Hz)	القدرة النسبية (dB)	التأخير (ns)	
0	0	0	خط البصر (LoS)
0,1 >	14,2-	0	خبو أملس
0,1 >	14,2-	1,5	جسم الطائرة
20 > (موجّه حسب معدل الاقتراب من الأرض)	15- إلى 25-	10-900 (تنازلياً)	الأرض

2.3.5.4 المسير المباشر

بالإضافة إلى خط البصر (الفرع 1)، يتأثر هذا المسير بتشكيل قوي (الفرع 2) ذو التوزيع الريسياني للاتساع. وتتولد عملية الخبو هذه كما هو محدد في المعادلات (8) و(9) و(10) و(11).

3.3.4.5 الانعكاس من الجناح

في حال وضع الهوائي على قمة مقصورة القيادة (وهو ما يعد إلزامياً بالنسبة لهوائيات الملاحة الساتلية)، فإن الإشعاع الوارد ينتشر عبر مدى زاوي كبير. وبالتالي يمكن إهمال القدرة الإجمالية للانعكاس من الجناح (أقل من -35 dB). وبالنسبة للهوائيات الموضوعة في أماكن أخرى (لأنظمة الاتصالات مثلاً)، لا سيما تلك الموضوعة بين الأجنحة، فإنه يمكن في هذه الحالة توقع مساهمة للانعكاس من الجناح.

4.3.5.4 الانعكاس من جسم الطائرة

لتوليد متوالية زمنية للانعكاس من جسم الطائرة، يلزم معرفة الطيف الخاص به. والنموذج مشتق من خلال عملية تسلسل عشوائي، P_{proc} . ويمكن توليد هذه العملية بترشيح الضوضاء البيضاء المركبة ذات الطيف المعطى بالمعادلة (8)، حيث b_2 و b_3 هما معاملان العملية الأسية:

$$p_{proc} \text{ (dB)} = b_1 + b_2 \cdot e^{b_3 \cdot |f|} \quad (8)$$

بالإضافة إلى العملية الضوئية هذه، تحتوي هذه الإشارة على مركبة متوسطة (DC).

وتبلغ القدرة الإجمالية التي قيسَت لهذه العملية -14,2 dB والتي تحدد الثابت:

$$(9) \quad b_1 = 14.2 - \text{mean} \quad (\text{dB})$$

وكما تلاحظ آنفاً، يتراوح مدى زاوية ارتفاع المسير الصالح بين 5° و 75°. ويمكن لزاوية السمَت أن تتراوح بين 15° إلى 165°، و 195° إلى 335°، على التوالي. ولاشتقاق المتوسط والمعاملين b_2 و b_3 ، تقدم دالة متعددة الحدود ثنائية الأبعاد من الدرجة الرابعة لكل معلمة (المتوسط و b_2 و b_3). وعلى سبيل المثال،

$$(10) \quad \text{mean}(\theta, \varphi) = [\theta^4 \quad \theta^3 \quad \theta^2 \quad \theta \quad 1] \cdot A_{\text{mean}} \cdot \begin{bmatrix} \varphi^4 \\ \varphi^3 \\ \varphi^2 \\ \varphi \\ 1 \end{bmatrix}$$

يعطى القيمة المتوسطة كدالة في زاوية الارتفاع θ وزاوية السمَت φ ، حيث A_{mean} عبارة عن مصفوفة 5×5 للمعاملات متعددة الحدود. ويحسب المعاملان b_2 و b_3 على نفس الوتيرة.

وبالنسبة لمثالي الطائرتين (ATTAS والإيرباص A340)، ترد هذه المصفوفات على التوالي كما يلي:

$$A_{mean,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -2.0057e-12 & 5.0499e-10 & -4.6114e-8 & 1.8053e-6 & -2.4773e-5 \\ 2.8598e-10 & -7.4259e-8 & 7.0553e-6 & -2.9116e-4 & 0.0043 \\ -1.1568e-8 & 3.2474e-6 & -3.3846e-4 & 0.0156 & -0.2698 \\ 3.8681e-8 & -2.2536e-5 & 0.0038 & -0.2512 & 6.3140 \\ 1.9434e-6 & -3.5747e-4 & 0.0133 & 0.8133 & -28.1329 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -1.8398e-12 & 4.2182e-10 & -3.3813e-8 & 1.0855e-6 & -1.0875e-5 \\ 2.6665e-10 & -6.0897e-8 & 4.8490e-8 & -1.5346e-4 & 0.0015 \\ -1.2870e-8 & 2.9171e-6 & -2.2947e-4 & 0.0071 & -0.0629 \\ 2.3542e-7 & -5.2520e-5 & 0.0040 & -0.1193 & 0.9153 \\ 1.2058e-6 & 2.5797e-4 & -0.0187 & 0.5027 & -4.1128 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -3.9148e-11 & 8.8672e-9 & -7.0048e-7 & 2.2069e-5 & -2.1492e-4 \\ 6.0699e-9 & -1.3708e-6 & 1.0784e-4 & -0.0034 & 0.0322 \\ -3.2203e-7 & 7.2344e-5 & -0.0057 & 0.1747 & -1.6206 \\ 6.7649e-6 & -0.0015 & 0.1162 & -3.5328 & 31.6814 \\ -4.4741e-5 & 0.0098 & -0.7383 & 21.9981 & -142.3524 \end{bmatrix}$$

(11)

$$A_{means,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -2.6220e-12 & 6.0886e-10 & -5.0686e-8 & 1.8074e-6 & -2.3633e-5 \\ 4.3848e-10 & -1.0231e-7 & 8.6113e-6 & -3.1465e-4 & 0.0044 \\ -2.3577e-8 & 5.5538e-6 & -4.7815e-4 & 0.0184 & -0.2872 \\ 3.9552e-7 & -9.2657e-5 & 0.0082 & -0.3431 & 6.9937 \\ -1.5225e-6 & 3.3690e-4 & -0.0312 & 1.7110 & -32.8066 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -1.2021e-12 & 2.7780e-10 & -2.2626e-8 & 7.4413e-7 & -7.5120e-6 \\ 1.7647e-10 & -4.0725e-8 & 3.3131e-6 & -1.0855e-4 & 0.0011 \\ -8.6470e-9 & 1.9871e-6 & -1.6099e-4 & 0.0052 & -0.0488 \\ 1.6123e-7 & -3.6656e-5 & 0.0029 & -0.0946 & 0.8204 \\ -8.5647e-7 & 1.8942e-4 & -0.0149 & 0.4826 & -5.5011 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -3.1880e-11 & 7.2724e-9 & -5.8454e-7 & 1.9069e-5 & -1.9707e-4 \\ 4.7229e-9 & -1.0775e-6 & 8.6761e-5 & -0.0028 & 0.0293 \\ -2.3471e-7 & 5.3437e-5 & -0.0043 & 0.1413 & -1.4541 \\ 4.4756e-6 & -0.0010 & 0.0812 & -2.6731 & 27.5448 \\ -2.5361e-5 & 0.0056 & -0.4459 & 14.8917 & -109.1083 \end{bmatrix}$$

5.3.5.4 الانعكاس الأرض

تحدث إزاحة دوبلرية للانعكاس الأرضي بواسطة معدل اقتراب الطائرة من الأرض (السرعة الرأسية)، $v_{vert}(t)$. ويتحصل على التخالف الدوبلري للانعكاس الأرضي من العلاقة:

$$(12) \quad f_{ground}(t) = \frac{v_{vert}(t)}{\lambda}$$

حيث λ هي الطول الموجي. ويُمثل الطيف الدوبلري للانعكاس الأرضي حول التردد المتوسط المتحصل عليه من المعادلة (12) تمثيلاً جيداً بواسطة توزيع غوسي مقيس:

$$(13) \quad P_{Gr(dB)} = P_{g(dB)} + 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}} \right)$$

وترمز P_g لقدرة الانعكاس الأرضي المتحصل عليها بواسطة نموذج ماركوف، حيث تبين تجريبياً أن الانحراف يكون كالتالي:

$$(14) \quad \sigma = 2.92 \text{ Hz}$$

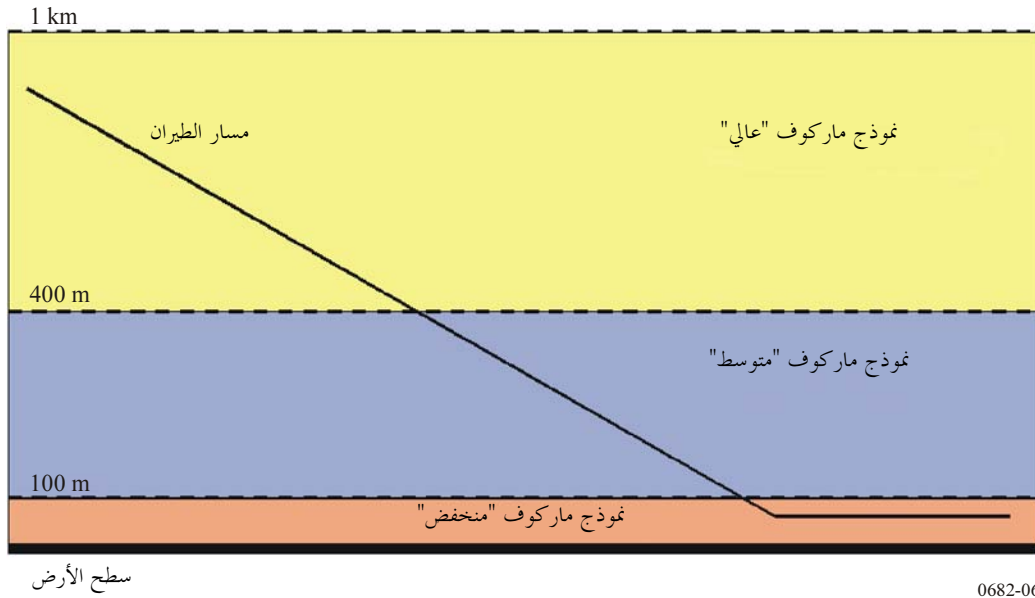
ولنمذجة الانعكاس الأرضي، يقسم الاقتراب النهائي إلى ثلاث مناطق ارتفاع مختلفة (ارتفاع عالي ومتوسط ومنخفض). وتحدد خصائص الانعكاس الأرضي في كل منطقة من هذه المناطق الثلاث بواسطة نموذج لحالة ماركوف.

الجدول 4

مناطق الارتفاع لنموذج ماركوف

إلى (m)	من (m)	المستوى
400	1 000	"مرتفع"
100	400	"متوسط"
0	100	"منخفض"

الشكل 6
مناطق الارتفاع للنموذج الأرضي



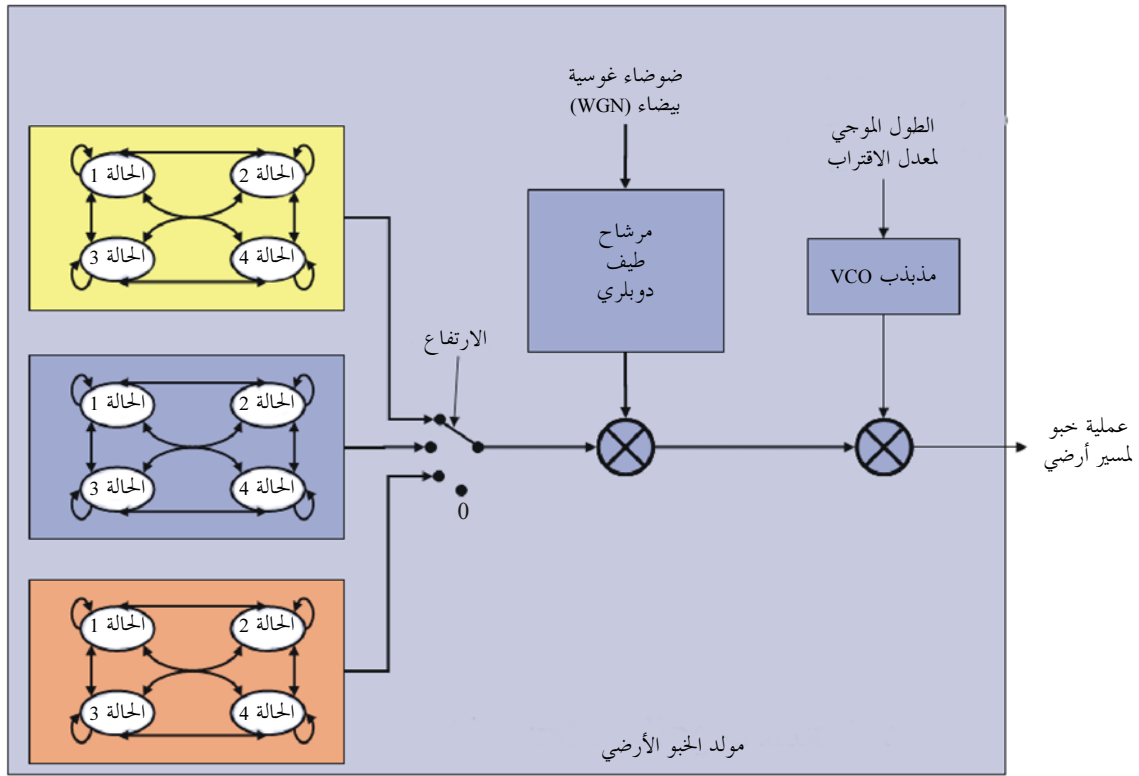
الجدول 5
حالات نموذج ماركوف للخبو الأرضي

القدرة (dB)	الحالة
15–	1
19–	2
23–	3
25– >	⁽¹⁾ 4

⁽¹⁾ لا يوجد انعكاس أرضي.

الشكل 7

تحقيق وحدة مولد الخبو الأرضي



0682-07

يتحصل على احتمالات التحول لماركوف من بيانات القياسات الكمية. وتحدد مصفوفة التحول P ، حيث $P_{x,y}$ عبارة عن احتمال التغيير من الحالة x إلى الحالة y ، لكل منطقة ارتفاع على حدة.

وتتولد عملية الخبو الأرضي بواسطة نموذج لماركوف يعتمد على الارتفاع لتردد اعتيان يبلغ 25,4 Hz. ويلاحظ أن احتمالات التحول هذه تسري فقط بالنسبة لهذا التردد. ويرد في الجدول 4 ارتفاعات التحول كما تبين في الشكل 6.

وتعطى حالات قدرة الخرج للنموذج في الجدول 5 وتبين في الشكل 7.

وتشتق مصفوفات احتمالات التحول التالية من القياسات،

$$\begin{aligned}
 P_{400-1500} &= \begin{bmatrix} 0.9866 & 0.0087 & 0.0047 & 0 \\ 0.6087 & 0.3043 & 0.0870 & 0 \\ 0.2143 & 0.3571 & 0.4286 & 0 \\ 0.3333 & 0.3333 & 0.3334 & 0 \end{bmatrix} \\
 P_{100-400} &= \begin{bmatrix} 0.9842 & 0.0130 & 0.0028 & 0 \\ 0.6667 & 0.2222 & 0.0889 & 0.0222 \\ 0.0667 & 0.1167 & 0.5000 & 0.3166 \\ 0 & 0 & 0.3279 & 0.6721 \end{bmatrix} \\
 P_{10-100} &= \begin{bmatrix} 0.9645 & 0.0310 & 0.0045 & 0 \\ 0.7308 & 0.1538 & 0.1154 & 0 \\ 0.6250 & 0.1250 & 0.2500 & 0 \\ 0.3333 & 0.3333 & 0.3334 & 0 \end{bmatrix} \\
 P_{0-10} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

حيث P_{x-y} ترمز إلى احتمال التحول في منطقة الارتفاع حيث $h(t) \geq x$ و $h(t) < y$.

ويلاحظ أن نموذج ماركوف هذا يشرح عملية هبوط في مطار غراتس في النمسا. وتغطي هذه المنطقة الغابات والأراضي الخضراء وبعض الشوارع المتفرقة. وقد تؤثر الظروف الجوية والبيئة وهندسة الطيران والعديد من المعلومات الأخرى على خصائص الرجوع الأرضي. لذا يجب أن ينظر إلى هذه الأرقام على اعتبار أنها معلومات تخضع للتعديل من قبل المستعمل في حال ما تقرر استعمالها لأنماط مناطق أخرى. ويتوقع أن ينتج بوجه خاص عن الاقتراب فوق مياه (بحار) أو مناطق ذات قنوات مائية عديدة سلوكاً مغايراً لذلك.

ويمكن بسهولة حساب تأخير الانعكاس الأرضي بدلالة زاوية ارتفاع المسير بافتراض بيئة مستوية حول المطار بالعلاقة

$$\tau_{ground}(t) = \frac{2 \cdot h(t) \cdot \sin(\theta)}{c}
 \tag{16}$$

حيث c تساوي سرعة الضوء.

4.5.4 تحميل النموذج

يوجد تنفيذ Matlab للنموذج للتحميل المجاني من موقع الويب التالي: <http://www.kn-s.dlr.de/satnav/#Aeronautical>.