التوصية ITU-R F.1108-4

تحديد المعايير اللازمة لحماية مستقبلات الخدمة الثابتة من إرسالات المحطات الفضائية العاملة في مدارات غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض في نطاقات ترددات متقاسمة

(المسألتان ITU-R 118/9 وITU-R 113/9)

(2005-2002-1997-1995-1994)

نطاق التطبيق

تتضمن هذه التوصية عدة طرائق لتحديد المعايير اللازمة لحماية مستقبلات الخدمة الثابتة من إرسالات المحطات الفضائية العاملة في مدارات غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض في نطاقات ترددات متقاسمة بما في ذلك المدارات شديدة الإهليلجية (HEO)

إن جمعية الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن المؤتمر العالمي للراديو المكلف بدراسة توزيعات التردد في بعض أجزاء الطيف (مالقة طورمولينوس، 1992) (WARC-92) قد وزع على الخدمات الساتلية، على أساس أولي، بصورة متساوية أجزاء الطيف الموزعة أيضاً على الخدمة الثابتة؛

ب) أن مستخدمي الخدمات الساتلية قد يرغبون بالتشغيل مع المحطات الفضائية في مدارات غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO)؛

ج) أن إرسالات المحطات الفضائية التي تعمل في المدارات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض والتي تتقاسم الجزء نفسه من الطيف يخشى أن تحدث تداخلات في محطات الاستقبال للخدمة الثابتة؛

د) أنه نظراً إلى الرؤية الجغرافية الشاسعة للإرسالات التي تحدثها المحطات الفضائية في المدارات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض، يخشى من عدم إمكانية تنسيق استعمال الترددات مع محطات الخدمة الثابتة؛

هـ) أن أنظمة الخدمة الثابتة ينبغي أن تراعي متطلبات الأداء ضمن شروط الشهر الأسوأ؛

و) أن انحطاط نوعية الأداء لنظام الخدمة الثابتة يتعلق بمجموع الانحطاطات التي تتسبب بها جميع المحطات الفضائية المرئية من هذه الخدمة؛

ز) أن دراسات كثافة تدفق القدرة على سطح الأرض التي تتسبب بها إرسالات المحطات الفضائية غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض يمكن إجراؤها بتطبيق الطرائق الإحصائية على نتائج المحاكاة بالحاسوب.

توصي

1 بأن تراعي معايير تقاسم الترددات المطبقة على أنظمة الخدمة الثابتة التي تتقاسم أجزاء الطيف مع المحطات الفضائية في المدارات غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض، كثافة تدفق القدرة الكلية للإرسالات الصادرة عن مجموع المحطات الفضائية المرئية من محطات الخدمة الثابتة في أي نقطة من نقاط الأرض؛

1.1 بتحديد سوية التداخلات المسموح بها فيما يخص الكثافة pfd (W/m^2) في عرض نطاق متفق عليه؛

2 بوضع حدود كثافة تدفق القدرة على أساس التطبيق الإحصائي لمبادئ التوصية ITU-R F.758 في حالة أنظمة المرحلات الراديوية الرقمية الثابتة، والتوصية ITU-R SF.357 في حالة أنظمة المرحلات الراديوية التماثلية الثابتة (طريقة قيد الدراسة)؛

3 بأن تراعى كما يجب مسألة فرض التوصية ITU-T G.826 (التي نتجت عنها التوصيتان ITU-R F.1397 وITU-RF.1491) لأهداف أكثر صرامة لأداء الخطأ والمتعلقة بأنظمة المرحل الراديوي الرقمية الثابتة؛

4 بأن تراعي حدود كثافة تدفق القدرة المعلمات المدارية للمحطات الفضائية التي تستعمل النطاق؛

1.4 بإمكانية استعمال الطرائق الواردة في الملحق 1 لتحديد إحصائيات الرؤية للمحطات الفضائية المشغلة على المدارات الدائرية؛

2.4 بأن يحدد انحطاط نوعية أداء الأنظمة التماثلية الذي يعزى إلى الإرسالات الصادرة عن محطة فضائية واحدة أو عدة محطات باستخدام الطرائق الواردة في الملحق 2؛

3.4 بأن يحدد انحطاط نوعية أداء الأنظمة الرقمية الذي يعزى إلى الإرسالات الصادرة عن محطة فضائية واحدة أو عدة محطات باستخدام الطرائق الواردة في الملحق 3 (انظر الملاحظة 1)؛

4.4 بأن تستعمل الطرائق الموصوفة في الملحق 4 لتحديد الآثار التي تسببها إرسالات محطة فضائية واحدة أو عدة محطات في الأنظمة الرقمية التي تعمل باستخدام أسلوب التنوع (انظر الملاحظة 2)؛

5.4 بأن تراعى الاعتبارات الواردة في الملحق 5 عند تقييم عدم انتظام التداخلات في أي شهر من الأشهر؛

6.4 بأن تطبق الطريقة الواردة في الملحق 6 لتحديد التوزيع التراكمي لنسبة القدرة المستقبلة إلى مجموع قدرات الضوضاء والتداخلات وتحديد الخسارة المصاحبة لهامش الخبو الذي تسببه إرسالات محطة فضائية واحدة أو عدة محطات (انظر الملاحظة 3)؛

7.4 بأن يعطي الملحق 7 مثالاً لطريقة يمكن استخدامها لأغراض تقييم التداخلات التي تنجم في محطة خدمة ثابتة عن كوكبة سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض وعاملة في مدارات دائرية أو إهليلجية في محطة خدمة ثابتة بما فيها المدارات شديدة الإهليلجية (HEO).

الملاحظة 1 – إن معيار الانحطاط النسبي للأداء (pfd) الذي يحدد في هذه التوصية يمكن أن يطبق على أنظمة الخدمة الثابتة التي تشغل على ترددات يكون فيها الخبو متعدد المسيرات هو السبب الرئيسي في خبو الإشارات. ويلزم إجراء دراسة إضافية لبحث المسيرات التي يعزى سبب الخبو الرئيسي فيها إلى التوهين بالمطر. ويتطلب تقييم آثار التداخلات على المدى القصير، دراسة إضافية أيضاً (انظر الفقرة 4 من الملحق 3).

الملاحظة 2 – لا يستعمل التنوع عموماً في الترددات التي تقل عن 3 GHz. وهو يستعمل غالباً في الترددات التي يكون فيها الخبو متعدد المسيرات هو السبب الرئيسي للخبو.

الملاحظة 3 – يمكن تطبيق الطريقة الواردة في الملحق 6 في المفاوضات الثنائية من أجل تقييم التداخلات على المدى القصير أو احتمالات التداخل.

الملحق 1

تحديد إحصائيات الرؤية من محطة أرضية، للمحطات الفضائية العاملة في مدارات دائرية غير متزامنة مع الأرض

1 مقدمة

بغية إعداد معايير للتقاسم بين سواتل المدار الأرضي المنخفض (LEO) وأنظمة الخدمة الثابتة، يلزم تحديد مدى تكرار رؤية الساتل في أي اتجاه لمحطة أرضية معينة أو لموقع معين، وتحديد كثافة التداخل التي يسببها هذا الساتل. ويرمي هذا الملحق إلى صياغة المعادلات اللازمة لمحاكاة أداء الساتل LEO وبالتالي الإحصائيات الضرورية. وسيكون هذا العمل عاماً بما يكفي لتطبيق نتائجه إما على نموذج عشوائي أو نموذج يتطور مع تغير الزمن.

وسيخصص القسم 2 من هذا الملحق لإعداد معادلات حركة الساتل على مدار دائري في نظام إحداثيات ثابتة. وتحول هذه المعادلات في الفقرة 3 إلى نظام إحداثيات ثابتة على الأرض. ويرد في الفقرة 4 زاوية سمت مسقط الساتل ومسافته بالنسبة إلى نقطة على سطح الأرض. وتعرض الفقرة 5 تعابير زوايا الارتفاع والانحراف عن محور التسديد للساتل وكذلك معياراً بسيطاً لاختبار رؤية ساتل يقع فوق نقطة معينة من الأرض.

ويستعمل نظام الإحداثيات الكروية الميامنة التي مركزها الأرض (r, θ, λ) في هذا الملحق حيث r هي المسافة اعتباراً من المصدر وθ هي المسافة الزاوية اعتباراً من القطب الشمالي وλ هي الزاوية نسبة إلى القطب.

2 الساتل في الإطار الثابت

بغية تحديد موقع الساتل في الإطار الثابت، ينبغي أولاً تحديد موقعه في المستوي المداري. وفيما يتعلق بجسم في المدار الكروي حول الأرض، تتطلب هذه العملية أربع معلمات مدارية كبلرية كالتالي:

R_s: نصف قطر المدار، أي المسافة الفاصلة بين مركز الأرض والساتل

I: زاوية الميل (rad) أي الزاوية الواقعة بين المستوي المداري والمستوي الاستوائي. وهي تقاس من 0 إلى π وتكون أقل من $\pi/2$ إذا كان الساتل موجهاً نحو الشرق عندما يتقاطع مع المستوي الاستوائي من الجنوب إلى الشمال وأعلى من $\pi/2$ إذا كان الساتل موجهاً نحو الغرب عندما يتقاطع مع المستوي الاستوائي من الجنوب إلى الشمال

Ω_s: المسافة الزاوية (rad) على امتداد المستوي الاستوائي من المرجع صفر إلى موقع العقدة الصاعدة أي التقاطع حيث يتقاطع مستوي الساتل مع المستوي الاستوائي من الجنوب إلى الشمال

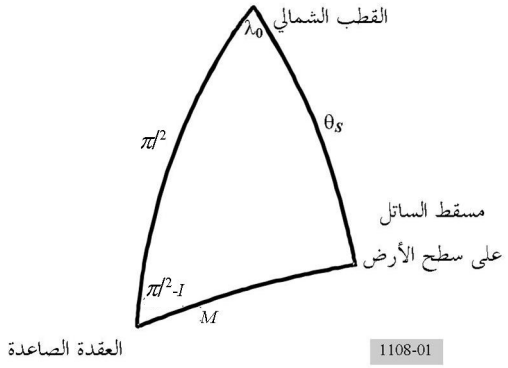
M: متوسط الشذوذ (rad) أي القوس الزاوي في المستوي المداري الساتلي الذي يقاس من العقدة الصاعدة إلى موقع الساتل.

ويمكن تحديد هذه الإحداثيات بالهندسة الكروية (انظر الشكل 1). وينتج بتطبيق قانون جيب التمام على القوس θ_s ما يلي: $\cos \theta_s = \sin M \sin I$. بما أن θ قد تحدد في الفاصل $(0, \pi)$:

$$\theta_s = \arccos (\sin M \sin I) \tag{1}$$

الشكل 1

المثلث الكروي للساتل في الإطار الثابت



وبصورة مماثلة، ينتج إذا طبق قانون جيب التمام على القوس M، $\cos M = \sin \theta_s \cos \lambda_0$. وتعرض المعادلة (2) قيم λ_0 من أجل المدى كله $(\theta, 2\pi)$.

$$\lambda_0 = \begin{cases} \arccos (\cos M / \sin \theta_s) & \text{for } \cos I \sin M \geq 0 \\ 2\pi - \arccos (\cos M / \sin \theta_s) & \text{for } \cos I \sin M < 0 \end{cases} \tag{2}$$

3 التحويل إلى إحداثيات أرضية

يمكن أن تتحول هذه الإحداثيات إلى إحداثيات أرضية مكافئة لا غير. ونظراً إلى أن الأرض تقوم بالدوران شرقاً عند 2π rad في 23 ساعة و56 دقيقة و4,09 ثانية، فإن خط الطول شرقاً لنقطة الساتل الفرعي λ_s يعادل:

$$\lambda_s = \lambda_0 + \Omega_s - \Delta_e E\, t \tag{3}$$

حيث:

$$\Delta E = 7{,}292115856 \times 1^{-5} \text{ rad/s}.$$

وفيما يخص الوصف الزمني الكامل لموقع مسقط ينبغي مراعاة موقع المدار وكذلك موقع الساتل على المدار. تجري العقدة الصاعدة زاوية مبادرة غرباً بمعدل $9.964\ (R_E/R_S)^{3,5} \cos I$ درجة في اليوم حيث R_E (=6378,14 km) هو نصف قطر الأرض عن الخط الاستوائي. ويتغير موقع العقدة الصاعدة إذاً مع الزمن التالي:

$$\Omega_s = \Omega_0 - \Delta_e L\, t$$

حيث:

$$\Delta L = -2{,}0183 \times 10^{-6} (R_E/R_s)^{3,5} \cos I$$

وتصبح المعادلة (3) إذاً:

$$\lambda_s = \lambda_0 + \Omega_0 - (\Delta L + \Delta E)\, t \tag{4}$$

يعطي الدور المداري (الأدوار المدارية) للساتل على مدارٍ دائري بنصف قطر Rs في الصيغة $T_s = 9{,}952004586 \times 10^{-3}\ R_s^{1,5}$ حيث R_s هو نصف قطر المدار الساتلي (km)، وينتج إذاً:

$$M = M_0 + \Delta M\, t \tag{5}$$

حيث $\Delta M = 2\pi / T_S$.

4 المسافة والسمت نسبة إلى محطة أرضية

يجب أولاً أن تتحول إحداثيات المحطة الأرضية من الإحداثيات القياسية لخط العرض وخط الطول إلى إحداثيات كروية. وإذا كان L_T هو خط العرض وLo_T هو خط الطول للمحطة الأرضية فيمكن الحصول على الزاويتين الموجبتين (بالدرجات)، والإحداثيات الكروية للمحطة (rad)، θ_T وλ_T من العلاقتين التاليتين:

$$\theta_T = \begin{cases} (\pi/180)\ (90 - L_T) & \text{بالنسبة إلى } L_T \text{ خط العرض شمالاً} \\ (\pi/180)\ (90 + L_T) & \text{بالنسبة إلى } L_T \text{ خط العرض جنوباً} \end{cases} \tag{6}$$

$$\lambda_T = \begin{cases} (\pi/180)\ (Lo_T) & \text{بالنسبة إلى } Lo_T \text{ خط الطول شرقاً} \\ (\pi/180)\ (360 - Lo_T) & \text{بالنسبة إلى } Lo_T \text{ خط الطول غرباً} \end{cases} \tag{7}$$

ويعادل الفرق في خط الطول من المحطة الأرضية إلى مسقط الساتل على سطح الأرض λ_D، تماماً الآتي:

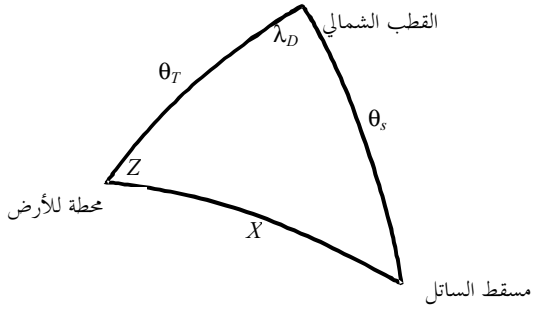
$$\lambda_D = \lambda_S - \lambda_T \tag{8}$$

تحديد المسافة X بين المحطة الأرضية ومسقط الساتل على سطح الأرض في زاوايا نصف قطرية للقوس، حسب قانون جيب التمام (انظر إلى الشكل 2) كالآتي:

$$X = \arccos\ (\cos\theta_T \cos\theta_s + \sin\theta_T \sin\theta_s \cos\lambda_D) \tag{9}$$

الشكل 2

المثلث الكروي الذي يمثل المسافة بين مسقط الساتل على سطح الأرض والمحطة الأرضية



1108-02

يكون مسقط الساتل على سطح الأرض شرق المحطة الأرضية، إذا كانت $\sin \lambda_D$ أعلى من الصفر وغربها إذا كانت $\sin \lambda_D$ أقل من الصفر. وتنتج إذاً زاوية السمت Z بين المحطة ومسقط الساتل على سطح الأرض بتطبيق قانون جيب التمام على القوس θ_s في الشكل 2 :

$$Z = \begin{cases} \arccos\left[\dfrac{\cos\theta_s - \cos\theta_T \cos X}{\sin\theta_T \sin X}\right] & \text{for } \sin\lambda_D \geq 0 \\ 2\pi - \arccos\left[\dfrac{\cos\theta_s - \cos\theta_T \cos X}{\sin\theta_T \sin X}\right] & \text{for } \sin\lambda_D < 0 \end{cases} \tag{10}$$

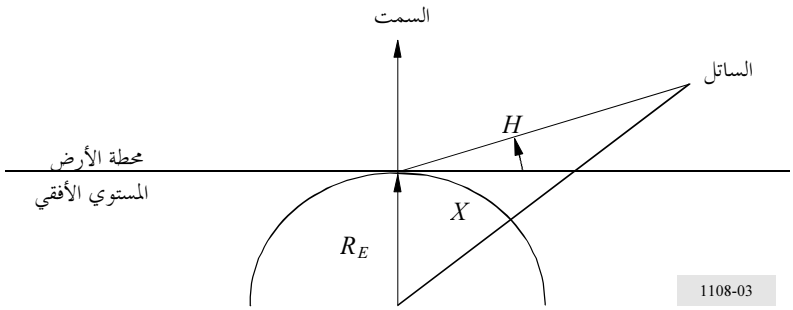
5 زاوية ارتفاع الساتل ومسافته الزاوية نسبة إلى الحزمة الرئيسية

يمكن الحصول على زاوية الارتفاع H للساتل فوق أفق المحطة الأرضية (بافتراض أن زاوية الأفق تعادل 0 درجة) بالرجوع إلى الشكل 3:

$$H = \arctan\left[\frac{\cos X - R_E / R_s}{\sin X}\right] \tag{11}$$

الشكل 3

مستو يضم مركز الأرض والمحطة الأرضية والساتل

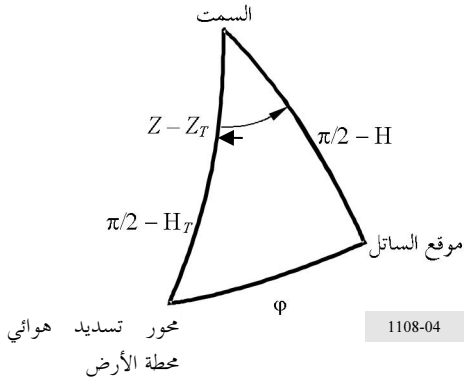


يفترض أن هوائي الاستقبال للمحطة الأرضية مسدد في اتجاه السمت Z_T مع زاوية ارتفاع تبلغ H_T rad فوق المستوي الأفقي. ويمكن حساب المسافة الزاوية φ بين الحزمة الرئيسية لهوائي المحطة الأرضية والساتل باستعمال نظام الإحداثيات الكروية المركز على المحطة الأرضية والذي يكون محوره في اتجاه السمت كما يوضح الشكل 4. وينتج بتطبيق قانون جيب التمام على المسافة الزاوية φ الجانبية ما يلي:

$$\varphi = \arccos\left(\sin H_T \sin H + \cos H_T \cos H \cos(Z - Z_T)\right) \tag{12}$$

الشكل 4

مثلث كروي يسمح بتحديد الزاوية بين
حزمة المحطة الأرضية والساتل



تسمح المعادلات من (1) إلى (12) بمحاكاة بيئة التداخل للمحطة الأرضية بوجود الساتل LEO. وتوجد إمكانية للتبسيط، مثلاً لا يؤخذ في الاعتبار عادة سوى التداخلات التي تسببها السواتل فوق الأفق. وتبعاً للمعادلة (11) يكون الساتل فوق الأفق من أجل:

$$\cos X > R_E / R_s = \gamma \qquad (13)$$

وإذا استعملت المعادلتان (13) و(9) يمكن صياغة تعبير لمدى من خطوط الطول التي تقع ضمن دائرة الرؤية هذه من أجل قيمة معينة لخط العرض لمسقط ساتل على سطح الأرض أو لمتوسط الشذوذ. ويجب إذاً تقييم المعادلات (10) و(11) و(12) فقط بموجب شروط يمكن تحديدها مسبقاً.

الملحق 2

محاكاة التداخلات التي تسببها السواتل LEO في مسارات المرحلات الراديوية التماثلية الثابتة

1 مقدمة

يصف هذا الملحق برنامج حاسوب ينفذ العلاقات الرياضية المعروضة في الملحق 1. ويمكن أن يستعمل هذا الملحق كأداة تحليل من أجل تفحص التداخلات في شبكات المرحل الراديوي التماثلية الخاضعة للمحاكاة والتي تتقاسم أجزاء الطيف مع السواتل LEO التي تمثل السواتل الممكن أن تشغل في النطاقات التي تقل عن 3 GHz. ويرد عرض لعدد من الأمثلة الخاصة بسيناريوهات التقاسم مع نتائجها.

2 وصف النموذج

يجري البرنامج بطريقة رياضية محاكاة مسير كوكبة LEO مع مراعاة دوران الأرض وآثار مبادرة المدار. ويتم حساب التداخلات التي تنجم عن كل حركة لساتل الكوكبة تبلغ 1/2 درجة في كل مستقبل للمرحل الراديوي ضمن تركيز لمسيرات المرحل الراديوي الموزعة عشوائياً. ويجمع البرنامج معطيات كثافة التداخلات لكل مسير من مسيرات المرحل الراديوي أثناء مدة المحاكاة. ثم يحوِّل هذه المعطيات إلى توزيع احتمالي مطابق لكل مسير من أجل إتاحة تحليل أداء كل مسير بصورة منفصلة. وتقارن نتائج أمثلة السناريوهات الوارد وصفها هنا مع متطلبات الأداء المرجعية الواردة في الشكل 1 من التوصية ITU-R SF.357. وتقترح التوصية ITU-R SF.357 معايير تقاسمٍ مرجعيةً في حالات التداخلات الخاصة بالأنظمة التماثلية فقط.

1.2 المداخل

تسمح المحاكاة للمشغل انتقاء المعلمات التالية:

- التردد،
- خطا العرض والطول لمركز مسيرات المرحلات الراديوية الثابتة (خطوط مستقيمة مكافئة)،
- كسب هوائي الاستقبال للمرحل الراديوي الثابت،
- عدد مسيرات المرحل الراديوي التي يجب تحليلها،
- ارتفاع مدار الساتل (نفسه لكل ساتل)،
- عدد المستويات المدارية الساتلية،
- طول العقدة الصاعدة لكل مستوٍ،
- ميل المدار (نفسه لكل ساتل)،
- عدد السواتل لكل مستوٍ (نفسه لكل مستوٍ)،
- سوية الكثافة pfd من أجل زوايا كبيرة ساتلية،
- سوية الكثافة pfd من أجل زوايا صغيرة ساتلية،
- مدة المحاكاة (بالأيام)،

يراعي النموذج الفرضيات التالية:

- *فيما يتعلق بنموذج نظام المرحل الراديوي الثابت:*

50 قفزة وطول مسير 2500 km ويتم انتقاء اتجاهات القفزات حسب طرائق مونت كارلو.

درجة حرارة الضوضاء للمستقبل = 750 1 K.

الضوضاء الحرارية في النطاق الأساسي البالغ 4 kHz هي 25 pW لكل قفزة.

خصائص هوائي الاستقبال حسب التوصية ITU-R F.699.

الخسارة (تغذية، تحويل) بمقدار 3 dB.

– *فيما يخص نموذج نظام السواتل:*

مدار دائري فقط.

كثافة تدفق القدرة محصورة في القيم التالية:

$$pfd_{low} \quad \text{for} \quad 0 \le \theta \le 5°$$

$$pfd = pfd_{low} + 0{,}05\,(pfd_{hi} - pfd_{low})\,(\theta - 5) \quad \text{for} \quad 5° < \theta \le 25°$$

$$pfd_{hi} \quad \text{for} \quad 25° < \theta \le 90°$$

2.2 الخرج

إن ناتج البرنامج هو ملف معطيات وحيد يسمى Leo.dat. وتتوفر معلومات لكل مسير مرحل راديوي ثابت خضع للمحاكاة. وتنظم المعلومات الناتجة بحيث تشير إلى المدة الزمنية لسويات التداخلات التي تحدث لكل مرحل راديوي. ويغطي البرنامج تداخلات تتراوح بين 1 و 100 000 pW مقسمة إلى 50 فاصلاً تتابعياً بعرض يبلغ 1 dB. ويضيف البرنامج بشكل تلقائي مدى التداخلات المناسب لكل مسير تأثر بتداخلات سببها الساتل لكل تغير مقداره 1/2 درجة من المدار.

3 نتائج المحاكاة

تحدد التوصية ITU-R SF.357 حدود التداخلات في فترتين طويلة وقصيرة الأجل، التي يتعرض لها نظام المرحل الراديوي بتشكيل زاوي في نطاقات يستعملها بالتقاسم مع الخدمة الثابتة الساتلية. وتقترح التوصية أيضاً شكل استكمال داخلي خطي لتحديد سويات التداخل المقبولة أثناء فترات زمنية محصورة بين الحدود المذكورة في الفترتين الطويلة والقصيرة الأجل. وبما أن البرنامج يحسب معطيات التداخل على شكل توزيع للاحتمالات، يمكن تقييم كل سيناريو للتقاسم عند التفحص بمقارنة نتائج البرنامج مع الحدود المنصوص عليها في التوصية ITU-R SF.357.

وترد حدود التداخلات المنصوص عليها في التوصية ITU-R SF.357 في الجزء الأيمن من الرسوم البيانية للمعلومات التي تظهر في الأشكال من 5 إلى 9 من هذا الملحق. وتمثل المنحنيات في الجزء الأيسر التداخلات التي تحدث لمسير المرحل الراديوي الثابت الأكثر تأثراً في سيناريو التقاسم LEO/الخدمة الثابتة.

مثلاً، يعرض الشكل 5 تحليلاً لآثار التداخلات التي تتعرض لها محطات الخدمة الثابتة العاملة عند 1,5 و2,0 و2,5 GHz، بينما تبقى ثابتة جميع المعلمات المتعلقة بالخدمة الثابتة وسواتل LEO. وهناك مجموعتان من السيناريوهات. تمثل مجموعة المنحنيات السفلية في الشكل آثار التداخلات التي يسببها ساتل وحيد LEO في الخدمة الثابتة. وتمثل المجموعة الثانية من المنحنيات آثار التداخلات المصاحبة لوجود عدد كاف من سواتل LEO في مستو مداري واحد بحيث يكون الساتل مرئياً دوماً. ويعد النظام الساتلي LEO الذي يكون فيه ساتل واحد مرئي دوماً المرجع الملائم لهذه المقارنة.

يوضح الشكل 6 آثار التغير في ارتفاع المدار وكثافة تدفق القدرة من أجل زاوية وصول صغيرة على التداخلات التي تحدث في الخدمة الثابتة والصادرة عن ساتل واحد LEO في حالة رؤية مستمرة. وفيما يتعلق بهذين السيناريوهين، يبين المنحنيان المشرطان (كثافة تدفق القدرة = 144 ($dB(W/m^2)$) (في نطاق 4 kHz من أجل جميع زوايا الوصول) أن ارتفاع المدار أي 800 km و 10 330 km ليس معلمة هامة وهو أمر متوقع.

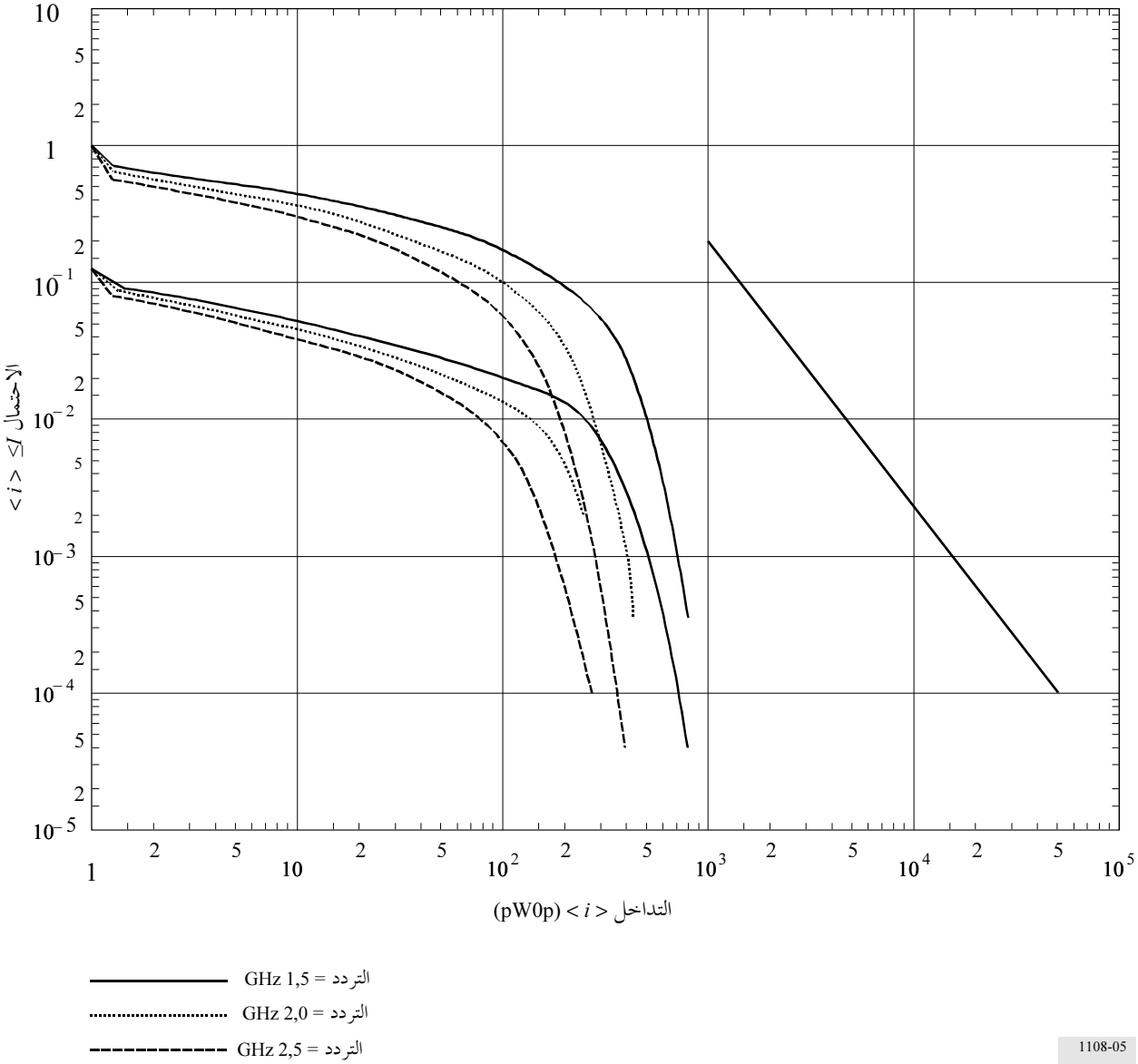
ويبين المنحني المتواصل في الشكل 6 أن استعمال السواتل LEO للحزم النقطية العاملة على هذين الارتفاعين، سوف يحد بشكل كبير من سوية التداخلات التي تتعرض لها الخدمة الثابتة.

يبين الشكل 7 نتائج دراسة آثار التداخلات التي تتعرض لها الخدمة الثابتة بدلالة خط العرض. وتمثل المنحنيات الثلاثة العلوية توزيع التداخلات التي تتعرض لها الخدمة الثابتة على ثلاثة خطوط عرض مختلفة، مع الافتراض نفسه أي وجود ساتل وحيد مرئي دوماً. ويبدو أن خط العرض لا يعد معلمة هامة فيما يتعلق بشكل التوزيعات التي تتشابه إلى حد معقول.

الشكل 5

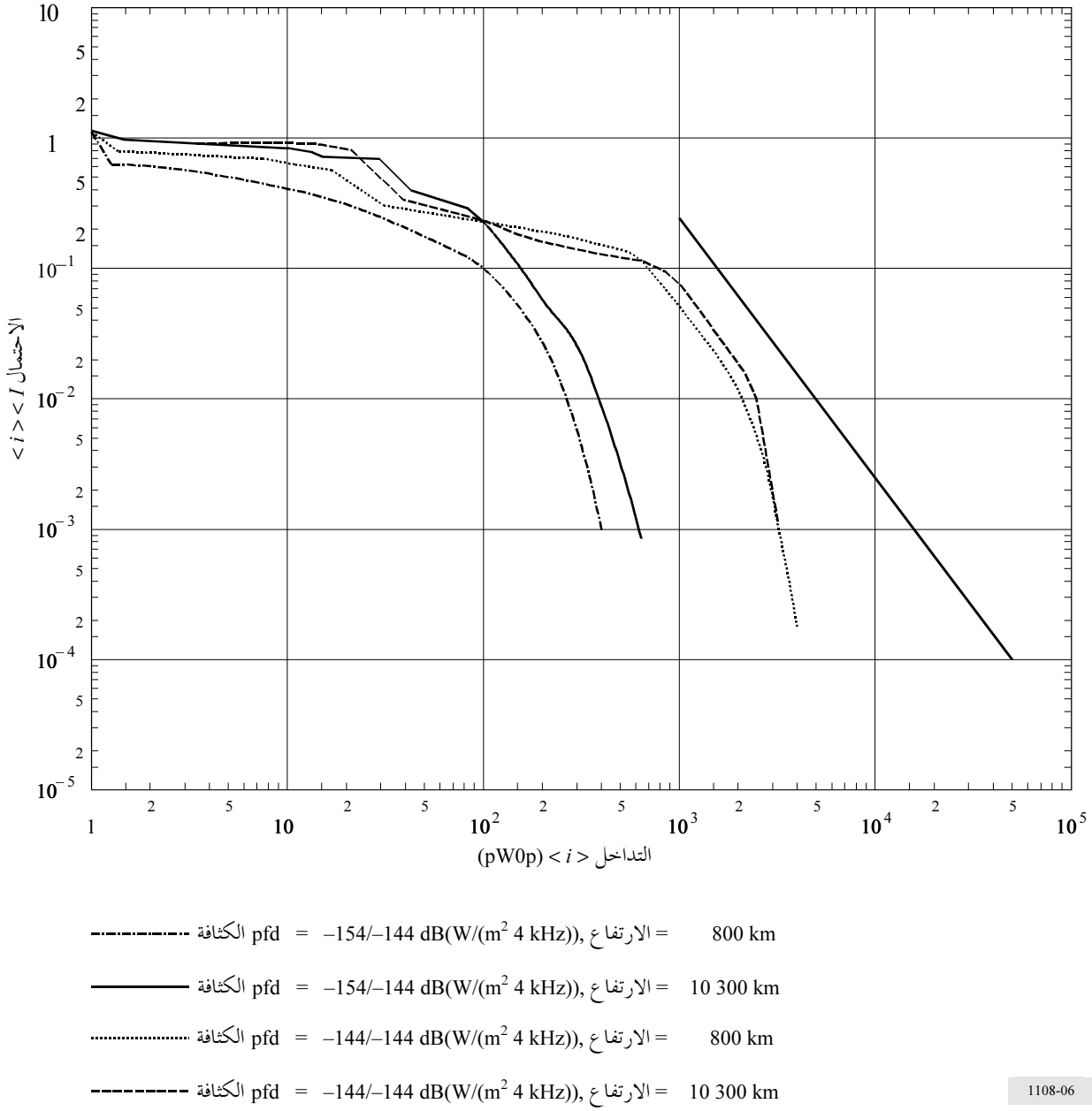
سويات التداخل في الخدمة الثابتة بدلالة الترددات

(km 800، 50 قفزة للحزم، 33 dB كسب الهوائي، 40° خط العرض، pfd = -144/-154 (dB(W/(m^2 · MHz))



الشكل 6

سويات التداخل بدلالة الارتفاع وكثافة تدفق القدرة
(50 قفزة للمسير، 40 درجة خط عرض، 2 GHz)

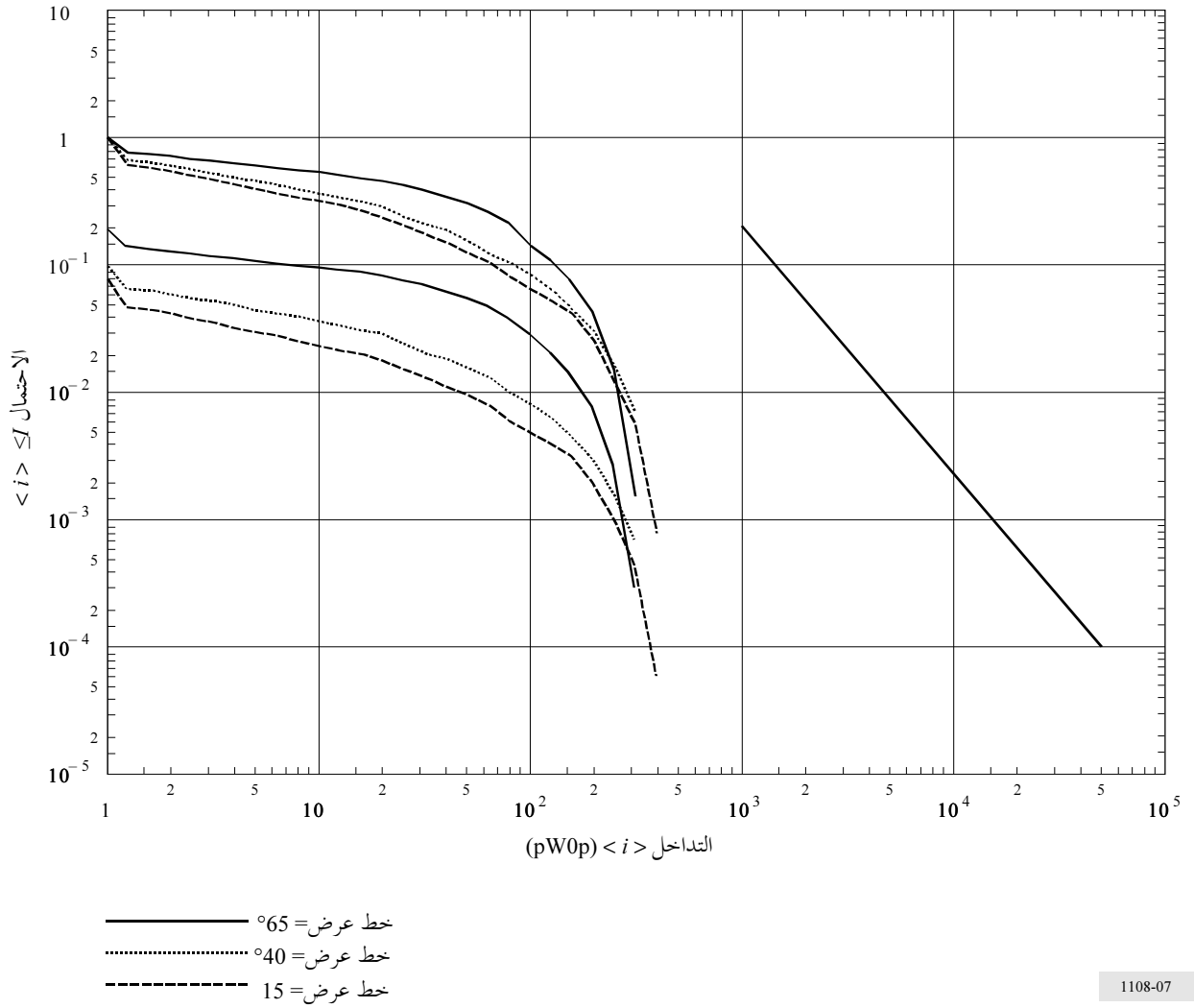


تمثل مجموعة المنحنيات الثلاثة السفلية في الشكل 7 توزيعات التداخلات في خطوط عرض مختلفة والصادرة عن سواتل أحادية في مدارات ذات زوايا شديدة الميل (80 درجة). وتجدر الملاحظة هنا بأنه إذا كان رسم المنحنيات مستكملاً خارجياً على محور الصادات حيث $X = 0$، فإن النتيجة يمكن أن تمثل تقريباً النسبة الزمنية التي تكون خلالها السواتل مرئية من أنظمة الخدمة الثابتة في خطوط العرض المذكورة. غير أن عكس هذا الرقم يمكن أن يقابل تقريباً عدد السواتل اللازمة لكي يكون ساتل وحيد مرئياً باستمرار. ويترتب على إجراء دراسة دقيقة لرسم المنحنيات في الشكل 7 أنه ينبغي وجود عدد قليل من السواتل للإضاءة المستمرة الخاصة بالأنظمة الموجودة في خطوط عرض مرتفعة، ويبدو أن التوزيع المطابق للمرحلات الراديوية الواقعة في خط عرض 65 درجة يتقاطع مع محور الصادات في نقطة أعلى بكثير.

الشكل 7

التداخلات *(i)* pW في عرض النطاق 4 kHz

سويات التداخل في الخدمة الثابتة بدلالة خط العرض
(50 قفزة، كسب الهوائي 33 dB، pfd = –154/–144 (dB(W/(m^2.4 kHz)، 2 GHz)



ويمكن التحقق من هذه الملاحظة بديهياً إذ يلاحظ أنه في كل مدار لنظام سواتل واقعة في مدارات شديدة الميل، يكون كل ساتل في المستوي مرئياً لفترة زمنية من المواقع الأرضية في خطوط عرض أكثر في الشمال أو في الجنوب، بينما يمكن للمحطات الأرضية الموجودة في خطوط عرض متوسطة أو منخفضة ألا تكون مرئية من أي جزء في مدارات معينة. ويبدو أن السواتل LEO المستمثلة لخدمة خطوط العرض المتوسطة والمنخفضة يمكن أن تسبب مزيداً من التداخلات للأنظمة الأرضية الواقعة في خطوط عرض مرتفعة، إذ إن نسبة كبيرة من السواتل في المدارات تكون مرئية من مواقع أرضية موجودة في خطوط عرض مرتفعة.

أخيراً، يوضح الشكلان 8 و9 آثار التداخلات التي تحدث للخدمة الثابتة والصادرة عن كوكبات السواتل التي يحتمل أن تشكل أنظمة تشغيل حقيقية. ويجهز كلا النظامين بحيث تكون السواتل من 3 إلى 6 مرئية باستمرار من موقع الأرض الذي تؤمن خدمته. ويخص الشكل 8 حالة كوكبة ساتلية تضم 6 مستويات مدارية دائرية و11 ساتلاً لكل مستوٍ. وتكون زاوية

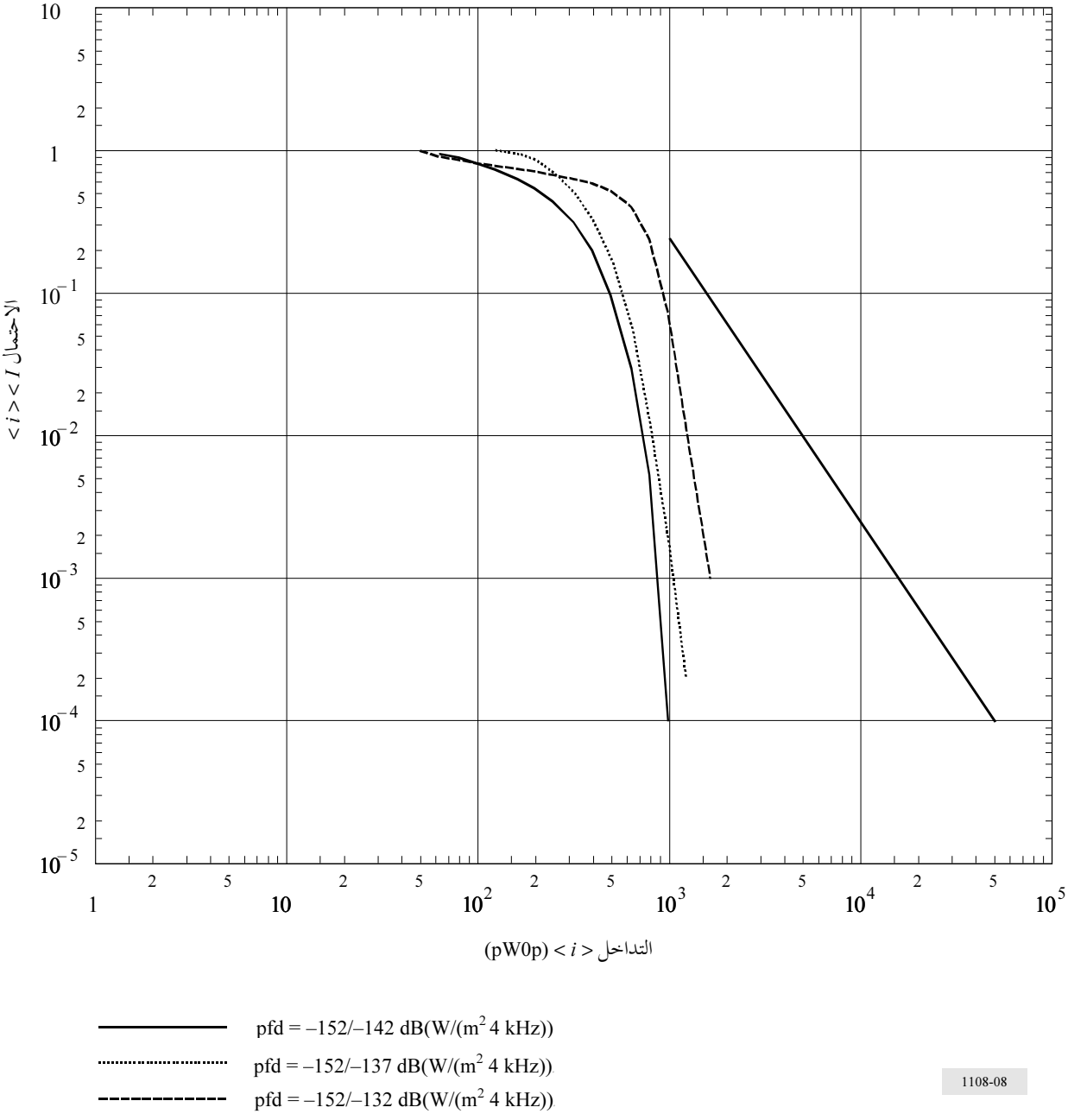
الميل واحدة (5,86° درجة) والارتفاع الساتلي نفسه (780 km) لجميع المستويات. ويبين الشكل 9 توزيع التداخلات التي يمكن أن تحدثها كوكبة تتألف من 12 ساتلاً تعمل على ارتفاع 370 10 km. وتوزع السواتل على 3 مستويات مدارية منفصلة بمقدار 120 درجة مع زاوية ميل تبلغ 56 درجة، ويشمل كل مستو 4 سواتل.

الشكل 8

التداخلات *(i)* pW في عرض النطاق 4 kHz

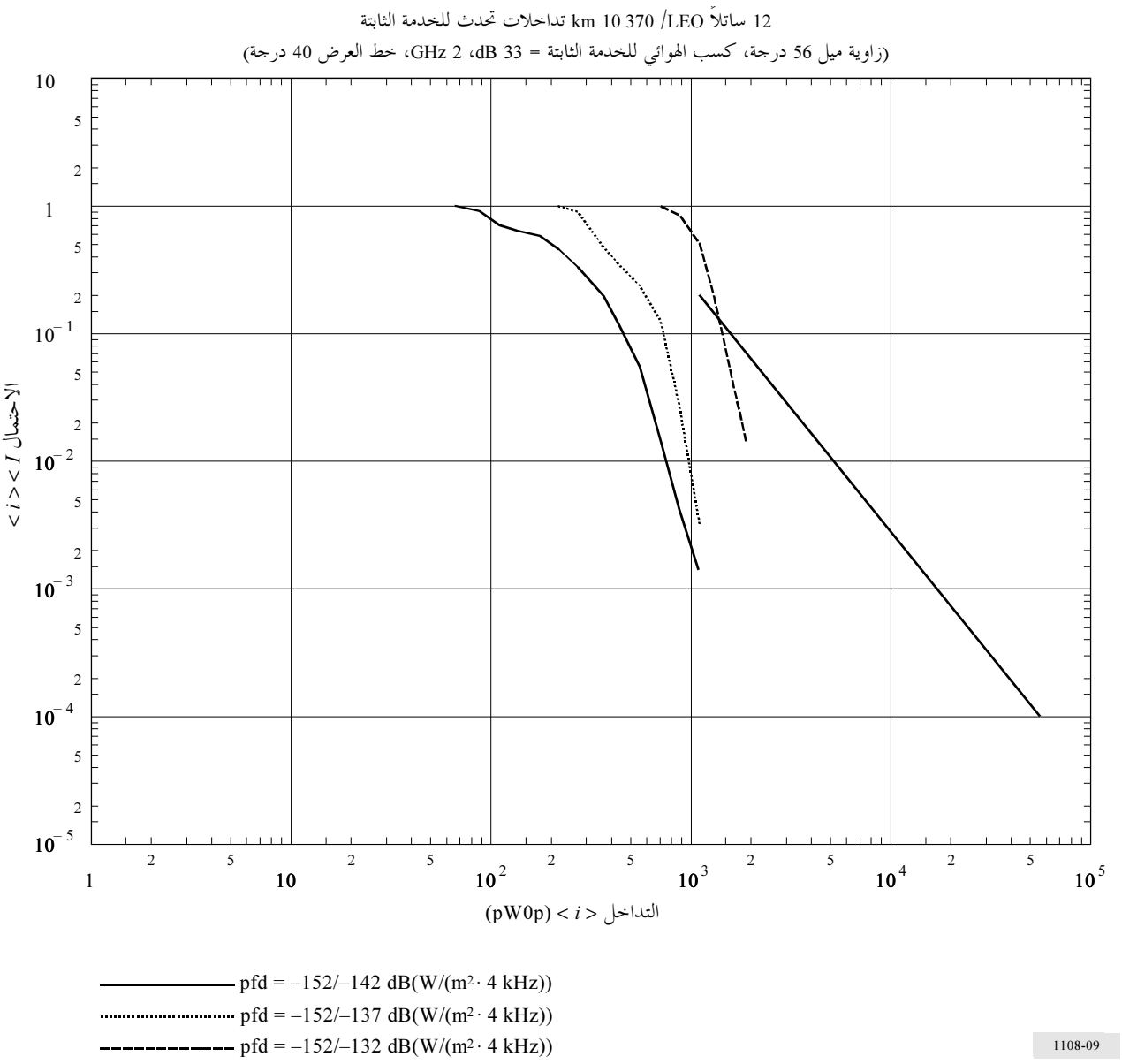
66 ساتلاً LEO/780 km تداخلات تحدث في الخدمة الثابتة

(زاوية ميل 86,5 درجة، كسب الهوائي للخدمة الثابتة = 33 dB، 2 GHz، خط العرض 40 درجة)



الشكل 9

التداخلات *(i)* pW في عرض النطاق 4 kHz



4 خاتمة

نظراً إلى المعلمة الزمنية التي ينبغي مراعاتها في حالة الساتل LEO، سيصبح تحليل التقاسم أكثر صعوبة بكثير وسيختلف في نقاط هامة عن التحليل الذي أجري على السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ولا توجد حالياً أي طريقة كاملة تسمح بتحديد شروط الحماية للخدمة الثابتة في بيئة السواتل LEO. وتظهر حقيقة ذلك خصوصاً بالنسبة إلى التقاسم مع أنظمة المرحلات الراديوية الرقمية الثابتة. وتحدد التوصية ITU-R SF 357 معياراً يمكن أن يستعمل في وضع حدود كثافة تدفق القدرة من أجل التقاسم مع المرحلات الراديوية الرقمية الثابتة. ومع ذلك، نظراً إلى أن التوصية ITU-R SF.357 تهدف إلى

تحديد شروط التقاسم مع السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض، فمن المناسب بحثها من جديد للنظر في التقاسم مع الشبكات الساتلية LEO.

إذا افترضت صلاحية التوصية ITU-R SF.357، قد يظهر أنه فيما يخص الحالات التي لا يكون فيها سوى عدد محدود من السواتل LEO مرئياً من الخدمة الثابتة، فإن المرحلات الراديوية الرقمية الثابتة يمكن أن تتقاسم نطاقات التردد مع أنظمة LEO شريطة التحكم بسويات كثافة تدفق القدرة المشعة في زوايا وصول صغيرة. ويبدو أيضاً أنه من أجل زوايا وصول كبيرة يمكن لحدود كثافة تدفق القدرة المشعة الصادرة عن الأنظمة LEO أن تتجاوز السويات الموضوعة حالياً من أجل أنظمة السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض. ويلزم إجراء دراسات إضافية وقد اقترح تشجيع التطور واستعمال أدوات المحاكاة لإجراء هذه الدراسات.

الملحق 3

تحديد آثار الإرسالات الصادرة عن محطات فضائية غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض في مستقبلات موجات صغرية رقمية للخدمة الثابتة

1 مقدمة

بغية إعداد معايير لتقاسم النطاقات بين الخدمة الثابتة والخدمات الفضائية التي تستعمل سواتل LEO، يجب معرفة الآثار التي تحدثها إرسالات هذه السواتل في نوعية أداء المستقبلات الرقمية الأرضية. ويقترح هذا الملحق طريقة لتقييم هذه الآثار بمساعدة المحاكاة بالحاسوب التي تسمح بإعداد إحصائيات عن كثافة التداخلات التي يسببها في مكان معين هوائي الاستقبال المسدد نحو أي اتجاه يشكل جزءاً من مجموعة الاتجاهات. وتستعمل هذه المحاكاة المعادلات المتعلقة بالمدار الواردة في الملحق 1 وتسمح إما بساتل وحيد أو بكوكبة ساتلية منتظمة للسواتل. وجرى تحديد كميتين معينتين هما:

- النسبة المئوية الزمنية التي تتجاوز فيها كثافة التداخل سوية معينة؛
- الزيادة المتعلقة باحتمال عدم الإيفاء بمعيار نوعية الأداء.

وترد عناصر المحاكاة بالتفصيل في الفقرتين 2 و3 من هذا الملحق، وترد عبارات انحطاط نوعية الأداء في الفقرة 4، بينما يشار في الفقرة 5 إلى بعض النتائج النموذجية المفيدة.

2 المحاكاة بالنماذج الإحصائية

تسمح المحاكاة بإعداد إحصاءات عن التداخلات من خلال دراسة التداخلات الصادرة عن كل موقع N_a من المواقع المتباعدة بعضها عن بعض بالتساوي في المدار. وبغية الحصول على مجموع التداخلات تبحث المدارات N_0 مع العقد الصاعدة الخاصة بها والمتباعدة بالتساوي على خط الاستواء. قد لا تكون هذه الطريقة في الحقيقة نموذجية في حالات عديدة لكنها أكثر ملاءمة

أو أقل تقييداً فيما يخص التقاسم، لأنها هي التي تنشر التداخلات على سطح الأرض. وينبغي في دراسات لاحقة بحث نتائج هذه الافتراضات مع فرضية المدارات الدائرية.

وواضح أن هناك موضعين محتملين للتداخلات $N_a \times N_0$ من أجل ساتل واحد. ويكون الاحتمال المصاحب لأي منهما نتيجة ذلك هو $1/(N_a \times N_0)$.

وتعد حالة السواتل المتعددة التي تشكل كوكبة منتظمة سهلة الدراسة أيضاً. فالكوكبة المنتظمة تتألف من مجموعة سواتل منتشرة على مجموعة مستويات مدارية متطابقة ومتباعدة فيما بينها بشكل منتظم. ويشمل كل مستو منها نفس العدد من السواتل المتباعدة بصورة منتظمة فيما بينها على المدار. ويمكن الحصول على تغطية منتظمة أكثر وعلى تقاسم أقل تقييداً عندما تكون مجموعة السواتل ذات أطوار متساوية. أي أنه حين يوجد ساتل على مدار يتقاطع مع الاستوائي، فإن هناك ساتلاً على كل مستو من المستويات المدارية يتقاطع مع الاستوائي في الاتجاه نفسه.

وفيما يخص الكميات المحددة سابقاً، وإذا كان N_a هو مضاعف صحيح لعدد السواتل في كل مدار، N_{spo} وكان N_0 هو مضاعف صحيح لعدد المستويات المدارية N_{orb}، في الكوكبة، فإن عدد الحالات المنفردة للكوكبة هو $(N_0/N_{orb})(N_a/N_{spo})$.

3 تحديد التداخلات

يفترض أن الإرسالات الصادرة عن السواتل محدودة بالطريقة التقليدية: بسوية منخفضة لكثافة تدفق القدرة من أجل زوايا الارتفاع على الأرض أقل من الحد المنخفض وبكثافة تدفق قدرة أعلى لزوايا ارتفاع أعلى من الحد المرتفع، مع زيادة خطية بين هذين الحدين بدلالة زاوية الارتفاع. ويعبر عن كثافة تدفق القدرة هنا بالوحدة ((dB(W/m^2.MHz)).

وكسب الهوائي $G_R(\varphi)$ للمستقبل الأرضي هو ما نصت عليه التوصية ITU-R F.699 من أجل قيم كسب وقطر وتردد تمثل مداخل منفصلة. وتعطى المساحة الفعلية القابلة للتطبيق من أجل تحديد قدرة التداخلات المستقبلة التي تسببها كثافة تدفق القدرة في زاوية φ كالآتي:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R(\varphi)$$

حيث λ هو طول الموجة (m).

4 وضع نماذج لأثر التداخلات في الأنظمة الرقمية

يعبر غالباً عن احتمال انقطاع نظام رقمي بالشكل التالي:

$$P_0 = C \left[,10^{-DFM/10} + 10^{-TFM/10} + 10^{-(C/I - CNC)/10} \right] \quad (14)$$

حيث:

C: ثابت يتعلق بمعلمات المناخ والأرض والوصلات

DFM: هامش حماية من الخبو المشتت (dB)

TFM: هامش حماية من الخبو الذي تسببه الضوضاء الحرارية (dB)

C/I: نسبة كثافة الإشارة دون خبو إلى قيمة الضوضاء المكافئة لقدرة التداخلات (dB)

CNC: قيمة نسبة الموجة الحاملة/الضوضاء التي يراعى فيها معيار الأداء (dB).

تملك الأنظمة الرقمية الحديثة عادة هوامش حماية من الخبو المشتت أعلى من هوامش الحماية من الخبو الذي تسببه الضوضاء الحرارية وهي في تحسن. لذلك يحتمل لأسباب خاصة بالتداخلات ألا يراعى المصطلح الأول في المعادلة (14). وبينما يمكن أن تكون قدرة التداخلات المكافئة لضوضاء مسببة للتداخل محددة على مستقبل معين أقل من الكثافة المقيسة، يمكن لاعتبارات التقاسم العامة وخاصة عند وجود عدة مسببات للتداخل الافتراض الحذر بأن التداخلات لها أثر الضوضاء الحرارية نفسه مع نفس القدرة. ونظراً إلى أن الفرق بالديسيبلات بين نسبة الموجة الحاملة/الضوضاء دون الخبو ونسبة الموجة الحاملة/الضوضاء الحرجة (CNC) هو هامش الحماية من الخبو الذي تسببه الضوضاء الحرارية، (TFM)، فإن الزيادة النسبية P_0 أي احتمال تجاوز نوعية الأداء تعادل نسبة القدرة المسببة للتداخل I على قدرة الضوضاء N_T حيث تقاس القدرتان في الكاشف بالواط W أو بالواط لكل وحدة عرض نطاق. وهكذا، تساوي هذه الزيادة النسبة I/N_T لكل قدرة تداخلات ثابتة I. ولتبسيط العرض، تعين هذه الزيادة P_0 كانحطاط الأداء أو أيضاً كانحطاط بنسبة مئوية في الأداء.

وإذا أنتج مسبب للتداخل قدرة تداخل I_i خلال جزء من الشهر f_i و لم يظهر أثناء الأجزاء المتبقية من الشهر، فإن الانحطاط النسبي للأداء الإضافي الذي يعزى إلى مسبب التداخل يمكن أن يعطى كالآتي:

$$\Delta P_{0,i} = \frac{I_i \ f_i}{N_T}$$

يعطى الانحطاط النسبي للأداء (FDP) الذي يعزى إلى مجموعة أسباب بالمعادلة التالية حيث i تقابل الجزء من الزمن الذي كانت خلاله قدرة التداخلات هي I_i:

$$FDP = \sum \Delta P_{0,i} = \sum \frac{I_i \ f_i}{N_T} \tag{15}$$

حيث يغطي المجموع أسباب التداخل كلها. ويشكل المجموع على الصيغة $I_i f_i$ المكافئ التقديري للحظة الأولى لتوزيع احتمال القدرة المسببة للتداخل في المستقبل وإن f_i هي الاحتمال الذي تأخذ فيه القدرة المسببة للتداخل قيمة تتراوح ما بين I_i و$I_i + \Delta I_i$.

ويمكن أيضاً أن يعبر عن الانحطاط النسبي للأداء (FDP) في شكل خسارة في هامش الحماية من الخبو (FML) (dB) حيث:

$$FML = 10 \log (1 + FDP) \tag{16}$$

بينما تعطى السوية المتوسطة لتداخل أعلى من الضوضاء الحرارية بوحدات dB بالصيغة 10 log *FDP*.

بالرغم من أن المعادلة (14) قد استعملت بالدرجة الأولى لتحديد تكرار الانقطاع (احتمال أن يتجاوز معدل الخطأ في البتات للمستقبل 1×10^{-3}، لكن معظم قياسات نوعية أداء الأنظمة الراديوية الرقمية تتطابق مع الانقطاعات. ويمكن إذاً أن تستعمل المعادلة (15) كقياس للانحطاط النسبي للأداء . بينما تعطي المعادلتان (15) و(16) الحدود المعقولة لانحطاط الأداء من أجل سويات تداخل معتدلة وربما تقلل من شأن الآثار الناجمة عن سويات تداخل أعلى مثلاً بمقدار 20 dB من الضوضاء الحرارية، لأن آثار التشتت التي تتضمنها العبارة الأولى في المعادلة (14) بدأت تصبح هامة ولأن ظاهرة الخبو فيما يخص زاوية ورود منخفض، يخشى ألا تتبع قانون رايلي الضمني في المعادلة (14).

ويفضل من أجل تقييم الآثار الناتجة عن سويات التداخل العالية، أن تبحث على حدة المعايير المتعلقة بالتداخل قصير المدى أو أن يدرس التوزيع التراكمي لنسبة القدرة للإشارة المستقبلة إلى مجموع قدرتي الضوضاء والتداخل (انظر الملحق 6) وتعمل لجنة الدراسات 9 للاتصالات الراديوية حالياً على إعداد طريقة تكون أكثر ملاءمة.

والمسألة الأخرى المتعلقة بسويات التداخل العالية تكمن في معرفة ما إذا كانت هذه السويات عالية بشكل كافٍ بأن تتسبب بانحطاط الأداء في أخطاء الوصلة عند الافتقار إلى الخبو. وربما يلزم مراعاة معايير نوعية الأداء مثل معدلات الخطأ في البتات المتبقي (التوصية ITU-R F.634) أو معايير أخرى مطلوبة للإيفاء بأحكام التوصية (ITU-T G.826). ويمكن التغاضي عن آثار أسباب التداخل هذه فقط عندما تكون نادرة الحدوث بما يكفي أو لا تحدث على الإطلاق.

إن المعادلة (15) تتكيف من حيث الشكل تماماً مع الدراسات بشأن التداخلات لأنها تسمح بمعالجة الكواكب الساتلية الكبرى فقط سواء كانت موحدة أم لا. ويسهل إضافة إلى ذلك تقييم آثار الكواكب المتعددة إذ يمكن إضافة الانحطاط النسبي للأداء (FDP) الناتج عن كل كوكبة منها للحصول على الانحطاط FDP الكلي أو المركب.

5 وصف طريقة بديلة لحساب الانحطاط FDP

لنفترض أن نوعية الأداء لمرحل راديوي رقمي يعمل على قفزة ما، تتعلق بتكرار الخبو العميق الذي يسببه الانتشار على مسيرات متعددة في هذه القفزة. هنا تكمن الفرضية المعقولة فيما يخص أنظمة مجهزة بمسويات عرضانية تكييفية وفعالة أو أنظمة ذات قفزة ضيقة مثل الأنظمة التي تعمل بترددات تقل عن 3 GHz.

إذا كانت C هي سوية الإشارة المستقبلة عند غياب الخبو وN_T هي سوية الضوضاء الحرارية وk هي القيمة الدنيا للنسبة C/N_T اللازمة للإيفاء بشرط نوعية الأداء المرجعي، فإن ظروف مراعاة الشرط اللازم لن تستوفى حين تكون:

$$\frac{rC}{N_T} < k \tag{17}$$

حيث:

r: عامل الخبو

$= 10^{-A/10}$

A: عمق الخبو (dB).

وإذا وجد تداخل له تقريباً صفة ضوضاء غوسية مع متوسط القدرة I في الكاشف، فإن صفة الأداء المرجعي لن تستوفى حين يكون:

$$\frac{rC}{N_T + I} < k \tag{18}$$

وواضح أن المعيار لم يستوف حين يكون:

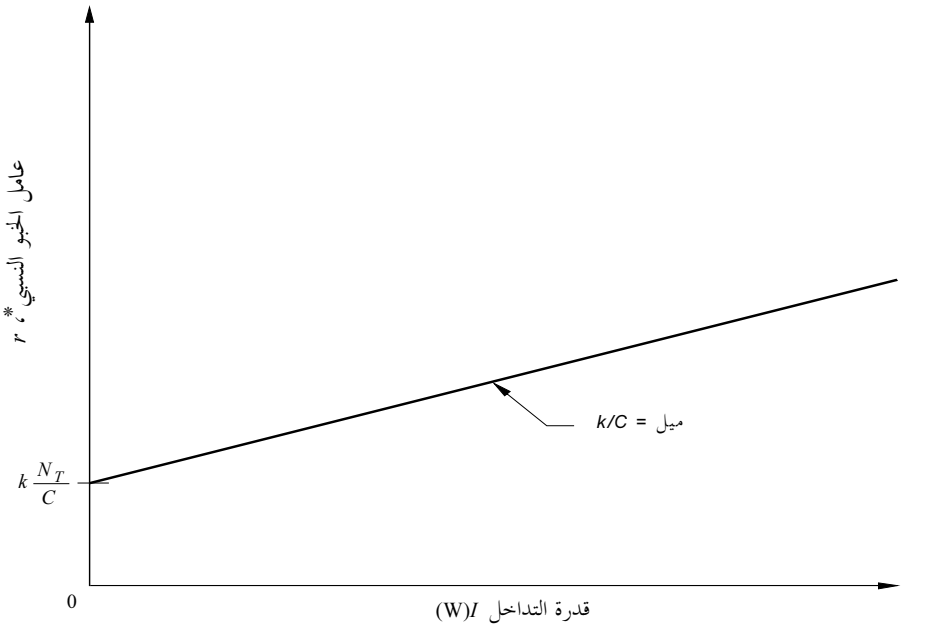
$$r \le k\left(\frac{N_T}{C} + \frac{I}{C}\right) \tag{19}$$

يشير الشكل 10 إلى حد المنطقة حيث تم التحقق تماماً من عدم التكافؤ في المعادلة (18). وإذا كانت القدرة المسببة للتداخل غير ثابتة، فإن مراعاة هدف الأداء المرجعي تتطلب أن يكون احتمال التكرار الآني للخبو والتداخل صغيراً بقدر كافٍ (قيم أقل من خط الفصل في الشكل 10). وبدقة أكثر، إذا كانت $p_r(r)$ هي دالة كثافة الاحتمال المتعلقة بعامل الخبو، و$p_I(I)$ هي دالة كثافة الاحتمال المتعلقة بقدرة التداخل، وبفرض أن هذه العمليات مستقلة، فإن الجزء من الشهر P_{0i} الذي لا يستوفى فيه معيار النوعية الحرج يعطى كالآتي:

$$P_{0i} = \int_0^{\infty} \mathrm{d}I \int_0^{(k/C)(N_T + I)} p_r(r)\, p_I(I)\, \mathrm{d}r \tag{20}$$

الشكل 10

حد المنطقة التي يستوفى فيها معيار النوعية



* نسبة القدرة مع الخبو إلى القدرة بدون الخبو.

1108-10

وفيما يخص معظم الحالات الهامة، تعتمد قيمة المعادلة (20) على تكرار الخبو العميق الذي يعزى إلى الانتشار على مسيرات متعددة ويمكن أن يبسط تقييم هذه القيمة. وتشير التوصية ITU-R P.530 إلى أن احتمال كون عامل الخبو في نظام الخبو العميق، أقل من r هو متناسب مع r. مما يعني أن دالة كثافة الاحتمال المرتبطة بعامل الخبو ينبغي أن تكون ثابتة.

$$p_r(r) = \beta \qquad r << 1 \tag{21}$$

حيث β هو ثابت التناسب الذي يمكن وصفه بعامل تكرار الخبو، وهكذا فإن الجزء من الشهر الذي لا يستوفى خلاله معيار الأداء الحاسم يتحدد باستعمال المعادلة (21) في المعادلة (20).

$$P_{0i} = \frac{\beta\, k}{C}(N_T + I_{av}) \tag{22}$$

وحيث I_{av} هو متوسط قدرة التداخل، أي

$$I_{av} = \int_0^\infty I p_I(I)\, dI \tag{23}$$

إن الانحطاط FDP هو الزيادة النسبية للنسبة المئوية من الزمن التي لا يستوفى فيها معيار الأداء المرجعي بسبب وجود التداخل. وإذا كانت قيمة المعادلة (22) هي P_{0o} عند غياب التداخل فيمكن أن يعبر عن الانحطاط FDP: $FDP = (P_{0i}/P_{0o}) - 1$ أي:

$$FDP = \frac{I_{av}}{N_T} \tag{24}$$

أي ما يعادل المعادلة (15)

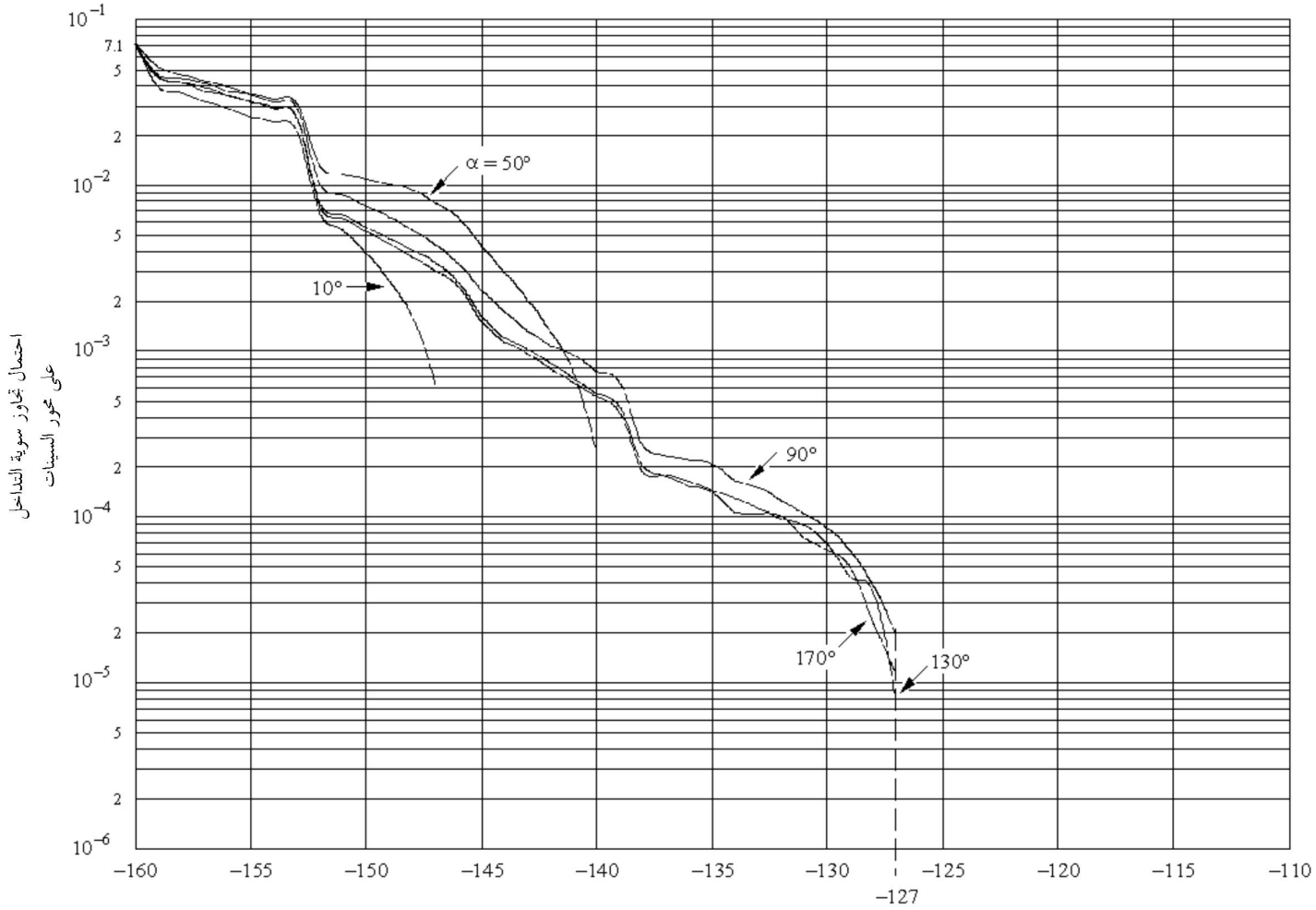
6 نتائج عينات للمحاكاة

تعرض هذه الفقرة بعض النتائج لعدد معين من المسارات الآلية الاختبارية للمحاكاة. والهدف هو تحديد بعض الاتجاهات الأساسية والمناطق التي تثير مشكلة. ويفترض، إلا إذا تحدد عكس ذلك، أن المحطة الأرضية تقع على خط عرض 40 درجة شمالاً وتشغل في GHz 2,000 مع هوائي يبلغ قطره m 2,76 وكسب مقداره dB 33 وأن الخسارات التي تعزى إلى إرشاد الموجات هي dB 2. وطبقاً للتوصية ITU-R F.759 يتحدد عامل الضوضاء المستقبل عند dB 4. وتطابق الإرسالات الساتلية حد كثافة تدفق القدرة –130 (dB(W/(m^2. MHz)) من أجل زوايا ارتفاع مقدارها 5 درجات أو أقل وترتفع بمقدار dB 0,5 لكل درجة ما بين 5 درجات و25 درجة، وإذا تم تجاوز هذه القيمة فهي تساوي الحد –120 (dB(W/(m^2. MHz)). أما التداخلات التي تعزى إلى السواتل فهي مختبرة بتزايد يبلغ 0,5 درجة حول المدار من أجل 720 مداراً متباعداً بصورة منتظمة حول خط الاستواء.

ويبين الشكل 11 التوزيع التراكمي لقدرة التداخل التي تستقبلها هوائيات ذات سموت مختلفة والصادرة عن ساتل في مدار يتحدد بارتفاع مقداره km 800 وبزاوية ميل تبلغ 50 درجة. ونظراً إلى ميل المدار المحدود، لا يمكن أبداً مشاهدة الساتل بجوار الأفق في الشمال. وهكذا لا تستقبل الهوائيات المسددة ضمن 50 درجة من القطب الشمالي أبداً تداخلاً في محور التسديد ويكون توزيعها مبتوراً. نتيجة لذلك، يتوافق الاحتمال الأكبر للرصد في نقطة التسديد عند زوايا سمت أكبر إلى حد ما. وتظهر هذه النتيجة بوضوح في الشكل 12 في منحني الانحطاط بنسبة مئوية من نوعية الأداء وذلك فيما يخص زوايا متعددة مطابقة لهذه الحالة.

الشكل 11

التوزيع التراكمي للقدرة المسببة للتداخل في محطة أرضية تقع على خط عرض 40° نسبة إلى ساتل في مدار زاوية ميله 50° وارتفاعه 800 km

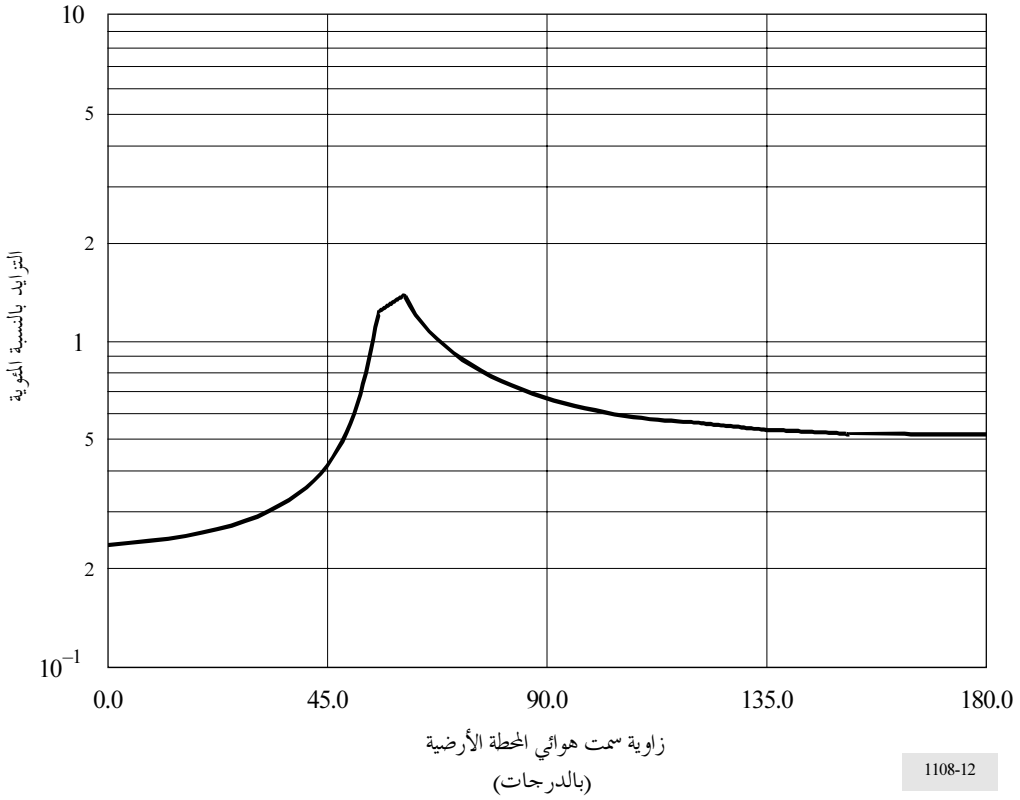


1108-11

α: زاوية سمت التسديد من القطب الشمالي

الشكل 12

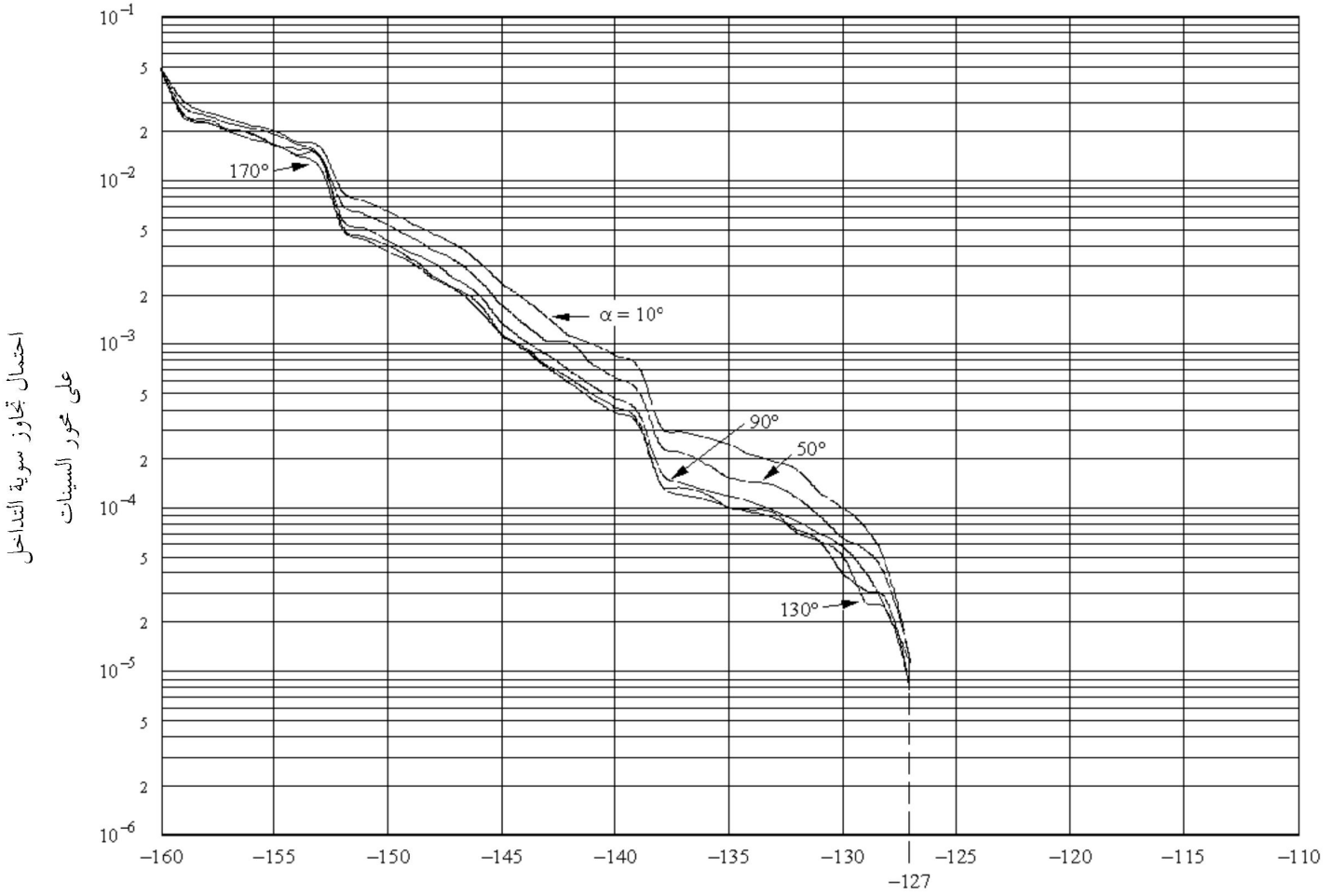
الانحطاط بالنسبة المئوية لنوعية الأداء من أجل الحالة الواردة في الشكل 11



ويبين الشكل 13 التوزيع التراكمي لقدرة التداخل المستقبلة من أجل نفس الوضع باستثناء الميل المداري الذي يبلغ هنا 5,89°. وجلي أن أثر السمت هو أقل وضوحاً في هذه الحالة.

الشكل 13

التوزيع التراكمي للقدرة المسببة للتداخل في محطة أرضية تقع على خط عرض 40^{o} نسبة إلى ساتل في مدار زاوية ميله $89{,}5^{o}$ وارتفاعه 800 km

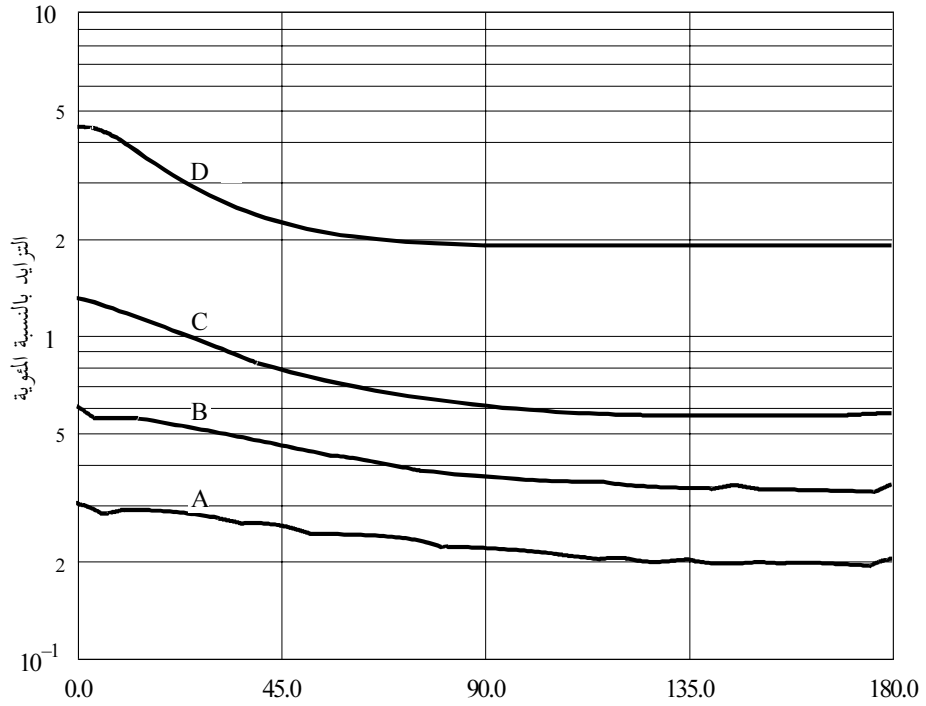


α: زاوية سمت التسديد من القطب الشمالي

يوضح الشكل 14 أثر ارتفاع الساتل من خلال منحنيات الانحطاط بالنسبة المئوية لنوعية الأداء بدلالة زاوية السمت. ويزداد خطياً انحطاط نوعية الأداء الذي يسببه الساتل مع ارتفاع المدار حتى 10 000 km تقريباً مثلما هو حال منطقة الأرض المرئية في أي لحظة من الساتل.

الشكل 14

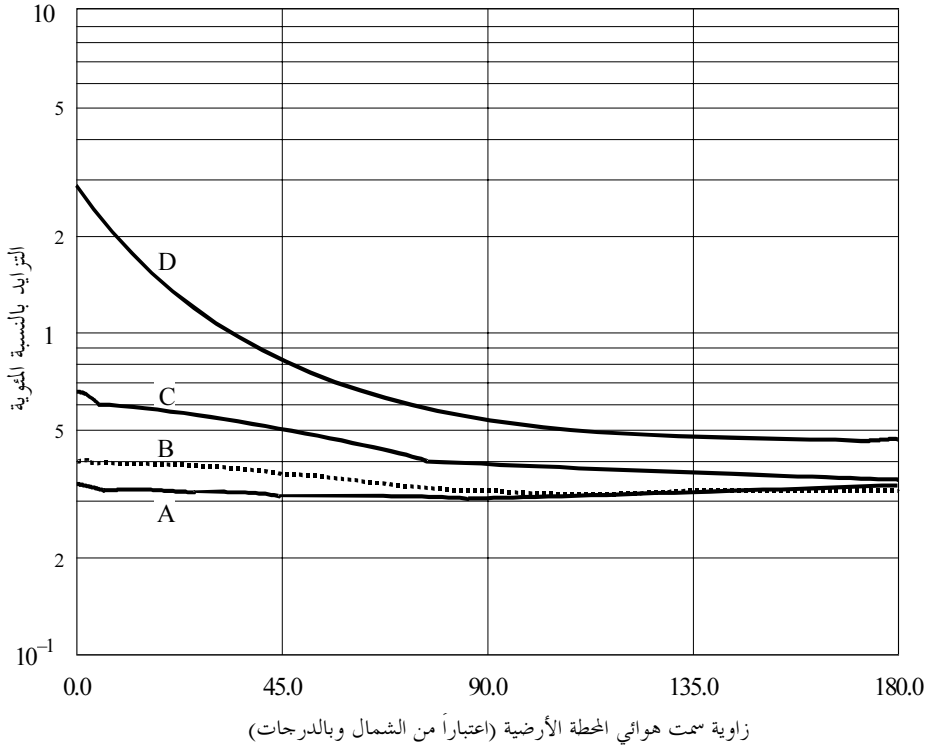
الانحطاط بالنسبة المئوية لنوعية الأداء لمحطة أرضية تقع على خط عرض 40 درجة وتخضع لتداخلات صادرة عن ساتل في مدار محدد بزاوية ميل 89,5° وارتفاعات مختلفة



ويوضح الشكل 15 أثر ارتفاع المحطة الأرضية في انحطاط نوعية الأداء، وحين لا يكون في هذا الأثر خطورة فهو يكتسب أهمية تزداد كلما تم الاقتراب من القطبين فيما يخص زوايا التسديد شبه القطبية.

الشكل 15

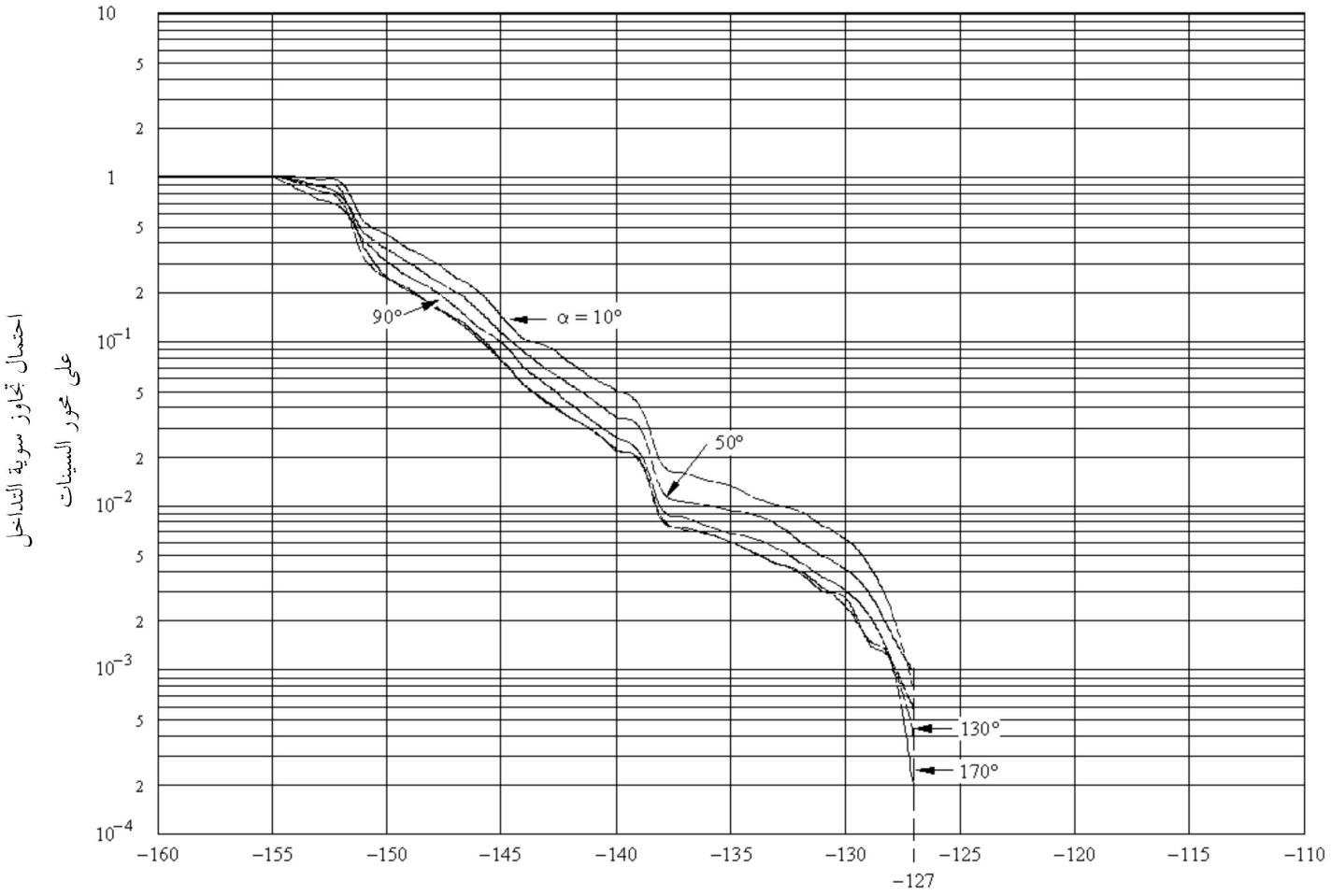
الانحطاط بالنسبة المئوية لنوعية الأداء لمحطة أرضية وخطوط عرض مختلفة وتخضع لتداخلات صادرة عن ساتل في مدار محدد بزاوية ميل 89,5 ° وارتفاع 800 km



يبين الشكلان 16 و17 أثر مركبة موحدة مكونة من 55 ساتلاً تعمل في نفس القناة كما لو أنها تستخدم النفاذ المتعدد بتقسيم شفري (CDMA). ويظهر عند المقارنة بين الشكلين 13 و16 أن توزيع التداخلات من أجل حالة ساتل واحد مشابه تماماً لحالات السواتل المتعددة. وتظهر هذه المقارنة جلية في الشكل 17 حيث يتبين أن الانحطاط في نوعية الأداء الذي يسببه 55 ساتلاً أسوأ بمقدار 55 مرة من الانحطاط الذي يسببه ساتل واحد.

الشكل 16

التوزيع التراكمي للتداخلات الناجمة عن كوكبة منتظمة مؤلفة من 55 ساتلاً على مدارات محددة بزاوية ميل قدرها $89,5^{o}$ وارتفاع 800 km في محطة أرض واقعة على خط عرض 40^{o}

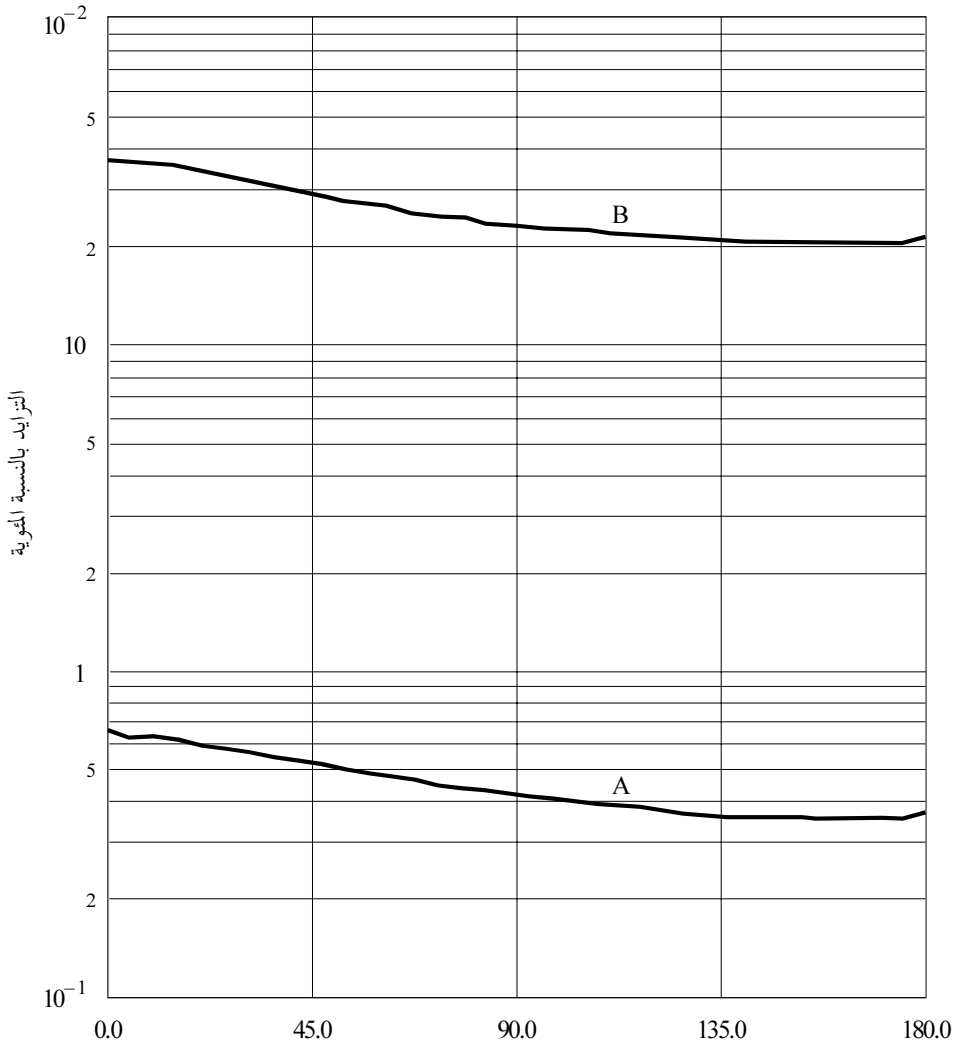


1108-16

α: زاوية سمت التسديد من القطب الشمالي

الشكل 17

**الانحطاط بالنسبة المئوية لنوعية الأداء لمحطة أرضية تقع على خط عرض 40°
وتتعرض لتداخلات صادرة عن ساتل واحد وكوكبة منتظمة مؤلفة من 55 ساتلاً
على مدارات محددة بزاوية ميل 89,5 ° وارتفاع 800 km**



7 استنتاجات مؤقتة

تبيّن أن انحطاط نوعية الأداء يتناسب مع عدد السواتل في كوكبة منتظمة. ويعبر عموماً عن هذا الانحطاط بأثر تراكمي لجميع السواتل التي تسبب تداخلات في نطاق مرور المستقبل.

وفيما يخص سواتل على مدارات غير متزامنة مع الأرض تستعمل نفس تغير كثافة تدفق القدرة بدلالة زاوية الارتفاع وتكون تغيرات الانحطاط FDP الذي تتعرض له مستقبلات الأرض الواقعة على ارتفاعات متوسطة محدودة تبعاً لما يلي:

- زاوية التسديد – تبعاً لعامل ثلاثي من أجل خطوط عرض تصل إلى 60 درجة وارتفاعات تصل إلى 800 km؛
- ارتفاع الساتل – زيادة خطية تقريباً مع الارتفاع؛
- خط عرض المحطة – زيادة تبلغ الضعف تقريباً من أجل خط عرض يتراوح ما بين 20 درجة و60 درجة.

يمكن أن تتغير هذه الاستنتاجات من أجل زيادات مختلفة لكثافة تدفق القدرة. ويمكن للانحطاط FDP الخاص بالمحطات الواقعة في خطوط عرض مرتفعة بدلالة زاوية السمت أن تتعرض لتغيير أكبر بكثير في حالة سواتل على مدارات شبه قطبية. ويمكن تيسير التقاسم باقتران زيادة كثافة تدفق القدرة أو حد الكثافة مع ارتفاع المدار وزاوية ميله. وتتطلب هذه الإمكانية المزيد من الدراسة.

وتعتمد هذه الاستنتاجات على استعمال المدارات شبه الدائرية غير المتزامنة مع الأرض، وفي الواقع فإن استخدام المدارات شديدة الإهليلجية يتطلب المزيد من المعلومات والدراسة إذ إن إحصاء التداخل بوجه خاص يخشى ألا يكون ثابتاً أثناء مراحل الشهر حيث يجب أن تراعى معايير نوعية الأداء. وتتطلب وسائل التكيف مع هذا التشغيل المزيد من الدراسة.

ويزيد استعمال المدارات المتزامنة مع الأرض من تغيير الانحطاط بالنسبة المئوية لنوعية الأداء نسبة إلى زاوية التسديد والمحطة الأرضية على السواء. وهنا تكمن أنماط الاعتبارات التي تشكل عادة جزءاً من إجراء التنسيق المفصل. وبما أنه قد يبدو من غير الممكن الشروع بمثل هذا التنسيق لكل محطة أرضية، فإن الحل البديل يكمن في تخفيض السوية المسموح بها للإرسالات الناتجة عن السواتل (كثافة تدفق القدرة). ويمكن في الحقيقة تحديد عتبات فقط، لكن يلزم إجراء دراسة إضافية.

إذا استعملت سواتل مستقرة بالنسبة إلى الأرض وسواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض في نطاق الترددات نفسها فإن اعتبارات التقاسم تنطوي على تعقيد متزايد لا سيما أن آثار التداخلات لنمطي الساتل تتراكم.

وقد جرى في هذا الملحق دراسة التداخل الذي تسببه الكواكب الساتلية التي تشغل الطيف بصورة موحدة على أساس مشترك للتردد وافترض أن الإرسالات الساتلية مقيدة بمدى قناع ثابت لكثافة تدفق القدرة على الأرض. إلا أن بعض الأنظمة يمكن أن تعمل داخل الكوكبة مع أسلوب إعادة استعمال الترددات الذي يمكن أن يحسن إمكانيات التقاسم. وإذا طبقت هذه المنهجية في دراسة مفصلة تتناول أنظمة محددة يمكن الاستفادة عند تقييم آثار التداخل من حزم الهوائي وخطط إعادة استعمال الترددات المنفذة في السواتل.

الملحق 4

منهجية لتحديد الآثار الناتجة عن التداخلات في المستقبلات الرقمية التي تعمل بأشكال متنوعة

1 مقدمة

تطبق غالباً أشكال متعددة من أنواع الترددات في نطاقات الترددات حيث يكون الخبو الذي يعزى إلى الانتشار على مسيرات متعددة هو السبب الرئيسي في انحطاط نوعية الأداء عند غياب التداخلات. وإن التحسين الناتج فيما يخص نوعية الأداء عند غياب التداخلات وانحطاط نوعية التنوع تحت تأثير التداخلات كل ذلك يعتمد إلى حد ما على شكل التنوع الذي جرى اختياره. وفي بعض الأنظمة يمكن الحصول على هوائي يتمتع بخصائص مختلفة عن خصائص الهوائي الرئيسية فيما يخص الحصول على إشارة تنوع. ويمكن أن تنفذ أنظمة متنوعة تجهيزات التركيب/التبديل المختلفة من أجل الحصول على إشارة مجمعة. أما الأشياء الأخرى فهي متساوية، فالنظام الذي يستعمل هوائيات متماثلة في مسيرات الإشارة الرئيسية والإشارة التنوعية يقدم أكبر تحسينٍ لنوعية الأداء إذا ما قورن بنظام دون تنوع. ويبدو أيضاً أن النظام ذا التنوع هو أقل حساسية لآثار التداخلات.

بغية حساب الانحطاط FDP لنظام ذي تنوعية، يفترض أن النظام الرقمي يستعمل هوائيات متماثلة في كلا طريقي التنوع. ويفترض أيضاً أن هذا النظام يعمل في نطاق ضيق أو متكافئ بما يكفي لكي تعتمد نوعية أدائه المطلوبة بشكل رئيسي على خبو الإشارة. وفي هذه الحالة فإن الجزء من الشهر الذي لا يستوفى خلاله معيار النوعية الحاسم P_{0i} يمكن أن يحسب بمساعدة الصيغة (20) شريطة التمييز بين الكميتين المقابلتين للتنوع وعدم التنوع ويصبح إذاً:

$$P_{0i} = \int_0^\infty \mathrm{d}I\, p_I(I) \int_0^{(k/C)(N_T + I_C)} \mathrm{d}r\, p_r(r) \tag{25}$$

تعد قدرة التداخل I وتوزيعها في القناة التي تحتوي على الهوائي الرئيسي مميزة نسبة إلى N_T قدرة الضوضاء المكافئة للنظام الموزع على هذه القناة مثلما في حالة عدم التنوع. وبغية تحديد الانحطاط الذي يعزى إلى التداخل، تدرس قدرة التداخل بعد المعالجة I_C بالنسبة إلى الضوضاء بعد المعالجة. ونظراً لوجود كسب مرتفع للنظام أعلى من التنوع، يمكن اعتماد معالجة إشارة الخرج بحيث يأخذ مكون الضوضاء القيمة N_T. وتكون قدرة التداخل في إشارة الخرج المعاد معايرتها هي I_C. وهكذا في حالة التنوع يعاد رسم الشكل 10 حيث I_C هي إحداثيات السينات من أجل تحديد المعادلة (25).

وفيما يخص نظام للخدمة الثابتة يعمل باستعمال التنوع ويكون فيه الخبو العميق الذي يعزى إلى الانتشار على مسيرات متعددة هو السبب الرئيسي للانحطاط في نوعية الأداء، تقدم التوصية ITU-R P.530 طريقة تتيح التنبؤ بسويات الإشارات ضيقة النطاق التي تستلم بالتنوع في نظام الخبو العميق. ويمكن استنتاج أن احتمال عامل الخبو الذي يقل عن r هو تناسبي مع r^2. وينتج عن ذلك أن دالة كثافة الاحتمال من أجل عامل الخبو يجب أن تكون تناسبية مع r وأن:

$$p_r(r) = \gamma\, r \qquad r << 1 \tag{26}$$

حيث تراعي المعلمة γ في هذه العبارة الآثار التي تعزى إلى نمط التنوع.

لوحظ أن المعادلة (26) تناسب عموماً وصف الأداء بالتنوع لأنظمة الخدمة الثابتة بوجود الخبو على مسيرات متعددة. وعند الاستبدال والتكامل بين المعادلتين (25) و(26) يمكن الحصول على:

$$P_{0i} = \frac{\gamma k^2}{2C^2} \int_0^\infty (N_T + I_C)^2 \, p_I(I) \, \mathrm{d}I \tag{27}$$

أو الانحطاط النسبي للأداء بالتنوع (DFDP):

$$DFDP = \int_0^\infty \left(\frac{2I_C}{N_T} + \frac{I_C^2}{N_T^2} \right) p_I(I) \, \mathrm{d}I \tag{28}$$

يمكن حساب المعادلة (28) بسهولة في حالتين هامتين: التنوع المثالي بالتبديل والتنوع بالجمع بين تساوي الكسب والقدرة القصوى. وسيبحث نمطا التنوع فيما يلي من أجل الحالة التي يكون فيها لهوائي قناة التنوع نفس كسب هوائي القناة الرئيسية وتكون القناتان ما عدا ذلك متماثلتين.

2 التنوع التبديلي

إن عملية التنوع في هذه الحالة تتحقق عن طريق تشغيل بالتبديل يختار إشارة الخبو الأقل. وبالتالي تظهر قدرة التداخل أو قدرة الضوضاء المكافئة في هوائي أو آخر في الخرج دون أن تخضع للمعايرة، و:

$$DFDP = \int_0^\infty \left(\frac{2I}{N_T} + \frac{I^2}{N_T^2} \right) p_I(I) \, \mathrm{d}I \tag{29}$$

أو:

$$DFDP = \int_0^\infty \left(\frac{2I}{N_T} + \frac{I^2}{N_T^2} \right) p_I(I) \, \mathrm{d}I \tag{30}$$

وحيث I_{av} هي كما تحددت في المعادلة (23)، اللحظة الثانية لقدرة التداخل وهي تعطى كالتالي:

$$I_2 = \int_0^\infty I^2 p_I(I) \, \mathrm{d}I \tag{31}$$

ويمكن أيضاً للمعادلة (30) أن تكتب بنفس شكل المعادلة (15) للاستعمال في المحاكاة:

$$DFDP = \sum f_i \left[\frac{2I_i}{N_T} + \left(\frac{I_i}{N_T} \right)^2 \right] \tag{32}$$

3 تجميع القدرة القصوى

إن المضمام ذا القدرة القصوى يعدل الطور النسبي بين قناتين للتنوع بحيث يتحقق توافق الطور بين نسختي الإشارة المرغوب بهما في القناتين. ونظراً إلى التماسك بين التداخلات التي يسببها الهوائيان فإن النسبة *I/N* تكون أعلى بمرتين في خرج المضمام عنها في الدخل إذا كان للتداخل الطور النسبي نفسه الذي للإشارة المرغوب بهما. وإذا كانت φ هي زوايا نصف قطرية تعين الفرق بين زحزحة الطور للتداخل من قناة إلى أخرى وبين زحزحة الطور للإشارة المرغوب بها، فإن قيمة I_C تعطى كالتالي:

$$I_C = 2I \cos^2 (\varphi/2) \tag{33}$$

يمكن لهذه العبارة أن تدخل في المعادلة (28). وإذا افترض أن الطور φ هو موزع بانتظام بين 0 و2φ فيمكن تحديد تأثيره المتوسط ويمكن الحصول على الآتي:

$$DFDP_{mpc} = \int_0^\infty \left(\frac{2I}{N_T} + \frac{3I^2}{2N_T^2} \right) p_I(I) \mathrm{d}I \tag{34}$$

أو:

$$DFDP_{mpc} = 2\frac{I_{av}}{N_T} + \frac{3I_2}{2N_T^2} \tag{35}$$

يمكن أيضاً أن تكتب هذه العبارة على شكل المعادلة (15) للاستعمال في المحاكاة.

$$DFDP = \sum f_i \left[\frac{2I_i}{N_T} + \frac{3}{2}\left(\frac{I_i}{N_T} \right)^2 \right] \tag{36}$$

4 الخسارة في هامش الحماية من الخبو بالتنوع (DFML)

بناء على ما تقدم، يمكن التنبؤ بأن الانحطاط النسبي في نوعية الأداء لنظام ما بالتنوع يكون على الأقل ضعف الانحطاط لنظام دون تنوع لكنه يتطابق إذا كانت بيئة التداخل نفسها. وبالعكس، إذا طبقت المعادلة (26) يمكن بسهولة التوصل إلى أن الخسارة DFML من أجل قيمة معينة DFDP هي أصغر بمرتين من الخسارة في نظام دون تنوع من أجل نفس قيمة FDP:

$$DFML = 5 \log (1 + DFDP) \tag{37}$$

إذا تحدد التفاوت في قدرة التداخل في مستقبل الخدمة الثابتة σ^2 بالطريقة المعتادة:

$$\sigma_I^2 = I_2 - I_{av}^2 \tag{38}$$

ويمكن كتابة العلاقة التالية من أجل DFML بدلالة FDP في حالة عدم التنوع:

$$DFML = 10 \log \sqrt{(1 + FDP)^2 + (FDP\sigma_I / I_{av})^2} \tag{39}$$

5 ملخص

عندما تكون قدرة التداخل ثابتة في نظام الاستقبال للخدمة الثابتة، أو متغيرة بشكل طفيف مع الزمن، فإن الخسارة في هامش الخبو للنظام تبقى نفسها مع التنوع أو بدونه. ويمكن في معظم الحالات أن تعتبر اختلافات التداخل ضعيفة إذا كان التفاوت في قدرة التداخل مشابهاً لمربع متوسط قدرة التداخل.

والنتائج التي تم التوصل إليها إثر عمليات عديدة لمحاكاة التداخل الذي تسببه الكواكب الساتلية المنتظمة تدل على أن التفاوت في قدرة التداخل هو غالباً أعلى بعدة أعشار من مربع متوسط قدرة التداخل. وفي هذه الحالة تصبح مساهمة التفاوت في التداخل المعبر عنه في العبارة الثانية من المعادلتين (30) و(39) هي الأثر السائد، وهذا يحد من السويات المقبولة لقدرة التداخل سواء استعمل الانحطاط في نوعية الأداء أو الانخفاض في هامش الحماية من الخبو.

وإذا تعين تقييم آثار التداخل في الأنظمة التي تعمل بالتنوع، فإن المعيار الأبسط للمقارنة هو انخفاض هامش الحماية من الخبو في نظام مثالي ذي تنوع بالتبديل.

الملحق 5

اعتبارات خاصة بانتظام بيئة التداخل على مدى شهر

إن مسقط الساتل non-GSO في مدار دائري يرسم بدلالة الزمن مسيراً على سطح الأرض. وبعد عدد معين من المدارات الكاملة يعود المسير إلى نفس النقطة تقريباً على سطح الأرض. أما الوقت المنقضي إلى حين حدوث هذه العودة فهو "دور تكرار" الساتل. وقد تتطلب الكواكب الساتلية وخاصة تلك التي لديها دورات تكرار قصيرة (عدة أيام أو فترات طويلة مثل أشهر عديدة) انتباهاً خاصاً ذلك لأنه يجب على أنظمة الخدمة الثابتة تلبية متطلبات نوعية الأداء في أي شهر كان.

أما الفترة التي وقع عليها الاختيار لمحاكاة التداخل الذي تسببه كوكبة السواتل non-GSO لمستقبلات الخدمة الثابتة فيجب أن تراعي شرطين اثنين. الأول هو أن تعادل فترة المحاكاة دور تكرار الكوكبة أي الزمن المنقضي بين مرورين متتابعين لساتل ما فوق نقطة معينة من سطح الأرض. والثاني هو الانتظام في بيئة التداخل الناتج عن الكوكبة على خط الطول. وإن إحصاءات التداخل الذي تتلقاه مستقبلات متماثلة للخدمة الثابتة الواقعة على نفس خط العرض قد تتوقف أيضاً على خط طول المحطة. ويمكن تقييم هذا التغير بدلالة خط الطول عن طريق تفحص توزيع الممرات الاستوائية على خط الطول جنوب–شمال لكل ساتل من سواتل الكوكبة خلال دور الساتل.

وبما أن أنظمة الخدمة الثابتة ينبغي أن تراعي متطلبات الأداء في أي شهر كان، فيجب تقييم التداخلات الصادرة عن السواتل على أساس الشهر الأكثر سوءاً، أي على مدى فترة اسمية تدوم 30 يوماً. وأجريت محاكاة لتحديد انخفاض الهامش في نظام الخبو من أجل مستقبلات الخدمة الثابتة التي تعمل بالتنوع أو بدونه. وقد دلت هذه الدراسات على أن المعلمتين FDP أو FML تتعلقان بالخصائص المدارية وبالشروط الأولية للكوكبة إذ تحدد هذه الخصائص انتظام بيئة التداخل على مدى شهر.

ويمكن استعمال طرائق متعددة للحصول على الانتظام الطولي في تخطيط كوكبة السواتل non-GSO مثل تغيير ارتفاع السواتل أو تعديل الزاوية التي تشكلها المستويات المدارية و/أو إجراء زحزحة الطور للسواتل من مستوٍ إلى آخر داخل المستويات. وتتطلب جدوى هذه الطرائق المزيد من الدراسة. وليست الطريقة المختارة مهمة فيما يخص الخدمة الثابتة، المهم هو مراعاة النقطة التالية: يخشى إذا لم يتم الحصول على الانتظام، أن يواجه عدد كبير من محطات الخدمة الثابتة بيئة التداخلات الأسوأ. وينبغي ألا تغيب هذه النقطة عن الأذهان عند إجراء دراسة تفصيلية للآثار التي تنتجها التداخلات في الأنظمة الفعلية.

الملحق 6

منهج لتحديد التوزيع التراكمي لنسبة القدرة الواردة إلى مجموع قدرات الضوضاء والتداخل حسب نتائج محاكاة إرسالات الكواكب التي تشكلها المحطات الفضائية non-GSO

1 العلاقة بين C/I و$C/(N+I)$

تسمح الطرائق المعروضة في الملحق 3 بتحديد القيمتين FDP وFML في الأنظمة الرقمية التي تقع عتبات الأداء الخاصة بها في منطقة الخبو العميق الذي يعزى إلى الانتشار على مسيرات متعددة. ويمكن التوسع بالطريقة الواردة في الفقرة 5 من هذا الملحق لتشمل أنظمة الخبو الأقل عمقاً حيث يمكن أن يكون شكل التوزيع التراكمي لأعماق الخبو هاماً. ويمكن تحديد التوزيعات التالية لهذا الغرض:

$F_M(A)$: احتمال أن تتعرض الإشارة المستقبلة إلى خبو يدفعها إلى سوية دنيا تقل بمقدار A (dB) أو أكثر عن المستوى الاسمي أو سوية الاستقبال بدون الخبو

$F_{C/(N+I)}(Z)$: احتمال أن تكون النسبة (dB) لقدرة الموجة الحاملة في مجموع قدرات الضوضاء والتداخل أدنى بمقدار Z (dB) على الأقل من قدرة الموجة الحاملة/الضوضاء عند غياب الخبو.

وفيما يخص المعادلة (20) فإن حساب التكامل للمتغير r يعطي $F_M(Z - 10 \log (1 + I/N_T))$ ويكون العنصر الأيسر من هذه المعادلة هو $F_{C/(N+I)}(Z)$ ويكون إذاً:

$$F_{C/(N+I)}(Z) = \int_0^\infty p_I(I)\, F_M(Z - 10 \log (1 + I/N_T))\, \mathrm{d}I \tag{40}$$

وفيما يتعلق بأي توزيع للخبو على المسيرات المتعددة وبأي دالة لكثافة الاحتمال لقدرة التداخل الواردة، تسمح المعادلة (40) بالحصول على توزيع تراكمي لنسبة قدرة الموجة الحاملة إلى مجموع قدرات الضوضاء والتداخل. وتجرى عادة المحاكاة بالحاسوب لتحديد كثافة الاحتمال للتداخل في مستقبل الخدمة الثابتة التي تعزى إلى كوكبة السواتل non-GSO. وإذا تمت المحافظة على هذا التوزيع يمكن أن يستعمل لاحقاً في المعادلة (40) من أجل حساب آخر يرمي إلى تقييم الآثار التي يحدثها الخبو متوسط العمق في نوعية الأداء.

2 نمذجة التوزيع التراكمي لأعماق الخبو

أعد القطاع ITU-R نموذجاً رياضياً يرد وصفه في التوصية ITU-R P.530 ويتألف من مجموعة توزيعات للخبو على المسيرات المتعددة تتميز بمعلمة *qt*. ويسمح هذا النموذج بتحديد الدالة $F_M(A)$ لجميع قيم A، الموجبة منها والسالبة. ويؤمن النموذج أساساً نافعاً لتحديد الإجراءات وتوضيح النتائج. ويستعمل هذا النموذج لهذا الغرض في الفقرات التالية.

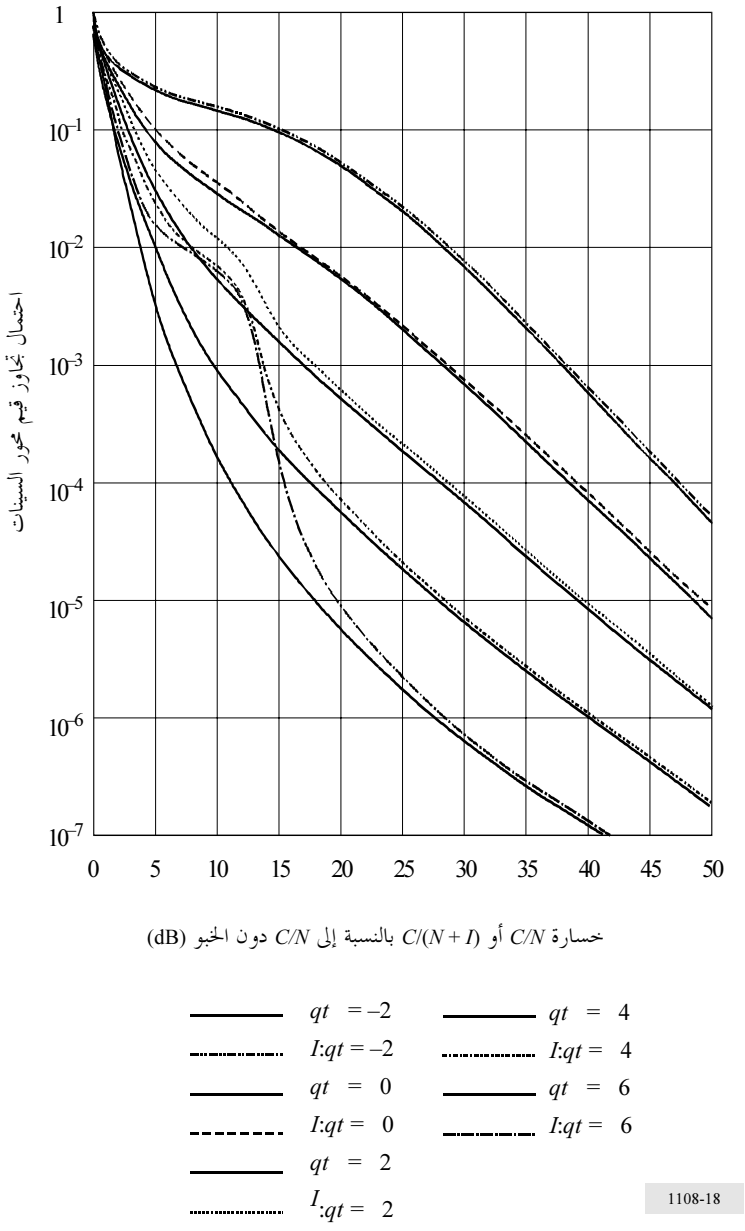
3 مثال

يوضح الشكل 18 خمسة أزواج من منحنيات التوزيع لتخفيض النسبتين C/I و$C/(N+I)$ بمعدل زوج لكل خمس قيم للمعلمة *qt* ورسمت هذه المنحنيات استناداً إلى قيم كثافة احتمال التداخل المحددة في الحالة التالية: محاكاة كوكبة LEO-F تعمل مع سويات كثافة تدفق القدرة الواردة في التوصية ITU-R M.1141 في التردد 2 180 MHz، حيث يحدث التداخل في محطة استقبال للخدمة الثابتة الواقعة عند خط عرض 40 درجة وزاوية السمت في الحالة الأكثر سوءاً هي 50 درجة. وتوجد قيمة واحدة للمعلمة *qt* من أجل مسير معين للخدمة الثابتة مع طول وموقع معينين في منطقة جيو–مناخية. وتقابل المسافة الرأسية لأي نقطة على منحني من منحنيات توزيع C/N وحتى التوزيع المقابل $C/(N+I)$ انحطاطاً في نوعية الأداء؛ أما الفصل الأفقي فيقابل الخسارة FML. ويمكن لمسافات الفصل بين توزيعي C/I و $C/(N+I)$ أن تحدد بدقة بواسطة برنامج حاسوب ملائم. ويبين الشكل 19 نتائج حساب كهذا من أجل التوزيعات الواردة في الشكل 18.

إن الفرق بين C/N وC/N عند غياب الخبو يمثل عمق الخبو. وتنخفض خسارة هامش الخبو بشكل طفيف من أجل خبو بعمق قليل حين $qt = -2$، وبالمقابل وفيما يخص القيم الإيجابية *qt* التي تعد أكثر نموذجية للخبو تحت التردد 3 GHz، ترتفع هذه الخسارة بشكل كبير من أجل الخبو قليل العمق.

الشكل 18

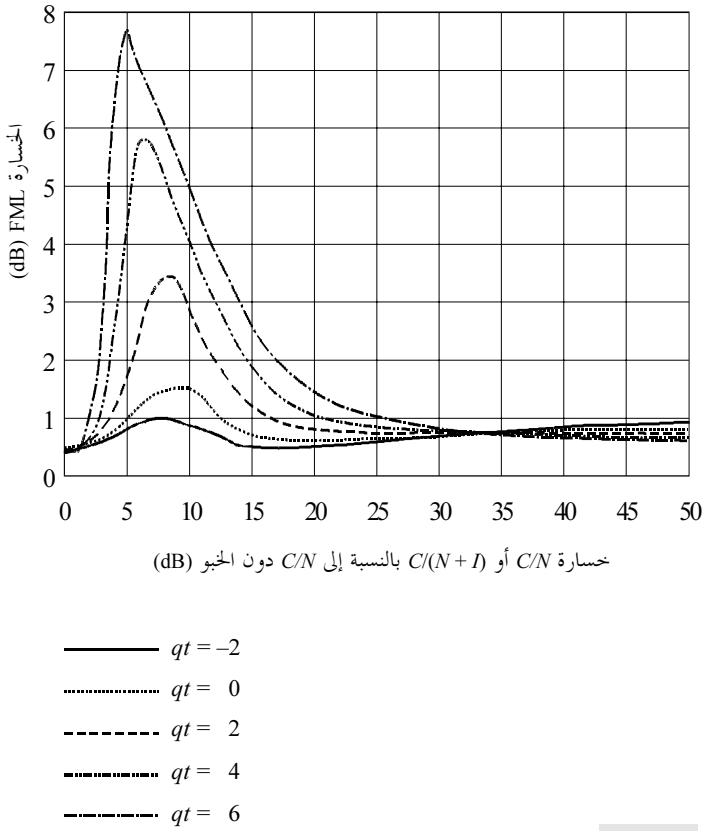
احتمال التوزيعات التراكمية للخسارة *C/N* و *C*/(*N* + *I*) بالنسبة إلى *C/N* بدون خبو منحنيات ناتجة عن محاكاة الكوكبة LEO-F من أجل التشغيل بدون تنوع في حالة هوائي الاستقبال للخدمة الثابتة موجه عند زاوية سمت 50° شمالاً من أجل قيم متعددة للمعلمة *qt*



الشكل 19

الخسارة FML دون تنوع من أجل قيمة معينة لعمق الخبو
منحنيات مستندة إلى المحاكاة المستعملة في الشكل 18

(زاوية السمت = 50°)



4 استنتاجات

قد تكون الخسارة FML في سويات الخبو المعتدلة أكبر بكثير من الخسارة في الخبو العميق. ويمكن أن يصل الفرق إلى عدد كبير من الديسيبلات. وتكون أكبر قيم FML مصاحبة لميل التوزيع التراكمي للخبو. ويظهر ذلك عند مقارنة الشكلين 18 و19. وتبين هذه المقارنة أن الخسارة تبلغ حدها الأقصى في توزيعات الخبو التي تمثل ميلاً أكبر وبجوار سويات الخبو المقابلة لهذه المنحنيات. وواضح أن الخسارة FML في عمق خبو معتدل تتأثر بميل التوزيع التراكمي لسويات الخبو على مسير معين.

ومع ذلك يمكن أن تطبق المنهجية المعروضة في هذا الملحق على جميع توزيعات أعماق الخبو. ويفترض أن تطبق على توزيعات حقيقية أو على النموذج الموصوف في التوصية ITU-R P.530. وإن التقييم الدقيق لأثر FML الفعلي على نوعية الأداء لنظام معين للخدمة الثابتة يتطلب معرفة دقيقة بخصائص هذا النظام أو نوعيته فيما يخص أداء الأخطاء من أجل سوية خبو معينة مع معايير نوعية الأداء الخاصة به.

الملحق 7

طريقة تحليلة لتقييم التداخلات الناجمة في محطة خدمة ثابتة عن كوكبة سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض عاملة في مدارات دائرية أو إهليلجية بما فيها المدارات شديدة الإهليلجية (HEO)

1 مقدمة

فيما يلي الفرضيات التي تستند إليها كوكبة السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض:

- M_s هي المستويات المدارية وN_s عدد السواتل في كل مستقر؛
- التباعد الزاوي بين المستويات المدارية المتجاورة ثابت؛
- الفترة الزمنية الفاصلة بين أي ساتلين متجاورين في نفس المستوي ثابتة؛
- دور المدار غير مرتبط رياضياً بدوران الأرض؛
- جميع السواتل ترسل على ترددات متماثلة؛
- زاوية الميل δ هي واحدة لجميع السواتل.

فضلاً عن ذلك وفي حالة المدار الإهليلجي يفترض أن زاوية الحضيض مشتركة لجميع السواتل.
يمكن تطبيق الطريقة موضوع هذا الملحق بهدف تقييم التداخلات التي تسببها كوكبة سواتل غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض تستخدم مدارات أرضية متوسطة أو منخفضة، وتضم سواتل كثيرة تعمل في عدد من المستويات لتأمين تغطية عالمية شاملة. ولا تضع هذه الطريقة حدوداً فيما يخص المبادئ المطبقة على مدى الترددات. باستثناء الحدود الواردة في توصيات القطاع ITU-R ذات الصلة إن وجدت. وتتلخص خصائص الطريقة التحليلية التي يتناولها هذا الملحق في الفقرة 6.

غير أنه ينبغي إدخال بعض التعديلات على هذه الطريقة في حالة التداخلات التي تسببها كواكب السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض العاملة في المدارات شديدة الإهليلجية (HEO).

ويقدم التذييل 2 لهذا الملحق التعديلات الواجب إدخالها على الطريقة التحليلية الواردة فيما بعض لكي تصبح قابلة للتطبيق على كواكب السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض والتي تستخدم المدارات HEO.

وبالرغم من أن الطرائق التحليلية الواردة في هذا الملحق وفي التذييل 2 التابع له تستعمل نظام خدمة ثابتة يضم محطة واحدة، فإنه من اليسير توسيع نطاق تطبيقها ليشمل تقييم التداخل التراكمي مسيراً مسيراً في نظام خدمة ثابتة بقفزات متعددة يتحدد فيه الانحطاط FDP مسيراً مسيراً باستعمال الصيغة الواردة في الملحق 2 بالتوصية ITU-R F.1107.

2 حالة المدارات الدائرية

إن المسافة الفاصلة بين الساتل ومركز الأرض في حالة المدارات الدائرية منتظمة. وكما أن دالة كثافة الاحتمال (pdf)، أي $p(u)$ لزاوية الساتل المحصورة بين u و$u+\mathrm{d}u$ منتظمة أيضاً وتساوي:

$$p(u) = 1/(2\pi) \tag{41}$$

وبافتراض أن مدة دوران الساتل تساوي 1، يمكن مع البقاء على مستوى عام التعبير عن الزاوية u في اللحظة t $(1 > t \geq 0)$ كالتالي:

$$u = 2\pi t \tag{42}$$

يمكن الافتراض في حال التقيد بشروط الفقرة 1، أن دالة كثافة الاحتمال (pdf) على خط الطول للساتل منتظمة في الفاصل $0-2\pi$.

وهكذا إذا كانت مستويات المدارات هي M_s وعدد السواتل في كل مستوى هو N_s، يمكن افتراض أن دالة كثافة الاحتمال (pdf) لزاوية ساتل مرجعي منتظمة على الفاصل $0\text{-}2\pi/N_s$ وأن دالة كثافة الاحتمال (pdf) على خط الطوال للساتل منتظمة في الفاصل $0\text{-}2\pi$.

وهكذا إذا كانت مستويات المدارات هي M_s وعدد السواتل في كل مستوٍ هو N_s، يمكن افتراض أن دالة كثافة الاحتمال (pdf) لزاوية ساتل مرجعي منتظمة على الفاصل $0\text{-}2\pi/N_s$. وأن دالة كثافة الاحتمال (pfd) لخط طول ساتل مرجعي، منتظمة على الفاصل $0\text{-}2\pi/M_s$ وإذا كانت زاوية الساتل وخط طول الساتل المرجعي هما u وφ على التوالي يمكن عندئذٍ التعبير عن الزاوية u_{ij} وخط الطول φ_{ij} للساتل ذي الترتيب i الذي يدور في المستوي j (وذلك للقيم $i = 1، 2، ...، N_s$ و$j = 1، 2، ...، M_s$) بالطريقة التالية (انظر الملاحظة 1):

$$u_{ij} = u + (i - 1)\, 2\pi/N_s \tag{43a}$$

$$\varphi_{ij} = \varphi + (j - 1)\, 2\pi/M_s \tag{43b}$$

حيث $i = 1$ و $j = 1$ يقابلان الساتل المرجعي. ويمكن بعد ذلك تقييم التداخلات عموماً باتباع الطريقة التي يرد وصفها في الفقرة 4.

الملاحظة 1– تفترض المعادلة (43a) عدم وجود فروق في الطور بين سواتل المستويات المختلفة. وينبغي في حال وجود هذه الفروق أن يدخل التعديل التالي على هذه المعادلة: $u_{ij} = u + \beta_j + (i - 1)\, 2\pi/N_s$، حيث β_j هو فرق الطور في المستوي j $(\beta_1 = 0)$.

3 حالة المدارات الإهليلجية

1.3 مدى الساتل (بعده عن مركز الأرض)

يمكن إعطاء المسافة $r(u)$ الفاصلة بين مركز الأرض وساتل في مدار إهليلجي بدلالة الزاوية u بالصيغة التالية:

$$r(u) = \frac{r_0}{1 + e \cdot \cos(u - \omega)} \tag{44}$$

حيث e وω هما الاختلاف المركزي وزاوية الحضيض على التوالي. وتعطى مسافتا أوج المدار وحضيضه نسبة إلى مركز الأرض بالصيغتين $r_0/(1 - e)$ و$r_0/(1 + e)$ على التوالي. وعكسياً يمكن التعبير عن r_0 وe بالطريقة التالية:

$$r_0 = 2\, r_{max} \cdot r_{min} / (r_{max} + r_{min}) \tag{45a}$$

$$e = (r_{max} - r_{min}) / (r_{max} + r_{min}) \tag{45b}$$

حيث r_{max} وr_{min} هما مسافتا الأوج والحضيض (نسبةً إلى مركز الأرض على التوالي).

2.3 دالة كثافة احتمال زاوية حضيض الساتل

تقول النظرية المعروفة عن المدار الإهليلجي (قانون كيلبر الثاني) إن "سرعة منطقة الكنس ثابتة" مما يمكن التعبير عنه كما يلي:

$$r^2(u) \cdot (\mathrm{d}u / \mathrm{d}t) = \text{constant} \tag{46a}$$

أو

$$\mathrm{d}t \propto r^2(u) \cdot \mathrm{d}u \tag{46b}$$

وتجدر الإشارة هنا إلى أن dt تتناسب مع احتمال أن تكون زاوية حضيض الساتل محصورة بين (u وu +du). وبالتالي تعطى دالة كثافة الاحتمال $p(u)$ للزاوية u لساتل ما على النحو التالي:

$$p(u) = \frac{\alpha}{[1 + e \cdot \cos(u - \omega)]^2} \tag{47}$$

وينبغي أن يساوي تكامل $p(u)$ مع u في المدى 0-2π الواحد، مما يتيح تحديد قيمة α:

$$\alpha = \frac{(1 - e^2)^{3/2}}{2\pi} \tag{48}$$

لنلاحظ هنا أن خط عرض θ الساتل يرتبط بزاوية الحضيض على النحو التالي:

$$\theta = \arcsin(\sin u \cdot \sin \delta) \tag{49}$$

حيث δ هي زاوية ميل المدار. وتنطبق هذه المعادلة في حالة المدارات الدائرية.

3.3 تحديد زاوية الحضيض بدلالة الزمن

يمكن أن نفترض تبسيطاً مع البقاء على المستوى العام، أن دور الساتل يساوي 1. وغالباً ما يكون من الضروري تحديد زاوية الحضيض $u(t)$ بدلالة الزمن t حيث $0 \le t < 1$. ولذا يمكن حل المعادلة التالية:

$$t = \int_0^{u(t)} p(x) \cdot \mathrm{d}x \tag{50}$$

ومن أجل تبسيط حساب $u(t)$ دون خسارة على صعيد الدقة، يمكن استعمال الطريقة الواردة فيما بعد والتي تنطوي على تقسيم المدة على N وعلى تحديد t_k كالتالي:

$$t_k = k/N \quad (k = 0, 1, \ldots, N) \tag{51}$$

ويشار إلى زاوية الحضيض في اللحظة t_k بما يلي $u_k = u(t_k)$ وتتحدد بالعلاقة التالية:

$$\int_{u_{k-1}}^{u_k} p(x) \cdot \mathrm{d}x = \frac{1}{N} \tag{52}$$

وتعطي العلاقة التالية قيمة تقريبية للزاوية u_k (لاحظ أن $u_0 = 0$):

$$u_k \cong u_{k-1} + \frac{1}{N \cdot p(u_{k-1})} \tag{53}$$

تنتج بافتراض أن $p(x)$ ثابت ويقع في المدى (u_{k-1} ،u_k). وتنطوي هذه الصيغة على قيمة تقريبية أولى u_k يمكن تحديد قيمتها الدقيقة باستعمال طريقة Newton-Raphson (انظر الملاحظة 1). وبذلك يمكن الحصول على u_k لجميع القيم t_k ($k = 0، 1، \ldots، N$). ولنلاحظ أن $u_N = 2\pi$.

ويمكن تقريب القيمة $u(t)$ المقابلة للزمن t باستعمال الصيغة التالية:

$$(t) = N\,[(t_{k+1} - t) \cdot u_k + (t - t_k) \cdot u_{k+1}] \tag{54}$$

حيث $t_k \le t < t_{k+1}$ (إذا كانت $t \ge 1$ ينبغي أن يستعاض عن هذا الفرق بالصيغة $t_k \le t - 1 < t_{k+1}$). وإذا القيمة N كبيرة إلى حد كافٍ مثل (N=10000) تعطي المعادلة (54) قيمة دقيقة $u(t)$ بدلالة الزمن. ويصف التذييل 1 طريقة حساب مبسطة تتيح الاستغناء عن تكامل المعادلة (52).

الملاحظة 1- يرد فيما بعد وصف موجزاً لطريقة نيوتن-رافسون.

تتيح المعادلة (53) تحديد القيمة التقريبية ν_0 للزاوية u_k:

$$\nu_0 = u_{k-1} + \frac{1}{N \cdot p(u_{k-1})} \tag{55}$$

وإذا عرفت القيمة التقريبية ν_{i-1} يمكن إعطاء القيمة التقريبية التالية كما يلي:

$$\nu_i = \nu_{i-1} - \frac{f(\nu_{i-1})}{p(\nu_{i-1})} \qquad (i = 1, 2, 3, \ldots..) \tag{56}$$

حيث

$$f(\nu_{i-1}) = \int_{u_{k-1}}^{\nu_{i-1}} p(x) \cdot \mathrm{d}x - \frac{1}{N} \tag{57}$$

وتعطى القيمتان $p(\nu_{i-1})$ و$p(x)$ بالمعادلة (47) (لاحظ أن $p(x)$ هي مشتقة $f(x)$). ويمكن الحصول بسهولة على قيمة دقيقة للزاوية u_k بتكرار الحسابات بالمعادلتين (56) و(57). أما التقارب فسريع جداً. وعلى سبيل المثال يمكن حساب القيمة $f(\nu_{i-1})$ باستخدام طريقة سمبسون.

4.3 تحديد مواقع السواتل

تعرض هذه الفقرة طريقة لتحديد مواقع السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض والتي تدور في مدارات إهليلجية. ويفترض وجود مستويات مدارية، M_s، وعدد سواتل N_s في كل مستوٍ.

نفترض عندئذ أن الموقع (الزمني) للساتل المرجعي موزع بانتظام في المدى $0 \le t < 1/N_s$ وأن خط طول هذا الساتل φ موزع بانتظام في المدى $0 \le \varphi < 2\pi/M_s$. وتعطى زاوية الحضيض $u(t)$ المقابلة لهذه الحالة في المعادلة (54). أما زوايا حضيض السواتل الأخرى الموجودة في نفس المدار فتقابل اللحظات $t + (k/N_s)$ حيث من $k = 1$ إلى $N_s - 1$.

وتتيح المعادلة (49) تحديد خطوط عرض السواتل في المستوي الموازي للساتل المرجعي. ويمكن افتراض أن زوايا حضيض السواتل في المستويات المدارية الأخرى مماثلة لنظيراتها في السواتل التي تدور في المستوي المداري المرجعي. ومن السهل تحديد خطوط طول جميع السواتل استناداً إلى خط طول الساتل المرجعي وزاوية حضيضه.

وفيما يتعلق بالحسابات الفعلية، من الضروري حساب التداخل في نقاط الاعتيان. ولهذا الغرض يتم تقسيم الزمن الأقصى ($= 1/N_s$) للساتل على N_t وأقصى خط طول ($= 2\pi/M_s$) للساتل المرجعي على M_φ. وهكذا يكون الاحتمال $1/(M_\varphi \cdot N_t)$ أن يظهر الساتل المرجعي في اللحظة وخط الطول التاليين:

$$t = \frac{1}{N_s} \cdot \frac{i_t - 0.5}{N_t} \quad (i_t = 1, 2, \ldots, N_t) \tag{58a}$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{M_s} \cdot \frac{j_\varphi - 0.5}{M_\varphi} \quad (j_\varphi = 1, 2, \ldots, M_\varphi) \tag{58b}$$

ويمكن تحديد خطوط عرض وخطوط طول جميع سواتل الكوكبة استناداً إلى المعادلات (49) و(54) و(58a) و(58b)

وقد تكون القيمتان M_φ وN_t غير كافيتين ووقت الحساب أطول من اللازم. لذا يستحسن اعتماد الطريقة الواردة أدناه في حال إجراء حسابات دقيقة في المناطق الحساسة.

وينبغي حساب التباعد الزاوي للهوائي في كل خلية تحددها المعادلتان (58a) و(58b) ولكل ساتل مرئي. وإذا كان أقلُّ تباعد زاوي أدنى من قيمة العتبة المعينة تعيّن اعتبار الخلية المقابلة منطقةً حساسة وتقسيمها من جديد إلى خلايا أصغر (انظر الملاحظة 1).

إذا كان الوقت وخط الطول المصاحبان للساتل المرجعي ناتجين عن المعادلتين (58a) و(58b) على التوالي يمكن الحصول على الوقت t_{ij} وخط الطول φ_{ij} المتعلقين بالساتل i الواقع في المدار j (i=1، 2، ...، N_s وj = 1، 2، ...، M_s) عن طريق الصيغتين:

$$t_{ij} = t + (i - 1)/N_s \tag{59a}$$

$$\varphi_{ij} = \varphi + (j - 1)\, 2\pi/M_s \tag{59b}$$

حيث $i = 1$ و$j = 1$ يقابلان الساتل المرجعي. ويمكن حساب زاوية الحضيض u_{ij} للساتل i في المستوي j بتطبيق المعادلتين (54) و(59a) (انظر الملاحظة 2).

الملاحظة 1– عندما تكون زاوية ارتفاع المحطة المتأثرة بالتداخل (محطة خدمة ثابتة مثلاً) منخفضة جداً يمكن إهمال خلية حساسة نظراً لتأثيرات الأفق. ويستحسن لتفادي ذلك دراسة 9 خلايا ومنها الخلايا المجاورة للمنطقة الحساسة على أنها خلايا حساسة وتقسيمها بدورها إلى خلايا أصغر. أما إذا لم تكن زاوية ارتفاع هوائي الخدمة الثابتة منخفضة فمن غير الضروري تقسيم الخلايا المجاورة إلى خلايا أصغر.

الملاحظة 2– يفترض في المعادلة (59a) أن السواتل لها نفس زاوية الحضيض في مختلف المستويات المدارية M_s. غير أن الحالة قد تكون مختلفة في بعض الحالات. وعندئذ فإن الأوقات t_{ij} المصاحبة للسواتل التي تدور في مستويات مختلفة تتحدد بالعلاقة $t_{ij} = t + \tau_j + (i - 1)/N_s$ حيث τ_j هو طور المستوي j ($0 = \tau_1$).

4 زاويتا الارتفاع والسمت باتجاه السواتل في ظروف الانتشار في الفضاء الحر

يعطى خط طول الساتل i في المستوي j بالمعادلتين (43a) أو (59b). ويمكن حساب خط العرض θ_{ij} لهذا الساتل باستعمال المعادلة (49). بينما تعطي المعادلة (44) المسافة r_{ij} الفاصلة بينه وبين مركز الأرض. وتكون هذه القيم الثلاث هي الإحداثيات القطبية (r_{ij}، θ_{ij}، φ_{ij}).

وإذا افترضنا أن خط العرض (موجب في نصف الكرة الشمالي وسالب في نصفها الجنوبي) وخط الطول لمحطة الخدمة الثابتة المتأثرة بالتداخل هما θ_f وφ_f، على التوالي، يمكن تحويل الإحداثيات القطبية المذكورة أعلاه على نحو تصبح فيه محطة الخدمة الثابتة في خط العرض 0° وخط الطول 0°. ولذا يوضع أولاً خط طول المحطة على 0°. فتكون عندئذٍ الإحداثيات الجديدة للساتل نسبةً إلى محطة الخدمة الثابتة الواقعة على خط الطول 0° هي الإحداثيات القطبية (r_{ij}، θ_{ij}، $\varphi_f - \varphi_{ij}$) التي تعادل الإحداثيات المتعامدة التالية:

$$x = r_{ij} \cdot \cos\theta_{ij} \cdot \cos(\varphi_{ij} - \varphi_f) \tag{60a}$$

$$y = r_{ij} \cdot \cos\theta_{ij} \cdot \sin(\varphi_{ij} - \varphi_f) \tag{60b}$$

$$z = r_{ij} \cdot \sin\theta_{ij} \tag{60c}$$

ثم يوضع خط عرض محطة الخدمة الثابتة على صفر درجة. وتعطى الإحداثيات المتعامدة الجديدة (x_1، y_1، z_1) للساتل نسبةً إلى محطة الخدمة الثابتة الواقعة على خط العرض 0° في الصيغة التالية:

$$x_1 = x \cdot \cos\theta_f + z \cdot \sin\theta_f \tag{61a}$$

$$y_1 = y \tag{61b}$$

$$z_1 = -x \cdot \sin\theta_f + z \cdot \cos\theta_f \tag{61c}$$

وتعطى زوايا الارتفاع ε_{s0} والسمت γ_s (المقيسة من الشمال في نفس اتجاه عقارب الساعة) نسبةً إلى الساتل المرئي من محطة الخدمة الثابتة في شروط الانتشار في الفضاء الحر كالتالي:

$$\varepsilon_{s0} = \arctan\left(\frac{x_1 - r_e}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2}}\right) \tag{62a}$$

$$\gamma_s = \arctan\left(\frac{y_1}{z_1}\right) \qquad \text{for } z_1 > 0$$

$$\gamma_s = \arctan\left(\frac{y_1}{z_1}\right) + \pi \text{ for } z_1 < 0 \tag{62b}$$

حيث r_e هي متوسط قيمة نصف قطر الأرض وتساوي 6 370 km.

ويلاحظ أن معادلات هذا القسم تكافئ المعادلات المقابلة لها في الملحق 1 بهذه التوصية.

5 التباعد الزاوي بين اتجاه هوائي الخدمة الثابتة والسواتل المرئية

يمكن الرجوع إلى التوصية ITU-R F.1333 لتحديد إمكانية رؤية الساتل وزاوية ارتفاعه الفعلية ε_s في حال رؤيته مع مراعاة ظاهرة الانكسار الجوي. ويمكن عندئذ حساب التباعد الزاوي SA المقيس استناداً إلى اتجاه الحزمة الرئيسية لهوائي الخدمة الثابتة باستعمال العلاقة التالية:

$$SA = \arccos(\cos\varepsilon_s \cdot \cos\varepsilon_f \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_f) + \sin\varepsilon_s \cdot \sin\varepsilon_f) \tag{63}$$

حيث ε_f وγ_f هما زاويتا الارتفاع والسمت (مقيستان من الشمال في نفس اتجاه عقارب الساعة) نسبةً إلى الحزمة الرئيسية لهوائي الخدمة الثابتة. ويتيح هذا التباعد الزاوي تحديد كسب هوائي الخدمة الثابتة في اتجاه الساتل وفقاً للتوصية ITU-R F.1245 في حالة الهوائي الاتجاهي. أما في حالة الهوائي شامل الاتجاه أو القطاعي فإن التباعد الزاوي SA يساوي $|\varepsilon_s - \varepsilon_f|$، ينبغي حساب كسب هوائي الخدمة الثابتة في اتجاه الساتل وفقاً للتوصية ITU-R F.1336.

الملاحظة 1– يمكن استخدام التوصية ITU-R SF.1395 أو ITU-R F.1404 لحساب أقل خسارة ناجمة عن الامتصاص الجوي وذلك هام في تقييم التداخلات في محطات الخدمة الثابتة. وإذا نتج هذا الامتصاص في نطاقات الترددات التي لا تتناولها التوصيات المذكورة يمكن الإحالة إلى التوصية ITU-R P.676.

6 ملخص خصائص الطريقة التحليلية

تفيد الطريقة التحليلية الواردة في هذا الملحق من الحالة التي لا يساوي فيها الدور المداري للساتل نسبة صحيحة من مدة دوران الأرض، وتكون دالة كثافة احتمال خط طول الساتل منتظمة في المدى 0-2π. كما أن دالة كثافة احتمال زاوية الحضيض u موزعة بانتظام أيضاً في المدى 0-2π في حالة المدار الدائري. ومن ناحية أخرى وفي حالة المدار الإهليلجي لا تكون زاوية الحضيض موزعة بانتظام ولكنها تتحدد بدلالة الزمن كما هو محدد في الفقرة 3.3 ويتناسب احتمال وجود ساتل في الفاصل الزمني (t+ dt،t) مع القيمة dt. وتتيح المعادلة (49) حساب خط عرض الساتل بدلالة زاوية الحضيض. وبالتالي يمكن اعتبار دالة كثافة الاحتمال لخط عرض الساتل مستقلّةً عن دالة كثافة احتمال خط طول الساتل. ومع مراعاة ما تقدم يمكن تحديد موقع الساتل المرجعي بطريقة تحليلية كما ورد في الفقرة 4.3.

ويكفي في حال التقيد بالفرضيات الواردة في الفقرة 1، افتراض توزيع منتظم لموضع (زمنياً) الساتل المرجعي في الفاصل $0 \le t < 1/N_s$ وكذلك التوزيع المنتظم بخط طوله φ في الفاصل $0 \le \varphi < 2\pi/M_s$. وتنتج زاوية الحضيض المقابلة $u(t)$ باستعمال المعادلة (54). ويمكن الحصول بسهولة على مواقع السواتل الأخرى لنفس الكوكبة بدلالة موقع الساتل المرجعي.

وإذا ما لوحظت حساسية خاصة للتداخل في خلية معينة (بعبارة أخرى إذا كان أقل تباعد زاوي مع السواتل المرئية أدنى من عتبة معينة) يستحسن عندئذٍ تقسيم هذه الخلية (والخلايا المجاورة) إلى خلايا أصغر من أجل تقييم التداخل بطريقة أدق، وبالمقابل في حال عدم الحساسية يكون التقسيم إلى خلايا أصغر غير مجد. وهذه نقطة هامة تعزز بشكل خاص فعالية الطريقة التحليلية من حيث الوقت المطلوب للحساب. وبناءً على ذلك ينبغي أن تبرهن الطريقة التحليلية على أنها أسرع بكثير من أي طريقة محاكاة عادية لإعطاء دقة مماثلة في الحساب. وعلى سبيل المثال إذا كان عدد الخلايا الحساسة للتداخل بما فيها الخلايا المجاورة يساوي 10% من مجموع الخلايا موضوع الفحص، يكون الوقت اللازم للحساب 1/10 تقريباً.

التذييل 1
للملحق 7

حسابات مبسطة لما ورد في الفقرة 3.3 من الملحق 7

يمكن تبسيط حسابات المعادلة (50) الواردة في الفقرة 3.3 من الملحق 7 مع تجنب حساب تكامل المعادلة (52) وذلك على النحو التالي.

يتم أولاً تحويل المتغير u في المعادلة (47) إلى متغير s كالتالي:

$$\frac{1}{1+e\cdot\cos(u-\omega)}=\frac{1-e\cdot\cos(s-s_0)}{1-e^2} \tag{64}$$

حيث $u=0$ تعادل $s=0$ وبالتالي تحدد s_0 أدناه بافتراض $0\le\omega<2\pi$:

$$s_0=\arccos\left(\frac{e+\cos\omega}{1+e\cdot\cos\omega}\right)\text{for }0\le\omega<\pi \tag{65a}$$

$$=2\pi-\arccos\left(\frac{e+\cos\omega}{1+e\cdot\cos\omega}\right)\text{for }\pi\le\omega<2\pi \tag{65b}$$

وتتحدد هنا دالة arccos (x) في الفاصل (π، 0) وتكون s_0 حسب المعادلتين (65a) و(65b) دالة متزايدة للقيمة ω. ويفترض من ناحية أخرى إمكانية تعريف u بأنها دالة متزايدة لقيمة s (أي $du/ds>0$) ويمكن التعبير عن du/ds حسب المعادلة (64) بعد إجراء بعض الحسابات على النحو التالي:

$$\frac{du}{ds}=\frac{\sqrt{1-e^2}}{1-e\cdot\cos(s-s_0)} \tag{66}$$

وإذا استبدلت المعادلتان (64) و(66) بالمعادلتين (47) و(50) من الملحق 7 تنتج العلاقة التالية:

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^s\left(1-e\cdot\cos(s-s_0)\right)ds=t \tag{67}$$

وبعد تكامل الحد الأيسر تصبح المعادلة (67) كالتالي:

$$s-e\cdot\sin(s-s_0)=2\pi t+e\cdot\sin s_0 \tag{68}$$

وهذه المعادلة المتسامية هي متغير من معادلة كيبلر (نلاحظ أن $2\pi t$ تسمى متوسط الشذوذ وأن معادلة كيبلر لا تتحدد بنظرية الحركية إلاّ بالنسبة إلى $s_0=0$). أما بالنسبة إلى القيمة t ($0\le t<1$) يمكن بسهولة حساب القيمة s ($0\le s<2\pi$) التي تتحقق من المعادلة (68) باستعمال طريقة نيوتن–رافسون بإجراء ما يلي (انظر الملاحظة 1).

ويمكن حساب القيمة الأولية التقريبية $s^{(0)}$ للقيمة s بالعلاقة:

$$s^{(0)} = 2\pi t + e \cdot \sin s_0 \tag{69}$$

ثم تحسب القيمة ν التقريبية لقيمة $s^{(\nu)}$ بالصيغة:

$$s^{(\nu)} = s^{(\nu-1)} - \frac{f(s^{(\nu-1)})}{f'(s^{(\nu-1)})} \quad (\nu = 1, 2, 3, \ldots) \tag{70}$$

وفيها:

$$\begin{aligned} f(s) &= s - e \cdot \sin(s - s_0) - 2\pi t - e \cdot \sin s_0 \\ f'(s) &= 1 - e \cdot \cos(s - s_0) \end{aligned} \tag{71}$$

نلاحظ أن $f'(s)$ تدل على المشتقة $f(s)$. ويكون تقارب $s^{(\nu)}$ من قيمة دقيقة للقيمة s بعد إجراء الحسابات التكرارية باستخدام المعادلتين (70) و(71) سريع جداً.

وتتحدد القيمة u المقابلة للقيمة s على النحو التالي مع مراعاة أن u هي دالة متزايدة للمتغير s :

$$u = \omega - 2\pi + a \qquad \text{for } -2\pi < s - s_0 < -\pi \tag{72a}$$

$$= \omega - a \qquad \text{for } -\pi \le s - s_0 < 0 \tag{72b}$$

$$= \omega + a \qquad \text{for } 0 \le s - s_0 < \pi \tag{72c}$$

$$= \omega + 2\pi - a \qquad \text{for } \pi \le s - s_0 < 2\pi \tag{72d}$$

وبالتالي يكون:

$$a = \arccos\left(\frac{\cos(s - s_0) - e}{1 - e \cdot \cos(s - s_0)}\right) \tag{72e}$$

ومن الممكن حساب u_k المقابلة لـــ t_k المحددة في المعادلة (51) من الملحق 7 وذلك لقيمة غير محددة لـــ k $(k = 0, 1, 2, ..., N)$ $(u_0 = 0)$.

ويمكن حساب قيمة $u(t)$ المقابلة لـــ t بشكل تقريبـــي على النحو التالي:

$$u(t) = N\,[(t_{k+1} - t) \cdot u_k + (t - t_k) \cdot u_{k+1}] \tag{73}$$

مع $t_k \le t < t_{k+1}$ (إذا $t \ge 1$ ينبغي أن يستعاض عند عدم التساوي بـــ $t_k \le t - 1 < t_{k+1}$) وتعطي المعادلة (73) عندما تكون القيمة N كبيرة بقدر كافٍ (مثل $N = 10\,000$) قيمة دقيقة لـــ $u(t)$ بدلالة الوقت.

وقد أكدت حسابات أجريت على الحاسوب تكافؤ طريقة الحساب الواردة في هذا التذييل مع طريقة الفقرة 3.3 من الملحق 7.

الملاحظة 1– حسب طريقة نيوتن–رافسون الواردة أعلاه، يكون التقارب من النتائج المتوقعة مستقر وسريع لكل قيمة t وs_0 شريطة أن تكون e أقل من 0,81. ويمكن التحقق من هذا الشرط الأخير لأغراض التطبيقات العامة. لكن إذا تعين لسبب ما وجوب حل المعادلة (68) لقيمة e أكبر، فهناك طريقة أكيدة تنطوي على اعتماد طريقة نيوتن–رافسون المعدلة على نحو يضمن تقارباً سريعاً. وترد فيما بعد طريقة على سبيل المثال (ينبغي إجراء جميع الحسابات بالدقة المضاعفة).

الخطوة 1: بدلاً من إجراء الحساب وفق المعادلة (70)، يتم أولاً اختيار $\lambda = 1$ ويحسب $s^{(\nu)}$ في المرحلة 2.

الخطوة 2: حساب:

$$s^{(\nu)} = s^{(\nu-1)} - \frac{\lambda \cdot f\left(s^{(\nu-1)}\right)}{f'\left(s^{(\nu-1)}\right)} \quad (74)$$

الخطوة 3: إذا كانت $f(s^{(\nu)}) < 10^{-12}$، بعد إنهاء الحساب كاملاً (أي بعد أن تبلغ $s^{(\nu)}$ قيمة دقيقة بقدر كافٍ). أما إذا كانت $|f(s^{(\nu)})| < |f(s^{(\nu-1)})|$ نعود إلى الخطوة 1 لإجراء حساب القيمة التالية لـــ ν. وإذا كانت $|f(s^{(\nu)})| \geq |f(s^{(\nu-1)})|$، يتم تقسيم λ على 2 ثم العودة إلى الخطوة 2 من أجل معاودة الحساب.

إن الطريقة المعدلة المقدمة أعلاه ناجعة لجميع القيم e وصولاً إلى 0,999.

التذييل 2
للملحق 7

تعديل الطريقة التحليلية الواردة في الملحق 7 لأغراض كواكب السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض التي تستخدم مدارات شديدة الإهليلجية (HEO)

تتميز الشبكات الساتلية غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض التي تستخدم مدارات HEO على النحو التالي. يفترض عموماً لمزيد من التبسيط أن السواتل HEO النشيطة لا تدور إلاّ في نصف واحد من نصفي الكرة الأرضية حتى ولو كان من السهل توسيع نطاق تطبيق الطريقة إلى حالة السواتل HEO النشيطة التي تدور في نصفي الكرة الأرضية:

- يفترض وجود M_s كوكبة ساتلية في أحد نصفي الكرة الأرضية؛
- تحتوي كل كوكبة ساتلية على عدد N_s ساتلاً يكون أحدها فقط نشيطاً قرب أوجه في لحظة معينة؛ وعندما يخمد ساتل ينشط ساتل آخر مما يضمن التغطية المتواصلة مع العلم بأن مسقط ساتل نشيط على الأرض مماثل لمسقط الساتل النشيط الذي سبقه؛
- توجد علاقة رياضية بين الدور المداري T_{orb} (مقدراً بالساعات)، لساتل ما ومدة دورة الأرض (عموماً 8 أو 12 أو 16 أو 24 ساعة تقريباً)؛
- زاوية الميل هي نفسها في جميع السواتل؛
- زاوية الحضيض (ω) هي نفسها في جميع السواتل.

من الممكن في حالة أنظمة سواتل HEO أن تكون كوكبة واحدة قادرة على توفير خدمات في عدة مناطق خدمة. فمثلاً عندما يكون الدور المداري 8 ساعات تقريباً توفر الكوكبة خدمات لثلاث مناطق مختلفة على سطح الأرض. غير أنه يستحسن لأغراض تقييم التداخلات القائم على الإحصاءات أن تعالج هذه المناطق كل على حدة بافتراض أن هذه المناطق الثلاث مستقلة بعضها عن البعض الآخر وأن ساتلاً واحداً نشيطاً يشغل كل منطقة.

وعموماً إذا لم تشغل السواتل HEO النشيطة إلا في نصف الكرة الأرضية الشمالي تكون الزاوية $\omega = -\pi/2$ (أو $\omega = 3\pi/2$) راديان، بينما إذا شغلت في نصف الكرة الجنوبي تكون الزاوية $\omega = \pi/2$ راديان. وفي حال تشغيل السواتل في نصفي الكرة الأرضية تستعمل هاتان القيمتان للزاوية ω. كما أن استعمال قيم أخرى غير $\pm \pi/2$ للزاوية ω ممكن لتطبيقات خاصة.

وتتحدد المسافة بين الساتل HEO ومركز الأرض في الصيغ المذكورة في الفقرة 1.3 من الملحق 7. وتتحدد زاوية ساتل HEO نشيط بدلالة الوقت t حيث $0 \le t < 1$ (يفترض هنا أن الدور المداري يساوي 1 دون تعريض العمومية للخسارة) باستخدام صيغ الفقرة 3.3 من الملحق 7 التي تستخدم صيغ الفقرة 2.3 من الملحق المذكور. ويلاحظ أن حسابات الفقرتين 2.3 و3.3 المذكورتين تفترض ضمنياً أن $u = 0$ في لحظة $t = 0$، بينما فرضية $u = \omega$ في لحظة $t = 0$ أكثر ملاءمة في حالة كواكب السواتل HEO. وتحدد المعادلة (49) في الملحق 7 خط عرض الساتل.

ويتم اختيار ساتل HEO نشيط باعتباره ساتلاً مرجعياً. وعندما لا يتجاوز الوقت T_{orb} مدة 24 ساعة تعطى لحظة بدء الطور النشيط T_{start}، ولحظة نهاية الطور النشيط T_{end} لهذا الساتل النشيط في المعادلتين (75a) و (75b) وبافتراض (دون تعريض العمومية للخسارة) أن الدور المداري يساوي الوحدة وأن الساتل يتواجد في الحضيض عند $t = 0$:

$$(T_{start} \ge 0)\ T_{start} = 0.5 - 12/(N_s \cdot T_{orb}) \quad (75a)$$

$$(T_{end} < 1)\ T_{end} = 0.5 + 12/(N_s \cdot T_{orb}) \quad (75b)$$

تفترض المعادلتان (75b) و(75a) أن الساتل نشيط عند اقترابه من الأوج وأن القوس النشيطة تناظرية مع الأوج. مثال، إذا كانت $N_s = 3$ و$T_{orb} = 12$ ساعة و$T_{start} = 1/6$ و$T_{end} = 5/6$ (مدة الطور النشيط 8 ساعات) وإذا كانت $N_s = 5$ و$T_{orb} = 8$ ساعات و$T_{start} = 0{,}2$ و$T_{end} = 0{,}8$ (مدة الدور النشيط 4,8 سا). أما إذا لم تكن القوس النشيطة تناظرية فينبغي عندئذ تعديل المعادلتين (75a) و(75b).

يمكن تحديد الزاوية $u(t)$ للساتل المرجعي في لحظة معينة t $(0 \le t < 1)$ من الفاصل الزمني (T_{start}, T_{end}) باستعمال المعادلة (54) الواردة في الملحق 7 ويفترض في هذه الحالة أن $u_0 = \omega$ (أي $u_N = \omega + 2\pi$).

وعند تشغيل عدد من الكواكب الساتلية في أحد نصفي الكرة الأرضية مع المحافظة على تباعد منتظم بين السواتل، يكون من اليسير تحديد مواقع جميع السواتل النشيطة. وبالعموم يكفي بالنسبة إلى دراسات التقاسم افتراض أن أطوار جميع السواتل النشيطة متماثلة. وفي حال وجود فروق في الطور بين الكواكب يمكن مراعاتها بسهولة في الحسابات.

أما إذا لم يكن التباعد بين السواتل موحداً وتحددت قيم تباعد فعلية فإن هذه القيم تراعى بشكل صحيح في الحسابات.

وبعد تحديد مواقع جميع السواتل النشيطة في لحظة معينة، يمكن تقييم التداخل التراكمي الذي تسببه جميع السواتل المرئية في محطة الخدمة الثابتة بموجب الطريقة الواردة في الفقرتين 4 و5 من الملحق 7.

وأخيراً تجدر الإشارة إلى وجود تباين كبير بين الطريقة التحليلية الواردة في الملحق 7 والطريقة التي يعرضها هذا التذييل. ففي الملحق 7 يقيّم التداخل بطريقة تحليلية مع افتراض أن خطي العرض والطول للساتل مستقلان بينما يرتبط خط عرض الساتل بخط طوله في حالة السواتل HEO موضوع الدراسة في هذا التذييل. لذا يتعين تحديد خطي العرض والطول للساتل في لحظة معينة حسب هذا التذييل. غير أنه يكفي تقييم التداخل في دور واحد بسبب انتظام أدوار حركة السواتل، مما يساهم في تقليص الوقت اللازم للحساب.

ومن ناحية أخرى لا ينطبق مفهوم "المناطق الحساسة" الوارد في الفقرة 4.3 من الملحق 7 على الطريقة التحليلية التي يقدمها هذا التذييل. ويتم تقييم التداخل في أنظمة الخدمة الثابتة بافتراض قناع كثافة pfd ملائم يتوقف على زاوية ورود الإرسالات التي تنتجها السواتل HEO النشيطة.