التوصيـــة ITU-R S.1713-1

منهجية حساب زاوية التباعد الأدنى عند سطح الأرض بين ساتل يعمل في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) في مدار إهليلجي شديد الانحناء (HEO) غير مستقر بالنسبة إلى الأرض يرسل في قوسه "النشيط" وساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض

(المسألة ITU-R 241/4)

(2007-2005)

مجال التطبيق

ترد في هذه التوصية منهجيتان لحساب زاوية التباعد الأدنى في أي موقع كائن على سطح الأرض بين ساتل بمدار إهليلجي شديد الانحناء (HEO) يرسل في قوسه "النشيط" وما يلي:

أ) جميع المواقع المرئية على قوس المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض (GSO)؛

ب) وساتل *معين* بمدار GSO.

والمنهجية الأولى (انظر الملحق 3) مفيدة في تحديد ما إذا كان أي نظام بمدار إهليلجي شديد الانحناء (HEO) يتقيد بحدود كثافة تدفق القدرة المكافئة (epfd) داخل نطاقات التردد التي تنطبق عليها حدود الكثافة epfd المبينة في المادة 22 من لوائح الراديو. أما المنهجية الثانية (انظر الملحق 5) فهي تساعد في تقييم التداخل بين شبكة ساتلية معينة بمدار GSO وساتل يعمل في الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) في مدار إهليلجي شديد الانحناء (HEO).

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أنه في الغالبية العظمى لتصاميم الأنظمة الساتلية ذات المدار HEO، يتطابق أوج كل ساتل مع نقطة خط العرض الأعلى في مداره، وأن جميع السواتل لا تؤدي الإرسال إلا عندما توجد في قوس "نشيط" حول الأوج؛

ب) أن المعلمة الرئيسية لتحديد الحالة الأسوأ للتداخل بين نظام HEO ونظام GSO هي زاوية التباعد الأدنى التي يكون فيها ساتل HEO نشيط مرئياً من طرف أية محطة أرضية تعمل بساتل GSO؛

ج) أن الزاوية المقابلة عند سطح الأرض بين ساتل HEO ونقطة ما على المدار GSO تختلف باختلاف خط عرض وخط طول النقطة الواقعة على سطح الأرض. وعليه، تختلف زاوية التباعد في أي محطة أرضية داخل شبكة ساتلية بمدار GSO بين الساتل الذي يعمل ضمن نطاقها وأي ساتل بمدار HEO باختلاف خط عرض وخط طول المحطة الأرضية المذكورة؛

د) أن تحديد زاوية التباعد الأدنى بين نظام HEO وشبكة GSO من شأنه أن يسهل إجراء تقييمات أولية سريعة لإمكانيات تقاسم النطاق بين نظام HEO وأنظمة GSO؛

هـ) أن الأنظمة غير GSO، بما فيها أنظمة HEO، العاملة ضمن نطاقات التردد التي تنطبق عليها حدود الكثافة epfd المبينة في المادة 22 من لوائح الراديو، ملزمة باستيفاء هذه الحدود في جميع المواقع الكائنة على سطح الأرض مع مراعاة الوصلات الهابطة من جميع المواقع المرئية داخل القوس GSO (سواء وُجد أم لم يُوجد ساتل GSO آنذاك عند خط طول أسوأ الحالات)؛

و) أن الكثافة القصوى epfd لأنظمة HEO التي يرد وصف لها في الفقرة أ) من "*إذ تضع في اعتبارها*" أعلاه والعاملة ضمن نطاقات التردد التي تنطبق عليها حدود الكثافة epfd المبينة في المادة 22 من لوائح الراديو، هي كثافة مقابلة لأدنى زاوية

تباعد عند سطح الأرض بين ساتل HEO يرسل في قوسه النشيط وخط طول الساتل GSO في أسوأ الحالات، وتحدث عندما يكون ساتل HEO في بداية قوسه النشيط أو في نهايته (أي عند أدنى نقطة خط عرض في القوس النشيط)؛

ز) أن تقاسم الترددات بين ساتل HEO وشبكة GSO معينة يعملان ضمن نطاقات تردد لا تنطبق عليها حدود الكثافة epfd المبينة في المادة 22 من لوائح الراديو، يتطلب عموماً حساب زاوية التباعد الأدنى عند سطح الأرض بين ساتل HEO في قوسه النشيط وموقع الساتل GSO المعني؛

ح) أن الحساب المبين في الفقرة ز) من *"إذ تضع في اعتبارها"* أعلاه المطبق على أنظمة HEO الموصوفة في الفقرة أ) من *"إذ تضع في اعتبارها"* أعلاه يؤدي إلى زاوية تباعد أدنى عند سطح الأرض بين ساتل HEO في قوسه "النشيط" وساتل GSO المعني، لا تتكون بالضرورة عندما يكون ساتل HEO في بداية قوسه "النشيط" أو في نهايته،

توصـــي

1 باستعمال المنهجية الموصوفة في الملحق 1 لحساب زاوية التباعد التي "يُرى" عندها ساتل HEO ما في قوسه النشيط انطلاقاً من محطة أرضية تعمل بساتل GSO معين ومن ثم لحساب زاوية التباعد الأدنى عند سطح الأرض مع مراعاة جميع مواقع المحطات الأرضية الممكنة وجميع خطوط الطول الممكنة لساتل GSO؛

2 باستعمال الملحق 2 لتحديد ارتفاع حرارة الضوضاء للوصلة GSO بسبب التداخل الذي يسببه الساتل HEO؛

3 باستعمال المنهجية الموصوفة في الملحق 5 لحساب زاوية التباعد الأدنى التي "يُرى" عندها ساتل HEO ما في قوسه "النشيط" انطلاقاً من محطة أرضية تعمل بساتل GSO معين.

الملاحظة 1 – يُطبِّق الملحق 3 بصفة تكرارية المنهجيات الواردة في الملحقين 1 و2 بغرض تحديد زاوية التباعد الأدنى التي يُرى منها ساتل "نشيط" في نظام HEO ما من طرف أية محطة أرضية تعمل مع أي ساتل GSO، ومن ثم حساب الحالة الأسوأ لارتفاع حرارة الضوضاء في الوصلة GSO.

الملاحظة 2 – يرد في الملحق 4 أمثلة على تطبيق الملحقات من 1 إلى 3.

الملاحظة 3 – يرد في الملحق 6 أمثلة على تطبيق الملحق 5.

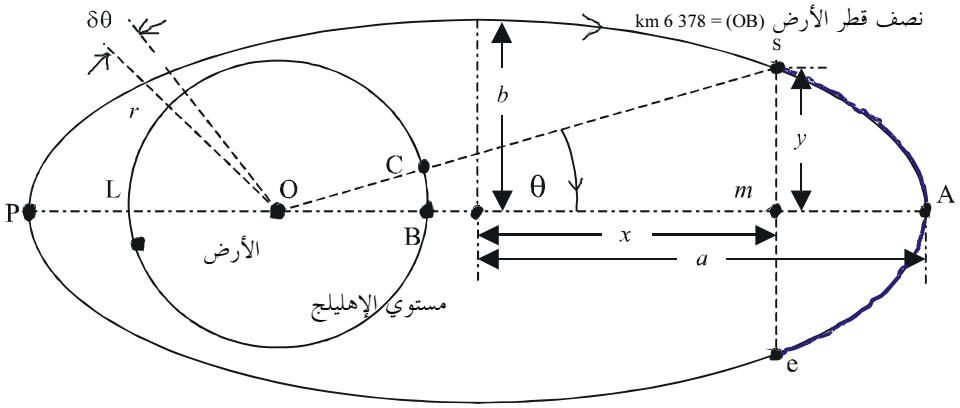
الملحق 1

طريقة حساب الزاوية الأدنى المقابلة عند سطح الأرض بين ساتل HEO ما داخل قوسه النشيط والجزء المرئي من المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض

يوضح الشكل 1، وهو رسم ثنائي البعد، المسير الذي يتخذه ساتل يدور في مدار حول الأرض. وبصفة عامة، يتعلق الأمر بمدار إهليلجي الشكل، حيث تتطابق إحدى نقطتيه الرئيسيتين مع مركز جاذبية الأرض (O) ويكون المستوي المداري مائلاً بالنسبة إلى المستوي الاستوائي للأرض. (GSO حالة خاصة يكون فيها الإهليلج دائرة في المستوي الاستوائي).

الشـــكل 1

شكل هندسي مستوٍ لمدار إهليلجي



1713-01

وفي معظم الأنظمة HEO، لا يرسل (أو يستقبل) الساتل الكائن في مدار من هذا النوع إلا في الوقت الذي يكون فيه داخل قوس محدود يحتوي على الأوج (A)، وبالتالي، لا يسبب (أو يخضع إلى) التداخل إلا عندما يوجد داخل هذا القوس الذي يُعرف عامة باسم "القوس النشيط". وقد صممت الغالبية العظمى للأنظمة HEO على نحو يكون فيها الأوج متطابقاً مع نقطة خط العرض الأعلى داخل المدار، وفي مثل هذه الحالات، يمكن أن تحدث سويات التداخل الأقصى عندما يكون الساتل في بداية أو في نهاية "القوس النشيط" ويختلف طول "القوس النشيط" من نظام إلى آخر. ويُشار في الشكل 1 إلى بداية "القوس النشيط" بواسطة (s) وإلى نهايته بواسطة (e). وبحسب دينامية المدار، ينتقل الساتل بسرعة في منطقة الحضيض (P) وببطء نسبي في منطقة الأوج. (وفي الواقع، فإن المنطقة التي يمسحها متجه نصف القطر (r) في كل وحدة من الزمن، أي ($r^2/2$) ($\delta\theta/\delta t$)، هي ثابتة على طول المدار.)

الخطوة 1: تتمثل الخطوة الأولى في تحديد الطول Os انطلاقاً من الخصائص الأساسية للمدار.

تحتوي المعلومات المقدمة إلى القطاع ITU-R بشأن نظام HEO عادة على المعلومات التالية: ارتفاع الأوج ((AB (km))؛ ارتفاع الحضيض ((PL (km))؛ الاختلاف المركزي (e)؛ زاوية الميل (i) درجة؛ شذوذ حقيقي متغير في بداية (وفي نهاية) القوس "النشيط" (الزاوية POs في الشكل 1، 180° – θ°).

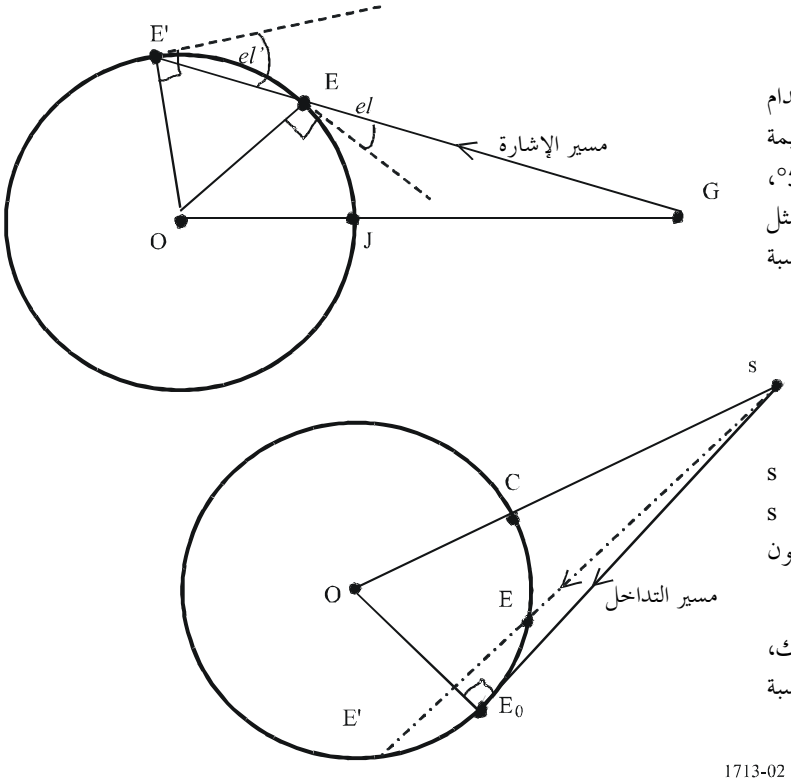
وكبديل عن حالات الشذوذ الحقيقية بالنسبة إلى s وe، تستعمل في غالب الأحيان قيمة محددة للفترة الزمنية التي يستغرقها الساتل للانتقال من s وصولاً إلى الأوج ومن الأوج إلى e، ولتكن على سبيل المثال ±4 ساعات. وفي هذه الحالة، يمكن حساب قيمة θ سواء عن طريق المحاكاة بخطوات زمنية لتحديدها أو عن طريق التكامل باعتبار أن ($r^2/2$)($\delta\theta/\delta t$) هي ثابتة، غير أن كلا الخيارين معقد نسبياً. وبخصوص دراسات القطاع ITU-R، من الملائم عادة تحديد حالة الشذوذ الحقيقي بالنسبة إلى s أو e) أو الزاوية θ بصفة واضحة، وهو ما يفترض هنا؛ إلا أن النسخة الإلكترونية من جدول بيانات EXCEL المرفقة بهذه التوصية تحتوي على برنامج Visual Basic يسمح بتحديد القيمة θ انطلاقاً من اللحظة التي تسبق الأوج التي يبلغ عندها الساتل s (أو لحظة ما بعد الأوج التي يبلغ عندها الساتل e).

تجدر الإشارة إلى أن المعلومات التي يتعين تقديمها إلى مكتب الاتصالات الراديوية بموجب التذييل 4 للوائح الراديو عند كل تبليغ عن أنظمة ساتلية غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض تحتوي على ارتفاع الأوج، وارتفاع الحضيض والاختلاف المركزي، غير أن حدود القوس "النشيط" الحالية ذات الصلة بالأنظمة غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO) من الصنف HEO لا ترد ضمن قائمة المعطيات التي يتعين تقديمها. بيد أنه بالنسبة للأنظمة غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (بما في ذلك ضمنياً الأنظمة HEO) التي يُخطط لاستعمالها في النطاقات التي تنطبق عليها حدود epfd المشار إليها في المادة 22 من لوائح الراديو، فإنه من بين المعلمات التي يتعين تقديمها بموجب التذييل 4 للوائح الراديو هي الارتفاع الأدنى فوق سطح الأرض الذي يمكن لأي ساتل في النظام الإرسال فيه. وبالنسبة إلى النظام HEO، يتطابق هذا الارتفاع مع sC في الشكل 1.

واستناداً إلى الشكل 1، وباستعمال معادلة إهليلج وعلم مثلثات المستوي، نحصل على معادلة رباعية بالنسبة إلى x يعبر عنها بواسطة AB وPL وe وθ؛ ونحل عندئذ هذه المعادلة بالنسبة إلى x ويمكن تحديد الطول Os انطلاقاً من المثلث Oms.

الشـــكل 2

مقتطفات مثلث مستوٍ



1713-02

من المستبعد أن تُصمم وصلة GSO لتعمل باستخدام زاوية ارتفاع (*el*) أقل من 5°، وهو ما يعطي EG قيمة 41 124,624 km. ويمكن أن تتجاوز *el′* القيمة 5°، إلا أن *E′G* تتعدى بوضوح هذا الطول. وبالتالي يتمثل الشرط الذي تكون E بموجبه "قابلة للرؤية" بالنسبة إلى G في $35\,786\ \text{km} \le EG < 41\,124{,}624\ \text{km}$.

E قابلة للرؤية بالنسبة إلى s ولكن 'E محجوبة عن s بواسطة الأرض. وتوجد E_0 في الكفاف الذي تكون s بالنسبة إليه عند زاوية ارتفاع قدرها 0°. ومن ثم، يكون المثلث OsE_0 مثلثاً قائم الزاوية، وبالتالي:

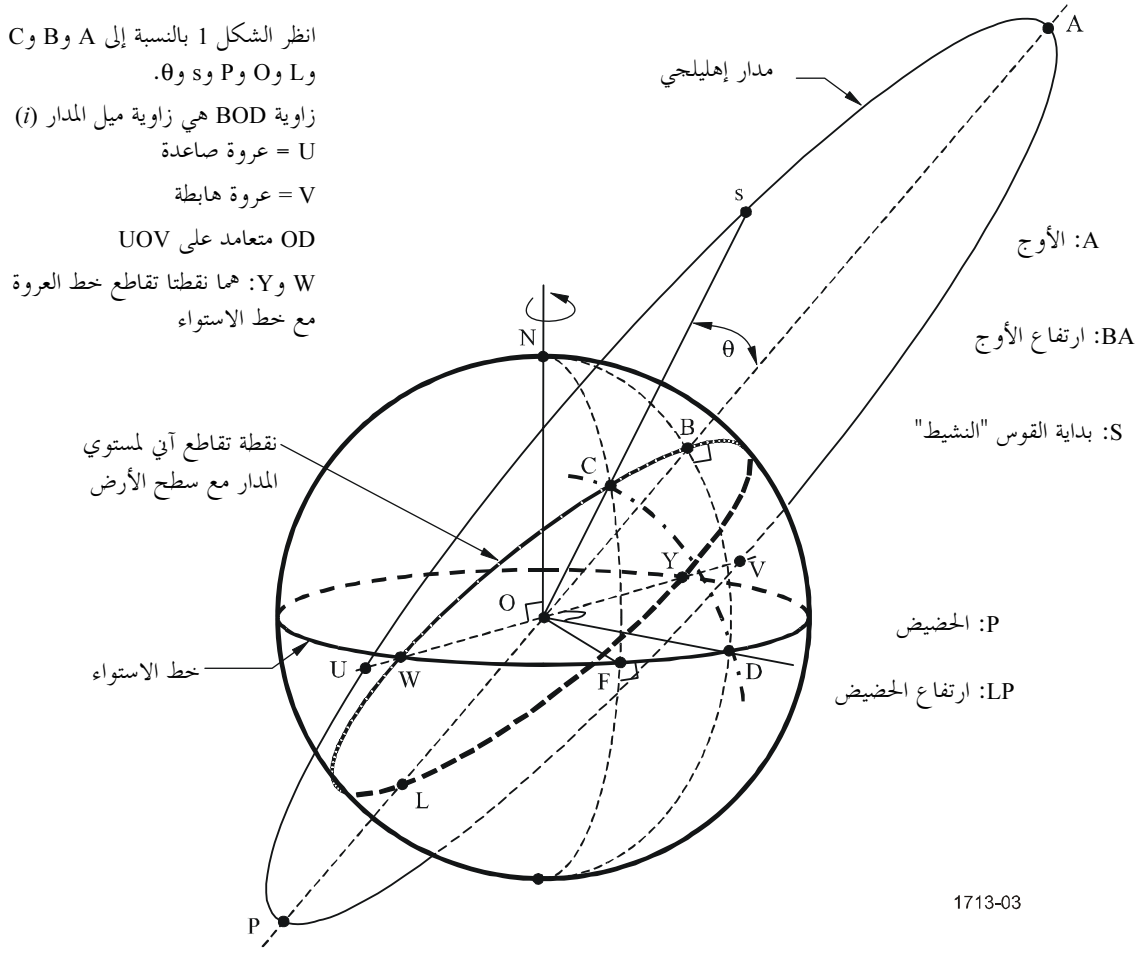
$sE_0 = ((Os)^2 - (6\,378)^2)^{0,5}$. واستناداً إلى ذلك، يتمثل الشرط الذي تكون E بموجبه قابلة للرؤية بالنسبة إلى s في $sE < ((Os)^2 - (6\,378)^2)^{0,5}$.

الخطوة 2: تتمثل الخطوة الثانية في إيجاد خط العرض s وخط الطول بالنسبة إلى خط طول الأوج الآني، ويمكن القيام بذلك باستعمال الشكل 3، الذي يمثل المدار في شكل ثلاثي الأبعاد باستعمال نفس الرموز التي تستعمل في الشكل 1. وعليه تحسب القيمة Os حسبما جاء في الخطوة 1. وبتطبيق قاعدة جيب التمام الكروي على المثلثين الكرويين OBCD وCODF في الشكل 3، ثم تطبيق قاعدة الجيب على المثلث الكروي ONBC، يمكن أن نستنتج أن خط الطول s بالنسبة إلى A (α_C) وخط العرض الخاص بها (λ_C) يمكن التعبير عنهما بالمعادلتين التاليتين:

$$\lambda_C = \angle FOC = \cos^{-1}(\sin(\theta)/\sin(\alpha_c)) \text{ و } \alpha_C = -\angle FOD = -\tan^{-1}(\tan(\theta)/\cos(i))$$

الشـــكل 3

الإحداثيات الجغرافية لبداية القوس "النشيط" للساتل HEO



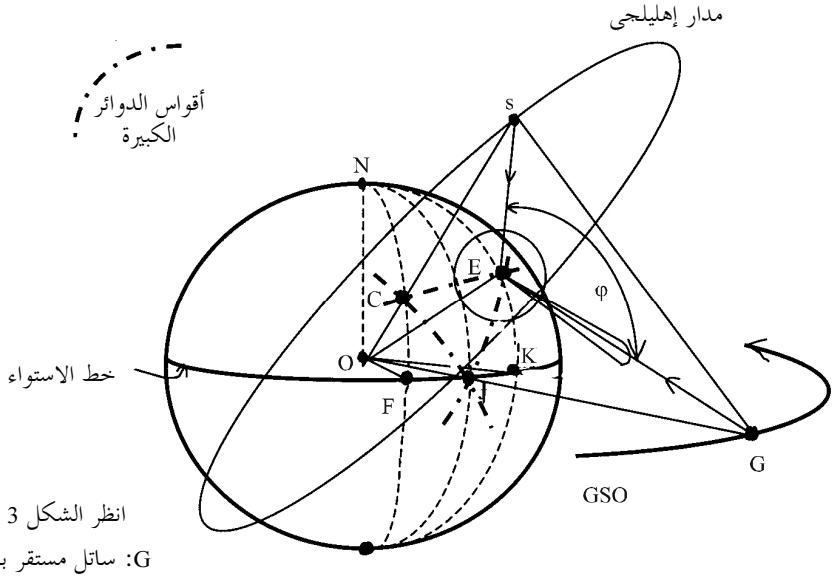
الخطوة 3: بعد أن وجدنا خط العرض وخط الطول النسبي الآني s، يمكن حساب زاوية تباعد التداخل (φ) المطابق عند أي محطة أرضية (E) تعمل مع ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض (G) وذلك باستعمال الشكل 4 الذي تتطابق فيه النقاط C وO وF وN وs مع النقاط الموجودة في الشكل 3. ولذلك فإن خط العرض E في الشكل 4 هو λ_E، وخط طوله بالنسبة إلى خط الطول A هو α_G، وخط الطول G بالنسبة إلى خط الطول A هو α_G. وبالتالي، بما أن α_C وα_E وλ_C وλ_E وα_G وOE (نصف قطر الأرض) وOG (نصف قطر GSO) وOs معروفة أو سبق حسابها،

- يمكن حساب الطول sE بتطبيق قاعدة جيب التمام الكروي على المثلث الكروي ONCE، ثم تطبيق قاعدة جيب التمام المستوي على المثلث المستوي OsE؛
- يمكن حساب الطول sG بتطبيق قاعدة جيب التمام الكروي على المثلث الكروي OCFJ، ثم قاعدة جيب التمام المستوي على المثلث المستوي OsG؛
- يمكن حساب الطول EG بتطبيق قاعدة جيب التمام الكروي على المثلث الكروي OEJK، ثم قاعدة جيب التمام المستوي على المثلث المستوي OEG؛

وأخيراً، في المثلث المستوي EsG، بما أن الجوانب الثلاثة sE وsG وEG قد حُسبت، يمكن حساب الزاوية φ باستعمال قاعدة جيب التمام المستوي.

الشـــكل 4

شكل هندسي للتداخل الذي يسببه ساتل HEO عند بداية القوس "النشيط" في محطة أرضية تابعة للشبكة GSO (أي مسير sE)



انظر الشكل 3 بالنسبة إلى C وF وN وO وs.
G: ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض.
E: محطة أرضية تستقبل إشارات من G.

1713-04

وهكذا، يمكن باستخدام هذه الطريقة لحساب زاوية تباعد التداخل (φ) بالنسبة إلى أي وصلة هابطة GSO (أي بالنسبة إلى محطة أرضية توجد في أي موقع جغرافي معين وتستقبل إشارات من ساتل GSO على أي خط طول)، إذا كانت زاوية ميل مدار الساتل HEO، وارتفاع الأوج، وارتفاع الحضيض، والاختلاف المركزي، وزاوية الاختلاف الحقيقية أو الزمن بين لحظة مرور الساتل على أوجه ولحظة دخوله إلى القوس "النشيط" أو خروجه منه معلومة.

وللحصول على القيمة الأدنى φ، يمكن كتابة برنامج حاسوبي بسيط يُطبق على فئة من التركيبات α_E وλ_E وα_G: يُستعمل الإجراء الوارد أدناه لحساب φ بالنسبة إلى كل توليفة، ثم تُختار القيمة الأقل. ونظراً إلى أن التداخل لا يحدث إلا بالنسبة إلى التركيبات α_E وλ_E وα_G التي تكون فيها E قابلة للرؤية بالنسبة إلى G وs (انظر الشكل 4)، ولكن يجب دراسة جميع هذه التركيبات فمن المناسب العمل على أن يشمل هذا البرنامج البسيط فئات واسعة من المتغيرات الثلاثة ثم يُستبعد من الحساب أي من التوليفات التي تكون فيها E محجوبة بواسطة الأرض، سواء من G أو s أو من G وs معاً. ويرد توضيح ذلك في مقتطفات المثلث المستوي المأخوذة من الشكل 4 والمبينة في الشكل 2.

الملحق 2

حساب الزيادة في ضوضاء الوصلة GSO بسبب التداخل الذي يسببه الساتل HEO عند بداية قوسه "النشيط"

يتبين من الشكل 4 أن الإشارات المسببة للتداخل الصادرة عن الساتل HEO عند s في الوصلة بين ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض عند G ومحطة أرضية عند E تدخل إلى مستقبل هذه المحطة الأرضية عبر الفص الجانبي لمخطط إشعاع هوائي المحطة. وتعطي المعادلة التالية الزيادة في حرارة الضوضاء للوصلة GSO:

$$10\log((\Delta T/T)/100) = E_1 - 20\log(4\pi d/\lambda) + G(\varphi) - 10\log(k\,T) \quad \text{dB}$$

حيث:

$\Delta T/T$: الزيادة في ضوضاء الوصلة معبراً عنها في شكل نسبة مئوية

E_1: كثافة تدفق القدرة e.i.r.p. للموجة الحاملة المرسلة بواسطة ساتل HEO، (dB(W/Hz))

d: طول مسير التداخل sE، (m)

λ: طول الموجة (m) = (0,3)/f حيث f هي تردد الموجة الحاملة للساتل HEO، (GHz)

$G(\varphi)$: كسب الاستقبال لهوائي المحطة الأرضية عند التردد f وزاوية الانحراف عن المحور الرئيسي φ (dBi)

T: حرارة ضوضاء الوصلة GSO (K)

k: ثابت بولتزمان، أي $10\text{Log}(k) = -228{,}6$ dB(W/Hz/K).

ويمكن أن تكون T إما حرارة ضوضاء الوصلة الهابطة GSO فقط أو حرارة ضوضاء النظام GSO عند دخل مستقبل المحطة الأرضية، تبعاً للطريقة المفضلة للتعبير عن $\Delta T/T$.

ولحساب $G(\varphi)$، ونظراً إلى أن المنهجية الواردة في هذا الملحق تتصل بالتداخل بين نظام غير مستقر بالنسبة إلى الأرض (non-SGO) ونظام مستقر بالنسبة إلى الأرض، فمن المناسب استخدام مخططات الكسب الموصى بها في التوصية ITU-R S.1428، حيث يعبر عن $G(\varphi)$ بالقيمة D/λ، وD هي قطر الهوائي (بالأمتار).

الملحق 3

تطبيق تكراري للمنهجية الواردة في الملحق 1

يتم تنفيذ الطريقة المشروحة في الملحق 1 في مرفق هذا الملحق ("MinseparationHEOangle") في شكل جدول بيانات EXCEL، يحتوي على برنامج Visual Basic الذي يمكن تشغيله في كل تركيبة تتكون من خط عرض المحطة الأرضية وخط طولها وخط طول الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض يكون الساتل GSO وبداية القوس "النشيط" للنظام HEO قابلين للرؤية فيها في آن معاً، ومن ثم يمكن التعرف على زاوية التباعد الأدنى عند أي محطة أرضية يمكن أن يحدث تداخل متبادل بينهما. ومن باب التسهيل على المستعمل، أدرجت الخطوات البسيطة المذكورة في الملحق 2 في جدول بيانات EXCEL لإتاحة خرج يعطي القيمة القصوى بالنسبة إلى $\Delta T/T$ بسبب هذا التداخل، إذا كان ذلك ضرورياً. وكما يتضح من الأمثلة الواردة في الملحق 4، يشمل جدول بيانات EXCEL جميع أنماط المدارات التي يستخدم فيها قوس "نشيط" محدود، بشرط أن لا يتقاطع القوس مع أي خط بين النظام GSO وسطح الأرض، عند خط العرض ±81,3°.

ومعطيات الدخل اللازمة هي المعلمات الآتية للنظام HEO دون سواها:

- ارتفاع الأوج (km)؛
- ارتفاع الحضيض (km)؛
- الاختلاف المركزي (جزء عشري)؛
- زاوية ميل المدار (درجات)؛
- معلمة واحدة (أو أكثر) من بين المعلمات الثلاث التالية لتعريف بداية "s" (أو نهاية "e") القوس "النشيط"؛ أي:
  - زاوية المركز الأرضي بين s والأوج (درجات)،
  - أو الزمن الذي يستغرقه الساتل للانتقال بين s والأوج (بالساعات)[1]،
  - أو ارتفاع s (km).

إذا رغب المستعمل في أن تُحسب القيمة المطابقة بالنسبة إلى $\Delta T/T$، تكون معلمات الدخل الإضافية التالية ضرورية:

- قيمة كثافة تدفق القدرة e.i.r.p. القصوى للساتل HEO ((dB(W/Hz))؛

والمعلمات التالية للوصلة GSO:

- قطر الهوائي (بالأمتار) في المحطة الأرضية للوصلة GSO؛
- مخطط كسب استقبال الهوائي في المحطة الأرضية للوصلة GSO (dBi في مقابل زاوية الانحراف عن المحور الرئيسي)؛
- حرارة ضوضاء الوصلة GSO (K)؛
- التردد (GHz).

MinseparationHEOangle.xls

[1] يحتوي المرفق بهذه الوثيقة على برنامج Visual Basic إضافي حتى يمكن استعمال هذا البند من المعطيات إذا أدخلت. وفي هذه الحالة، لا تحسب زاوية التباعد الأدنى فقط، بل تحسب أيضاً المواقع المطلقة للمحطة الأرضية والساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض الذي يتوافق مع هذه الزاوية، بشرط أن يدخل خط طول الأوج للنظام HEO كمعلومات دخل إضافية. انظر ملف EXCEL الذي يتصل بالموضوع والمعنون "MinseparationHEOangle".

الملحق 4

أمثلة على تطبيق المنهجية الموصوفة في الملحق 1

تبين الصفوف من 2 إلى 8 في الجدول 1 أدناه الخصائص المدارية لاثني عشر تصميماً تتعلق بالأنظمة HEO، وقد جُمعت انطلاقاً من المعطيات التي قُدمت إلى القطاع ITU-R. وبغرض توضيح هذه الأنظمة، تجري المقارنة بين أنماط المسالك الأرضية التابعة لها في الأشكال من 5 إلى 7؛ ويعطي الصف الحادي عشر في الجدول 1 خطوط طول الأوج التي استُعملت في إعداد الأشكال من 5 إلى 7؛ ولا ترد خطوط الأوج هذه التي تم انتقاؤها إلا بغرض التوضيح.

الجـــدول 1

1. نظام HEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. ارتفاع الأوج (km)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	47 669	39 300	27 470
3. ارتفاع الحضيض (km)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	9 312.9	1 075	310
4. الاختلاف المركزي للمدار	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. زاوية ميل المدار (بالدرجات)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. زاوية s بالنسبة إلى الأوج (بالدرجات)	35	31	(29,5)	60	(30)	37	(24)	40	(30)	(36),	25	(28)
7. توقيت s بالنسبة إلى الأوج (h)	(3,13−)	(3−)	3,5−	(4−)	4−	(2,95−)	3−	(2,55−)	1−	(4,5−)	(3,06−)	2−
8. الارتفاع s (km)	(27 200)	(42 800)	(26 900)	N/A	(48 000)	(39 000)	(47 900)	(16 500)	N/A	(37 800)	(30 700)	(21 400)
9. زاوية التباعد الأدنى (بالدرجات)	39,84	35,84	52,58	26,94	49,35	31,34	55,49	40,66	51,84	35,47,	55,55	37,73
10. التحقق باستعمال المحاكاة (بالدرجات)	(39,78)	(35,78)	(52,50)	(26,86)	(49,25)	(31,40)	(55,47)	(40,91)	(51,86)	(35,51)	(55,49)	(37,26)
11. خط طول الأوج (°E)	150−	108−	62−	43−	130−	38−	110−	83−	30−	18−	27	57
12. خط طول المحطة الأرضية (°E)	117,63−	110,81−	14,89	17,33	43,32−	38,65	34,89−	75,38−	35,33−	79,63	101,86	82,72
13. خط عرض المحطة الأرضية (°N)	73,63	46,70−	3,72	7,73−	3,15−	5,44−	2,01−	73,63	73,63	5,4−4	2,58	73,63
14. خط طول الساتل GSO (°E)	150,29−	102,22−	61,32−	58,88−	119,52−	37,55−	111,09−	108,04−	67,99−	3,42	25,66	50,06
15. مثال: $\Delta T/T$ (%) [1]	0,204	0,072	0,150	0,200	0,058	0,108	0,058	0,572	0,386	0,043	0,122	0,312

[1] قيم محسوبة بالاستناد إلى الملحق 2 بالنسبة إلى $E_1 = -21$ dB(W/Hz) و$D = 3$ m و$T = 100$ K و$f = 11$ GHz و$G(\varphi)$ من التوصية ITU-R S.1428-1.

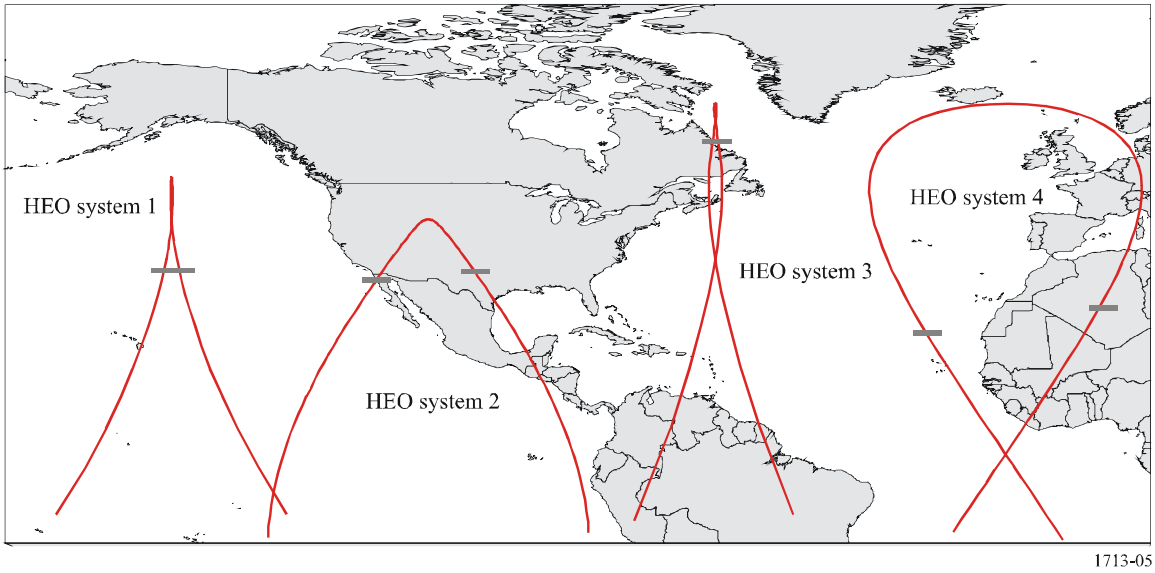
N/A: غير متوفر.

وتمثل الصفوف السادس والسابع والثامن طرقاً متنوعة للإشارة إلى بداية (أو نهاية) القوس "النشيط". وفي هذه الصفوف الثلاثة، توافق القيم التي لا توجد بين معقوفين القيم التي قُدمت إلى القطاع ITU-R؛ وقد تم الحصول على القيم الموجودة بين معقوفين انطلاقاً من محاكاة حاسوبية لكل نظام من الأنظمة، وذلك بوقف التشغيل عند القيمة التي لا توجد بين معقوفين وتسجيل القيمتين الموجودتين بين معقوفين. وقد تم الحصول على القيم الواردة في الصف التاسع انطلاقاً من الملحق 3 باستعمال القيم التي لا توجد بين معقوفين لتحديد بداية القوس "النشيط". (عندما استعملت القيم الواردة بين معقوفين في الملحق 3، كانت النتائج مختلفة بعض الشيء، إلا أن هذه الاختلافات كانت لا تمس بدقة الحسابات التي أجريت.) ثم أجري التحقق من كل نتيجة عبر المحاكاة بواسطة الحاسوب، وتم الحصول بالتالي على زوايا تباعد أدنى ترد بخط مائل في الصف العاشر، وهذه القيم كما يلاحظ، تتفق بصفة وثيقة مع القيم الواردة في الصف التاسع، وتؤكد بالتالي صحة الملحق 3.

وبالإضافة إلى ذلك، تم الحصول استناداً إلى خطوط طول الأوج التي يحتوي عليها الصف الحادي عشر، وباستخدام الملحق 3، على تركيبة تتكون من مواقع المحطة الأرضية والساتل GSO تحدث عندها زاوية انحراف أدنى خارج المحور الرئيسي في كل حالة، وترد هذه النتائج في الصفوف الثاني عشر والثالث عشر والرابع عشر من هذا الجدول.

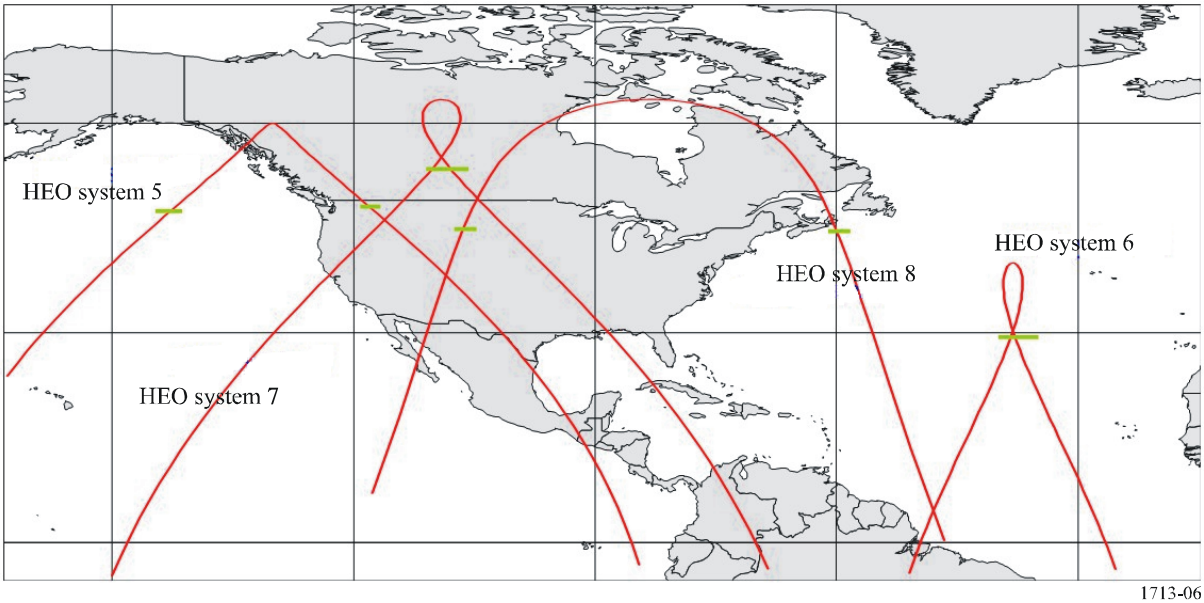
الشـــكل 5

أجزاء من المسالك الأرضية للأنظمة HEO من 1 إلى 4، تبين الأقواس "النشيطة" (أي فوق – –)



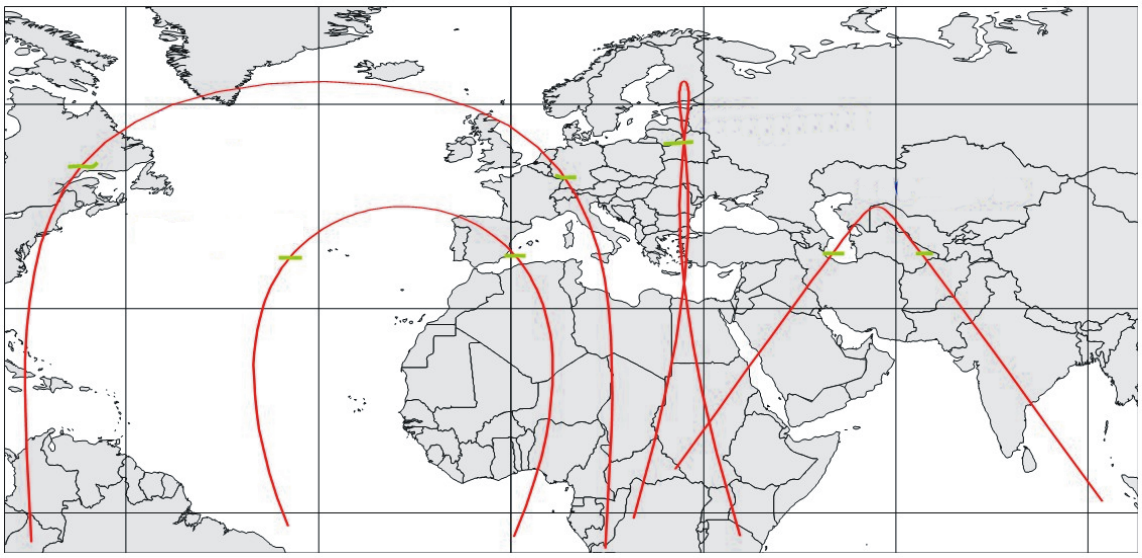
الشـــكل 6

أجزاء من المسالك الأرضية للأنظمة HEO من 5 إلى 8، تبين الأقواس "النشيطة"



الشـــكل 7

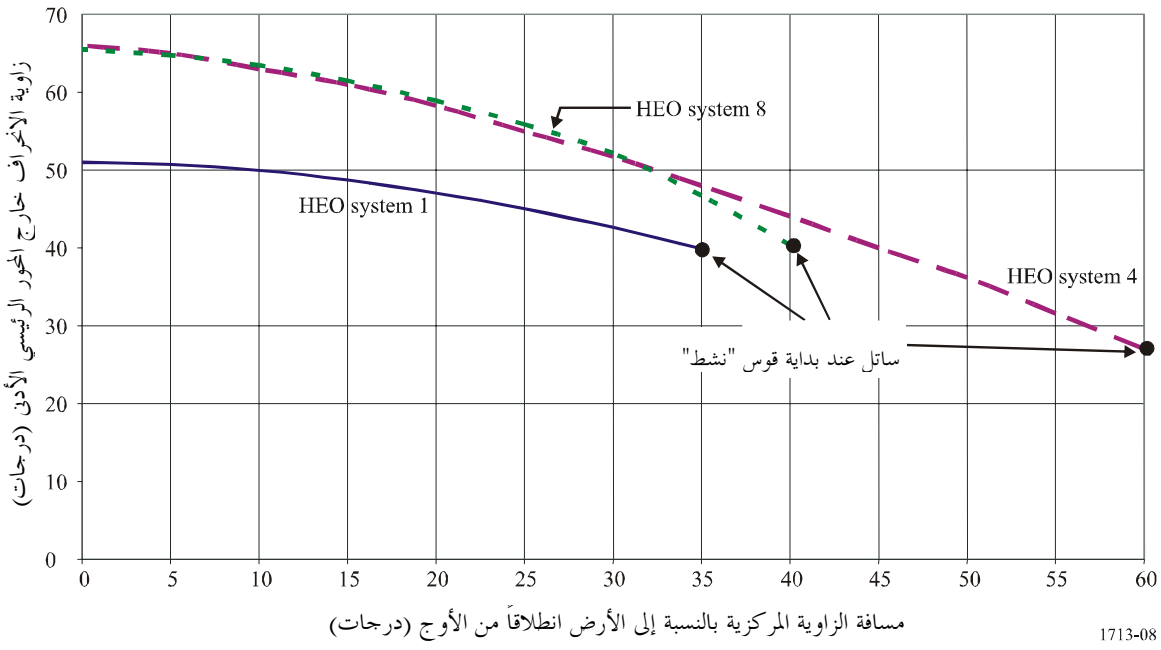
أجزاء من المسالك الأرضية للأنظمة HEO من 9 إلى 12، تبين الأقواس "النشيطة"



وأخيراً، يعرض الملحق 3 وسيلة للتحقق من صحة الفقرة ج) من *"إذ تضع في اعتبارها"* في الحالات التي أُخذت كمثال. وقد حدث ذلك بالنسبة إلى الأنظمة 1 و4 و8، بهدف تغطية كافة أنواع الأنظمة، بحساب الزاوية الأدنى خارج المحور الرئيسي (أو زاوية التباعد الأدنى) بالنسبة إلى قيم تتناقص تدريجياً للزاوية المركزية بالنسبة إلى الأرض (θ) بين ساتل HEO والأوج. ويحتوي الشكل 8 على تصوير بياني لهذه النتائج.

الشـــكل 8

تغير زاوية الانحراف عن المحور الرئيسي الأدنى بتغير بُعد الساتل HEO عن الأوج



يبين الشكل 8 بوضوح، فيما يتعلق بالأنظمة HEO النمطية، أنه بقدر ما يكون الساتل بعيداً عن أوج مداره تقل زاوية الانحراف الأدنى عن المحور الرئيسي التي يكون فيها قابلاً للرؤية من المحطات الأرضية التي تشغل نظرياً ساتلاً مستقراً بالنسبة إلى الأرض يقع على خط طول أسوأ حالة في القوس GSO بالنسبة إلى مدار الساتل HEO تحديداً.

الملحق 5

طريقة حساب زاوية التباعد الأدنى عند سطح الأرض داخل مسقط حزمة ساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض عند خط طول معين بين الساتل المذكور وساتل HEO داخل قوسه النشيط

1 الشكل الهندسي المستوي للمدار الإهليلجي

يبين الشكل 9 الوارد أدناه رسماً ثنائي الأبعاد للمسير الذي يتخذه ساتل HEO ما يدور حول الأرض. والمعلمات التي غالباً ما تُستعمل لتحديد موقع هذا الساتل آنياً داخل مداره، وهي زاوية الاختلاف المتوسط، M، وزاوية الاختلاف المركزي، E، وزاوية الاختلاف الحقيقي، f، مبينة في التعابير الواردة أدناه[2]، وحيث تعرّف الرموز على النحو الآتي:

$$M = 2\pi t/T \text{ (rad)}$$

$$M = E - e\sin(E) \text{ (rad)} \qquad \text{(معادلة كبلر)}$$

$$f = 2\tan^{-1}(\{(1+e)/(1-e)\}^{0.5}\tan(E/2)) \text{ rad}$$

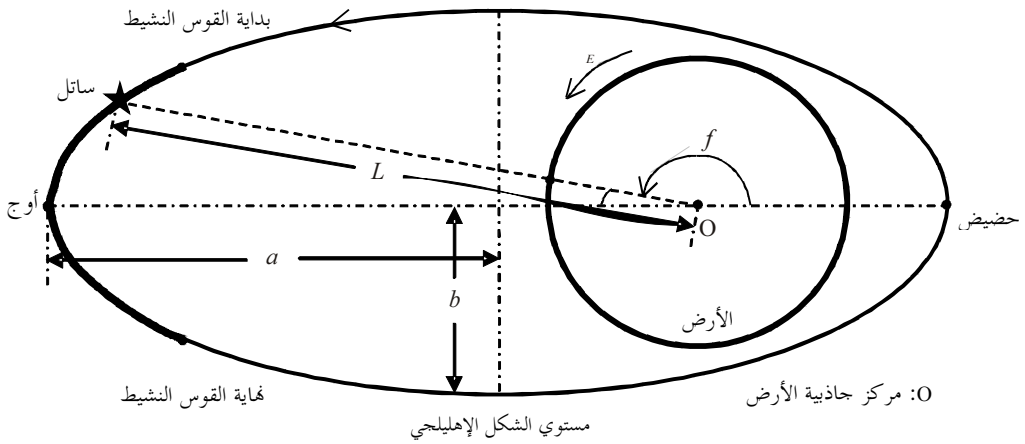
ويمكن أيضاً الاستدلال على أن الطول L بين ساتل HEO بقوس "نشيط" ومركز جاذبية الأرض يُعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$L = a(1 - e\cos(E)) \text{ km}$$

[2] انظر الملحق 1 للتوصية ITU-R S.1529.

الشـــكل 9

الشكل الهندسي المستوي لمدار إهليلجي



a: محور شبه رئيسي (km)
b: محور شبه ثانوي (km)
i: زاوية الميل (rad)
e: زاوية الاختلاف
f: زاوية اختلاف حقيقي (rad)
E: زاوية اختلاف مركزي (rad)

t: الزمن (t=0: حضيض) (ثانية)
T: دور مداري (ثانية)
θ: الزاوية المقيسة من الأوج (rad)
ω_E: السرعة الزاوية لدوران الأرض (rad/s)

1713-09

2 حساب الإحداثيات الجغرافية لساتل HEO "نشيط"

يمكن باتباع الطريقة الواردة في الخطوة 2 من الملحق 1 حساب كل من خط العرض، λ_C، وخط الطول النسبي، α_C، لساتل HEO بقوس "نشيط"، كما يُعبر عن خط الطول المطلق، α، للساتل المذكور بالمعادلة التالية:

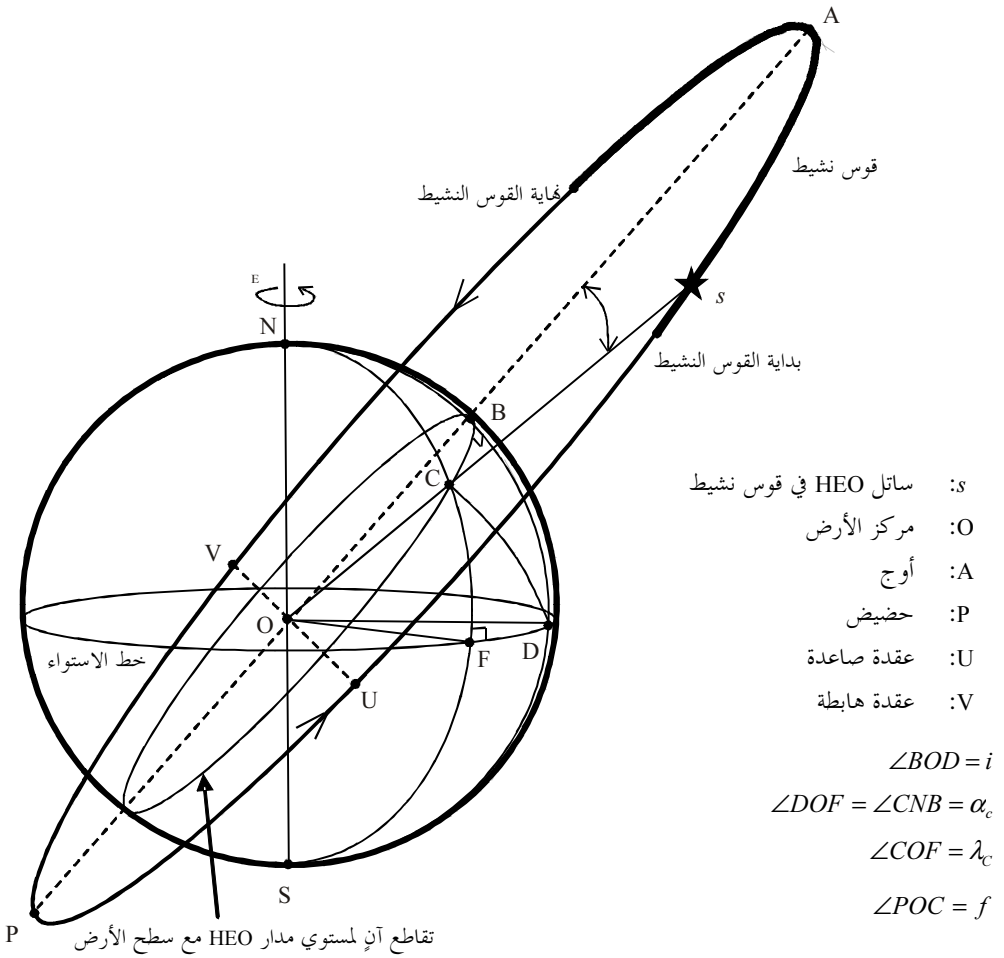
$$\alpha = \alpha_c + \alpha_{apogee} - \omega_E (t - t_{apogee}) \quad \text{(rad)}$$

t_{apogee}: الزمن عند الأوج (بالثواني)

α_{apogee}: خط طول الأوج (rad)

الشـــكل 10

الإحداثيات الجغرافية لساتل HEO



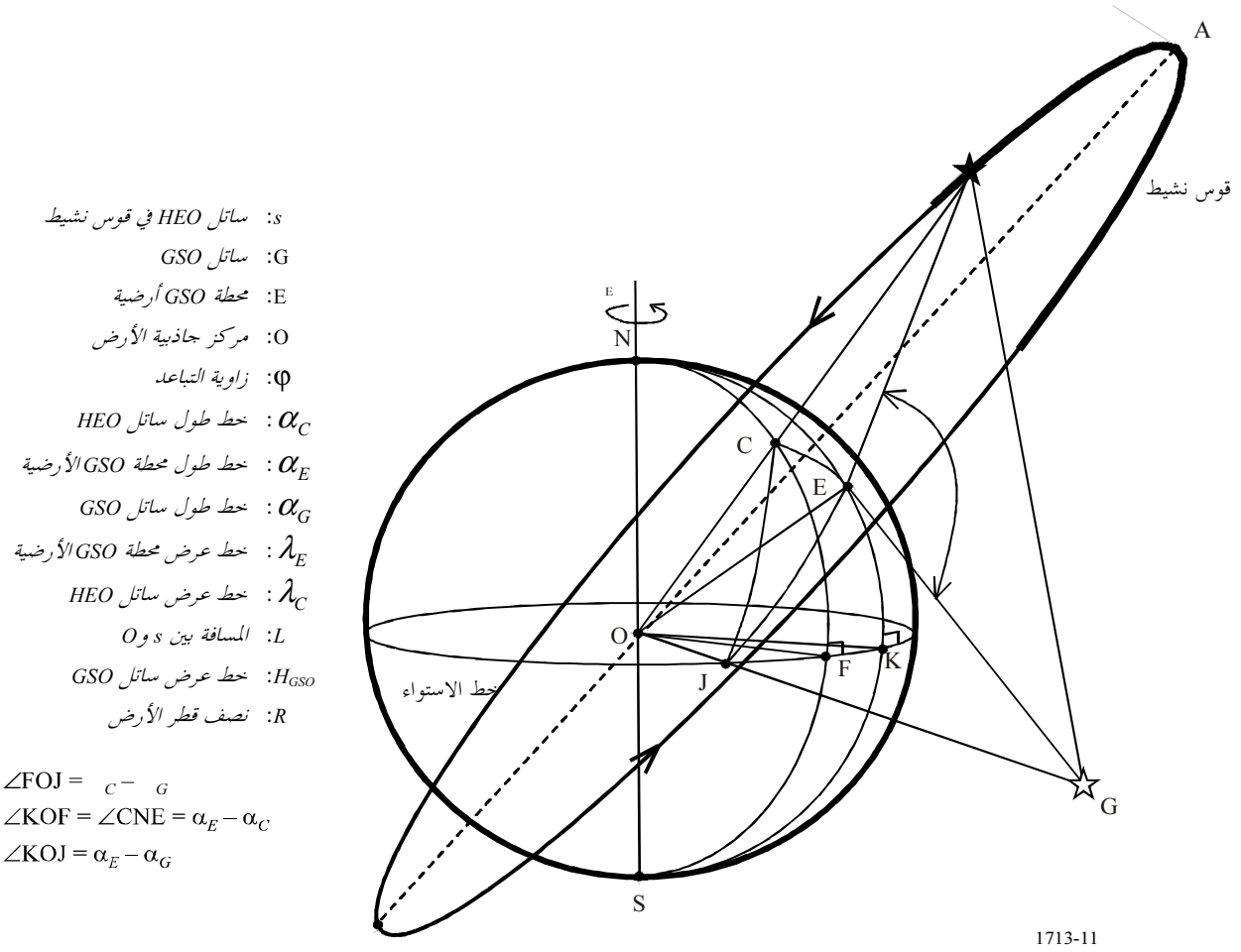
1713-10

3 حساب زاوية التباعد الأدنى

من الممكن باتباع الطريقة الواردة في الخطوة 3 من الملحق 1 حساب زاوية التباعد، φ، بين ساتل HEO بقوس "نشيط" وساتل GSO معين في محطة أرضية في أي موقع جغرافي تستقبل إشارات من ساتل GSO إذا ما عُرفت زاوية ميل المدار HEO، وارتفاع الأوج، وارتفاع الحضيض، وزاوية الاختلاف المركزي، وخط طول الأوج، وخط طول المدار GSO.

الشـــكل 11

زاوية التباعد بين ساتل HEO وساتل GSO انطلاقا من محطة GSO أرضية على خط الطول E



ويُلاحظ في الملحق 1 أن قيمة المتغيرين α_E وα_G نسبية إزاء المتغير α_C، بينما يشر المتغيران المذكوران في الملحق 5 إلى خطي الطول المطلقين للمحطة E والساتل G على التوالي.

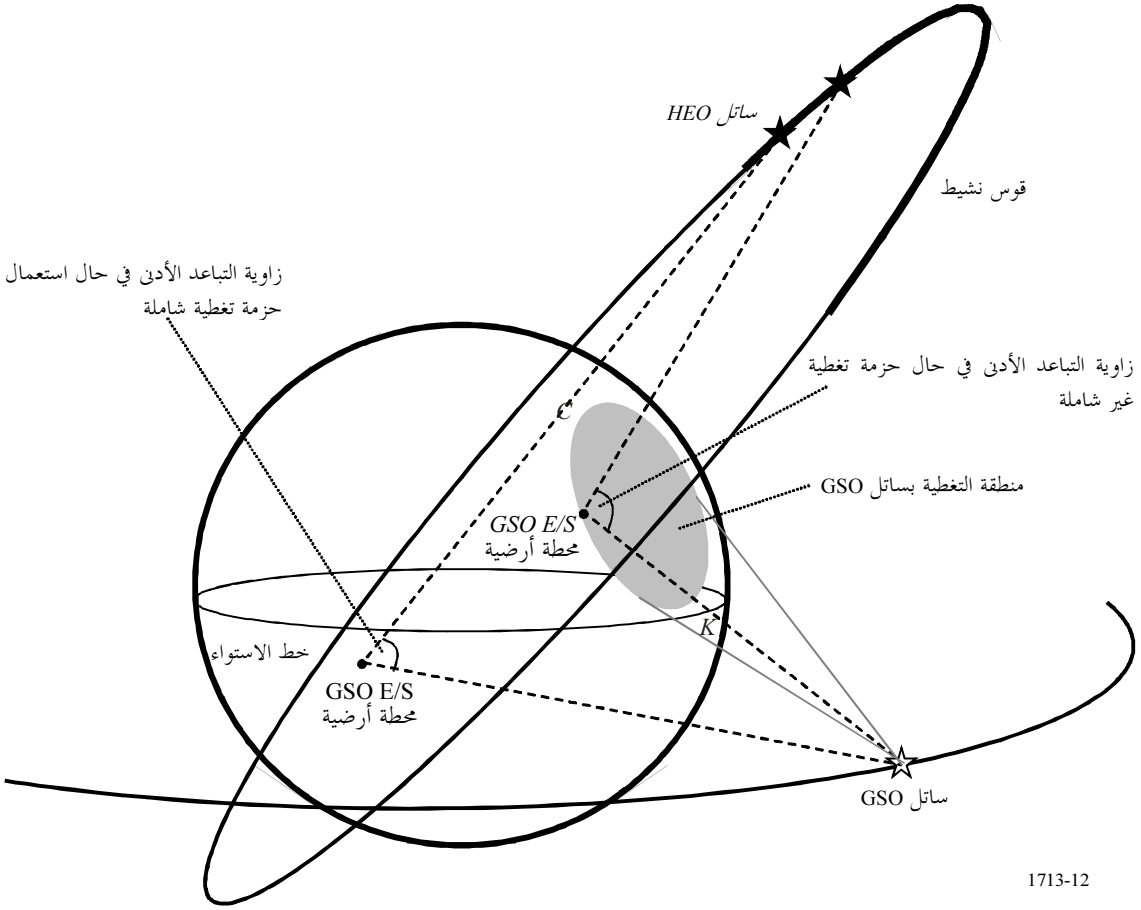
ولإيجاد القيمة الدنيا للزاوية φ، يمكن إعداد برنامج حاسوبي لتكرار طائفة من توليفات المتغيرات α_E وλ_E وt، وذلك بتطبيق الطريقة المبينة في الخطوة 3 من الملحق 1 لحساب الزاوية φ في كل توليفة، ومن ثم انتقاء القيمة الأدنى.

ونظراً إلى أن التداخل لا يمكن أن يحصل إلا في توليفات المتغيرات α_E وλ_E وt التي تكون فيها المحطة الأرضية مرئية بالنسبة لساتل HEO وساتل GSO على حد سواء، وإلى أنه لا بد من دراسة جميع هذه التوليفات، فإن من المناسب تنظيم البرنامج الحاسوبي بطريقة يشمل فيها طوائف واسعة من المتغيرات الثلاثة ومن ثم يسقط من الحساب جميع التوليفات التي تحجب فيها الأرض المحطة الأرضية عن الساتل GSO أو الساتل HEO أو عن كليهما. ويوضح ذلك الشكل 2.

وفي الحالات التي لا يستعمل فيها الساتل GSO حزمة تغطية شاملة، ينبغي أيضاً استبعاد التوليفات التي تضع المحطة الأرضية GSO خارج نطاق عرض الحزمة المستعملة من جانب الساتل المذكور.

الشـــكل 12

زاوية التباعد الأدنى بين ساتل HEO وساتل GSO في حال حزمة تغطية غير شاملة



ومن الممكن أيضاً حساب النسبة $\Delta T/T$ بتطبيق منهجية الملحق 2.

الملحق 6

أمثلة على تطبيق منهجية الملحق 5

يبين الجدول 2 أدناه النتائج المحددة بناء على الملحق 5 فيما يخص 12 تصميماً مختلفاً من تصاميم أنظمة HEO الواردة في الجدول 1.

الجـــدول 2

زوايا التباعد الأدنى في حال ساتل GSO ذي حزمة تغطية شاملة

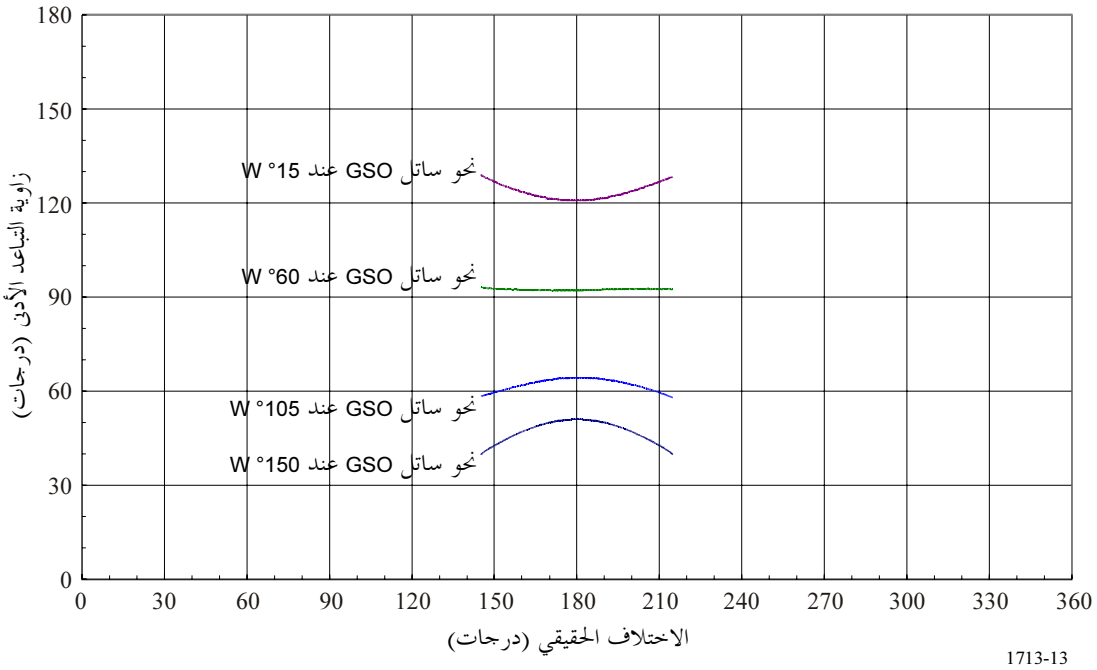
1. نظام HEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. ارتفاع الأوج (km)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	47669	39 300	27 470
3. ارتفاع الحضيض (km)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	9312,9	1 075	310
4. الاختلاف المركزي للمدار	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. زاوية ميل المدار (بالدرجات)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. خط طول الأوج (°E)	150–	108–	62–	43–	130–	38–	110–	83–	30–	18–	27	57
7. دور القوس النشيط (ساعة)	6,26[1]	6[1]	7[1]	8[1]	8[1]	5,9[1]	6[1]	5,1[1]	2[1]	9[1]	6,12[1]	4[1]
8. خط طول ساتل GSO (°E)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
9. زاوية التباعد الأدنى (بالدرجات)	80,5	109,6	118,6	120,2	87,4	145,4	102,5	112,6	118,2	126,7	100,2	78,5
10. خط طول المحطة الأرضية (°N)	153–	76	60	150–	66	60	62	149–	59	165–	152–	162–
11. خط عرض المحطة الأرضية (°E)	40–	62	24	18	45	22	34	7–	6–	61	35	58
12. خط طول ساتل HEO (°E)	150,3–	114,1–	62–	43–	141,3–	38,1–	112,0–	96,8–	3,7	2,6	27,3	63,4
13. خط عرض ساتل HEO (°N)	38,9	35,4	63,4	63,4	48,8	40,0	62,4	59,5	54,1	36,6	63,2	38,8

[1] وضعت هذه القيم بمضاعفة القيم الواردة في الصف السابع من الجدول 1.

وتبين أيضاً الأشكال 13 و14 و15 نتائج حساب زاوية التباعد الأدنى لكل زاوية اختلاف حقيقي في أمثلة أنظمة HEO 1 و4 و8 على التوالي. وتبين النتائج المذكورة أن زاوية التباعد الأدنى بين ساتل HEO بقوس "نشيط" وساتل GSO معين تختلف باختلاف خط طول الساتل GSO، كما تبرهن صحة الفقرة ح) من "*إذ تضع في اعتبارها*" الواردة أعلاه. ويلاحظ في هذا الصدد أن الأوج يكون في زاوية اختلاف حقيقي قدرها 180 درجة، وأن المنحنيات المبينة في كل شكل تمتد من زاوية الاختلاف الحقيقي في بداية القوس النشيط إلى زاوية الاختلاف الحقيقي في نهايته.

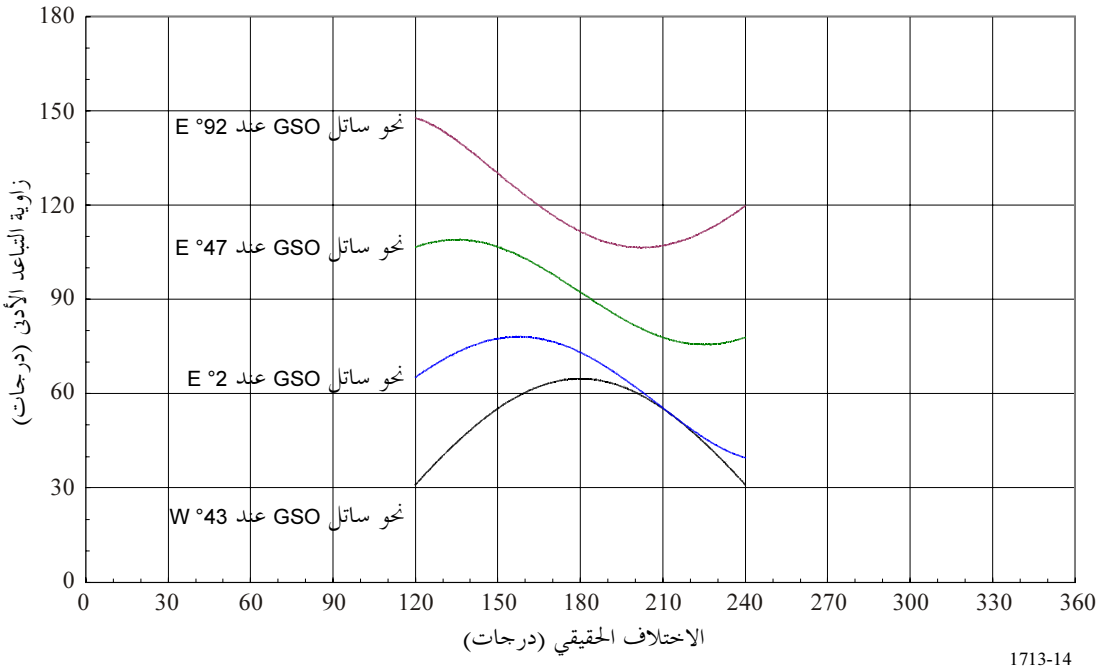
الشـــكل 13

زاوية التباعد الأدنى مقابل زاوية الاختلاف الحقيقي لساتل بقوس "نشيط" من النظام 1 HEO



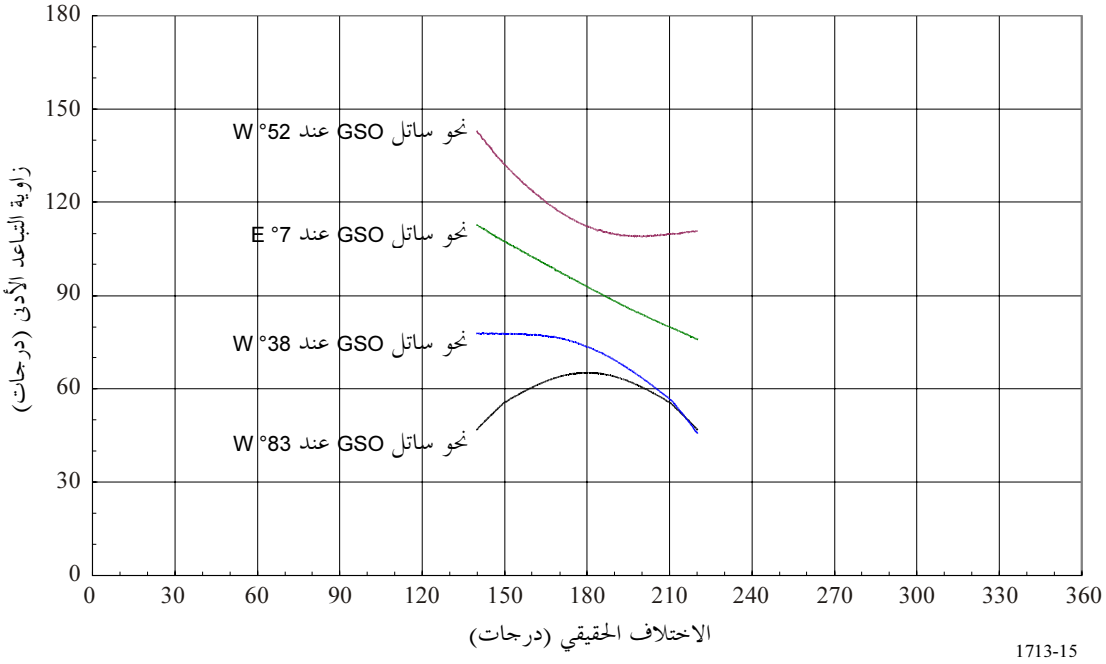
الشـــكل 14

زاوية التباعد الأدنى مقابل زاوية الاختلاف الحقيقي لساتل بقوس "نشيط" من النظام 4 HEO



الشـــكل 15

زاوية التباعد الأدنى مقابل زاوية الاختلاف الحقيقية لساتل بقوس "نشيط" من النظام 8 HEO



ويبين الجدول 3 مثالاً على بيانات مسقط الحزمة الإهليلجي لساتل GSO على خط طول 135° E. ويورد الجدول 4 معلمات زوايا التباعد الأدنى بين مثال من نظام 4 HEO والساتل GSO على نفس خط الطول 135° E، على أساس بيانات مسقط الحزمة الواردة في الجدول 3، كما يوضح الشكل 16 زاوية التباعد الأدنى لكل اختلاف حقيقي في هذه الحالة.

الجـــدول 3

بيانات مثال لمسقط حزمة إهليلجي لمثال ساتل GSO على خط طول 135° E

خط الطول (°E)	خط العرض (°N)	خط الطول (°E)	خط العرض (°N)	خط الطول (°E)	خط العرض (°N)
75,7	39,9	74,3	6,3	103,0	29,5
73,3	37,4	77,7	4,8	104,0	32,5
71,1	34,8	81,8	4,4	104,6	35,5
69,1	32,2	85,7	5,4	104,8	38,6
67,8	29,2	88,7	7,5	104,0	41,6
67,2	26,1	91,3	9,9	101,7	44,1
66,9	23,1	93,7	12,4	98,1	45,6
66,7	20,1	95,7	15,1	94,0	46,1
67,0	17,0	97,3	17,9	89,9	45,8
67,7	13,9	98,8	20,8	86,0	44,9
69,1	11,1	100,3	23,7	82,1	43,7
71,4	8,5	101,7	26,5	78,7	42,1

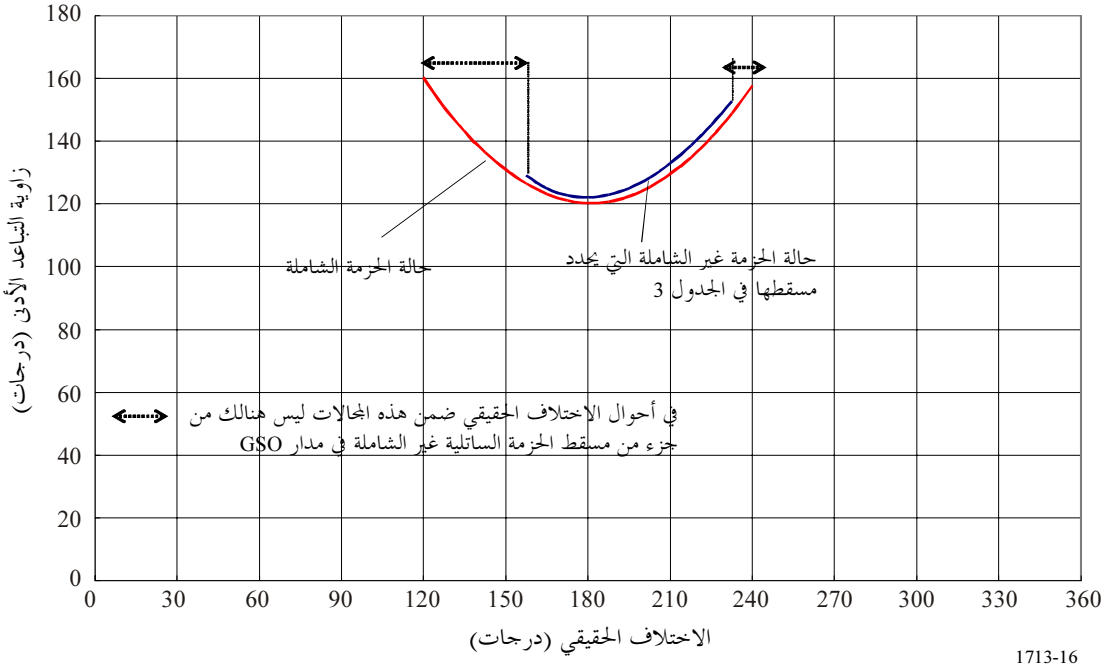
الجـــدول 4

زاوية التباعد الأدنى في حال تشغيل ساتل GSO نموذجي بدون أثر حزمة تغطية شاملة

1. نظام HEO	4
2. ارتفاع الأوج (km)	35 800
3. ارتفاع الحضيض (km)	35 800
4. الاختلاف المركزي للمدار	0
5. زاوية ميل المدار (بالدرجات)	63,4
6. خط طول الأوج (°E)	43−
7. دور القوس النشيط (h)	8
8. خط طول ساتل GSO (°E)	135
9. زاوية التباعد الأدنى (بالدرجات)	122,0
10. خط طول المحطة الأرضية (°E)	67
11. خط عرض المحطة الأرضية (°N)	18
12. خط طول ساتل HEO (°E)	39,93−
13. خط عرض ساتل HEO (°N)	63,29

الشـــكل 16

زاوية التباعد الأدنى مقابل زاوية الاختلاف الحقيقية لساتل بقوس "نشيط" من النظام HEO 4 (موقع الساتل GSO على خط طول 135° E)



ويشتمل ملف Excel المضمن "MinSepAnnex5" الوارد أدناه على برنامج Visual Basic المتعلق بتطبيق منهجية الملحق 5. وهذه الأداة دقيقة في حساب زاوية التباعد الأدنى في كلتا الحالتين الآتيتين: ساتل GSO بحزمة شاملة وساتل GSO بدون هذه الحزمة. ومن الملاحظ أن هذه الأداة دقيقة في حساب زاوية التباعد الأدنى داخل نطاق أثر إحدى الحزم المشكلة شريطة ألاّ يحتوي الأثر على تقعرات. وإذا تضمن الأثر تقعرات من هذا القبيل، ينبغي أن تشتمل معطيات الدخل على نقاط اصطناعية تعمل على تجسير كل تقعر، وفي حال حساب زاوية التباعد الأدنى في موقع جغرافي موجود داخل أحد التقعرات، لا بد أن يفترض المستعمل أن الزاوية تقع على محيط الأثر عند النقطة الأقرب إلى النقطة المحسوبة.

MinSepAnnex5.
xls