

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.1713

Методика расчета минимального углового разноса на поверхности Земли между негеостационарным спутником на "активной" дуге высокой околоземной орбиты и геостационарным спутником

(Вопрос МСЭ-R 241/4)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

(2005)

учитывая,

- а) что в подавляющем большинстве проектов спутниковых систем на высокой околоземной орбите (ВОО) апогей каждого спутника наступает в точке самой высокой широты его орбиты и каждый спутник осуществляет передачу только тогда, когда он находится в пределах "активной" дуги вокруг апогея;
- б) что ключевым параметром для определения наихудшего случая помех между системой ВОО и системой ГСО является минимальный угловой разнос, при котором активный спутник ВОО виден с любой земной станции, работающей со спутником ГСО;
- с) что для систем, указанных в п. а) раздела *учитывая*, минимальный угловой разнос, о котором говорится в п. б) раздела *учитывая*, имеет место тогда, когда спутник находится в начале или в конце активной дуги (т. е. в точке самой низкой широты в активной дуге);
- д) что угловой разнос, при котором спутник ВОО виден с земной станции, зависит от широты и долготы этой земной станции и от долготы соответствующего спутника ГСО;
- е) что определение минимального углового разноса между системой ВОО и сетью ГСО содействовало бы быстрой предварительной оценке возможности для системы ВОО совместно использовать полосу частот с системами ГСО,

рекомендует,

- 1** что методику, описанную в Приложении 1, можно использовать для расчета углового разноса, при котором данный спутник ВОО "виден" с данной земной станции, работающей с данным спутником ГСО;
- 2** что Приложение 2 может быть использовано для определения повышения шумовой температуры в линии ГСО вследствие помех от спутника ВОО.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В Приложении 3 итерационно применяется методика, содержащаяся в Приложениях 1 и 2 для определения минимального углового разноса, при котором активный спутник заданной системы ВОО может быть виден с любой другой земной станции, работающей с любым спутником ГСО, и таким образом рассчитывается наихудший случай повышения шумовой температуры в линии ГСО.

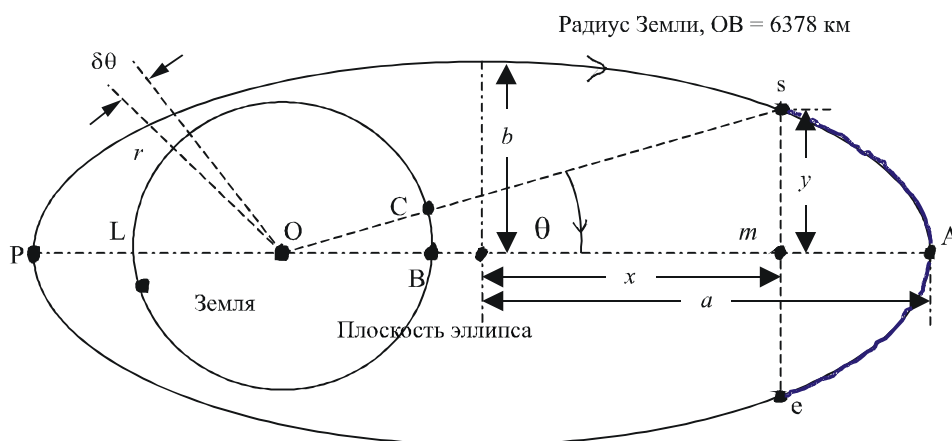
ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В Приложении 4 даются примеры применения Приложений 1–3.

Приложение 1

Определение минимального углового разноса при помехах от ВОО линии вниз ГСО

На рисунке 1 приводится двухмерное изображение траектории движения спутника вокруг Земли. Обычно это представляет собой эллиптическую орбиту, где одна из двух фокусных точек совпадает с центром гравитации Земли O , и плоскость орбиты наклонена по отношению к экваториальной плоскости Земли (ГСО является частным случаем, когда эллипс становится кругом в экваториальной плоскости).

РИСУНОК 1
Планиметрия эллиптической орбиты



1713-01

В большинстве систем ВОО спутник на такой орбите передает (или принимает) только тогда, когда он находится в пределах ограниченной дуги, содержащей апогей A , и поэтому будет создавать (или испытывать) помехи только тогда, когда он находится в пределах той дуги, которая обычно называется активной дугой. Подавляющее большинство систем ВОО проектируется так, чтобы апогей являлся самой высокой точкой по широте, и в таких случаях максимальные уровни помех потенциально возникают, когда спутник находится в начале или в конце своей активной дуги. Длина активной дуги зависит от системы. На рисунке 1 начало активной дуги обозначено как s и конец как e . Динамика орбиты такова, что спутник быстро проходит область перигея, P , и относительно медленно область апогея (фактически, область, охватываемая вектором радиуса, r , за единицу времени, т. е. $r^2/2\delta\theta/\delta t$, является постоянной для всей орбиты).

Этап 1: Первым этапом здесь является определение длины Os , исходя из основных характеристик орбиты.

Информация, обычно представляемая в МСЭ-R относительно системы ВОО, включает следующее: высоту апогея (AB (км)); высоту перигея (PL (км)); эксцентриситет, ϵ ; наклонение, i° ; истинную аномалию начала (и конца) активной дуги (угол POs на рисунке 1, т. е. $180^\circ - \theta^\circ$).

В качестве альтернативы истинным аномалиям s и e часто даются периоды времени движения спутника из s до апогея и от апогея до e , например ± 4 час. В таких случаях величина θ может быть получена путем моделирования ситуации время-этап для его определения либо путем объединения, основанного на том факте, что $r^2/2\delta\theta/\delta t$ является постоянной, но оба варианта являются относительно сложными. Для изучений МСЭ-R более удобно получать в явном виде или истинную аномалию s (или e), или угол θ , именно это здесь и предполагается; тем не менее, электронная версия динамической таблицы EXCEL, приложенная к данной Рекомендации, содержит стандартную

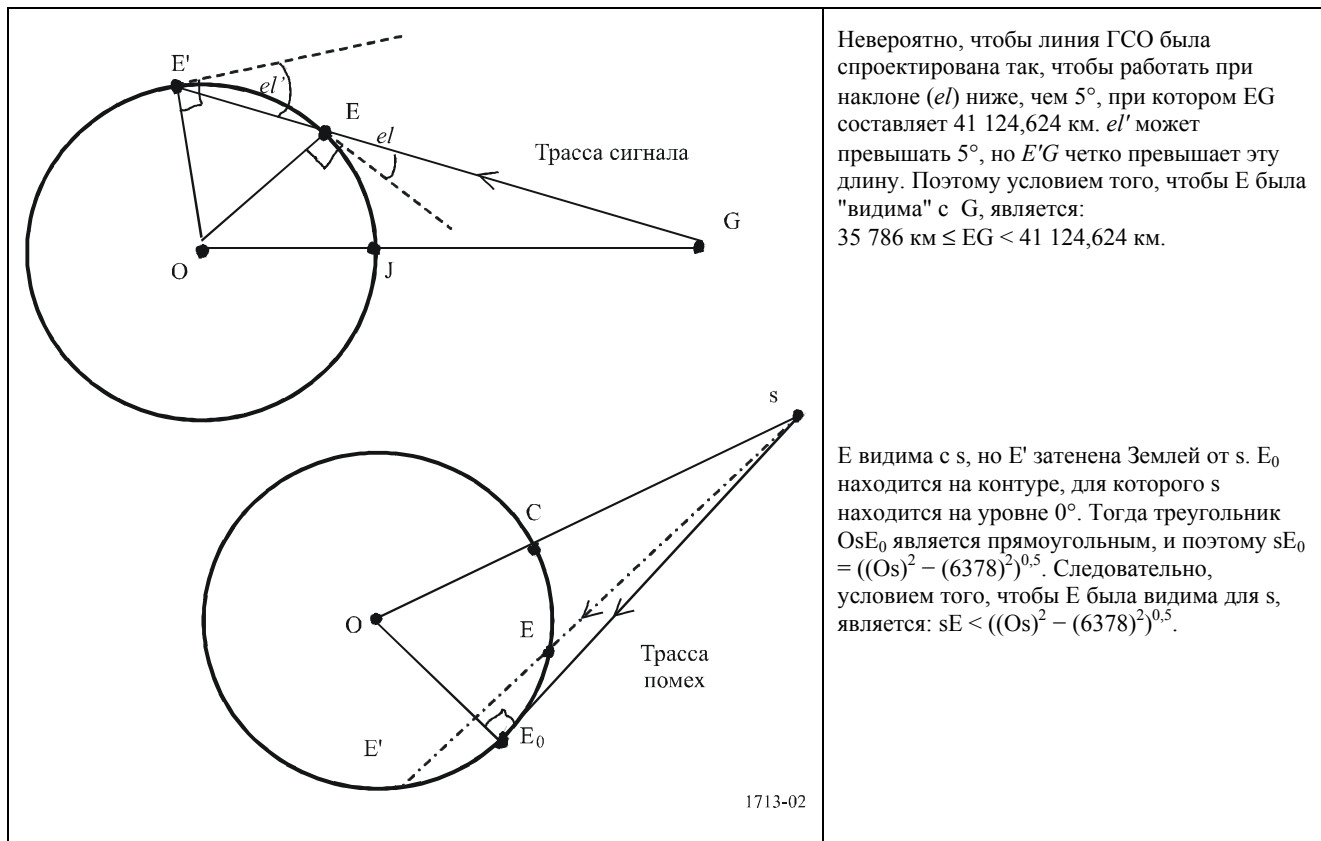
программу visual basic для определения θ со времени до апогея, когда спутник достигает s (или время после апогея, когда спутник достигает e).

Можно отметить, что информация, требуемая для представления в соответствии с Приложением 4 к РР при передаче в Бюро радиосвязи любых заявок на спутниковые системы НГСО, содержит высоту апогея и перигея и эксцентриситет, но в настоящее время пределы активной дуги, которые относятся только к системам НГСО, класса ВОО, не включены в список данных, которые необходимо представлять. Тем не менее, для систем НГСО (потенциально включающих ВОО), планируемых для использования в полосах частот, в которых применяются пределы э.п.п.м. Статьи 22 РР, одним из параметров, требуемых по Приложению 4 к РР, является минимальная высота над поверхностью Земли, на которой осуществляет передачу любой спутник системы. Для спутника ВОО это s_C на рисунке 1.

На основе рисунка 1, используя тригонометрию на эллипсе и на плоскости, может быть составлено квадратное уравнение для x в зависимости от AB , PL , ϵ и θ и решено для x , а длина Os может быть затем найдена из треугольника Oms .

РИСУНОК 2

Примеры плоскостных треугольников



Этап 2: Следующий этап связан с нахождением широты s и ее долготы относительно синхронизированной долготы апогея, что может быть сделано с использованием рисунка 3. Это представляет собой трехмерное изображение орбиты с использованием тех же символов, что и на рисунке 1, поэтому Os равняется величине, рассчитанной на Этапе 1. Применяя теорему косинусов на сфере к сферическим треугольникам $OBCD$ и $CODF$ на рисунке 3 и затем применяя теорему синусов на сфере к сферическому треугольнику $ONBC$, можно вывести, что долгота s относительно A (α_c) и ее широта (λ_c) получаются как:

$$\alpha_c = -\angle FOD = -\tan^{-1}[\tan(\theta)/\cos(i)] \text{ и } \lambda_c = \angle FOC = \cos^{-1}[\sin(\theta)/\sin(\alpha_c)]$$

РИСУНОК 3

Географические координаты начала активной дуги ВОО

A, B, C, L, O, P, s и θ даны на рисунке 1.

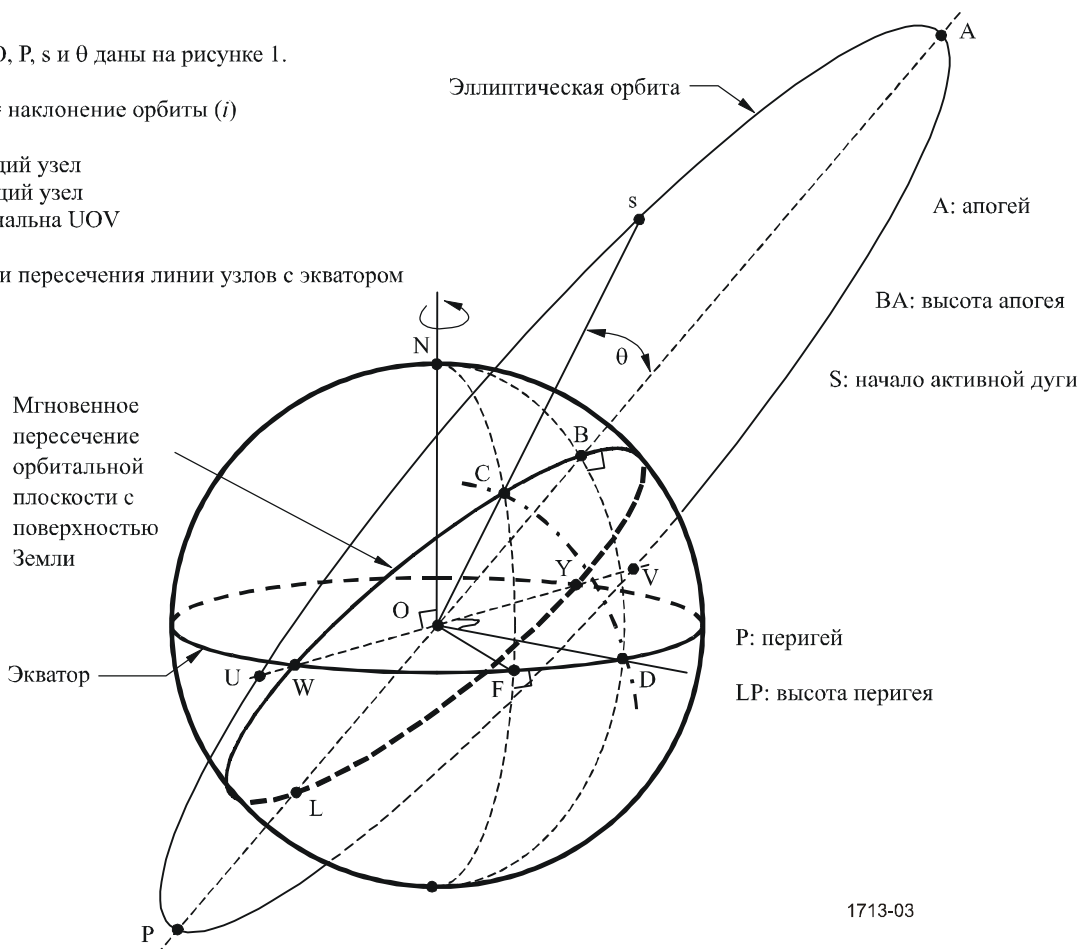
Угол BOD = наклонение орбиты (i)

U: восходящий узел

V: нисходящий узел

OD: ортогональна UOV

W и Y: точки пересечения линии узлов с экватором



1713-03

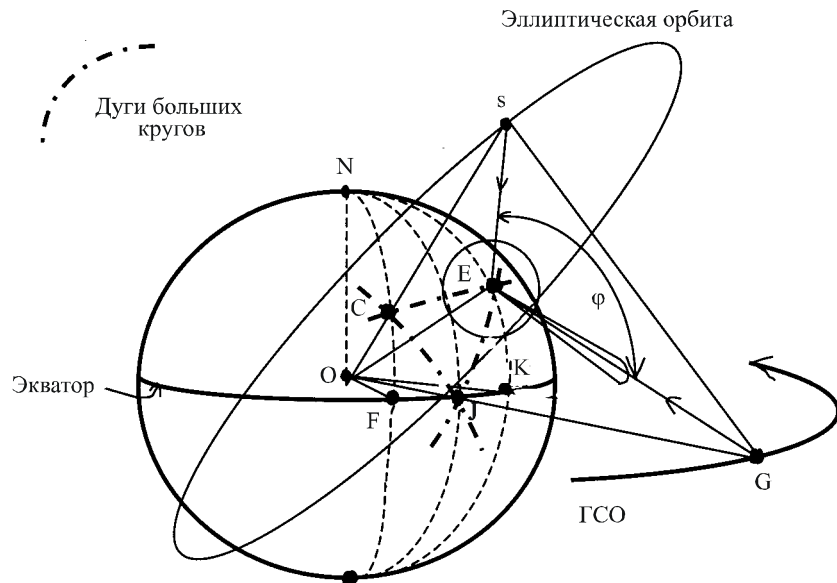
Этап 3: Найдя широту и мгновенную относительную долготу s, соответствующий угловой разнос по помехам (ϕ) на любой земной станции E, работающей с любым геостационарным спутником G, может быть рассчитан с использованием рисунка 4, в котором точки C, O, F, N и s идентичны тем, которые указаны на рисунке 3. Таким образом, на рисунке 4 широта E равна λ_E и ее долгота относительно долготы A равна α_E и долгота G относительно долготы A равна α_G . В результате, поскольку α_C , α_E , λ_C , λ_E , α_G , OE (радиус Земли), OG (радиус ГСО) и Os известны или были рассчитаны,

- применяя теорему косинусов на сфере к сферическому треугольнику ONCE и затем применяя теорему косинусов на плоскости к плоскостному треугольнику OsE, можно рассчитать длину sE;
- применяя теорему косинусов на сфере к сферическому треугольнику OCFJ и затем применяя теорему косинусов на плоскости к плоскостному треугольнику OsG, можно рассчитать длину sG; и
- применяя теорему косинусов на сфере к сферическому треугольнику OEJK и затем применяя теорему косинусов на плоскости к плоскостному треугольнику OEG, можно рассчитать длину EG.

И, наконец, в плоскостном треугольнике EsG, поскольку уже рассчитаны все три стороны sE, sG и EG, угол ϕ можно найти с использованием теоремы косинусов на плоскости.

РИСУНОК 4

Геометрия помех от спутника ВОО в начале активной дуги
земной станции сети ГСО (т. е. трасса sE)



C, F, N, O и s: даны на рисунке 3.

G: геостационарный спутник

E: земная станция, принимающая от G

1713-04

Таким образом, используя данную процедуру, можно рассчитать угловой разнос по помехам ϕ для любой линии вниз ГСО (т. е. для земной станции в любом географическом местоположении, осуществляющей прием со спутника ГСО на любой долготе), если известны угол наклона ВОО, высота апогея, высота перигея, эксцентриситет и истинная аномалия или время относительно апогея начала (или конца) активной дуги.

Чтобы найти минимальную величину ϕ , нужно написать простую компьютерную программу и пройти через диапазон комбинаций α_E , λ_E и α_G , используя вышеуказанную процедуру для расчета ϕ для каждой комбинации, и затем выбрать наименьшую величину. Поскольку помехи могут возникнуть только для комбинаций α_E , λ_E и α_G , при которых E является видимой как для G, так и для s (см. рисунок 4), но все такие комбинации должны быть рассмотрены, целесообразно подготовить простую программу, чтобы включить широкий диапазон этих трех переменных, и затем исключить из вычислений любые комбинации, где E затемнена Землей от G или s или как от G, так и от s. Это иллюстрируется в следующих примерах на рисунке 4 для плоскостных треугольников.

Приложение 2

Расчет увеличения шума в линии ГСО вследствие помех от спутника ВОО в начале его активной дуги

Из рисунка 4 можно видеть, что помехи от спутника ВОО в s линии между геостационарным спутником в G и земной станцией в E будут поступать в приемник земной станции через боковой лепесток диаграммы направленности антенны. Соответствующее увеличение шумовой температуры линии ГСО определяется как:

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

где:

- $\Delta T / T$: увеличение шума в линии, выраженное в процентах;
- E_1 : плотность э.и.и.м. несущей, передаваемой спутником ВОО (дБ(Вт/Гц));
- d : длина трассы помех sE (м);
- λ : длина волны (м) $= (0,3)/f$, где f является несущей частотой ВОО (ГГц);
- $G(\varphi)$: усиление приема антенны земной станции на частоте f и при угле вне оси φ (дБи);
- T : шумовая температура линии ГСО (К);
- k : постоянная Больцмана, т. е. $10 \log(k) = -228,6$ дБ(Вт/Гц/К).

T может быть шумовой температурой только линии вниз ГСО или шумовой температурой системы ГСО, отнесенной ко входу приемника земной станции, зависимой от выбираемой формы выражения $\Delta T / T$.

Поскольку методика в данном Приложении относится к расчету помех между системами НГСО и ГСО, для расчета $G(\varphi)$ целесообразно использовать диаграммы усиления, приведенные в Рекомендации МСЭ-R S.1428, где $G(\varphi)$ выражается через D/λ и D – диаметр антенны (м).

Приложение 3

Итеративная реализация методики в Приложении 1

В присоединении процедура, разработанная в Приложении 1, реализуется в динамической таблице EXCEL, которая содержит программы Visual Basic для прогона всех комбинаций широты и долготы земной станции и долготы спутника ГСО, при которых как спутник ГСО, так и начало активной орбиты системы одновременно видны, и, таким образом, для определения минимального углового разноса на любой земной станции, в которой могут возникнуть взаимные помехи. Для удобства пользователя, простые шаги, описанные в Приложении 2, включены в динамическую таблицу, с тем чтобы обеспечить результат, дающий максимальную величину $\Delta T / T$ вследствие этих помех, если это требуется. Как очевидно из примеров в Приложении 4, динамическая таблица охватывает все типы орбиты, в которых используется активная дуга, при условии, что дуга не пересекает никакие линии между ГСО и поверхностью Земли на широте $\pm 81,3^\circ$.

Единственными входными требуемыми данными являются следующие параметры системы ВОО:

- высота апогея (км);
- высота перигея (км);
- эксцентриситет (как десятичная дробь);
- угол наклона орбиты (градусы);
- один (или более) из трех параметров для определения начала s (или конца "e") активной дуги, т. е.:
 - любой геоцентрический угол между s и апогеем (градусы);
 - или время, затрачиваемое спутником для движения между s и апогеем (час)¹;
 - или высота s (км).

Если пользователь желает рассчитать соответствующее значение $\Delta T/T$, то требуются следующие дополнительные входные параметры:

- максимальная плотность э.и.и.м. спутника ВОО (дБ(Вт/Гц));

и следующие параметры линии ГСО:

- диаметр (м) антенны земной станции линии ГСО;
- диаграмма усиления приема антенны земной станции линии ГСО (дБи в отношении угла от оси);
- шумовая температура линии ГСО (К);
- частота (ГГц).

Приложение 4

Примеры применения методики

В своих второй–восьмой строках таблица 1, ниже, содержит перечень орбитальных характеристик 12 различных проектов систем ВОО, составленный из информации, представленной в МСЭ-R. Чтобы проиллюстрировать такие системы, типы их следов на Земле сравниваются на рисунках 5–7. В одиннадцатой строке таблицы даются значения долготы апогея, используемые при подготовке рисунков 5–7; эти значения долготы апогея были выбраны просто для удобства иллюстрации, и никакого другого смысла здесь нет.

¹ Присоединение включает дополнительную программу Visual Basic, с тем чтобы использовать этот элемент данных, если он имеется. В этом случае рассчитывается не только минимальный угловой разнос, но и абсолютные местоположения земной станции и спутника ГСО, для которых получается этот угол, при условии, что в качестве дополнительной входной информации вводится долгота апогея ВОО. См. соответствующий файл EXCEL, озаглавленный "MinseparationHEOangle".



ТАБЛИЦА 1

1. Система ВОО	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Высота апогея (км)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	34 800	39 300	27 470
3. Высота перигея (км)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	20 600	1 075	310
4. Эксцентриситет орбиты	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. Наклонение орбиты (градусы)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. Угол δ по отношению к апогею (градусы)	35	31	(29,5)	60	(30)	37	(24)	40	(30)	(32,3)	25	(28)
7. Время τ по отношению к апогею (час)	(-3,13)	(-3)	-3,5	(-4)	-4	(-2,95)	-3	(-2,55)	-1	-4	(-3,06)	-2
8. Высота s (км)	(27 200)	(42 800)	(26 900)	Н/Д	(48 000)	(39 000)	(47 900)	(16 500)	Н/Д	(30 850)	(30 700)	(21 400)
9. Минимальный угол разноса (градусы)	39,85	35,84	52,50	26,94	49,35	31,34	55,49	40,05	51,84	37,63	55,51	37,98
10. Проверка с использованием моделирования (градусы)	(39,78)	(35,78)	(52,50)	(26,86)	(49,25)	(31,40)	(55,47)	(40,91)	(51,86)	(37,47)	(55,49)	(37,26)
11. Долгота апогея (градусы в. д.)	-150	-108	-62	-43	-130	-38	-110	-83	-30	-18	27	57
12. Долгота земной станции (градусы в. д.)	-97,63	-110,81	14,89	17,33	-43,32	38,65	-34,89	-75,38	-35,33	76,7	101,86	82,72
13. Широта земной станции (градусы с. ш.)	73,63	-46,70	2,58	-7,73	-3,15	-5,44	-2,01	73,63	73,63	-0,86	1,43	73,63
14. Долгота спутника ГСО (градусы в. д.)	-130,29	-102,22	-61,32	-58,88	-119,52	-37,55	-111,09	-108,04	-67,99	0,50	25,66	50,06
15. Пример $\Delta T/T$ (%) ⁽¹⁾	0,204	0,072	0,150	0,200	0,058	0,108	0,058	0,572	0,386	0,128	0,122	0,312

⁽¹⁾ Значения, вычисленные через Приложение 2 для $E_1 = -21$ дБ(Вт/Гц), $D = 3$ м, $T = 100$ К, $f = 11$ ГГц и $G(\phi)$ из Рекомендации МСЭ-R S.1428-1.

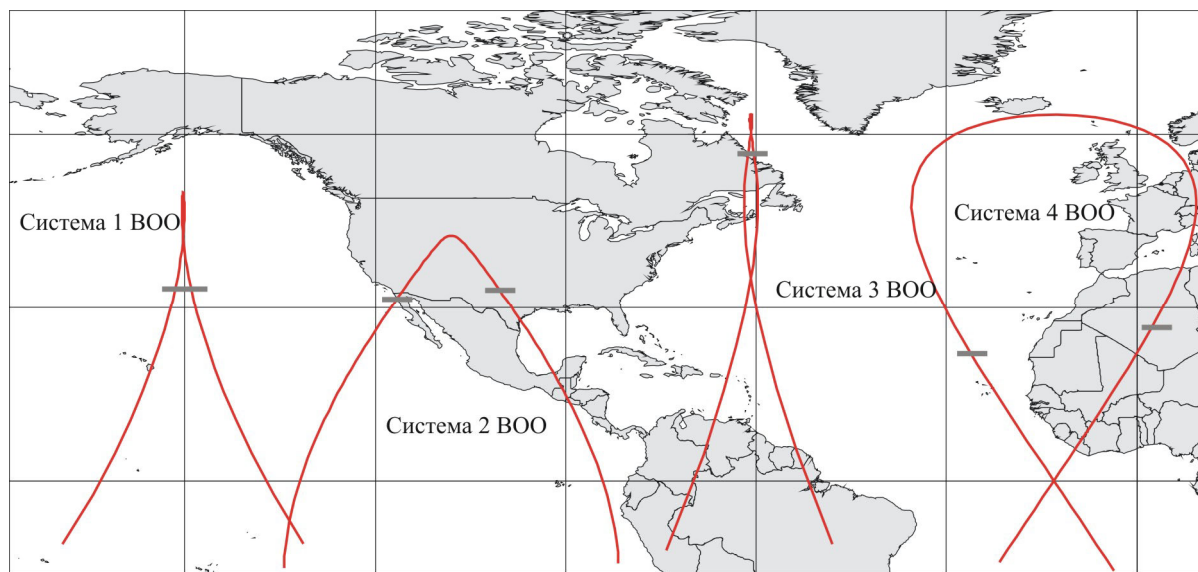
Н/Д: нет данных

Шестая, седьмая и восьмая строки являются различными путями заявления начала (или конца) активной дуги. В этих трех строках значения без скобок – это те значения, которые представлены в МСЭ-R; значения в скобках были получены из компьютерного моделирования каждой системы, задавая интервал изменения значения без скобок и отмечая два соответствующих значения в скобках. Результаты в девятой строке определены из Приложения 3, используя значения без скобок для определения начала активной дуги (когда в Приложении 3 были использованы значения в скобках, результаты были минимально различными, но разница была в пределах точности выполняемых расчетов). Проверка каждого результата была выполнена путем моделирования на компьютере, достигая минимальных углов разноса, показанных курсивом в десятой строке; как можно видеть, они находятся в тесном соответствии со значениями в девятой строке и таким образом подтверждают справедливость Приложения 3.

Кроме того, на основе значений долготы апогея в одиннадцатой строке комбинация местоположений земной станции и спутника ГСО, при которой возникает минимальный внеосевой угол, в каждом случае получалась при использовании Приложения 3, и они приводятся в двенадцатой, тринадцатой и четырнадцатой строках таблицы 1.

РИСУНОК 5

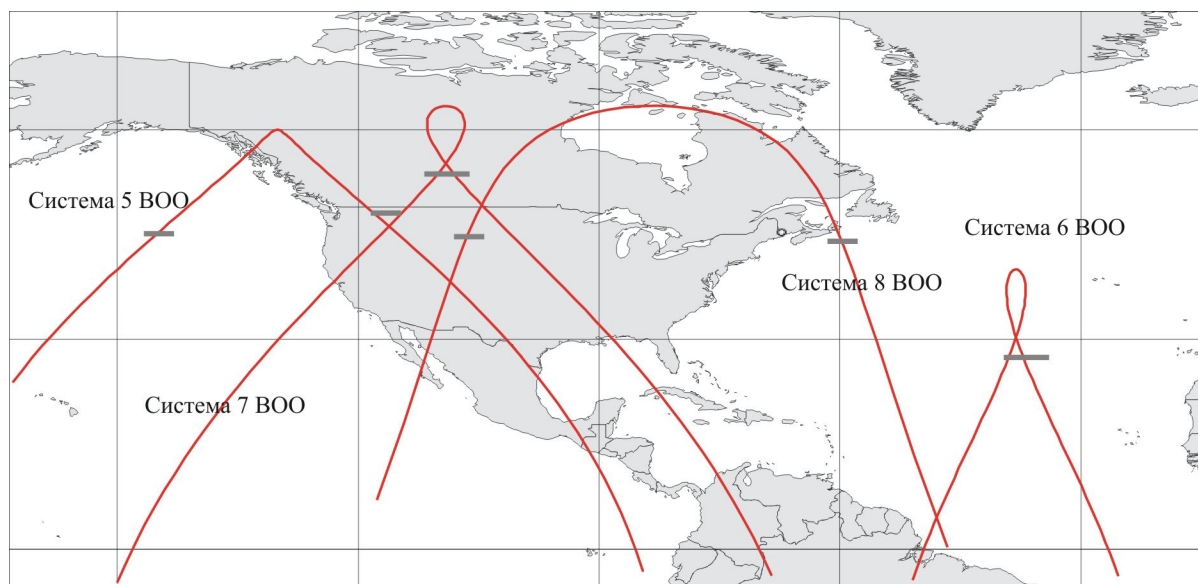
Части земных трасс систем 1–4 ВОО, показывающие активные дуги (т. е. выше —)



1713-05

РИСУНОК 6

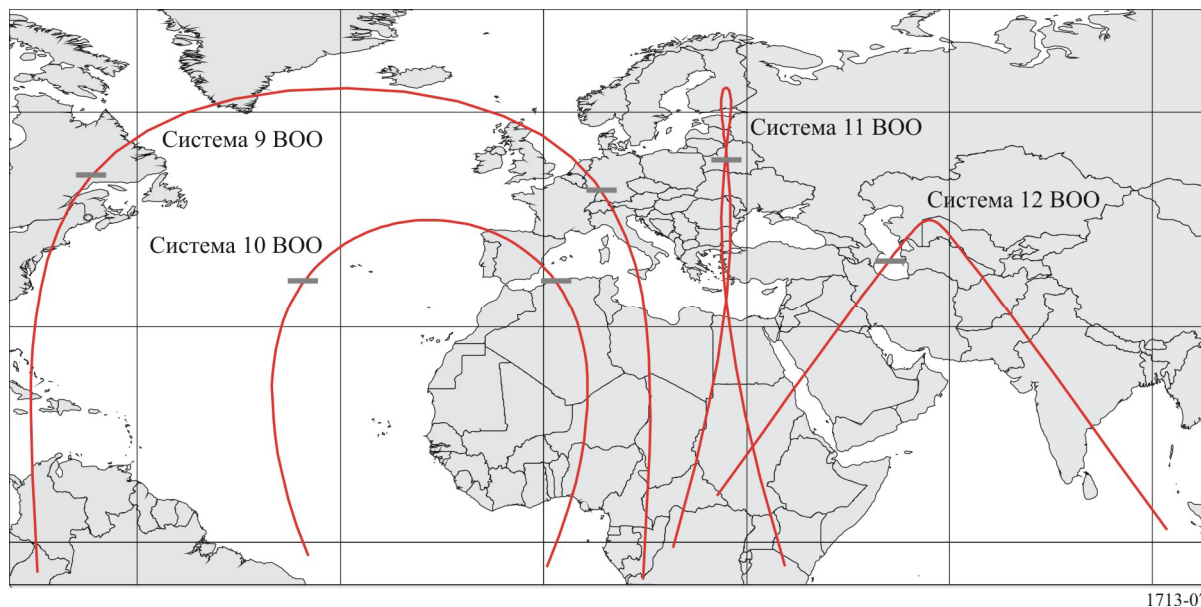
Части земных трасс систем 5–8 ВОО, показывающие активные дуги



1713-06

РИСУНОК 7

Части земных трасс систем 9–12 ВОО, показывающие активные дуги



В результате, наличие Приложения 3 наделяет средствами для проверки верности п. с) раздела *учитывая* в рассматриваемых примерах. Это было сделано для систем 1, 4 и 8 с целью широкого охвата типов систем в плане определения минимального внеосевого угла (или углового разнеса) для постепенно уменьшаемых величин геоцентрического угла θ между спутником ВОО и апогеем. В графической форме результаты представлены на рисунке 8.

РИСУНОК 8

Изменение минимального внеосевого угла в зависимости от расстояния спутника ВОО от апогея

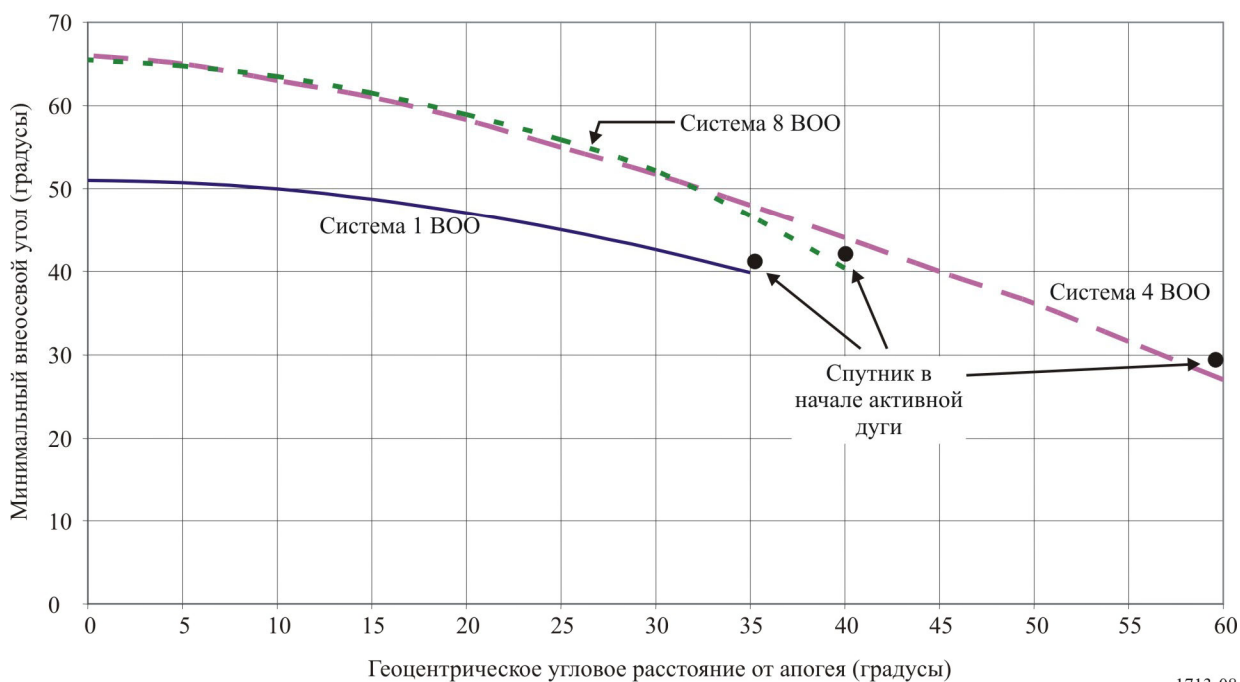


Рисунок 8 четко показывает, что для типовых систем ВОО чем дальше спутник находится от апогея своей орбиты, тем меньше минимальный внеосевой угол, при котором он виден с земных станций, работающих с геостационарными спутниками.
