

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R F.1108-4

Определение критериев защиты приемников фиксированной службы от излучений космических станций, работающих на негеостационарных орбитах в совместно используемых полосах частот

(Вопросы МСЭ-R 118/9 и МСЭ-R 113/9)

(1994-1995-1997-2002-2005)

Сфера применения

Эта Рекомендация содержит различные методологии для определения критериев защиты приемников фиксированной службы от излучений космических станций, работающих на негеостационарных орбитах в совместно используемых полосах частот, включая высокоэллиптические орбиты (ВЭО).

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что Всемирная административная радиоконференция для распределения частотных назначений в определенных частях спектра, Малага-Торремолинос, 1992 год (ВАРК-92) распределила спутниковым службам на совместной первичной основе спектр, который также распределен фиксированной службе (ФС);
- b) что спутниковые службы могут иметь желание работать со спутниковыми станциями на негеостационарных орбитах (не-ГСО);
- c) что излучения от космических станций, работающих на орбитах не-ГСО и совместно использующих тот же самый спектр, могут порождать помехи в приемных станциях ФС;
- d) что из-за широкой географической видимости излучений от космических станций на орбитах не-ГСО, частотная координация со станциями в ФС может оказаться неосуществимой;
- e) что системы ФС должны удовлетворять требованиям по показателям качества на основе наихудшего месяца;
- f) что ухудшение показателей качества для систем ФС зависит от суммы ухудшений из-за излучений от всех космических станций, которые для нее являются видимыми;
- g) что исследования плотности потока мощности (п.п.м.) на поверхности Земли из-за излучений от космических станций на орбите не-ГСО может быть выполнено путем применения статистических методов к результатам компьютерного моделирования,

рекомендует,

1 чтобы критерий совместного использования частоты для систем ФС, разделяющих спектр с космическими станциями на орбите не-ГСО, принимал во внимание составную п.п.м., являющуюся результатом излучений общего дополнения космических станций, видимых для станций ФС в любой точке на Земле;

1.1 что допустимые помехи должны быть определены в понятиях п.п.м. ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в согласованной ширине полосы частот;

2 что пределы п.п.м. должны быть определены на основе статистического применения принципов Рекомендации МСЭ-R F.758 в случае цифровых фиксированных беспроводных систем и Рекомендации МСЭ-R SF.357 в случае аналоговых фиксированных беспроводных систем (метод находится на изучении);

3 что соответствующий подход должен быть предпринят с учетом факта, что Рекомендация МСЭ-T G.826 (из которой получены Рекомендации МСЭ-R F.1397 и МСЭ-R F.1491), налагает более строгие нормы показателей качества по ошибкам для цифровых фиксированных беспроводных систем;

4 что пределы п.п.м. принимают во внимание орбитальные параметры космических станций, использующих полосу;

4.1 что методы в Приложении 1 могут быть использованы для определения статистики видимости космических станций, действующих на круговых орбитах;

4.2 что ухудшение показателей качества аналоговых систем из-за излучений от одной или множества космических станций должно определяться с использованием методов, описанных в Приложении 2;

4.3 что ухудшение показателей качества цифровых систем из-за излучений одной или множества космических станций должно определяться с использованием методов, описанных в Приложении 3 (см. Примечание 1);

4.4 что воздействия на цифровые системы, использующие разнесение, из-за излучений от одной или множества космических станций, могут быть определены с использованием методов, описанных в Приложении 4 (см. Примечание 2);

4.5 что соображения в Приложении 5 должны использоваться в оценке неравномерности помех в любой месяц;

4.6 что методология, приведенная в Приложении 6, может быть использована для развития интегрального распределения для отношения полученной мощности к сумме мощностей шума и помех и для связанной потери запаса на замирания из-за излучений от одной и множества космических станций (см. Примечание 3);

4.7 что Приложение 7 предоставляет примерную методологию, которая могла быть использована для оценки помех для станции в ФС от орбитальной группировки спутников на орбитах не-ГСО, использующих круговые или эллиптические орбиты, включая высокоэллиптические орбиты (ВЭО).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Критерий частичного ухудшения в показателях качества (FDP), разработанный в этой Рекомендации, применим к системам ФС, действующим на частотах, где многолучевые замирания являются принципиальной причиной замираний сигнала. Для трактов, где главной причиной замираний является затухание из-за дождя, требуется дальнейшее изучение. Оценка воздействия кратковременных помех, как описано в п. 4 Приложения 3, требует дальнейшего изучения.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В общем случае разнесение на частотах ниже 3 ГГц не используется. Оно является наиболее часто используемым на частотах, где многолучевые замирания являются главной причиной замираний.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Методология, развитая в Приложении 6, может быть использована в оценке кратковременных помех или для оценивания потенциала помех в двусторонних переговорах.

Приложение 1

Определение статистики видимости космических станций, работающих на круговых негеостационарных орбитах, как это видится наземной станцией

1 Введение

Чтобы разрабатывать критерии совместного использования между спутниками на околоземной орбите (ОЗО) и системами ФС, необходимо определять, как часто спутник будет видим в любом направлении для конкретной наземной станции или позиции, и насколько сильными будут помехи, полученные от него. Цель этого Приложения состоит в том, чтобы разработать уравнения, необходимые для моделирования работы спутника ОЗО и, таким образом, необходимую статистику. Разработка является достаточно общей, чтобы результаты можно было применить как для случайной модели, так и для временной эволюционной модели.

Пункт 2 этого Приложения обеспечивает развитие уравнений движения спутника, который находится на круговой орбите, в инерционной координатной системе. В п. 3 эти уравнения преобразовываются в координатную систему, закрепленную на Земле. Азимут и расстояние подспутниковой точки от позиции на поверхности Земли определены в п. 4. В п. 5 разработаны выражения для угла возвышения и вне пеленга спутника, и дается простой критерий для испытания для видимости спутника, который находится выше конкретной позиции на Земле.

В ходе этой разработки используется правосторонняя сферическая координатная система для координат с центром на Земле (r, θ, λ) , где r – расстояние от начала координат, θ – угловое расстояние от Северного полюса и λ – угол вокруг Северного полюса.

2 Спутник в инерционном кадре

Чтобы определять позицию спутника в инерционном кадре, сначала должна быть определена его позиция в орбитальной плоскости. Для тела на круговой орбите вокруг Земли это описание включает в себя четыре орбитальных параметра Кеплера следующим образом:

R_S : орбитальный радиус, расстояние от центра Земли до спутника

I : угол наклона (рад), угол между орбитальной плоскостью и экваториальной плоскостью Земли. Он измеряется в диапазоне от 0 до π и составляет меньше, чем $\pi/2$, если спутник направляется в восточном направлении, поскольку он пересекает экваториальную плоскость с юга на север, и больше чем $\pi/2$, если спутник направляется на запад, поскольку он пересекает экваториальную плоскость с юга на север

Ω_S : угловое расстояние (рад) вдоль экваториальной плоскости от нулевого эталона к позиции восходящей точки пересечения орбит, т. е. к пересечению, где плоскость спутника пересекает экваториальную плоскость с юга на север

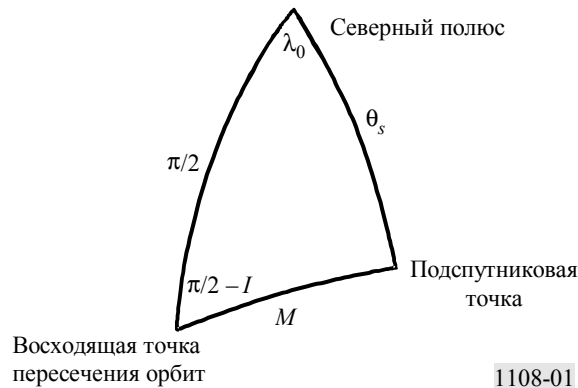
M : средняя аномалия (рад), угловая дуга в спутниковой орбитальной плоскости, измеренная от восходящей точки пересечения орбит до позиции спутника.

Чтобы определить координаты спутника в инерционной сферической системе координат, нужно сначала определить позицию спутника, отнесенную к Ω_0 , угловой позиции или долготы восходящей точке пересечения орбит, измеренной к востоку от первой точки Овена. Позиция подспутниковой точки обозначается с помощью θ_s и λ_0 .

Эти координаты могут быть определены с помощью сферической геометрии со ссылкой на рисунок 1. Применение закона косинусов к дуге θ_s дает $\cos \theta_s = \sin M \sin I$. Поскольку θ определяется на интервале $(0, \pi)$:

$$\theta_s = \arccos(\sin M \sin I). \quad (1)$$

РИСУНОК 1
Сферический треугольник спутника в инерционном кадре



Подобным образом применение закона косинусов к дуге M дает $\cos M = \sin \theta_s \cos \lambda_0$. Уравнение (2) дает значения λ_0 для полного диапазона $(\theta, 2\pi)$.

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

3 Преобразование в координаты Земли

Эти координаты могут быть просто преобразованы в эквивалентные координаты Земли. Поскольку Земля вращается в западном направлении через 2π рад за 23 час., 56 мин. и 4,09 с, восточная долгота для подспутниковой точки, λ_s , дается выражением:

$$\lambda_s = \lambda_0 + \Omega_s - \Delta E t, \quad (3)$$

где $\Delta E = 7,292115856 \times 10^{-5}$ рад/с.

Для завершения описания во времени позиции подспутниковой точки нужно произвести расчет для позиции орбиты, а также для позиции спутника на орбите. Восходящая точка пересечения орбит осуществляет перемещение (прецессию) в западном направлении на скорости $9,964 (R_E / R_S)^{3,5} \cos I$ градусов в день, где $R_E (= 6378,14 \text{ км})$ является экваториальным радиусом Земли. Следовательно, местоположение восходящей точки пересечения орбит устанавливается во времени как:

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

где:

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

Поэтому уравнение (3) становится:

$$\lambda_s = \lambda_0 + \Omega_0 - (\Delta L + \Delta E) t. \quad (4)$$

Орбитальный период (s) спутника на круговой орбите радиусом R_s дается выражением $T_s = 9,952004586 \times 10^{-3} R_s^{1,5}$, где R_s – радиус орбиты спутника (км). Поэтому:

$$M = M_0 + \Delta M t, \quad (5)$$

где $\Delta M = 2\pi / T_s$.

4 Расстояние и азимут наземной станции

Позиция для наземной станции сначала должна быть преобразована из стандартных координат широты и долготы в сферические координаты. Если L_T – широта и Lo_T – долгота наземной станции, обе с положительными углами (градусы), сферические координаты станции (рад), θ_T и λ_T , могут быть получены с помощью следующих двух соотношений.

$$\theta_T = \begin{cases} (\pi/180)(90 - L_T) & \text{для } L_T \text{ северной широты} \\ (\pi/180)(90 + L_T) & \text{для } L_T \text{ южной широты} \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_T = \begin{cases} (\pi/180)(Lo_T) & \text{для } Lo_T \text{ восточной долготы} \\ (\pi/180)(360 - Lo_T) & \text{для } Lo_T \text{ западной долготы} \end{cases} \quad (7)$$

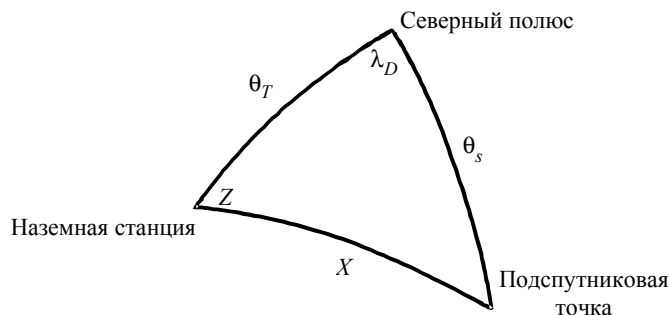
Разность в долготе от наземной станции до подспутниковой точки, λ_D , точно равна

$$\lambda_D = \lambda_s - \lambda_T. \quad (8)$$

Расстояние X между наземной станцией и подспутниковой точкой в радианах дуги можно определить с помощью закона косинусов, со ссылкой на рисунок 2, как:

$$X = \arccos (\cos \theta_T \cos \theta_s + \sin \theta_T \sin \theta_s \cos \lambda_D). \quad (9)$$

РИСУНОК 2
Сферический треугольник для расстояния
между подспутниковой точкой и земной



Подспутниковая точка является востоком наземной станции, если $\sin \lambda_D$ больше нуля, и западом наземной станции, если $\sin \lambda_D$ менее нуля. Поэтому азимут Z от станции к подспутниковой точке получается путем применения закона косинусов к дуге θ_s на рисунке 2:

$$Z = \begin{cases} \arccos \left[\frac{\cos \theta_s - \cos \theta_T \cos X}{\sin \theta_T \sin X} \right] & \text{для } \sin \lambda_D \geq 0 \\ 2\pi - \arccos \left[\frac{\cos \theta_s - \cos \theta_T \cos X}{\sin \theta_T \sin X} \right] & \text{для } \sin \lambda_D < 0 \end{cases} \quad (10)$$

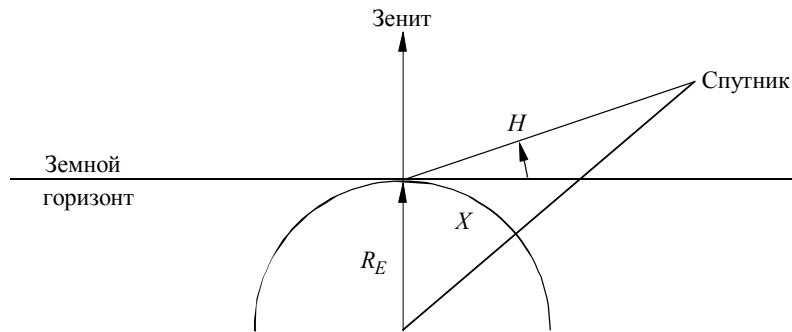
5 Возвышение спутника и угловое расстояние от главного луча

Угол возвышения H спутника над горизонтом наземной станции, предполагая горизонтальный угол равным 0° , может быть получен со ссылкой на рисунок 3.

$$H = \arctan \left[\frac{\cos X - R_E / R_S}{\sin X} \right] \quad (11)$$

РИСУНОК

Плоскость, содержащая центр земли, наземную станцию и спутник



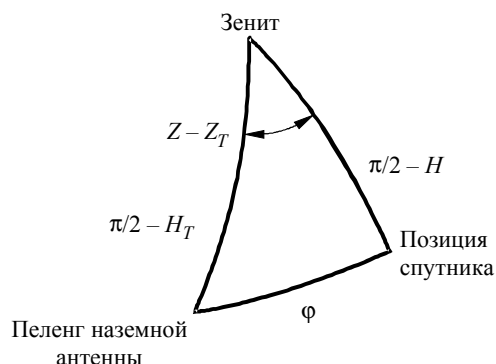
1108-03

Предположим, что приемная антенна наземной антенны нацелена вдоль азимута Z_T с углом возвышения в H_T рад выше местной горизонтали. Угловое расстояние φ от главного луча антенны этой наземной станции к спутнику может быть получено путем рассмотрения сферической координатной системы, сосредоточенной на наземной станции, с ее осью в вертикальном направлении, как показано на рисунке 4. Применяя закон косинусов к стороне φ , получаем:

$$\varphi = \arccos (\sin H_T \sin H + \cos H_T \cos H \cos (Z - Z_T)). \quad (12)$$

РИСУНОК 4

Сферический треугольник для определения угла между земным лучом и спутником



1108-04

Уравнения с (1) по (12) обеспечивают средства для моделирования окружающей среды помех наземной станции в присутствии спутника ОЗО. Возможны некоторые упрощения. Например, обычно рассматриваются помехи только от спутника выше горизонта. Из уравнения (11) спутник находится выше горизонта для:

$$\cos X > R_E / R_S = \gamma. \quad (13)$$

Используя (13) в (9), оказывается возможным вывести выражение для диапазона долгот, которые находятся в пределах этого круга видимости для широты конкретной подспутниковой точки или для средней аномалии. Следовательно, уравнения (10), (11) и (12) нуждаются в оценке только при условиях, которые могут быть predetermined.

Приложение 2

Моделирование помех в аналоговых фиксированных беспроводных маршрутах от спутников ОЗО

1 Введение

Это Приложение описывает компьютерную программу, которая реализует математические соотношения, разработанные в Приложении 1. Результирующая программа может использоваться в качестве инструмента анализа для того, чтобы исследовать помехи в моделируемых аналоговых фиксированных беспроводных сетях, которые совместно используют спектр с представителем спутников ОЗО из тех, что могут работать в полосах ниже 3 ГГц. Описывается ряд ситуаций примерных сценариев совместного использования и их результаты.

2 Описание модели

Программа математически моделирует тракт созвездия ОЗО, принимая во внимание воздействия вращения Земли и прецессии орбиты. Помехи рассчитываются для каждого движения 1/2 градуса спутника в созвездии в каждом фиксированном беспроводном приемнике в сочетании распределенных по случайному закону фиксированных беспроводных маршрутов. Программа накапливает данные о плотности помех для каждого фиксированного беспроводного маршрута в течение периода моделирования. Программа преобразовывает эти данные в распределение вероятности для каждого маршрута так, чтобы показатели качества каждого маршрута могли быть проанализированы отдельно. Результаты примерных сценариев, описанных здесь, сравниваются с требованиями показателей качества, описанными на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R SF.357. Рекомендация МСЭ-R SF.357 предлагает эталонные критерии распределения помех только для аналоговых систем.

2.1 Входные данные

Моделирование позволяет выбирать с помощью оператора следующие параметры:

- частота,
- широта и долгота центра линий движения фиксированных беспроводных маршрутов,
- усиление приемной антенны фиксированной беспроводной системы,
- количество радиомаршрутов, подлежащих анализу,
- высота орбиты спутника (то же самое для каждого спутника),
- количество спутниковых орбитальных плоскостей,
- долгота восходящей точки пересечения орбит для каждой плоскости,
- наклонение орбиты (то же самое для каждой плоскости),
- количество спутников на каждую плоскость (то же самое для каждой плоскости),
- уровень п.п.м. спутника высокого угла,
- уровень п.п.м. спутника низкого угла,
- продолжительность моделирования (в днях).

Предположения, которые встраиваются в модель, включают:

- *Для модели фиксированной беспроводной системы:*
 50 скачков (транзитных участков), маршруты 2500 км, направления скачков выбираются методами Монте-Карло.
 Шумовая температура приемника 1750 К.
 Тепловой шум в полосе частот шириной 4 кГц на каждый скачок составляет 25 пВт.
 Характеристики приемной антенны соответствуют Рекомендации МСЭ-R F.699.
 Потери (фидер, преобразование) около 3 дБ.
- *Для модели спутниковой системы:*
 Только круговая орбита.
 п.п.м. ограничивается следующей маской:

$$\begin{array}{ll}
 n.p.m._{low} & \text{для } 0 \leq \theta \leq 5^\circ \\
 n.p.m. = n.p.m._{low} + 0,05 (n.p.m._{hi} - n.p.m._{low}) (\theta - 5) & \text{для } 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\
 n.p.m._{hi} & \text{для } 25^\circ < \theta \leq 90^\circ.
 \end{array}$$

2.2 Результат

Результатом программы является отдельный файл, именуемый Leo.dat. Предоставляется информация для каждого моделируемого фиксированного беспроводного маршрута. Выводимая информация классифицируется для указания продолжительности времени уровней помех, получаемых каждым маршрутом. Поддерживаются пятьдесят последовательных, шириной 1 дБ, диапазонов помех от 1 до 100 000 пВт. Программа автоматически увеличивает соответствующий диапазон помех для каждого маршрута, который затрагивается спутником, для каждого приращения $1/2^\circ$ орбиты.

3 Результаты моделирования

Рекомендация МСЭ-R SF.357 определяет и краткосрочный, и долгосрочный предел помех, которые позволены для фиксированной беспроводной системы с угловой модуляцией в полосах, совместно используемых с фиксированной спутниковой службой. В Рекомендации также указывается линейная форма интерполяции для определения допустимых уровней помех для продолжительностей времени между долгосрочным и краткосрочным периодами. Поскольку программа вычисляет данные помех как распределение вероятности, есть возможность оценивать каждый исследованный сценарий совместного использования путем сравнения результатов программы с пределами Рекомендации МСЭ-R SF.357.

Пределы помех, определенные в Рекомендации МСЭ-R SF.357, нанесены на правосторонней части графиков информации, показанных на рисунках 5–9 этого Приложения. В каждом рисунке кривые слева представляют помехи в наиболее затронутом фиксированном беспроводном маршруте для рассматриваемого сценария совместного использования ОЗО/ФС.

Например, рисунок 5 представляет анализ воздействий помех в ФС, работающей в полосах 1,5 ГГц, 2,0 ГГц и 2,5 ГГц, где все другие параметры ФС и ОЗО являются фиксированными. Были рассмотрены две группы сценариев. Нижний набор кривых на рисунке представляет воздействия помех в ФС от одной орбитальной ОЗО. Вторая группа кривых представляет воздействия помех, когда достаточное количество ОЗО присутствует в одной плоскости таким образом, что спутник постоянно находится в поле зрения. Система ОЗО с одним спутником в постоянном поле зрения является удобным эталоном для этого сравнения.

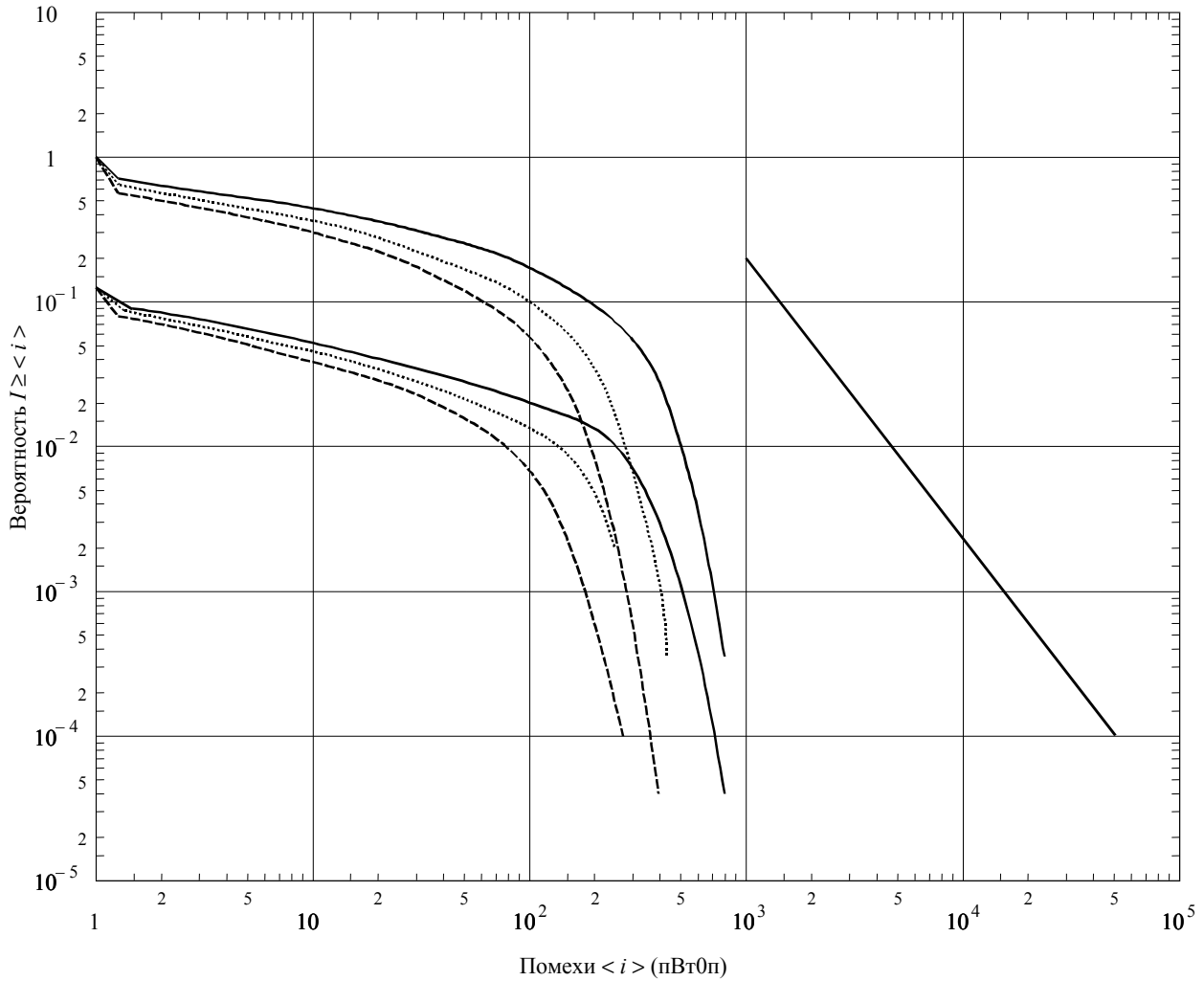
Рисунок 6 демонстрирует воздействия изменений в широте орбиты и низком угле прибытия п.п.м. на помехах, полученных службой ФС от одной орбиты ОЗО, постоянно находящейся в поле зрения. Для этого сценария ОЗО пара пунктирных кривых показывает (п.п.м. = -144 дБ(Вт/м²) (ширина полосы частот 4 кГц для всех углов прибытия), как могло бы ожидать, что высота орбиты, т. е. 800 км и 10 330 км, не является существенным параметром.

Сплошная кривая на рисунке 6 демонстрирует, что использование точечных лучей орбитой ОЗО, действующей на любой высоте, будет значительно снижать уровень помех в системе ФС.

Рисунок 7 показывает результаты исследований воздействий помех в службе ФС как функцию широты ФС. Верхние три кривые представляют распределения помех в службе ФС в трех различных широтах, предполагая то же самое ограничение об одном постоянном видимом спутнике. Оказалось, что широта не является существенным параметром по отношению к форме распределений, поскольку они достаточно подобны.

РИСУНОК 5

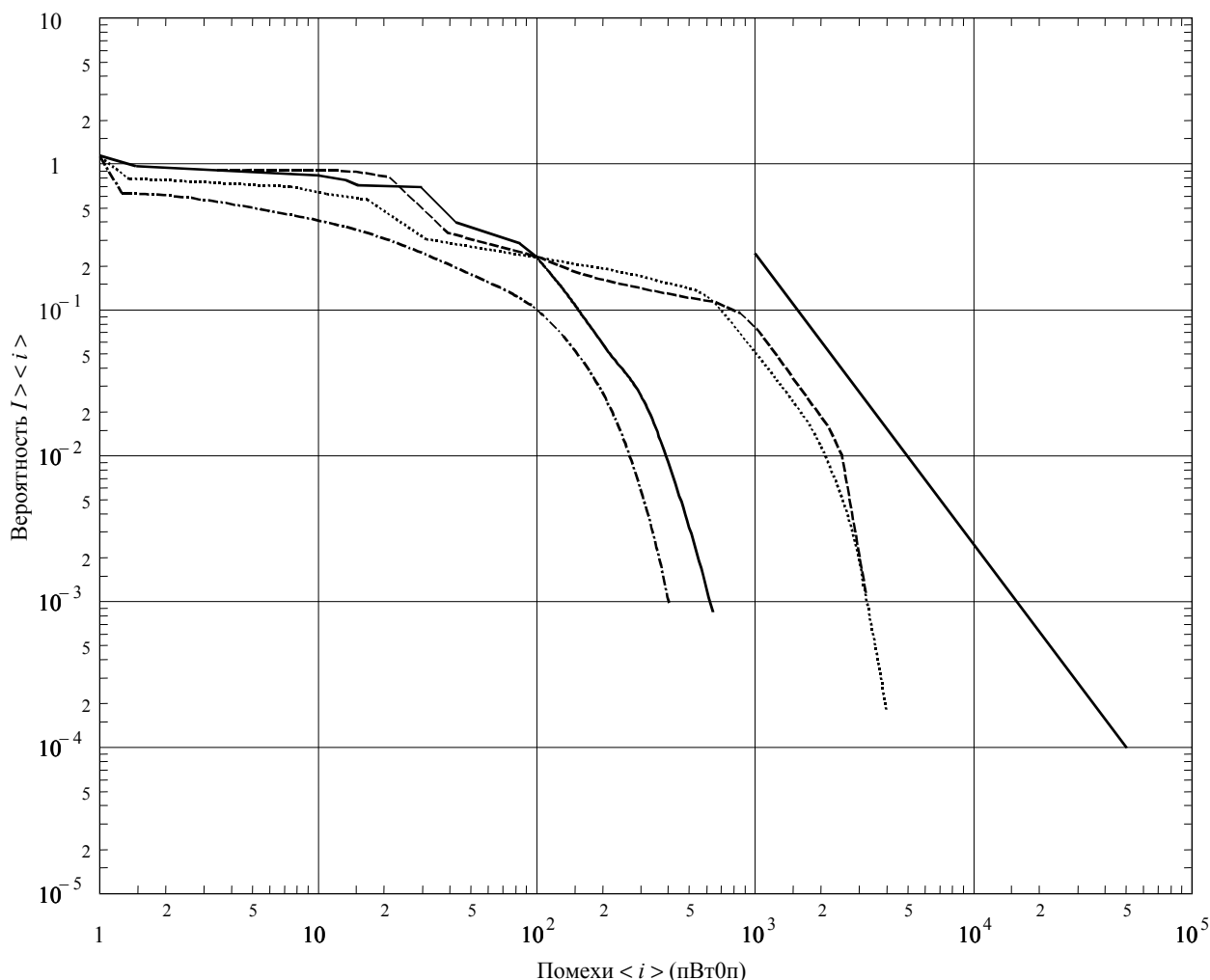
Помехи ФС в зависимости от частоты
 (800 км, 50 маршрутов скачков, усиление антенны 33 дБ, широта 40°,
 п.п.м. = -154/-144 дБ(Вт/(м² · 4 кГц)))



- Частота = 1,5 ГГц
- ⋯ Частота = 2,0 ГГц
- - - Частота = 2,5 ГГц

РИСУНОК 6

Помехи в зависимости от высоты и п.п.м.
(50 маршрутов скачков, широта 40°, 2 ГГц)



----- п.п.м. = -154/-144 дБ(Вт/(м² · 4 кГц)), высота = 800 км

———— п.п.м. = -154/-144 дБ(Вт/(м² · 4 кГц)), высота = 10 300 км

..... п.п.м. = -144/-144 дБ(Вт/(м² · 4 кГц)), высота = 800 км

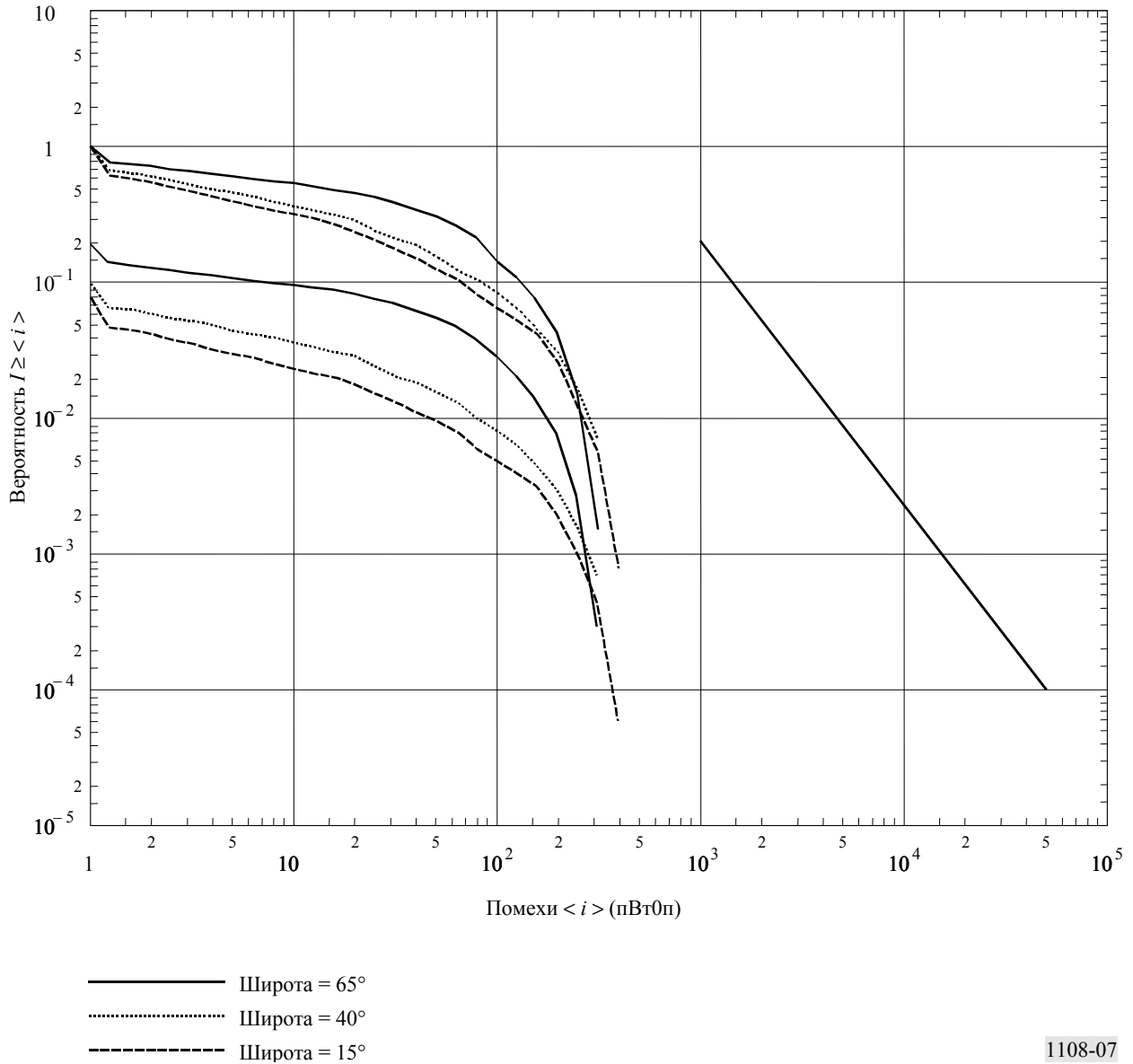
- · - · - п.п.м. = -144/-144 дБ(Вт/(м² · 4 кГц)), высота = 10 300 км

1108-06

Нижняя группа из трех кривых на рисунке 7 представляет распределения полученных помех в различных широтах от отдельных орбитальных спутников, которые имеют высокие углы орбиты (80°). Здесь интересно отметить, что если бы участки кривой были бы экстраполированы обратно к оси у для $X = 0$, это приблизительно представило бы процент времени, когда спутники были видимы для систем ФС в обозначенных широтах. Наоборот, инверсия такого числа также аппроксимировала бы количество спутников, необходимых для достижения постоянной видимости отдельного спутника. Из близкого рассмотрения этих участков кривой на рисунке 7 следует, что для непрерывного освещения систем более высоких широт было бы необходимо меньше спутников, поскольку оказывается, что распределение для беспроводных фиксированных маршрутов широты 65° перехватывает ось у в намного более высокой точке.

РИСУНОК 7
Помехи (i) пВт в полосе частот шириной 4 кГц

Помехи ФС в зависимости от широты
(50 маршрутов скачков, усиление антенны 33 дБ, п.п.м. = $-154/-144$ дБ(Вт/(м² · 4 кГц)), 2 ГГц)



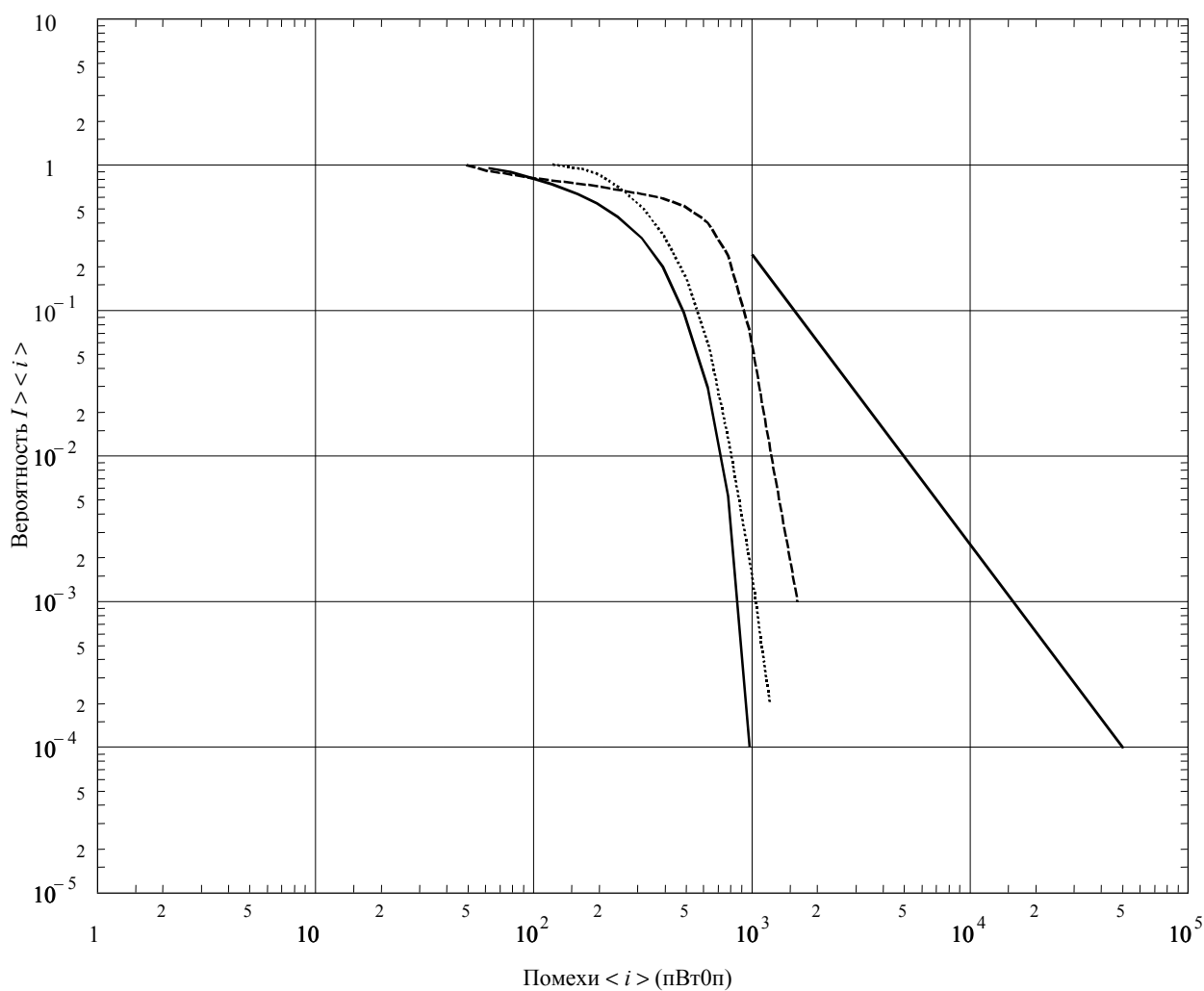
Это могло бы быть подтверждено интуитивно, полагая, что для каждой орбиты высоко наклоненной спутниковой системы каждый спутник в плоскости для процентного отношения времени был бы видимым для земных участков в более северных или южных широтах, тогда как земные участки в средних и более низких широтах могли не быть видимыми для любой части некоторых орбит. Можно предложить, что орбиты ОЗО, оптимизированные для обслуживания средних и более низких широт, вызывали бы больше помех в наземных системах более высоких широт, так как больший процент спутников на орбите был бы видимым для земных участков более высоких широт.

Наконец, рисунки 8 и 9 иллюстрируют воздействия помех в ФС от орбитальных группировок спутников, которые могли бы представлять практические работающие системы. Обе системы устроены так, что от 3 до 6 спутников являются постоянно видимыми для земного участка, требующего обслуживания. Рисунок 8 исследует спутниковую орбитальную группировку, состоящую из 6 круговых орбитальных плоскостей с 11 спутниками на каждую плоскость. Все плоскости имеют то же самое наклонение ($86,5^\circ$) и ту же самую высоту спутника (780 км). Рисунок 9 показывает распределение помех, которое могло бы ожидать от орбитальной группировки с 12 спутниками, работающими на высоте 10 370 км. Спутники расположены в 3 плоскостях орбиты, разнесенных на 120° с наклонениями в 56° и с 4 спутниками на каждую плоскость.

РИСУНОК 8

Помехи (i) пВт в полосе частот шириной 4 кГц

Помехи в ФС при 66 орбитах ОЗО/780 км
(наклонение $86,5^\circ$, усиление антенны ФС = 33 дБ, 2 ГГц, широта 40°)

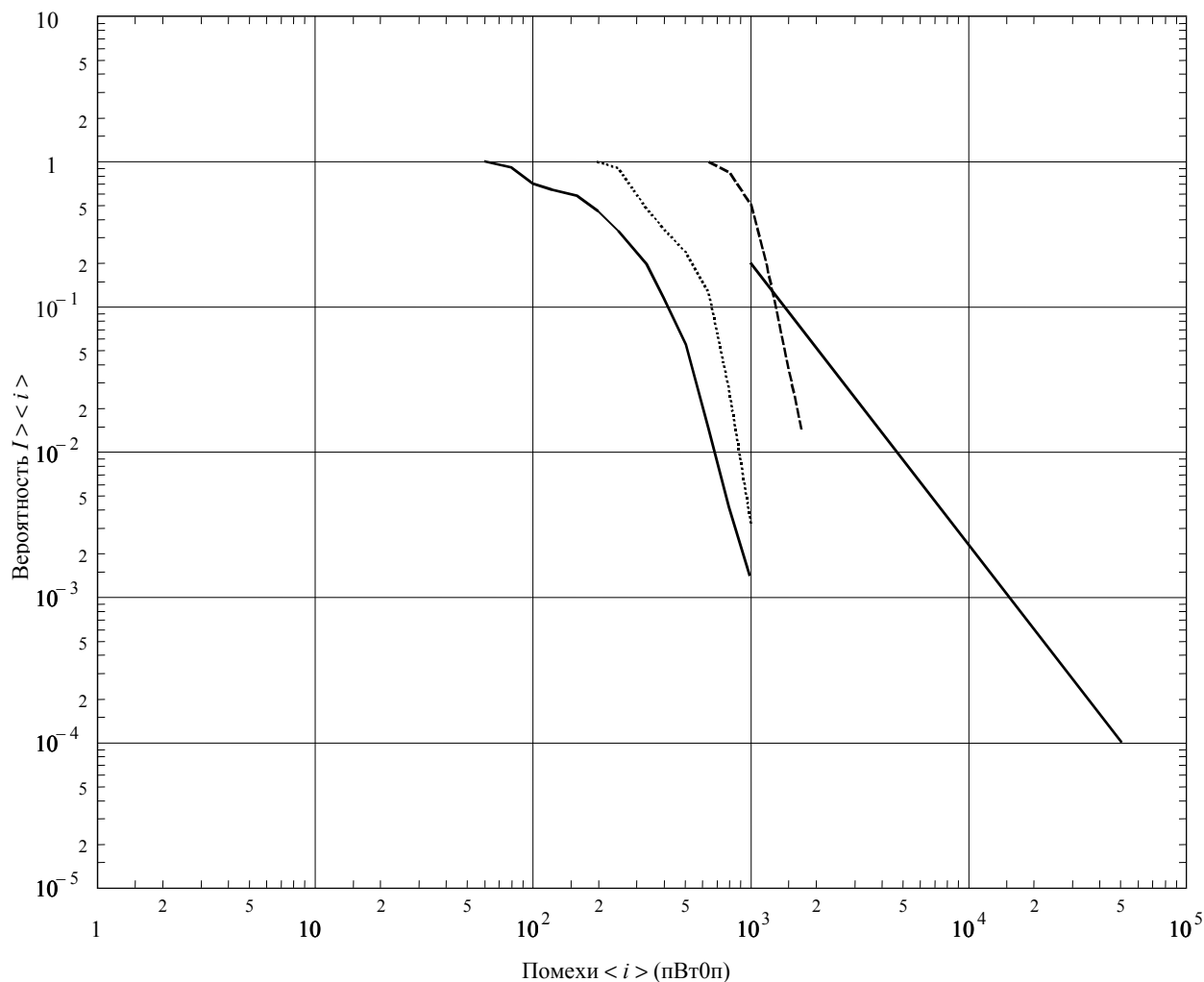


- п.п.м. = $-152/-142$ дБ(Вт/($m^2 \cdot 4$ кГц))
- п.п.м. = $-152/-137$ дБ(Вт/($m^2 \cdot 4$ кГц))
- п.п.м. = $-152/-132$ дБ(Вт/($m^2 \cdot 4$ кГц))

РИСУНОК 9

Помехи (i) пВт в полосе частот шириной 4 кГц

Помехи в ФС при 12 орбитах ОЗО/10 370 км
(наклонение 56° , усиление антенны ФС = 33 дБ, 2 ГГц, широта 40°)



———— п.п.м. = $-152/-142$ дБ(Вт/(м² · 4 кГц))

..... п.п.м. = $-152/-137$ дБ(Вт/(м² · 4 кГц))

----- п.п.м. = $-152/-132$ дБ(Вт/(м² · 4 кГц))

1108-09

4 Заключение

Из-за параметра времени, введенного орбитами ОЗО, анализ совместного использования становится гораздо более трудным; и, в важных отношениях, отличается от совместного использования со спутниками геостационарной орбиты (ГСО). В данное время нет законченной методологии для установления требований по защите для ФС в окружающей среде ОЗО. Это особенно справедливо при совместном использовании с цифровыми фиксированными беспроводными системами. Рекомендация МСЭ-R SF.357 обеспечивает критерии, которые могли бы использоваться для установления пределов п.п.м. для совместного использования с аналоговыми фиксированными беспроводными маршрутами. Однако, поскольку функцией Рекомендации МСЭ-R SF.357 является установление совместного использования со спутниками ГСО, может быть подходящим пересмотреть ее относительно совместного использования с спутниковыми сетями ОЗО.

Предполагая обоснованность Рекомендации МС-R SF.357, далее оказывается, что для ситуаций, где есть ограниченное число орбит ОЗО, видимых для ФС, аналоговые фиксированные беспроводные сети могли бы совместно использоваться с системами ОЗО при условии, что низкими углами прибытия излучений п.п.м. можно управлять. Также очевидно, что, для высоких углов прибытия, пределы излучения п.п.м. от систем ОЗО могли бы превышать уровни, установленные в настоящее время для геостационарных спутниковых систем. Ясно, что требуется дальнейшее исследование, и предлагается, чтобы для проведения таких исследований поощрялись развитие и использование инструментальных средств моделирования.

Приложение 3

Определение воздействий излучений от негеостационарной космической станции на цифровые микроволновые приемники ФС

1 Введение

Развитие критериев совместного использования полосы между ФС и космическими службами, использующими спутники ОЗО, требует понимания воздействий, которые оказывают на показатели качества цифровых наземных приемников излучения от таких спутников. Данное Приложение описывает подход к оценке этих воздействий на цифровые радиоустройства, используя компьютерное моделирование. Моделирование развивает статистику мощности помех, которая была бы получена в данном местоположении на приемной антенне, направленной на один из любых наборов направлений. Оно использует орбитальные уравнения, разработанные в Приложении 1, и учитывает или отдельный спутник, или однородную орбитальную группировку спутников. Конкретные разработанные величины включают в себя:

- процентное отношение времени, когда полученная мощность помех превышает уровень; и
- частичное увеличение в вероятности неудовлетворения критерия показателей качества.

Подробные описания элементов моделирования даются в пп. 2 и 3 данного Приложения; развитие выражений для ухудшения показателей качества дается в п. 4. Некоторые показательные результаты, представляющие интерес, даются в п. 5.

2 Статистическое моделирование

Моделирование развивает статистику помех путем рассмотрения помех, полученных от каждой из N_a одинаково расположенных позиций на орбите. Суммарный набор помех получается путем рассмотрения N_0 орбит с их восходящими точками пересечения орбит, одинаково разнесенными вокруг экватора. В то время как во многих случаях это не может быть показательным, оно является самым благоприятным или наиболее разрешающим предположением для совместного использования в том, что оно разбрасывает помехи наиболее широко поперек поверхности Земли. Последствия этого предположения необходимо рассматривать в дальнейших исследованиях вместе с предположением о круговых орбитах.

Ясно, что для отдельного спутника имеются $N_a \times N_0$ возможных позиций помех. Таким образом, вероятность, связанная с любой из них, составляет $1/(N_a N_0)$.

Случай множества спутников в однородной орбитальной группировке также легко рассматривается. Однородная орбитальная группировка состоит из набора спутников, распределенных по набору идентичных, однородно расположенных орбитальных плоскостей. Каждая орбитальная плоскость содержит одинаковое количество спутников, однородно разнесенных на орбите. Самое однородное покрытие и наибольшее разрешающее совместное использование получается тогда, когда наборы спутников одинаково сфазированы. Это означает, что когда имеется спутник на одной орбите, пересекающей экватор, будет спутник на каждой из орбитальных плоскостей, пересекающих экватор в том же самом направлении.

В понятиях ранее определенных величин, если N_a – общее кратное для количества спутников на каждой орбите, N_{spo} , и N_0 – общее кратное для количества орбитальных плоскостей, N_{orb} , в орбитальной группировке, количество уникальных состояний орбитальной группировки равно точно $(N_0 / N_{orb})(N_a / N_{spo})$.

3 Определение помех

Предполагается, что излучения спутников должны быть ограничены обычным способом: низким уровнем п.п.м. для углов возвышения, на Земле, ниже более низкого предела и более высокой п.п.м. для углов возвышения выше более верхнего предела, с помощью линейного подъема с углом возвышения между пределами. п.п.м. определяется здесь в дБ(Вт/(м² · МГц)).

Усиление антенны, $G_R(\varphi)$, наземного приемника является таким, как определяется Рекомендацией МСЭ-R F.699 для усиления, диаметра и частоты в качестве независимых входных данных. Эффективная область, применимая для определения мощности получаемой помехи из-за п.п.м. при угле φ , дается выражением:

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

где λ выражается в м.

4 Моделирование воздействия помех на цифровые системы

Вероятность отказа цифровой системы часто записывается в следующей форме:

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

где:

- C : константа, зависящая от климата, ландшафта и параметров линии
- DFM : запас на дисперсионные замирания (дБ)
- TFM : запас на тепловые замирания (дБ)
- C/I : отношение мощности сигнала без замираний к эквивалентному шумовому значению мощности помех (дБ)
- CNC : значение критического отношения несущей частоты к шуму, на котором критерий показателей качества точно удовлетворяется (дБ).

Современные цифровые системы обычно имеют запас на дисперсионные замирания больше, чем их запасы на тепловые замирания, и совершенствуются. Следовательно, первый член в уравнении (14) для рассмотрения помех можно проигнорировать. В то время как мощность помех эквивалентного шума конкретного источника помех в конкретном приемнике может быть меньше, чем измеренная мощность, для общих соображений по совместному использованию, особенно там, где есть множество источников помех, можно консервативно предположить, что помехи обладают тем же самым воздействием, что и тепловой шум с одинаковой мощностью. Поскольку разность в децибелах между отношением несущей частоты без замираний к шуму и критическим отношением несущей частоты к шуму (CNC) является запасом замираний на тепловом шуме (TFM), частичное увеличение в P_0 , вероятности превышения нормы показателей качества равно отношению мощности помех I к мощности шума N_T , где оба параметра измерены в детекторе в ваттах или в ваттах на единичную ширину полосы частот. То есть частичное увеличение равно I/N_T , для постоянной мощности помех I . Для упрощения обсуждения такое увеличение в P_0 будет обозначаться как частичное ухудшение в показателях качества (FDP) или процентное ухудшение в показателях качества.

Если источник помех вызывал мощность помех I_i в течение части месяца, f_i , и отсутствовал в оставшуюся часть месяца, увеличивающееся FDP из-за этих помех могло быть дано следующим выражением:

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

FDP из-за набора событий, где i -тое событие состоит из доли времени, когда помехи имели мощность I_i , дается так:

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

где суммирование берется по всем событиям помех. Суммирование по $I_i f_i$ является дискретным эквивалентом первому моменту распределения вероятности для мощности помех в приемнике, поскольку f_i является вероятностью того, что мощность помех имеет значение между I_i и $I_i + \Delta I_i$.

FDP можно также выразить как потерю запаса на замирания (FML) (дБ), где:

$$FML = 10 \log (1 + FDP), \quad (16)$$

тогда как средний уровень помех выше теплового шума дается в дБ как $10 \log FDP$.

Хотя уравнение (14) было использовано главным образом со ссылкой на возникновение отказа, вероятность коэффициента ошибок по битам приемника выше 1×10^{-3} , большинство мер показателей качества цифрового радио взвешивают с помощью отказа. Следовательно, уравнение (15) может использоваться как мера FDP. В то время как выражения в (15) и (16) обеспечивают приемлемые границы по ухудшению показателей качества для умеренных уровней помех, они могут недооценить воздействия для уровней помех, скажем, на 20 децибелов выше, чем тепловой шум, потому что начинают становиться важными дисперсионные воздействия, включенные в первый член в уравнении (14), и потому неглубокие замирания могут не следовать закону замираний Рэлея, неявному в (14).

Воздействия высоких уровней помех могут быть лучше всего оценены путем отдельных соображений относительно критериев краткосрочных помех или через исследование интегрального распределения отношения мощности принимаемого сигнала к сумме мощностей шума и помех (см. Приложение 6). Развитие наиболее соответствующего метода находится в настоящее время на изучении в 9-й Исследовательской комиссии Сектора радиосвязи.

Другое соображение о высоких уровнях помех состоит в том, достаточно ли они высоки, чтобы ухудшить показатели качества линии по ошибкам в отсутствии замираний. Могут нуждаться в рассмотрении такие критерии показателей качества, как остаточный коэффициент ошибок по битам в Рекомендации МСЭ-R F.634 или другие критерии, требуемые для выполнения Рекомендации МСЭ-T G.826, которые сейчас разрабатываются. Только если такие события высоких помех происходят достаточно редко или не происходят вообще, можно пренебречь их воздействием.

Форма уравнения (15) делает это чрезвычайно подходящим для исследований помех, поскольку она позволяет большим орбитальным группировкам спутников просто обрабатываться независимо от того, являются ли они однородными или нет. Воздействия множества орбитальных группировок также могут быть легко оценены, так как FDP, произведенное каждой орбитальной группировкой, можно добавить для определения полного или составного FDP.

5 Альтернативное извлечение FDP

Предположим, что показатели качества цифрового радио, работающего на скачке (транзитном участке), регулируются возникновением глубоких замираний из-за многолучевого распространения на скачке. Для систем с эффективными адаптивными трансверсальными выравнивателями или для достаточно узкополосных систем, как те, что обычно находятся на частотах ниже 3 ГГц, это является разумным предположением.

Если C является уровнем сигнала, принимаемого без замираний, N_T – уровень теплового шума и k – минимальное значение C/N_T , необходимое для удовлетворения регулирующего требования по показателям качества, то условия для удовлетворения требования не будут выполняться, когда:

$$\frac{rC}{N_T} < k, \quad (17)$$

где:

r : коэффициент замираний

$$= 10^{-A/10}$$

A : глубина замираний (дБ).

Если есть помехи, которые приблизительно похожи на Гауссовский шум, со средней мощностью I в детекторе, тогда регулирующий критерий показателей качества не удовлетворился бы, если:

$$\frac{rC}{N_T + I} < k. \quad (18)$$

Безусловно, критерий показателей качества не удовлетворяется, когда:

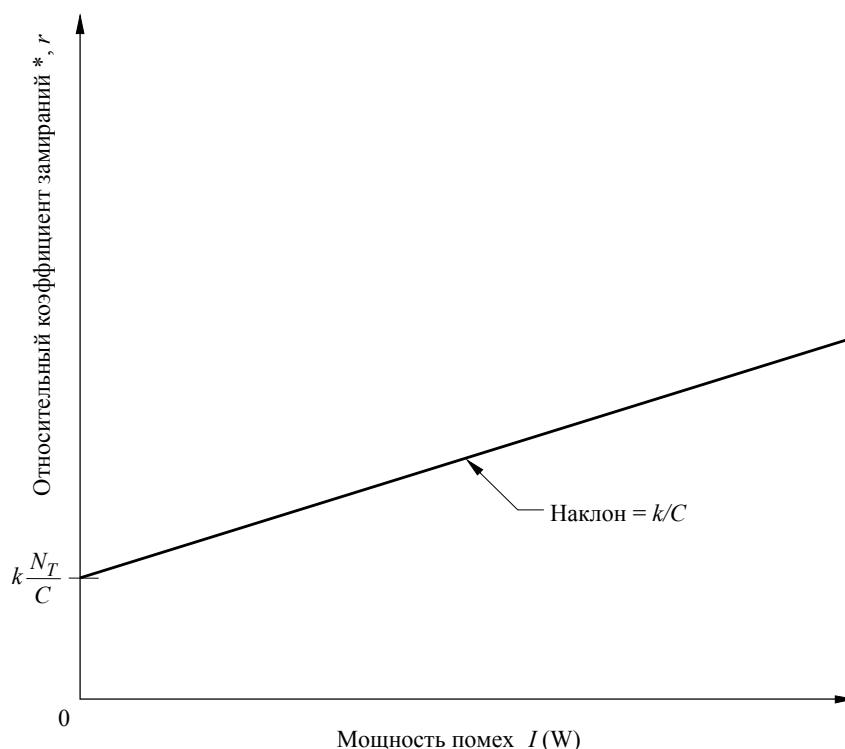
$$r \leq k \left(\frac{N_T}{C} + \frac{I}{C} \right). \quad (19)$$

Рисунок 10 показывает границу области, где неравенство в формуле (18) точно выполняется. Когда мощность помех не является постоянной, удовлетворение регулирующей нормы показателей качества требует, соответственно, малой вероятности одновременного возникновения замираний и помех со значениями ниже разделительной линии на рисунке 10. Определенно, если $p_r(r)$ – функция плотности вероятности для коэффициента замираний, $p_I(I)$ – функция плотности вероятности для мощности помех и эти процессы независимы, доля месяца, когда критический критерий показателей качества не будет удовлетворяться, P_{0i} , дается выражением:

$$P_{0i} = \int_0^{\infty} dI \int_0^{(k/C)(N_T + I)} p_r(r) p_I(I) dr . \quad (20)$$

РИСУНОК 10

Граница области, где критический критерий показателей качества удовлетворяется



* Отношение мощности при замираниях к мощности без замираний.

1108-10

В большинстве интересующих случаев значение уравнения (20) регулируется возникновением глубоких многолучевых замираний, и его оценка может быть упрощена. Рекомендация МСЭ-R P.530 предсказывает, что в режиме глубоких замираний вероятность коэффициента замираний меньше, чем r , пропорциональна r . Таким образом, функция плотности вероятности для коэффициента замираний должна быть постоянной.

$$p_r(r) = \beta \quad r \ll 1, \quad (21)$$

где β – константа пропорциональности, которая может быть описана как коэффициент возникновения замираний. Поэтому доля месяца, во время которого критический критерий показателей качества не будет удовлетворяться, определяется путем использования уравнения (21) в (20).

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

где I_{av} – средняя мощность помех, или

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

FDP является частичным увеличением процентного отношения времени, когда регулирующий критерий показателей качества не будет удовлетворяться из-за присутствия помех. Обозначая значение уравнения (22) в отсутствие помех с помощью P_{0o} , FDP можно выразить как $FDP = (P_{0i}/P_{0o}) - 1$, или

$$FDP = \frac{I_{av}}{N_T}, \quad (24)$$

которое эквивалентно уравнению (15).

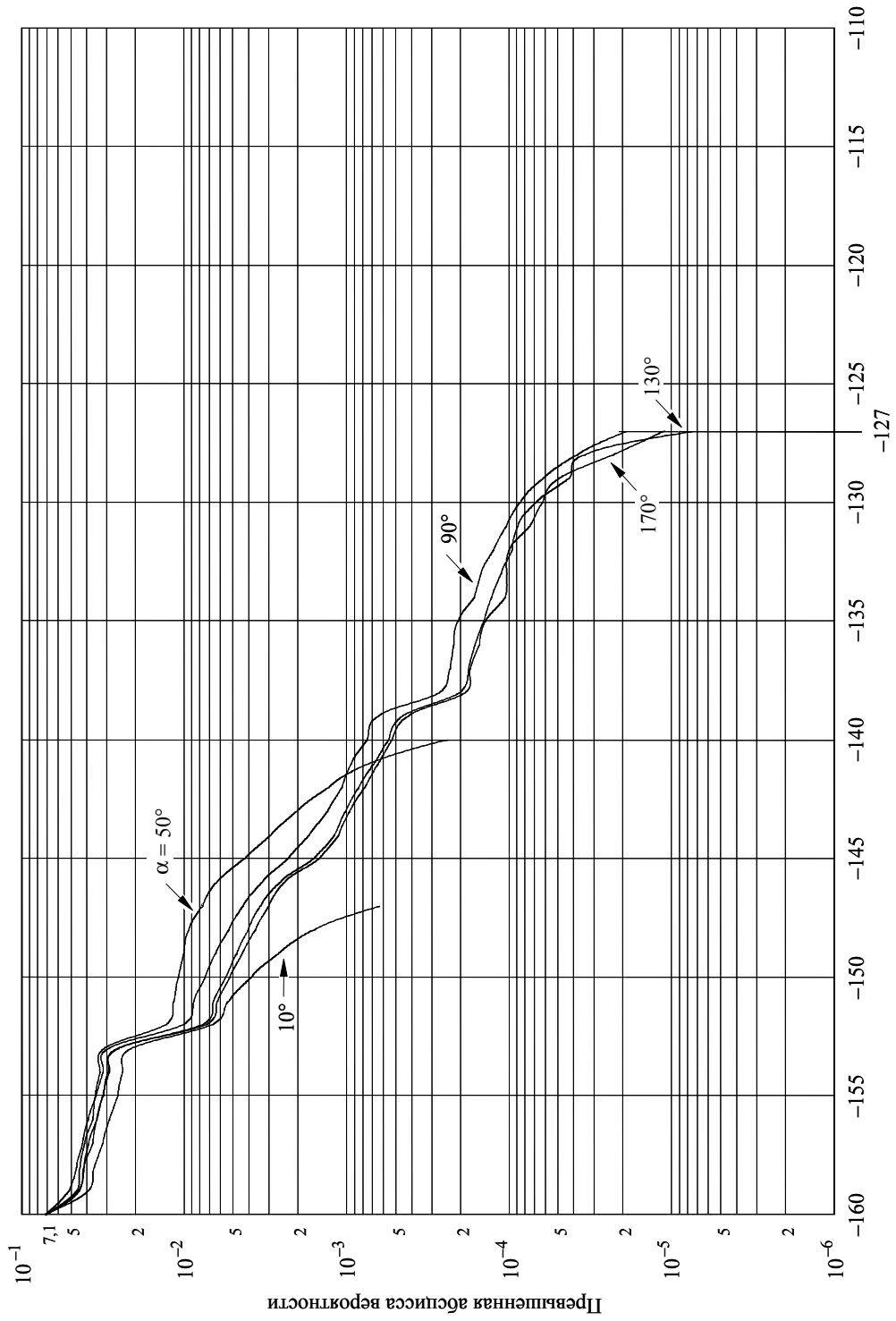
6 Типовые результаты моделирования

Этот пункт представляет некоторые результаты из множества испытательных прогонов моделирования. Цель состояла в том, чтобы определить некоторые основные тенденции и области проблем. Если не определено иначе, предполагается, что наземная станция находится на северной широте 40° , работая на частоте 2,000 ГГц с антенной диаметром 2,76 м и усилением 33 дБ, и что потери волновода равны 2 дБ. В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R F.759 коэффициент шума приемника взят равным 4 дБ. Излучения спутников падают на пределе п.п.м. -130 дБ(Вт/(м² · МГц)) для углов возвышения 5° или меньше, и увеличиваются на 0,5 дБ на каждый градус от 5° до 25° , за пределами которого они достигают значения -120 дБ(Вт/(м² · МГц)). Помехи спутников выбираются на приращениях $0,5^\circ$ вокруг орбиты для 720 орбит, однородно расставленных вокруг экватора.

Рисунок 11 показывает интегральное распределение мощности помех, полученной антеннами с различными азимутами наведения, от спутника на орбите с высотой 800 км и наклоном 50° . Из-за ограниченного наклона орбиты спутник никогда не наблюдается около северного горизонта. Следовательно, антенны, направленные на азимутах в пределах 50° Северного полюса, никогда не получают помехи в пеленге и имеют усеченные распределения. В результате имеется, соответственно, более значительная вероятность наблюдений пеленгов под несколько большими углами азимута. Рисунок 12 ясно показывает это на графике процентного ухудшения в показателях качества для набора углов для этого случая.

РИСУНОК 11

Интегральное распределение мощности помех для земной станции на широте 40° от спутника на орбите с наклоном 50° и высотой 800 км

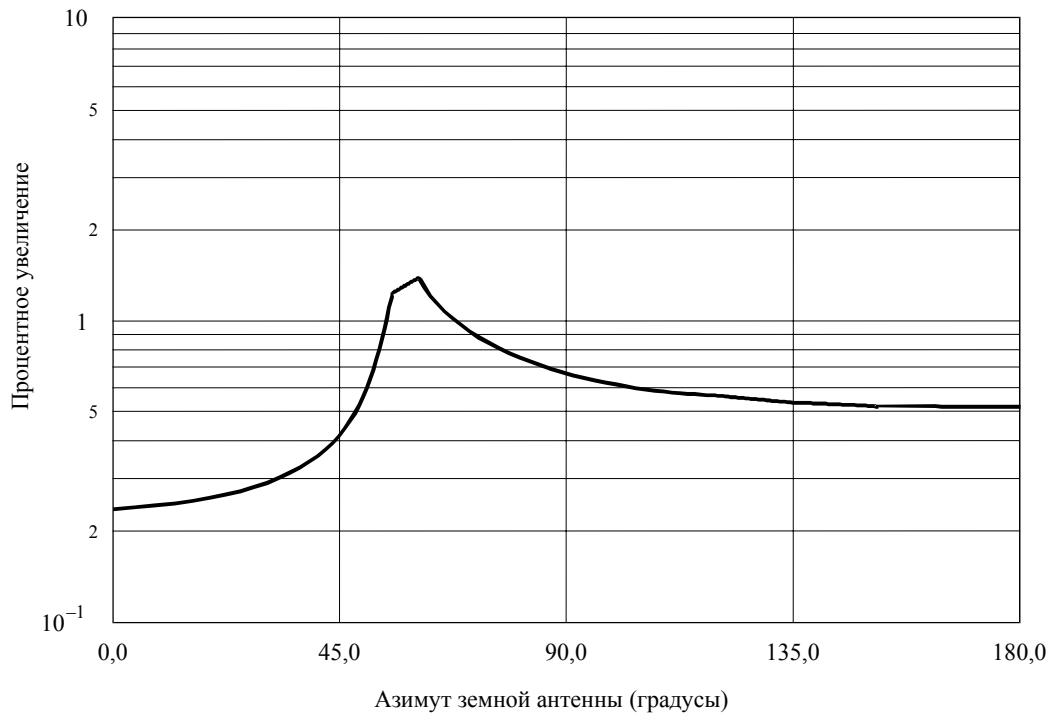


Превышенная мощность помех (дБ(Вт/МГц))

1108-11

α : азимут наведения от Севера

РИСУНОК 12
Процентное ухудшение показателей качества для случая на рисунке 11

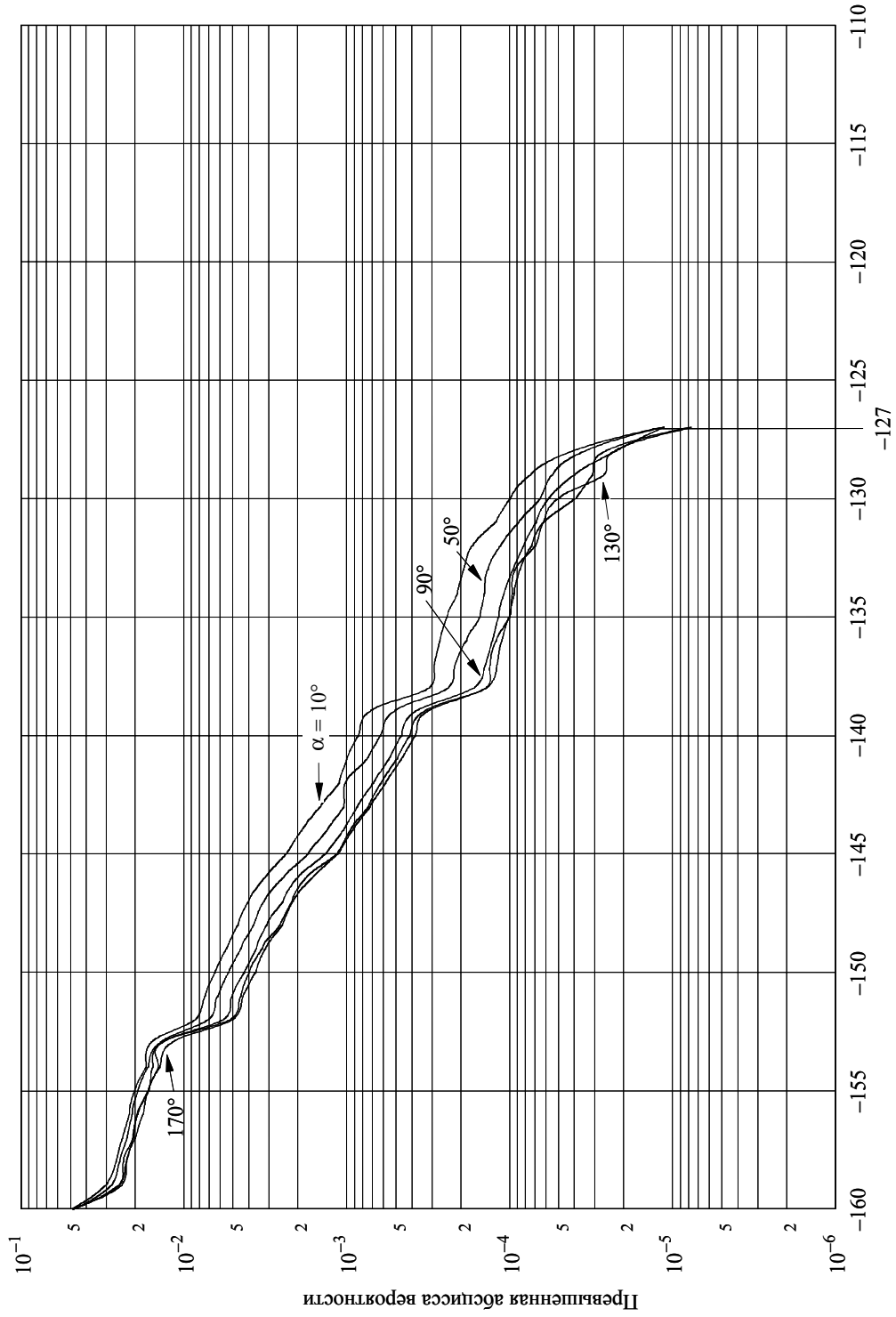


1108-12

Рисунок 13 показывает интегральное распределение полученной мощности помех для одинаковой ситуации, за исключением орбитального наклонения в $89,5^\circ$. Ясно, что в этом случае воздействие азимута является намного меньшим.

РИСУНОК 13

Интегральное распределение мощности помех для земной станции на широте 40° от спутника на орбите с наклоном $89,5^\circ$ и высотой 800 км



Превышенная мощность помех (дБ(Вт/МГц))

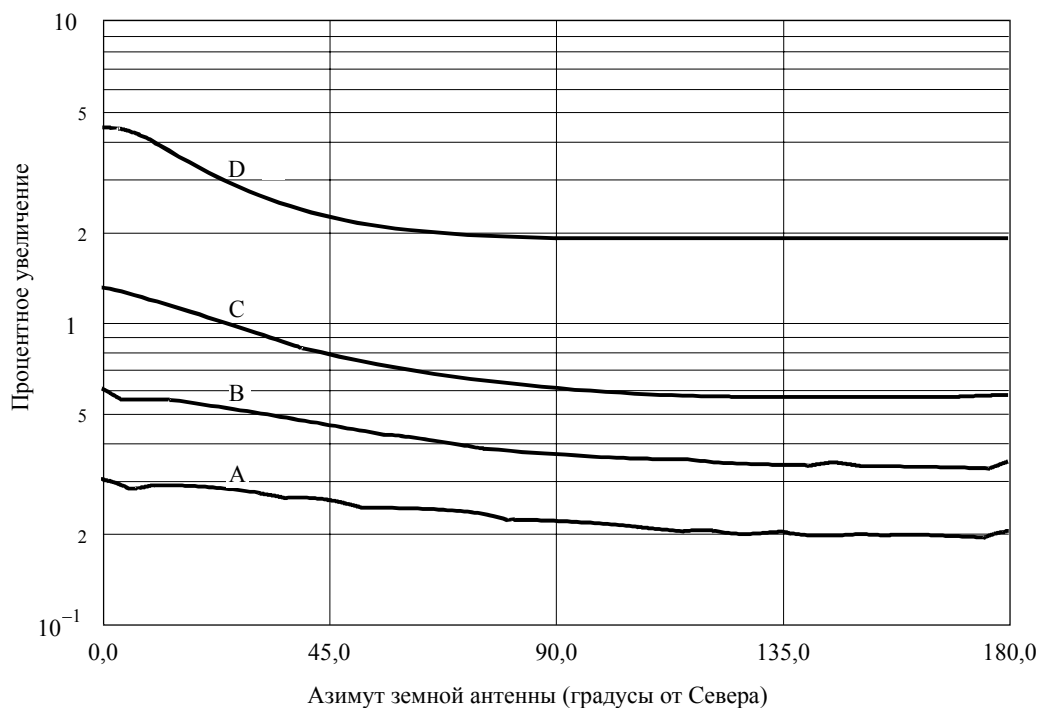
α : азимут наведения от Севера

1108-13

Рисунок 14 иллюстрирует воздействие высоты спутника с помощью графика процентного ухудшения в показателях качества в зависимости от угла азимута. Ухудшение показателей качества, вызванное спутником, увеличивается линейно с орбитальной высотой почти до 10 000 км, поскольку делает область Земли видимой спутнику в любой момент.

РИСУНОК 14

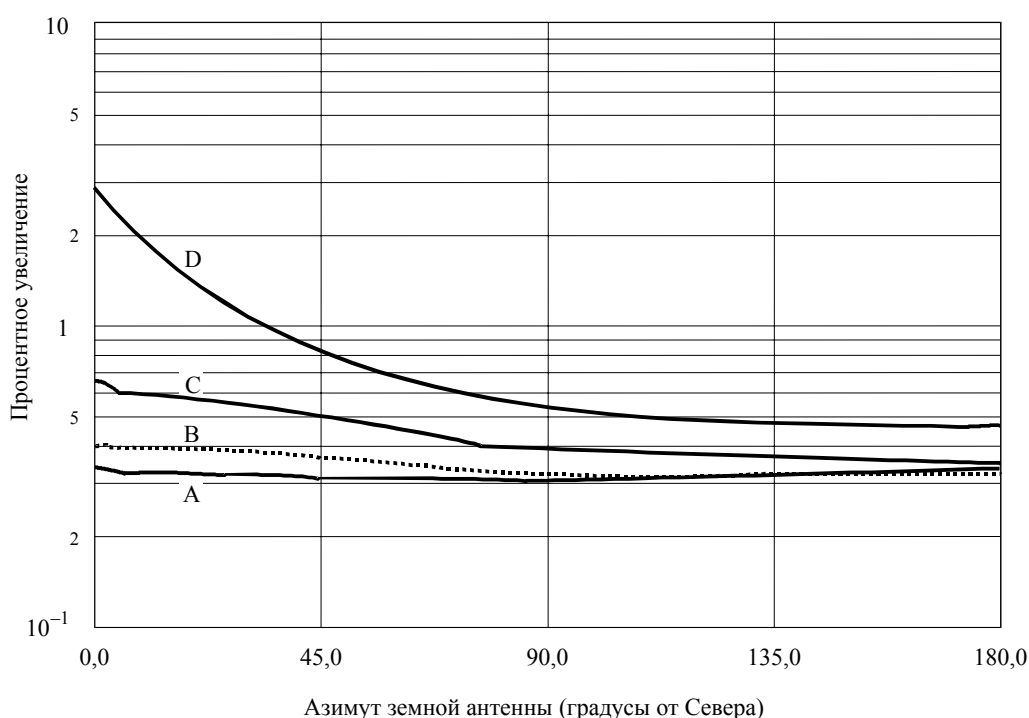
Процентное ухудшение в показателях качества для земной станции на широте 40° из-за помех от спутника с наклонением $89,5^\circ$ и с различными высотами



Кривые A: высота = 400 км
 B: высота = 800 км
 C: высота = 1 600 км
 D: высота = 10 000 км

Воздействие широты наземной станции на ухудшение показателей качества иллюстрируется рисунком 15. В то время как воздействия не являются сильными, они все более и более важны ближе к полюсам для околполярных углов наведения.

РИСУНОК 15
Процентное ухудшение в показателях качества для земной станции на различных широтах из-за помех от спутника на орбите с наклоном $89,5^\circ$ на высоте 800 км



Кривые A: широта = 0°
 B: широта = 20°
 C: широта = 40°
 D: широта = 60°

1108-15

Рисунки 16 и 17 показывают воздействие однородной орбитальной группировки из 55 спутников, работающих на совместной канальной основе, при условии, если бы они использовали многократный доступ с кодовым разделением (МДКР). Сравнивая рисунки 13 и 16, можно обнаружить, что распределения помех для случаев одного спутника и множества спутников должны быть почти подобными. Сравнение оказывается еще более очевидным на рисунке 17, где ухудшение показателей качества, вызванное 55 спутниками, видится как ухудшенное в 55 раз по сравнению с тем, что вызвано одним спутником.

РИСУНОК 16

Интегральное распределение помех для земной станции на широте 40° из-за однородной орбитальной группировки 55 спутников на орбитах с наклоном $89,5^\circ$ и высотой 800 км

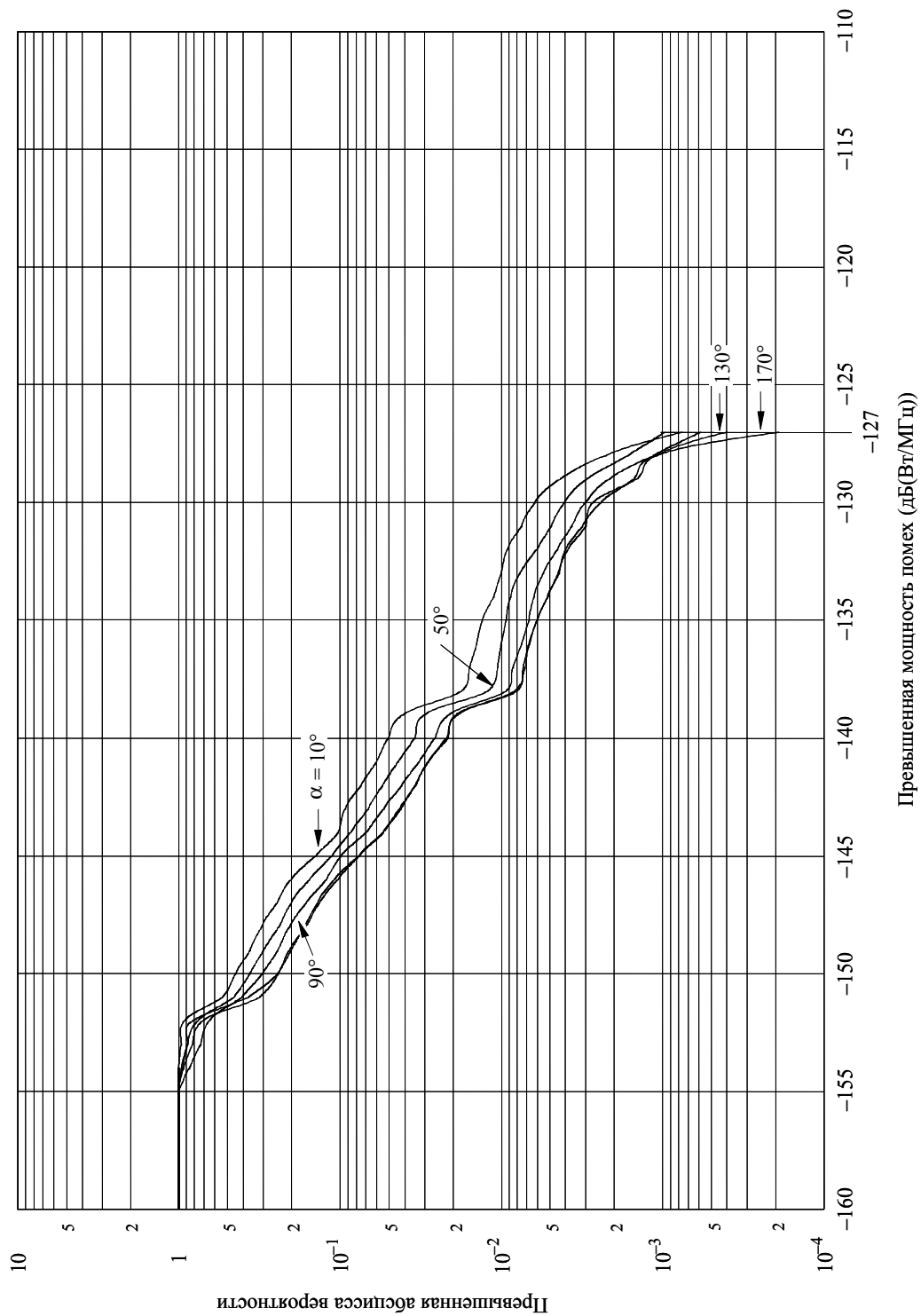
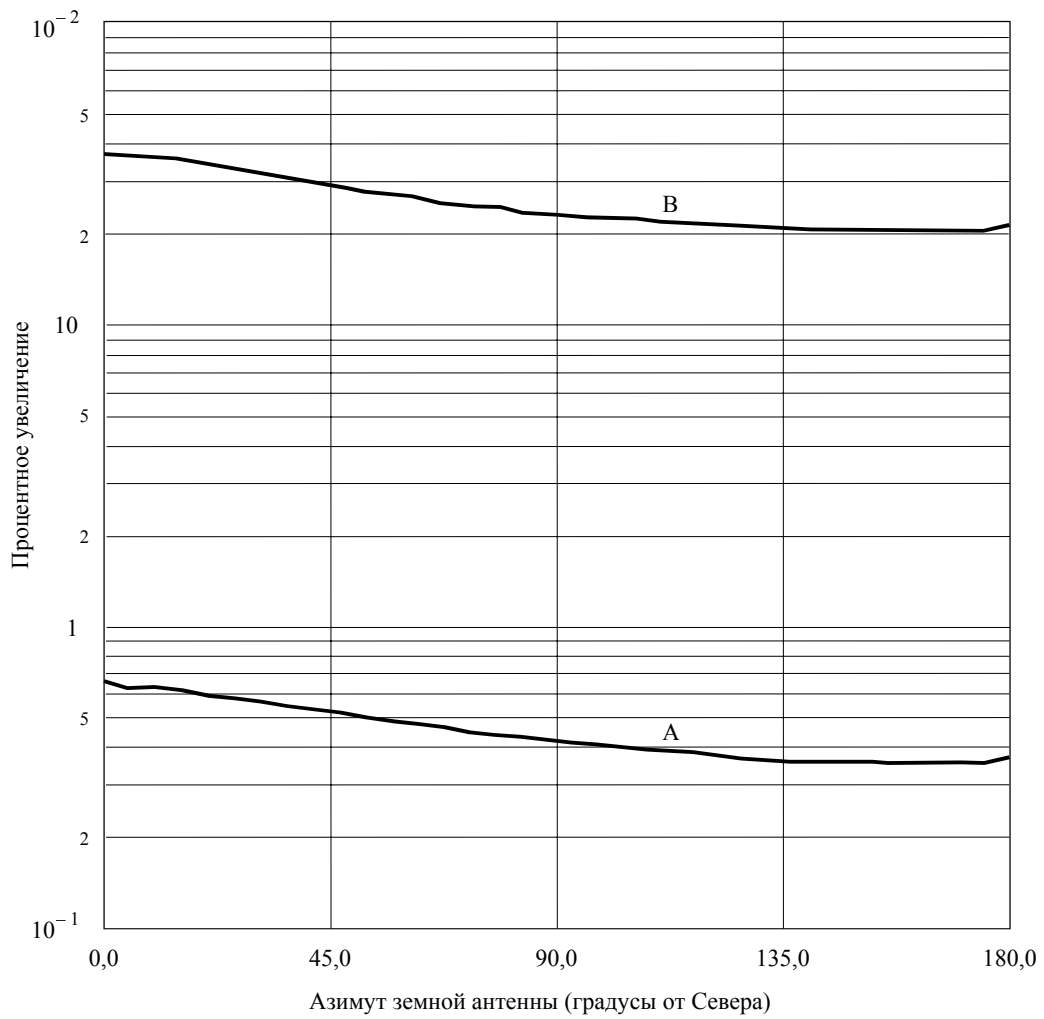


РИСУНОК 17

Процентное ухудшение в показателях качества для земной станции на широте 40° из-за одного спутника и однородной орбитальной группировки 55 спутников на орбитах с наклоном $89,5^\circ$ и высотой 800 км



Кривые А: 1 спутник
В: 55 спутников

1108-17

7 Промежуточные выводы

Оказалось, что ухудшение в показателях качества должно линейно зависеть от количества спутников для спутников в однородном созвездии. В общем случае, ухудшение является аддитивным по всем спутникам, вносящим помехи в полосу пропускания приемника.

Для спутников на негеостационарных орбитах, использующих то же самое повышение в п.п.м. с помощью угла возвышения, FDP, ощущаемое наземными приемниками в умеренных широтах, было ограниченным изменением с помощью:

- угла наведения – в пределах коэффициента три для широт вплоть до 60° и высот вплоть до 800 км;
- высоты спутника – увеличивается примерно линейно с высотой;
- долготы станции – увеличивается на величину, которая находится в пределах коэффициента около двух от долготы 20° до 60° .

Эти выводы могли изменяться для различных повышений п.п.м. Станции в высоких широтах могут испытывать большее изменение в FDP относительно угла азимута для спутников в околополярных орбитах. Совместное использование может быть облегчено взаимодействием повышения или самого предела п.п.м. с высотой и наклоном орбиты. Эти возможности заслуживают дальнейшего изучения.

Эти выводы зависят от использования почти круговых орбит, которые не являются геосинхронными. Использование орбит ВЭО требует дальнейшей информации и дальнейшего изучения, особенно потому, что статистика помех не может быть устойчивой за одномесечные периоды, в течение которых должны удовлетворяться критерии показателей качества. Средства для обеспечения такого действия требуют дальнейшего изучения.

Использование геосинхронных орбит увеличило бы изменения процентного ухудшения в показателях качества относительно и угла наведения, и местоположения наземной станции. Имеются типы соображений, которые обычно являются частью подробной процедуры координации. Поскольку координация с каждой наземной станцией, казалось бы, была непрактичной, альтернатива должна была бы уменьшить позволенные излучения спутника (п.п.м.). Хотя такие пределы могли быть разработаны просто, необходимо дальнейшее изучение.

Если бы и спутники ГСО, и спутники не-ГСО использовались в той же самой полосе частоты, соображения по совместному использованию стали бы все более и более сложными, особенно в связи с тем, что воздействия помех двух типов спутников являются аддитивными.

Это Приложение рассмотрело помехи от спутниковых орбитальных группировок, которые занимают спектр однородно на совместной частотной основе, и предполагает, что излучения спутников ограничены фиксированной маской п.п.м. на поверхности Земли. Определенные системы в пределах орбитальной группировки могут применять повторное использование частоты, которое могло бы улучшить перспективы совместного использования. Если эта методология должна быть применена к подробному рассмотрению определенных систем, оценка воздействий помех могла использовать лучи антенн и планы повторного использования частоты, осуществленные в спутниках.

Приложение 4

Методология для определения воздействия помех на цифровые приемники, использующие разнесение

1 Введение

В полосах частот, где замирания при многолучевом распространении являются доминирующей причиной ухудшения показателей качества при отсутствии помех, часто осуществляются различные формы частотного разнесения. Достигнутые усовершенствования показателей качества при отсутствии помех и ухудшение показателей качества при разнесении из-за помех будут в некоторой степени зависеть от конкретного выбранного осуществления разнесения. В получении сигнала разнесения некоторые системы могут использовать антенну с характеристиками, отличающимися от характеристик главной антенны. Различные системы в получении объединенного сигнала могут использовать различные устройства сочетания/переключения. При всех прочих равных условиях, система, которая использует идентичные антенны в главном и разнесенном трактах сигнала, будет достигать самых больших улучшений показателей качества по сравнению с системой без разнесения; такая система разнесения также, кажется, будет наименее затронутой помехами.

Ради развития FDP системы разнесения будет предполагаться, что цифровая система использует идентичные антенны в обеих ветвях разнесения, и является достаточно узкополосной или хорошо скорректированной, что ее требования по показателям качества преобладающим образом определяются затуханием сигнала. В этом случае доля месяца, когда критический критерий показателей качества не удовлетворяется, P_{0i} , может быть разработан тем же самым способом, как уравнение (20), за исключением того, что нужно проводить различие между величинами разнесения и отсутствия разнесения. Таким образом:

$$P_{0i} = \int_0^{\infty} dI p_I(I) \int_0^{(k/C)(N_T + I_C)} dr p_r(r) . \quad (25)$$

Мощность помех I и их распределение характеризуются, как в случае без разнесения, в ветви, содержащей главную антенну, относительно N_T , эффективной мощности шума системы, приписываемой к такой ветви. Мощность помех после обработки, I_C , относительно шума после обработки используется для определения ухудшения из-за помех. Поскольку имеется достаточное усиление системы перед разнесением, обработка выходного сигнала может быть проведена с изменением масштаба так, чтобы шумовой компонент снова имел значение N_T . Мощность помех в этом повторно масштабируемом выходном сигнале – I_C . Таким образом, в случае разнесения, можно было бы перерисовать рисунок 10 с I_C в качестве абсциссы, чтобы получить уравнение (25).

Там, где глубокие замирания при многолучевом распространении являются основной причиной ухудшения показателей качества разнесенной системы ФС, Рекомендация МСЭ-R P.530 обеспечивает метод предсказания уровней разнесенного приема узкополосных сигналов в режиме глубоких замираний. Из этого можно определить, что вероятность коэффициента замираний меньше, чем r , пропорциональна r^2 . Таким образом, функция плотности вероятности для коэффициента замираний должна быть пропорциональна r , и:

$$p_r(r) = \gamma r \quad r \ll 1, \quad (26)$$

где параметр γ включает в себя воздействия реализации разнесения.

Оказалось, что в общем виде уравнение (26) является подходящим для описания операции разнесения систем ФС в присутствии замираний при многолучевом распространении. Подставляя уравнение (26) в (25) и интегрируя, получаем:

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

или частичное ухудшение в показателях качества (DFDP) при разнесении как:

$$DFDP = \int_0^{\infty} \left(\frac{2I_C}{N_T} + \frac{I_C^2}{N_T^2} \right) p_I(I) dI. \quad (28)$$

Уравнение (28) может быть легко оценено для двух важных случаев: идеально переключаемого разнесения и разнесения, сочетающего максимальную мощность равного усиления. Оба типа будут рассматриваться для случая, где антенна в ветви разнесения имеет то же самое усиление, что и в главной ветви, и две ветви во всем другом являются идентичными.

2 Переключаемое разнесение

В этом случае операция разнесения достигается через действие переключателя, который выбирает сигнал с наименьшими замираниями. Следовательно, помехи и эффективная мощность шума в любой антенне появляются на выходе, без изменения масштаба, и

$$DFDP = \int_0^{\infty} \left(\frac{2I}{N_T} + \frac{I^2}{N_T^2} \right) p_I(I) dI \quad (29)$$

или:

$$DFDP = 2 \frac{I_{av}}{N_T} + \frac{I_2}{N_T^2}, \quad (30)$$

где I_{av} является таким, как определено в уравнении (23), а I_2 , второй момент мощности помех дается как:

$$I_2 = \int_0^{\infty} I^2 p_I(I) dI. \quad (31)$$

Уравнение (30) может быть также записано в той же самой форме, как (15), для использования в моделировании:

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

3 Объединение максимальной мощности

Сумматор максимальной мощности сдвигает относительную фазу между двумя ветвями разнесения так, что точные копии желательного сигнала в двух ветвях будут в фазе. Так как вклад помех от этих двух антенн является когерентным, отношение I/N было бы в два раза выше на выходе сумматора по сравнению со на входом, если помехи имели ту же самую относительную фазу, как желаемый сигнал. Если сдвиг фазы между ветвями помех отличается от сдвига желательного сигнала на ϕ радиан, то мощность помех на выходе сумматора, I_C , была бы дана как:

$$I_C = 2I \cos^2(\phi/2). \quad (33)$$

Этот результат можно подставить в уравнение (28). Предполагая, что фаза ϕ равномерно распределена на интервале от 0 до 2ϕ , можно определить ее среднее воздействие. Это дает следующее выражение:

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

или:

$$DFDP_{mpc} = 2 \frac{I_{av}}{N_T} + \frac{3I_2}{2N_T^2}. \quad (35)$$

Это также может быть записано в форме, подобной уравнению (15), для использования в моделировании.

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

4 Потеря запаса на замирания при разнесении (DFML)

Из предыдущих выводов можно ожидать, что FDP системы разнесения должно быть, меньшей мере, в два раза больше по сравнению с другой идентичной системой без разнесения в той же самой окружающей среде помех. Наоборот, используя уравнение (26), легко устанавливается, что DFML системы для заданного DFDP является половиной такого ухудшения системы без разнесения для подобного значения FDP. То есть:

$$DFML = 5 \log(1 + DFDP). \quad (37)$$

Если дисперсия мощности помех в приемнике ФС, σ^2 , определяется обычным путем:

$$\sigma_I^2 = I_2 - I_{av}^2 \quad (38)$$

и DFML может быть записано в понятиях FDP без разнесения как:

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

5 Резюме

В окружающих средах, где мощность помех в приемной системе ФС является постоянной, или не изменяется сильно во времени, потеря запаса на замирания, испытываемая такой системой, не будет зависеть от того, использует ли она разнесение или нет. В большинстве случаев изменения помех считаются не сильными, когда дисперсия мощности помех сопоставима с квадратом средней мощности помех.

Результаты из многих случаев моделирования помех от однородных созвездий спутников указывают, что дисперсия мощности помех часто на порядки величины выше, чем квадрат средней мощности помех. В этих случаях вклад дисперсии в помехи, как доказано вторым членом в уравнениях (30) и (39), становится доминирующим воздействием, которое будет ограничивать приемлемые уровни мощности помех, независимо от того, используется ли ухудшение показателей качества или потери запаса на замирания.

Для оценки воздействия помех в системах разнесения, FML идеальной переключаемой системы разнесения обеспечивает самую простую основу для сравнений.

Приложение 5

Соображения об однородности окружающей среды помех в течение месяца

По мере хода времени подспутниковая точка спутника не-ГСО в круговой орбите набрасывает траекторию на поверхности Земли. После некоторого количества законченных орбит, эта траектория возвратится к той же самой, или почти к той же самой, точке на поверхности Земли. Общее затраченное время для этого случая является периодом повторения спутника. Спутниковые орбитальные группировки, которые имеют короткие периоды повторения в несколько дней, или такие очень длительные периоды, как много месяцев, могут требовать специального рассмотрения, поскольку системы ФС должны удовлетворять требованиям показателей качества в любом месяце.

Период, выбираемый для моделирования помех от созвездия не-ГСО в приемнике ФС, следует выбирать так, чтобы удовлетворять двум условиям. Первое условие заключается в том, чтобы период моделирования был равным периоду повторения орбитальной группировки, который является временем между последовательными проходами определенного спутника через заданное пятно на поверхности Земли. Второе условие касается однородности в географической долготе окружающей среды помех, произведенной орбитальной группировкой. Статистика помех, полученных идентичными приемниками ФС на одинаковой широте, может также зависеть от географической долготы станции. Оценка этого изменения с географической долготой может быть сделана путем рассмотрения распределения в долготу экваториальных пересечений с юга на север каждого спутника в орбитальной группировке за его период повторения.

Так как системы ФС должны удовлетворять своим требованиям по показателям качества в любом месяце, оценкам помех от спутников следует основываться на самом плохом месяце, номинально за 30-дневный период. Моделирование выполняется для определения FML в режиме замираний, как для разнесенных, так и для неразнесенных приемников ФС, чтобы показать, что FDP или FML чувствительны к орбитальным параметрам орбитальной группировки и к начальным условиям орбитальной группировки, к параметрам, которые управляют однородностью окружающей среды помех в течение месяца.

Может быть множество способов, которыми продольная однородность помех может быть достигнута в планировании созвездия не-ГСО, например, изменением высоты спутников, изменением угла между орбитальными плоскостями и/или введением сдвига между плоскостями в фазе спутников в пределах плоскостей. Практическая жизнеспособность таких подходов нуждалась бы в дальнейшем изучении. Выбранный метод не важен для ФС. Однако следует признать, что неспособность достижения однородности могла подвергнуть существенное количество станций ФС худшей окружающей среде помех. Это нужно было бы принимать во внимание в любой подробной оценке воздействий помех на реальные системы.

Приложение 6

Методология для разработки интегрального распределения коэффициента полученной мощности к сумме мощностей шума и помех из результатов моделирования излучений от орбитальных группировок космических станций не-ГСО

1 Взаимоотношение между C/I и $C/(N+I)$

FDP и FML для цифровых систем с порогами показателей качества в режиме глубоких замираний при многолучевом распространении могут быть определены с использованием методов, разработанные в Приложении 3. Подход, использованный в п. 5 этого Приложения, может быть расширен на состояния менее глубоких замираний, где может быть важной форма интегрального распределения глубины замираний. Для этой цели могут быть определены следующие распределения:

$F_M(A)$: вероятность, что принятый сигнал на трактах замирает до уровня A (дБ) или еще ниже номинального, или уровень приема без замираний;

$F_{C/(N+I)}(Z)$: вероятность, что отношение мощности несущей частоты к мощности шума плюс помехи (дБ), это Z (дБ) или еще ниже отношения мощности несущей частоты без замираний к шуму.

Интеграл по переменной r в уравнении (20) это $F_M(Z - 10 \log(1 + I/N_T))$, и левая сторона уравнения (20) это $F_{C/(N+I)}(Z)$. Таким образом:

$$F_{C/(N+I)}(Z) = \int_0^{\infty} p_I(I) F_M(Z - 10 \log(1 + I/N_T)) dI. \quad (40)$$

Для любого распределения замираний при многолучевом распространении и функции плотности вероятности полученной мощности помех, уравнение (40) обеспечивает средства разработки интегрального распределения отношения несущей частоты к мощности шума плюс помех. Плотность вероятности мощности помех в приемнике ФС из-за орбитальной группировки спутников не-ГСО обычно получается компьютерным моделированием. Если это распределение сохраняется, оно может использоваться в уравнении (40) впоследствии в отдельном вычислении для оценки воздействий замираний на показатели качества при умеренных глубинах замираний.

2 Моделирование совокупного распределения глубины замираний

МСЭ-R разработал математическую модель, приведенную в Рекомендации МСЭ-R P.530, состоящую из семейства распределений замираний при многолучевом распространении, где семейство характеризуется параметром qt . Эта модель может использоваться для определения функции $F_M(A)$ по всем значениям A , и положительным, и отрицательным. Модель обеспечивает полезную основу для прояснения процедур и иллюстрации результатов. Она используется для этой цели в следующих параграфах.

3 Пример

Рисунок 18 показывает пять пар распределений потерь C/I и $C/C/(N+I)$, одна пара для каждого из пяти значений параметра qt , используя плотность вероятности помех, разработанную для случая примерной орбитальной группировки ОЗО-F, работающей на уровнях п.п.м., приведенных в Рекомендации МСЭ-R M.1141 на частоте 2180 МГц, на приемную станцию ФС на широте 40° и под углом азимута самого плохого случая в 50° . Для заданного тракта ФС заданной длины и местоположения в геоклиматической области применимо только единственное значение qt . В любой точке на одном из распределений C/N вертикальное расстояние к соответствующему распределению $C/(N+I)$ соответствует ухудшению показателей качества, а горизонтальное разделение соответствует FML. Разделения между распределениями C/N и $C/(N+I)$ могут быть точно определены с помощью тщательно написанной компьютерной программы. Результаты такого вычисления даются на рисунке 19 для распределений, показанных на рисунке 18.

Потери C/N относительно C/N без замираний идентичны глубине замираний. Хотя FML слегка уменьшается при более мелких глубинах замираний для случая qt , равного -2 , для положительных значений qt , которые являются более типичными для замираний ниже 3 ГГц, FML увеличивается значительно на более мелких глубинах замираний.

РИСУНОК 18

Интегральные распределения потерь C/N и $C/(N+I)$ из C/N без замираний из моделирования созвездия ОЗО-F для работы без разнесения для приемной антенны ФС на азимуте 50° от Севера с несколькими значениями параметра qt

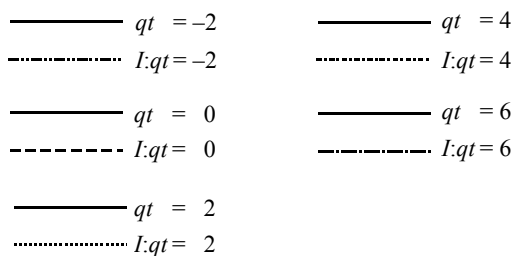
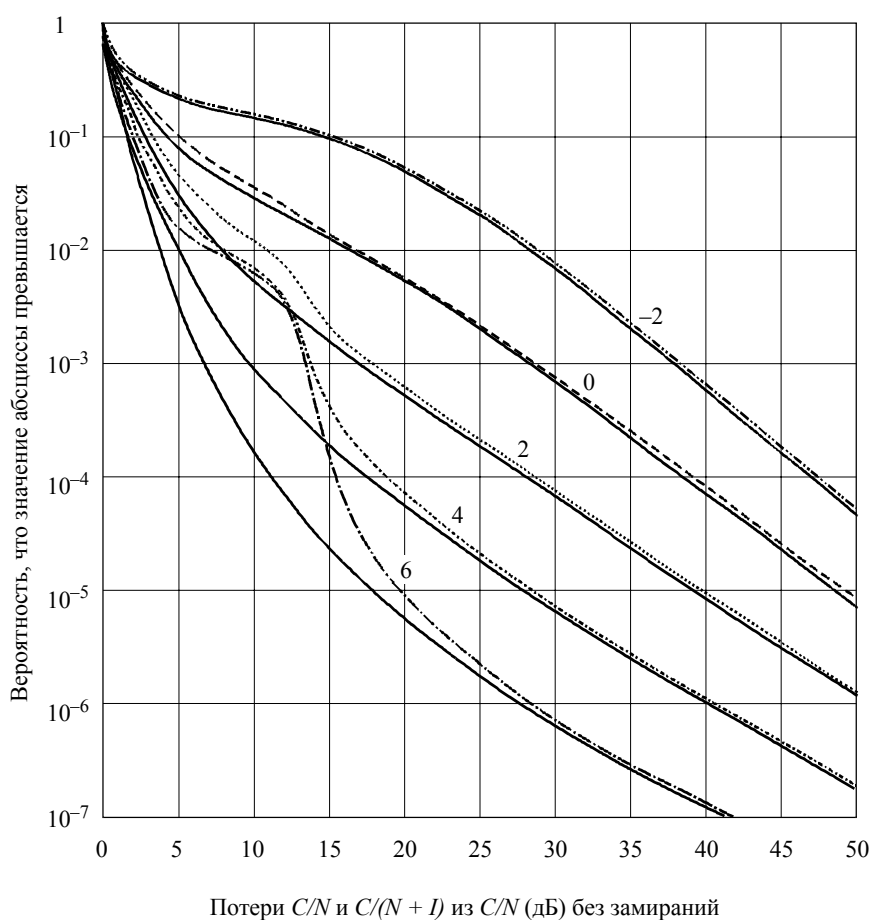
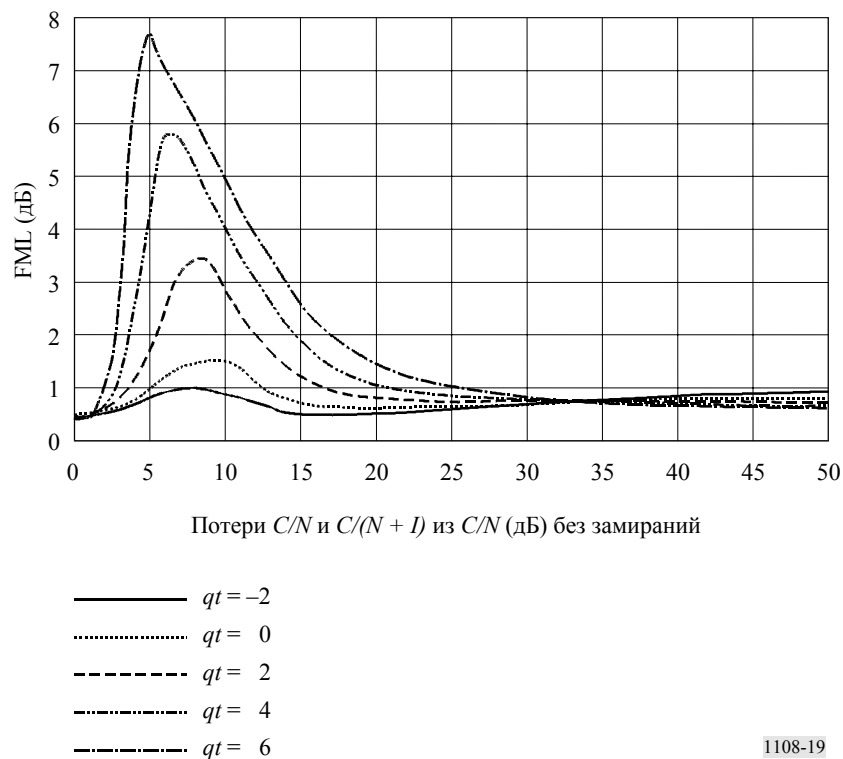


РИСУНОК 19

FML без разнесения на определенной глубине замираний,
полученной из результатов моделирования,
используемых на рисунке 18

(Азимут = 50°)



4 Выводы

FML на промежуточных уровнях замираний может быть значительно больше, больше на много децибел, чем потери на глубоких уровнях замираний. Более значительные значения FML связываются с наклоном интегрального распределения замираний. Эта ассоциация, например, очевидна из сравнения рисунков 18 и 19. Здесь можно видеть, что наибольшие потери происходят для распределений замираний, которые имеют наибольший наклон, и около уровней замираний, где происходят эти большие наклоны. Безусловно, потери FML на промежуточных глубинах чувствительны к подробной форме интегрального распределения уровней замираний на тракте.

Тем не менее, методология, развитая в этом Приложении, может быть применена к любому распределению глубины замираний. Она будет нуждаться в применении с реальными распределениями замираний или с моделью Рекомендации МСЭ-R P.530. Детальная оценка фактического воздействия FML на показатели качества данной системы ФС потребовала бы подробного знания характеристик системы или ее показателей качества по ошибкам на конкретном уровне замираний наряду с ее критериями показателей качества.

Приложение 7

Аналитический метод для оценки помех к станции в службе ФС от созвездия спутников не-ГСО, использующего круговую или эллиптическую орбиты, включая орбиты ВЭО

1 Введение

Для созвездия спутников не-ГСО сделаны следующие предположения:

- имеются M_s орбитальных планов и N_s спутников в плоскости;
- угол разделения между смежными орбитальными орбитами является однородным;
- временной интервал между двумя смежными спутниками в плоскости является однородным;
- орбитальный период рационально не связан с вращением Земли;
- все спутники всегда передают на одинаковых частотах;
- угол наклонения, δ , является общим для всех спутников.

Также предполагается, что, в случае эллиптической орбиты, аргумент перигея является общим для всех спутников.

Метод в этом Приложении применим к оценке помех от созвездия спутников не-ГСО, использующего средние или низкие земные орбиты и состоящего из многих спутников, действующих в множестве орбитальных планов, со всемирным покрытием. Что касается применимого частотного диапазона, то с точки зрения принципа этого метода нет никакого предела, кроме любых ограничений, которые могли быть включены в уместные Рекомендации МСЭ-R. Особенности аналитического метода в этом Приложении обобщены в п. 6.

Некоторые изменения к методу необходимы при выполнении оценки помех от созвездий спутников не-ГСО, использующих орбиты ВЭО.

Дополнение 2 к этому Приложению представляет необходимые изменения, требуемые для того, чтобы сделать следующий аналитический метод применимым к созвездиям спутников не-ГСО, которые используют орбиты ВЭО.

Хотя аналитические методы, описанные в этом Приложении и в Дополнении 2 к этому Приложению, предполагают, что система ФС состоит из одной станции, легко расширить методы до оценки основы маршрута для составных помех в многопролетной системе ФС, в которой FDP основы маршрута определено формулой, как представлено в Приложении 2 к Рекомендации МСЭ-R F.1107.

2 Случай круговых орбит

В случае круговых орбит диапазон спутника является постоянным. Функция плотности вероятности (p.d.f.), $p(u)$, аргумента спутника, которая должна быть в диапазоне $(u, u + du)$, является однородной согласно:

$$p(u) = 1/(2\pi). \quad (41)$$

Предполагая, что период спутника – единица, без потери общности, аргумент, u , во времени, t ($0 \leq t < 1$), дается выражением:

$$u = 2\pi t. \quad (42)$$

При условиях, приведенных в п. 1, мы можем предположить, что p.d.f. долготы спутника является однородной на интервале $0-2\pi$.

Поэтому, когда есть M_s орбитальных плоскостей и N_s спутников в плоскости, можно предположить, что p.d.f. аргумента эталонного спутника является однородной на интервале $0-2\pi/N_s$, а p.d.f. долготы эталонного спутника однородно на интервале $0-2\pi/M_s$. Таким образом, когда аргумент и долгота эталонного спутника – u и φ , соответственно, аргумент, u_{ij} , и долгота, φ_{ij} , i -того спутника в j -том плане (для $i = 1, 2, \dots, N_s$ и $j = 1, 2, \dots, M_s$) даются с помощью (см. Примечание 1):

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

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

где $i = 1$ и $j = 1$ соответствуют эталонному спутнику. Тогда помехи могут быть определены в общем виде согласно методу, описанному в п. 4.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнение (43a) предполагает, что нет разности по фазе между спутниками в различных плоскостях. Если имеется какая-либо разность по фазе, это уравнение следует изменить, поскольку $u_{ij} = u + \beta_j + (i - 1) 2\pi/N_s$, где β_j – разность по фазе j -той плоскости ($\beta_1 = 0$).

3 Случаи эллиптических орбит

3.1 Диапазон спутника

Диапазон (от центра Земли), $r(u)$, спутника на эллиптической орбите может быть выражен как функция аргумента, u , следующим образом:

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

где e и ω являются, соответственно, эксцентриситетом и аргументом перигея, а диапазоны апогея и перигея орбиты от центра Земли даются, соответственно, выражениями $r_0/(1 - e)$ и $r_0/(1 + e)$. Наоборот, r_0 и e могут быть выражены следующим образом:

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

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

где r_{max} и r_{min} – диапазоны, соответственно, апогея и перигея от центра Земли.

3.2 p.d.f. аргумента спутника

Хорошо известная теорема эллиптической орбиты (Второй закон Кеплера) гласит, что "скорость охватываемой области является постоянной". Это может быть выражено следующим образом:

$$r^2(u) \cdot (du / dt) = \text{константа} \quad (46a)$$

или

$$dt \propto r^2(u) \cdot du. \quad (46b)$$

Здесь следует отметить, что dt пропорционально вероятности того, что аргумент спутника находится в диапазоне $(u, u + du)$. Поэтому p.d.f. спутника, $p(u)$, как функция аргумента, u , дается выражением:

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

Если $p(u)$ интегрируется по отношению к u на интервале $0-2\pi$, результату следует быть равным единице. Из этого, α определяется следующим образом:

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

Здесь следует отметить, что долгота спутника, θ , определяется как функция аргумента следующим образом:

$$\theta = \arcsin(\sin u \cdot \sin \delta), \quad (49)$$

где δ – угол наклона орбиты. Это уравнение применимо также к круговым орбитам.

3.3 Определение аргумента как функции времени

Для упрощения можно предположить, что период спутника это 1, без потери общности. Очень часто оказывается необходимым определять аргумент, $u(t)$, как функцию времени, t , где $0 \leq t < 1$. Это может быть определено путем решения следующего уравнения:

$$t = \int_0^{u(t)} p(x) \cdot dx. \quad (50)$$

Чтобы упростить вычисление $u(t)$ без потери точности, может быть соответствующим следующий подход. Один период делится на N , и t_k определяется как:

$$t_k = k/N \quad (k = 0, 1, \dots, N). \quad (51)$$

Аргумент, соответствующий t_k , обозначается как $u_k = u(t_k)$. Тогда u_k определяется с помощью:

$$\int_{u_{k-1}}^{u_k} p(x) \cdot dx = \frac{1}{N}. \quad (52)$$

Приближительное значение u_k дается с помощью (отметим, что $u_0 = 0$):

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

которое получается, предположив, что $p(x)$ является постоянным в диапазоне (u_{k-1}, u_k) . Это может быть использовано как начальное приближительное значение, а точное значение u_k может быть определено, например, с помощью метода Ньютона-Рафсона (см. Примечание 1). Таким образом, u_k может быть определено для всех значений t_k ($k = 0, 1, \dots, N$). Отметим, что $u_N = 2\pi$.

Значение $u(t)$, соответствующее времени t , может быть аппроксимировано следующим образом:

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

где $t_k \leq t < t_{k+1}$ (если $t \geq 1$, это неравенство следует заменить неравенством $t_k \leq t - 1 < t_{k+1}$). Если N является достаточно большим (например, $N = 10\,000$), уравнение (54) дает точное значение $u(t)$ как функции времени. Упрощенный метод вычисления, который исключает необходимость интегрирования в уравнении (52), описывается в Приложении 1.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Метод Ньютона-Рафсона кратко описывается ниже.

На основе уравнения (53), первоначальное приближенное значение v_0 из u_k определяется как:

$$v_0 = u_{k-1} + \frac{1}{N \cdot p(u_{k-1})}. \quad (55)$$

Когда приближенное значение v_{i-1} известно, следующее приближенное значение v_i дается с помощью:

$$v_i = v_{i-1} - \frac{f(v_{i-1})}{p(v_{i-1})} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (56)$$

где

$$f(v_{i-1}) = \int_{u_{k-1}}^{v_{i-1}} p(x) \cdot dx - \frac{1}{N} \quad (57)$$

и как $p(v_{i-1})$, так и $p(x)$, даются уравнением (47) (отметим, что $p(x)$ – производная от $f(x)$). Путем повторения вычислений согласно уравнениям (56) и (57) легко получается точное значение u_k . Сходимость является очень быстрой. Значение $f(v_{i-1})$ может быть вычислено, например, с помощью метода Симпсона.

3.4 Определение местоположений спутников

Этот пункт дает метод для определения местоположений спутников не-ГСО, использующих эллиптические орбиты. Предполагается, что имеются M_s орбитальных плоскостей и N_s спутников в орбитальной плоскости.

Можно предположить, что местоположение (во времени) эталонного спутника является равномерно распределенным в пределах $0 \leq t < 1/N_s$, а его долгота, ϕ , равномерно распределена в пределах $0 \leq \phi < 2\pi/M_s$. Соответствующий аргумент, $u(t)$, дается уравнением (54). Аргументы других спутников в той же самой орбитальной плоскости могут быть определены как аргументы, соответствующие $t + (k/N_s)$, где k равно от 1 до $N_s - 1$.

Широты спутников в этой орбитальной плоскости, содержащей эталонный спутник, могут быть определены путем использования уравнения (49). Аргументы спутников в других орбитальных плоскостях могут рассматриваться как те же самые, что и аргументы эталонного орбитального плана. Легко определить долготы всех спутников на основе долготы и аргумента эталонного спутника.

Для реальных вычислений необходимо вычислить помехи в примерных точках. Для этой цели максимальное время ($= 1/N_s$) эталонного спутника делится на N_t , а максимальная долгота ($= 2\pi/M_s$) эталонного спутника делится на M_ϕ . Тем самым вероятность появления эталонного спутника в следующие время и долготу $- 1/(M_\phi \cdot N_t)$:

$$t = \frac{1}{N_s} \cdot \frac{i_t - 0,5}{N_t} \quad (i_t = 1, 2, \dots, N_t) \quad (58a)$$

$$\phi = \frac{2\pi}{M_s} \cdot \frac{j_\phi - 0,5}{M_\phi} \quad (j_\phi = 1, 2, \dots, M_\phi). \quad (58b)$$

Уравнения (49), (54), (58a) и (58b) могут быть использованы в качестве основы для определения широт и долгот всех спутников в созвездии.

С точки зрения времени вычислений, значения M_ϕ и N_t могут не быть достаточно большими. Поэтому чтобы осуществить подробные вычисления в чувствительных областях, целесообразно принять следующий подход.

Для каждой ячейки, определяемой уравнениями (58a) и (58b), углы разделения антенн следует вычислять для всех видимых спутников. Если минимальный угол разделения меньше, чем определенный пороговый угол, эту ячейку следует рассматривать как чувствительную область, и ее следует далее делить на меньшие ячейки (см. Примечание 1).

Когда время и долгота эталонного спутника даются, соответственно, уравнениями (58a) и (58b), время, t_{ij} , и долгота, ϕ_{ij} , для i -того спутника в j -той плоскости (для $i = 1, 2, \dots, N_s$ и $j = 1, 2, \dots, M_s$) даются с помощью:

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

$$\phi_{ij} = \phi + (j - 1) 2\pi/M_s, \quad (59b)$$

где $i = 1$ и $j = 1$ соответствуют эталонному спутнику. Аргумент, u_{ij} , для i -того спутника в j -той плоскости можно вычислить путем использования уравнений (54) и (59a) (см. Примечание 2).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Когда угол возвышения станции, на которую действуют помехи, (например, станция в фиксированной службе), очень низок, имеется вероятность, что чувствительная ячейка может быть пропущена из-за воздействия горизонта. Чтобы избегать таких ситуаций, 9 ячеек, включая ячейки, смежные с чувствительной областью, следует расценивать как чувствительные ячейки, и они должны быть далее разделены на меньшие ячейки. Если угол возвышения антенны ФС не является низким, дальнейшее деление смежных ячеек на меньшие ячейки может оказаться ненужным.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Уравнение (59a) предполагает, что имеются спутники в том же самом аргументе в M_s различных орбитальных плоскостях. Однако в определенных случаях ситуация может быть отличающейся. В таких случаях время, t_{ij} , спутников в различных плоскостях следует определять как $t_{ij} = t + \tau_j + (i - 1)/N_s$, где τ_j – разность времени j -той плоскости ($\tau_1 = 0$).

4 Углы возвышения и азимута к спутникам в условиях распространения в свободном пространстве

Долгота i -того спутника в j -той плоскости дается уравнениями (43b) или (59b). Широта, θ_{ij} , i -того спутника в j -той плоскости может быть вычислена путем использования уравнения (49). Диапазон, r_{ij} , этого спутника может быть вычислен с помощью уравнения (44). Они выражаются в полярных координатах как r_{ij} , θ_{ij} , ϕ_{ij} .

Предполагая, что широта (положительная в Северном полушарии и отрицательная в Южном полушарии) и долгота станции ФС, подвергающейся помехам, соответственно, это θ_f и φ_f , вышеупомянутые координаты, преобразовываются так, чтобы станция ФС была расположена на широте 0° и долготы 0° . Для этой цели сначала долгота станции ФС преобразовывается в 0° . В этом случае новые координаты спутника относительно долготы 0° станции ФС даются с помощью $(r_{ij}, \theta_{ij}, \varphi_{ij} - \varphi_f)$ в полярных координатах. Это местоположение выражается в прямоугольных координатах как (x, y, z) , которые следуют:

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

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

$$z = r_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} \cdot \quad (60c)$$

Затем широта станции ФС преобразовывается в 0° . Новые координаты (x_1, y_1, z_1) спутника относительно широты 0° станции ФС даются с помощью:

$$x_1 = x \cdot \cos \theta_f + z \cdot \sin \theta_f \quad (61a)$$

$$y_1 = y \quad (61b)$$

$$z_1 = -x \cdot \sin \theta_f + z \cdot \cos \theta_f \cdot \quad (61c)$$

Угол возвышения, ε_{s0} , и угол азимута, γ_s (измеренный против часовой стрелки от Севера), спутника в условиях распространения в свободном пространстве, как видится из станции ФС, даются с помощью:

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

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

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

где r_e является средним значением радиуса Земли и равно 6370 км.

Следует отметить, что уравнения в этом пункте эквивалентны соответствующим уравнениям в Приложении 1 к этой Рекомендации.

5 Углы разделения между направлением антенны ФС и видимыми спутниками

Видимость спутника может быть определена с использованием Рекомендации МСЭ-R F.1333, и когда спутник видим, фактический угол возвышения, ε_s , принимая во внимание атмосферное преломление, может также быть определен с помощью Рекомендации МСЭ-R F.1333, которая обеспечивает методы

для определения видимости спутников и для оценки фактических углов возвышения, принимая во внимание атмосферное преломление. Эти значения могут использоваться для определения угла разделения, SA , от направления главного луча антенны ФС следующим образом:

$$SA = \arccos(\cos \varepsilon_s \cdot \cos \varepsilon_f \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_f) + \sin \varepsilon_s \cdot \sin \varepsilon_f), \quad (63)$$

где ε_f и γ_f являются, соответственно, углами возвышения и азимута (измеренными против часовой стрелки от Севера) главного луча антенны ФС. Основанное на этом угле возвышения, усиление антенны ФС в направлении спутника следует определять согласно Рекомендации МСЭ-R F.1245 в случае направленной антенны. С другой стороны, в случае всенаправленной или секторной антенны, угол разделения дается с помощью $SA = |\varepsilon_s - \varepsilon_f|$, и усиление антенны ФС в направлении спутника следует определять согласно Рекомендации МСЭ-R F.1336.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Рекомендация МСЭ-R SF.1395 или Рекомендация МСЭ-R F.1404 могут использоваться для вычисления минимального атмосферного поглощения, которое является важным для оценки помех к станциям ФС. Для полос частот, не охваченных этой Рекомендацией, для оценки потерь от минимального атмосферного поглощения может быть использована Рекомендация МСЭ-R P.676.

6 Резюме особенностей аналитического метода

Аналитический метод в этом Приложении использует тот факт, что если орбитальный период спутника рационально не связан с вращением Земли, то p.d.f. долготы спутника однородна на интервале $0-2\pi$. В случае круговой орбиты p.d.f. аргумента, u , также однородно распределена в интервале $0-2\pi$. С другой стороны, в случае эллиптической орбиты, аргумент однородно не распределен, но если аргумент определяется как функция времени, как показано в п. 3.3, то вероятность спутника, существующего во временном интервале $(t, t + dt)$, пропорциональна dt . Широта спутника может быть рассчитана из аргумента согласно уравнению (49). Таким образом, p.d.f. широты спутника может рассматриваться как независимая от этой долготы спутника. Если этот факт принимается во внимание, то местоположение эталонного спутника может быть определено аналитическим путем, как описано в п. 3.4.

Если предположения в п. 1 выдерживаются, то достаточно предположить, что местоположение во времени эталонного спутника однородно распределено в пределах $0 \leq t < 1/N_s$, а его долгота, φ , однородно распределена в пределах $0 \leq \varphi < 2\pi/M_s$. Соответствующий аргумент, $u(t)$, дается уравнением (54). Местоположения других спутников в той же самой орбитальной группировке спутников могут быть легко рассчитаны на основе местоположения эталонного спутника.

Если некоторую ячейку находят чувствительной (то есть минимальный угол разделения от видимых спутников меньше, чем некоторый порог), ячейку (и смежные ячейки) следует далее разделить на меньшие ячейки, чтобы оценить помехи подробно, но если нет чувствительных ячеек, то разделение на меньшие ячейки не является необходимым. Это является важным фактором, который делает аналитический метод очень эффективным в понятиях требуемого времени вычисления. Поэтому аналитический метод, как ожидается, будет намного быстрее, чем обычный метод моделирования, при условии, что точность вычисления является одинаковой. Например, если количество чувствительных ячеек, включая смежные ячейки, составляет 10% от всех наблюдаемых ячеек, требуемое время вычисления будет около 1/10.

Дополнение 1 к Приложению 7

Упрощенные вычисления для п. 3.3 Приложения 7

Вычисления для уравнения (50) в п. 3.3 Приложения 7 могут быть упрощены следующим образом путем исключения необходимости интегрирования в уравнении (52).

Сначала в уравнении (47), переменная u преобразуется в новую переменную s следующим образом:

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

где $u = 0$ соответствует $s = 0$ и поэтому s_0 определяется следующим образом, предполагая, что $0 \leq \omega < 2\pi$:

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

$$= 2\pi - \arccos\left(\frac{e + \cos \omega}{1 + e \cdot \cos \omega}\right) \quad \text{для } \pi \leq \omega < 2\pi. \quad (65b)$$

Здесь значение функции $\arccos(x)$ определяется в диапазоне $(0, \pi)$. Уравнения (65a) и (65b) показывают, что s_0 является возрастающей функцией от ω . Также предполагается, что u может быть определено как возрастающая функция от s ($n_j \text{ tcnm}$, $du/ds > 0$). Из уравнения (64), после некоторых вычислений, du/ds может быть выражено следующим образом:

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

Подстановкой уравнений (64) и (66) в уравнения (47) и (50) в Приложении 7, можно получить следующее уравнение:

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

Левая сторона уравнения (67) может быть легко преобразована в следующее:

$$s - e \cdot \sin(s - s_0) = 2\pi t + e \cdot \sin s_0. \quad (68)$$

Это трансцендентное уравнение является вариацией так называемого уравнения Кеплера (отметим, что $2\pi t$ называется средней аномалией, и что учебник по динамике может определять уравнение Кеплера только для $s_0 = 0$). Для любых других t ($0 \leq t < 1$), значение s ($0 \leq s < 2\pi$), удовлетворяющее уравнению (68), может быть легко вычислено с помощью метода Ньютона-Рафсона следующим образом (см. Примечание 1).

Первоначальное приближенное значение $s^{(0)}$ для s может быть вычислено путем:

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

Тогда v -тое приближенное значение $s^{(v)}$ вычисляется с помощью:

$$s^{(v)} = s^{(v-1)} - \frac{f(s^{(v-1)})}{f'(s^{(v-1)})} \quad (v = 1, 2, 3, \dots), \quad (70)$$

где:

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

Отметим, что $f'(s)$ является производной от $f(s)$. Сходимость $s^{(v)}$ к точному значению s с помощью итераций согласно уравнениям (70) и (71) является очень быстрой.

Значение u , соответствующего s , определяется следующим образом, принимая во внимание, что u является возрастающей функцией от s :

$$u = \omega - 2\pi + a \quad \text{для } -2\pi < s - s_0 < -\pi \quad (72a)$$

$$= \omega - a \quad \text{для } -\pi \leq s - s_0 < 0 \quad (72b)$$

$$= \omega + a \quad \text{для } 0 \leq s - s_0 < \pi \quad (72c)$$

$$= \omega + 2\pi - a \quad \text{для } \pi \leq s - s_0 < 2\pi, \quad (72d)$$

где:

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

Таким образом, u_k , соответствующее t_k , определенному уравнением (51) в Приложении 7, может быть вычислено для любого значения k ($k = 0, 1, 2, \dots, N$) ($u_0 = 0$).

Значение $u(t)$, соответствующего времени t , может быть аппроксимировано следующим образом:

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

где $t_k \leq t < t_{k+1}$ (если $t \geq 1$, это неравенство следует заменить неравенством $t_k \leq t - 1 < t_{k+1}$). Если N является достаточно большим (например, $N = 10\,000$), уравнение (73) дает точное значение $u(t)$ как функции времени.

Эквивалентность метода вычисления в этом Дополнении и метода в п. 3.3 Приложения 7 была подтверждена путем компьютерных вычислений.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В методе Ньютона-Рафсона, описанном здесь, сходимость к желаемым результатам является стабильной и быстрой для любых значений t и s_0 , при условии, что e меньше, чем 0,81. Для общих приложений это условие будет выдержано. Однако, если по какой-либо причине необходимо решить уравнение (68) для большего значения e , можно без опасений принять метод Ньютон-Рафсона, чтобы гарантировать быструю сходимость. Один примерный метод дается ниже (все вычисления следует выполнять с двойной точностью).

Шаг 1: Вместо вычисления согласно уравнению (70), сначала выбирают $\lambda = 1$ и вычисляют $s^{(v)}$ в шаге 2.

Шаг 2: Вычисляют:

$$s^{(v)} = s^{(v-1)} - \frac{\lambda \cdot f(s^{(v-1)})}{f'(s^{(v-1)})}. \quad (74)$$

Шаг 3: Если $|f(s^{(v)})| < 10^{-12}$, полное вычисление закончено (то есть, $s^{(v)}$ достигло достаточно точного значения). Если это не так, и если $|f(s^{(v)})| < |f(s^{(v-1)})|$, вычисление $s^{(v)}$ закончено и возвращаются к шагу 1, чтобы вычислить следующее v . Если $|f(s^{(v)})| \geq |f(s^{(v-1)})|$, делят λ на 2, возвращаются к шагу 2 и повторяют вычисление.

Вышеуказанный измененный метод эффективен для любого ϵ вплоть до 0,999.

Дополнение 2 к Приложению 7

Изменения аналитического метода в Приложении 7 для орбитальных группировок спутников не-ГСО, использующих орбиты ВЭО

Сети спутников не-ГСО, использующие орбиты ВЭО, можно охарактеризовать следующим образом. Ради упрощения, в общем случае предполагается, что активные спутники ВЭО существуют только в одном полушарии, но легко расширить метод вычисления до варианта, где активные спутники ВЭО существуют в двух полушариях:

- имеются M_s орбитальных группировок спутников в одном полушарии;
- одна орбитальная группировка спутников состоит из N_s спутников и только один спутник является активным около своего апогея в любое время; когда один спутник становится пассивным, другой спутник становится активным, обеспечивая непрерывное покрытие, и его наземный след идентичен такому следу предыдущего активного спутника;
- орбитальный период, T_{orb} (в часах), спутника рационально относится к вращению Земли (обычно будучи примерно 8, 12, 16 или 24 часов);
- узел наклона является общим для всех спутников;
- аргумент перигея (ω) является общим для всех спутников.

В случае систем спутников ВЭО оказывается возможным, что одна орбитальная группировка может обеспечить услуги в более чем одной области обслуживания. Например, когда орбитальный период равен приблизительно 8 часов, одна орбитальная группировка может обеспечить на поверхности Земли услуги в трех различных областях обслуживания. Однако ради статистической оценки помех удобно рассматривать эти области обслуживания отдельно и поэтому предполагать, что три области обслуживания существуют независимо, и что только один активный спутник существует для каждой области обслуживания.

В общем случае, если активные спутники ВЭО работают только в северном полушарии, $\omega = -\pi/2$ (или $\omega = 3\pi/2$) радиан, а если активные спутники ВЭО работают только в южном полушарии, $\omega = \pi/2$ радиан. Если активно спутники ВЭО работают в обоих полушариях, то следует использовать эти оба значения ω . Значения ω , отличающиеся от $\pm\pi/2$, также возможны для специальных приложений.

Диапазон спутника ВЭО от центра Земли определяется формулой в п. 3.1 Приложения 7. Аргумент активного спутника ВЭО определяется как функция времени t , где $0 \leq t < 1$ (здесь орбитальный период предполагается равным 1, без потери общности), с помощью формулы в п. 3.3 Приложения 7, для которого используется формула в п. 3.2 Приложения 7. Отметим, что вычисления в п. 3.2 и п. 3.3 Приложения 7 неявно предполагают, что $u = 0$ в $t = 0$, но в случае созвездий спутников ВЭО более подходяще предполагать, что $u = \omega$ в $t = 0$. Ширина спутника определяется уравнением (49) Приложения 7.

Один активный спутник ВЭО выбирается в качестве эталонного спутника. Когда T_{orb} не превышает 24 часов, начальное активное время, T_{start} , и конечное активное время, T_{end} , этого активного спутника даются следующим образом, предполагая, что орбитальный период для левой стороны уравнения является единицей без потери общности, и что спутник существует в перигее в момент $t = 0$:

$$(T_{start} \geq 0) \quad T_{start} = 0,5 - 12/(N_s \cdot T_{orb}) \quad (75a)$$

$$(T_{end} < 1) \quad T_{end} = 0,5 + 12/(N_s \cdot T_{orb}). \quad (75b)$$

Уравнения (75a) и (75b) предполагают, что спутник является активным, когда он находится вблизи апогея, и что активная дуга симметрична по отношению к апогею. Например, если $N_s = 3$ и $T_{orb} = 12$ часов, $T_{start} = 1/6$ и $T_{end} = 5/6$ (одна активная длительность равна 8 часам), а если $N_s = 5$ и $T_{orb} = 8$ часов, $T_{start} = 0,2$ и $T_{end} = 0,8$ (одна активная длительность равна 4,8 часа). Если активная дуга не является симметричной, уравнения (75a) и (75b) следует изменить соответствующим образом.

Аргумент, $u(t)$, эталонного спутника в любое время, t ($0 \leq t < 1$), в диапазоне (T_{start}, T_{end}) можно определить с помощью уравнения (54) Приложения 7. В этом случае следует полагать, что $u_0 = \omega$ (поэтому, $u_N = \omega + 2\pi$).

Когда есть множество орбитальных группировок спутников, работающих в одном полушарии, и спутниковый интервал однороден, легко определить местоположения всех активных спутников. Для исследований совместного использования в общем случае достаточно предположить, что фазы всех активных спутников одинаковы. Если между различными созвездиями спутников заданы разности фаз, то их легко включить в вычисления.

Кроме того, если спутниковый интервал не является однородным, а фактические значения спутникового интервала определены, их можно должным образом включить в вычисления.

После того, как местоположения всех активных спутников определены в любой момент времени, составные помехи к станции ФС от всех видимых спутников могут быть оценены согласно методу, описанному в п. 4 и п. 5 из Приложения 7.

Наконец, следует отметить, что есть одно важное различие между аналитическим методом в Приложении 7 и методом в этом Дополнении. В Приложении 7 помехи оцениваются аналитически согласно предположению, что широта и долгота спутника являются независимыми, но в случае спутников ВЭО этого Дополнения широта спутника не является независимой от его долготы. Поэтому необходимо в этом Дополнении определять широту и долготу спутника одновременно в любой момент времени. Однако достаточно оценить помехи только за один период, потому что спутники появляются периодически, и поэтому вычисления не являются трудоёмкими.

С другой стороны, концепция чувствительных областей, как описано в п. 3.4 Приложения 7, не применима к аналитическому методу в этом Дополнении.

Помехи к системам ФС оцениваются, предполагая соответствующую маску p.f.d. как функции угла прибытия, произведенного излучениями от активных спутников ВЭО.