

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.531-9

Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем

(Вопрос МСЭ-R 218/3)

(1978-1990-1992-1994-1997-1999-2001-2003-2005-2007)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.531-8 описываются методы оценки эффектов ионосферного распространения радиоволн на трассах Земля-космос на частотах от 0,1 до 12 ГГц. На трассе Земля-космос, когда сигнал проходит через ионосферу, могут возникать следующие эффекты:

- вращение плоскости поляризации (фарадеевское вращение), вызываемое взаимодействием электромагнитной волны с ионизированной средой магнитного поля Земли вдоль трассы;
- групповая задержка сигнала, вызванная полным содержанием электронов (ПСЭ), накопившимся вдоль трассы;
- быстрое изменение сигнала по амплитуде и фазе (мерцание), вызванное маломасштабными неоднородностями ионосферы;
- изменение очевидного направления прибытия, вызванное рефракцией;
- доплеровский эффект, вызванный нелинейным характером вращения плоскости поляризации и временными задержками.

Данные и методы, описанные в настоящей Рекомендации, применяются для планирования спутниковых систем в соответствующих действующих параметрах, указанных в Приложении 1.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что ионосферные эффекты оказывают существенное влияние на распространение радиоволн на частотах по меньшей мере до 12 ГГц;
- b) что эти эффекты могут быть особенно существенны для спутниковых служб, использующих негеостационарную орбиту и работающих на частотах ниже 3 ГГц;
- c) что были представлены экспериментальные данные и/или разработаны методы моделирования, которые позволяют прогнозировать параметры ионосферного распространения, необходимые для планирования спутниковых систем;
- d) что ионосферные эффекты могут оказывать влияние на проектирование и эксплуатацию цифровой сети с интеграцией служб (ЦСИС) и других радиосистем, в состав которых входят космические аппараты;
- e) что эти данные и методы оказались совместимыми с естественной изменчивостью явлений распространения радиоволн и, следовательно, их можно использовать при планировании спутниковых систем,

рекомендует,

1 чтобы данные и методы, представленные в Приложении 1, использовались при планировании спутниковых систем с учетом диапазонов их действительности, указанных в этом Приложении.

Приложение 1

1 Введение

В настоящем Приложении рассматриваются эффекты ионосферного распространения на трассах Земля-космос. С точки зрения проектирования систем воздействие ионосферы можно свести к следующему:

- a) полное содержание электронов (ПСЭ) вдоль ионосферной трассы распространения подвижной спутниковой службы (ПСС) вызывает вращение плоскости поляризации (фарадеевское вращение) несущей ПСС и временную задержку сигнала, а также изменение наблюдаемого направления прихода волны из-за рефракции;
- b) локализованные участки ионосферы, возникающие случайным образом и обычно называемые ионосферными неоднородностями, приводят к избыточному и случайному вращению поляризации и увеличению временной задержки, причем процесс этот может быть описан только стохастически;
- c) из-за того, что вращение плоскости поляризации и временные задержки, связанные с плотностью электронов, зависят от частоты нелинейно, а также поскольку локализованные ионосферные неоднородности, по всей видимости, перемещаются, оказываясь в области линии связи или за ее пределами, вызывая таким образом доплеровские эффекты, то эффекты a) и b) ведут в свою очередь к дисперсии или изменению групповой скорости несущих ПСС;
- d) кроме того, локализованные ионосферные неоднородности могут также действовать как собирающая или рассеивающая линза, фокусируя или рассеивая радиоволны. Такие явления обычно называют мерцаниями, и они воздействуют на амплитуду, фазу и угол прихода сигнала ПСС.

Из-за сложной физической природы ионосферы ионосферные эффекты, влияющие на параметры системы, как уже говорилось выше, не всегда можно описать с помощью простых аналитических формул. Соответствующие данные, представленные в виде таблиц и/или графиков и дополненные описательными или ограничивающими утверждениями, являются по всем практическим соображениям наилучшим способом представления этих эффектов.

Говоря об эффектах распространения при проектировании ПСС на частотах ниже 3 ГГц, следует признать, что:

- e) известные явления распространения на трассах космос-Земля, вызываемые воздействием гидрометеоров, не играют существенной роли в случаях пп. f) и h);
- f) эффекты многолучевости вблизи поверхности Земли, наблюдающиеся в присутствии естественных или искусственных препятствий и/или при низких углах места, всегда являются критическими;
- g) эффекты многолучевости вблизи поверхности Земли могут меняться в зависимости от местоположения и, следовательно, не являются определяющим фактором при проектировании систем ПСС, если речь идет о факторах распространения в глобальных масштабах;
- h) ионосферные эффекты являются наиболее важными факторами распространения, которые следует учитывать при проектировании систем ПСС в глобальных масштабах.

2 Базовая информация

Из-за влияния солнечной радиации ионосфера Земли состоит из нескольких областей ионизации. Для всех практических целей применительно к связи области ионосферы D, E, F и ионизация верхних слоев считаются источниками существенного вклада в ПСЭ между оконечной станцией спутника и наземной оконечной станцией.

В каждой области ионизированная среда не является ни однородной в пространстве, ни стационарной во времени. Вообще говоря, процесс фоновой ионизации характеризуется относительно регулярными колебаниями по времени суток, времени года и 11-годовому циклу солнечной активности и в значительной мере зависит от географического местоположения и геомагнитной активности. Помимо фоновой ионизации всегда существуют высокодинамичные маломасштабные нестационарные

структуры, так называемые неоднородности. Как фоновая ионизация, так и эти неоднородности способствуют искажению радиоволн. Кроме того, фоновая ионизация и ионосферные неоднородности приводят к тому, что индекс рефракции становится частотнозависимым, а среда передачи – диспергирующей.

3 Первичные искажения, вызванные фоновой ионизацией

Ряд эффектов, таких как рефракция, дисперсия и групповая задержка, по своей величине прямо пропорциональны ПСЭ; фарадеевское вращение также приблизительно пропорционально ПСЭ, причем различные участки траектории луча вносят в него свой вклад с весом, зависящим от продольной составляющей магнитного поля. Таким образом, информация о ПСЭ позволяет количественно оценить многие важные ионосферные явления.

3.1 ПСЭ

Полное содержание электронов, обозначаемое как N_T , можно определить по формуле:

$$N_T = \int_s n_e(s) ds, \quad (1)$$

где:

s : трасса распространения (м)

n_e : концентрация электронов (эл/м³).

Даже если геометрия трассы распространения точно известна, определение N_T оказывается затруднительно, поскольку n_e меняется в зависимости от времени суток, времени года и цикла солнечной активности.

Для целей моделирования величина ПСЭ обычно оценивается для зенитных трасс с поперечным сечением 1 м². ПСЭ в таком вертикальном столбце может колебаться от 10¹⁶ до 10¹⁸ эл/м², достигая максимального значения в то время суток, когда светит солнце.

Для оценки величины ПСЭ можно использовать либо процедуру, основанную на международной эталонной ионосфере (IRI), либо более гибкую процедуру, также применимую для определения ПСЭ на наклонных трассах и основанную на модели NeQuick. Обе эти процедуры представлены ниже.

3.1.1 Метод, основанный на использовании IRI

За стандартную месячную медианную ионосферу принимается Международная эталонная ионосфера IRI-95, разработанная COSPAR-URSI. В условиях низкой и умеренной солнечной активности можно использовать численные методы, которые позволяют получить искомые значения для любого места, времени и выбранных высот вплоть до 2000 км. Если солнечная активность высока, то оценка содержания электронов с помощью модели IRI-95 может оказаться затруднительной. Для многих целей с приемлемой точностью можно определить содержание электронов, умножив максимальное значение их плотности на эквивалентную толщину слоя воздуха, равную 300 км.

3.1.2 Метод, основанный на модели NeQuick

Распределение плотности электронов, определяемое данной моделью, представляется в виде непрерывной функции, которая также непрерывна для всех пространственных первых производных. Оно состоит из двух частей: нижней (ниже максимальной высоты слоя F2) и верхней (выше максимальной высоты слоя F2). Максимальная высота слоя F2 вычисляется из величины M(3000)F2 и отношения foF2/foE (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1239).

Нижняя часть описывается с помощью полуслоев Эпштейна для представления слоев E, F1 и F2. Верхняя часть слоя F опять же представляет собой полуслой Эпштейна, параметр толщины которого зависит от высоты. Модель NeQuick позволяет определить величины плотности электронов и ПСЭ на произвольных трассах Земля-спутник и спутник-спутник.

Компьютерную программу и связанные с ней файлы данных можно получить в Бюро радиосвязи.

3.1.3 Точность моделей

Оценки точности моделей NeQuick и IRI приведены в документах, опубликованных вместе с базой данных трансионосферного распространения радиоволн в разделе веб-сайта МСЭ-R, относящемся к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

3.2 Фарадеевское вращение

При пересечении ионосферы плоскость поляризации линейно поляризованной волны постепенно поворачивается под влиянием геомагнитного поля и анизотропии плазмы. Величина фарадеевского вращения, θ , будет зависеть от частоты волны, напряженности магнитного поля и плотности электронов плазмы:

$$\theta = 2,36 \times 10^{-14} \frac{B_{av} N_T}{f^2}, \quad (2)$$

где:

θ : угол вращения (рад)

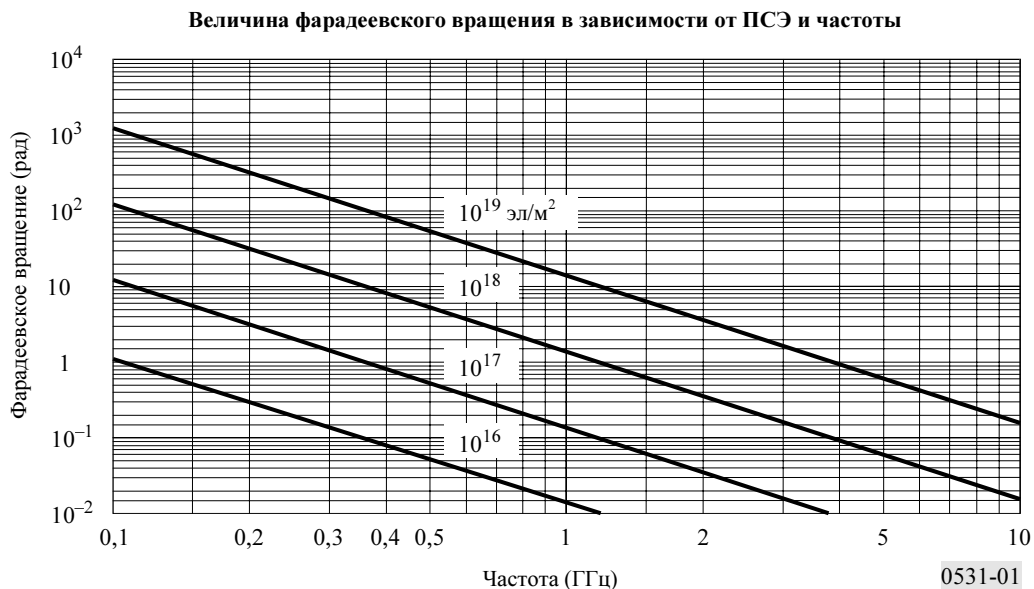
B_{av} : средний уровень магнитного поля Земли ($\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ или тесла)

N_T : полное содержание электронов (ПСЭ) ($\text{электроны} \cdot \text{m}^{-2}$)

f : частота (ГГц).

Характерные значения θ показаны на рисунке 1.

РИСУНОК 1



Таким образом, фарадеевское вращение обратно пропорционально квадрату частоты и прямо пропорционально интегральному произведению концентрации электронов и величины составляющей магнитного поля Земли вдоль трассы распространения. Его медианное значение на данной частоте имеет весьма регулярную прогнозируемую зависимость от времени суток, времени года и точки цикла солнечной активности. Следовательно, эта регулярная компонента фарадеевского вращения может быть компенсирована ручной подстройкой угла наклона поляризации антенны земной станции. Однако в течение небольших процентов времени могут возникать значительные отклонения от этого регулярного поведения в результате геомагнитных бурь и, в меньшей степени, перемещающихся крупномасштабных ионосферных возмущений. Эти отклонения нельзя предсказать заранее. Установлена связь быстрых и интенсивных флуктуаций углов фарадеевского вращения ОВЧ

сигналов с соответствующими сильными и быстрыми мерцаниями амплитуды в пунктах, расположенных вблизи гребней экваториальной аномалии.

Развязка по кросс-поляризации для направленных антенн, XPD (дБ), связана с углом фарадеевского вращения, θ , соотношением:

$$XPD = -20 \log (\tan \theta). \quad (3)$$

3.3 Групповая задержка

Наличие заряженных частиц в ионосфере замедляет распространение радиосигналов вдоль трассы. Величина превышения времени распространения по сравнению со свободным пространством, обычно обозначаемая t , называется "групповой задержкой". Это очень важный фактор, который должен учитываться в системах ПСС. Временная задержка вычисляется по формуле:

$$t = 1,345 N_T / f^2 \times 10^{-7}, \quad (4)$$

где:

t : временная задержка (с) по сравнению с распространением в вакууме

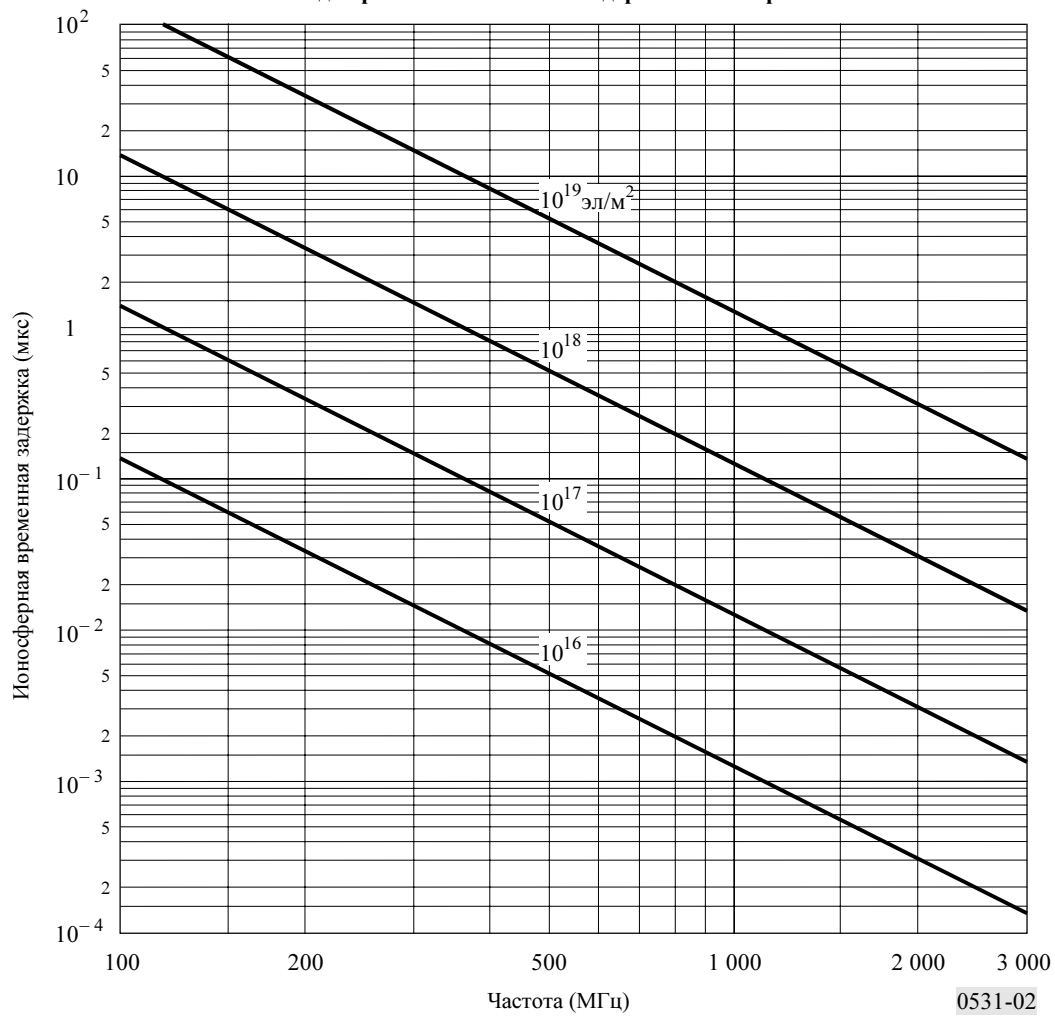
f : частота распространения (Гц)

N_T : определяется вдоль наклонной трассы распространения.

Рисунок 2 представляет собой график временной задержки, t , в зависимости от частоты, f , для нескольких значений содержания электронов вдоль луча.

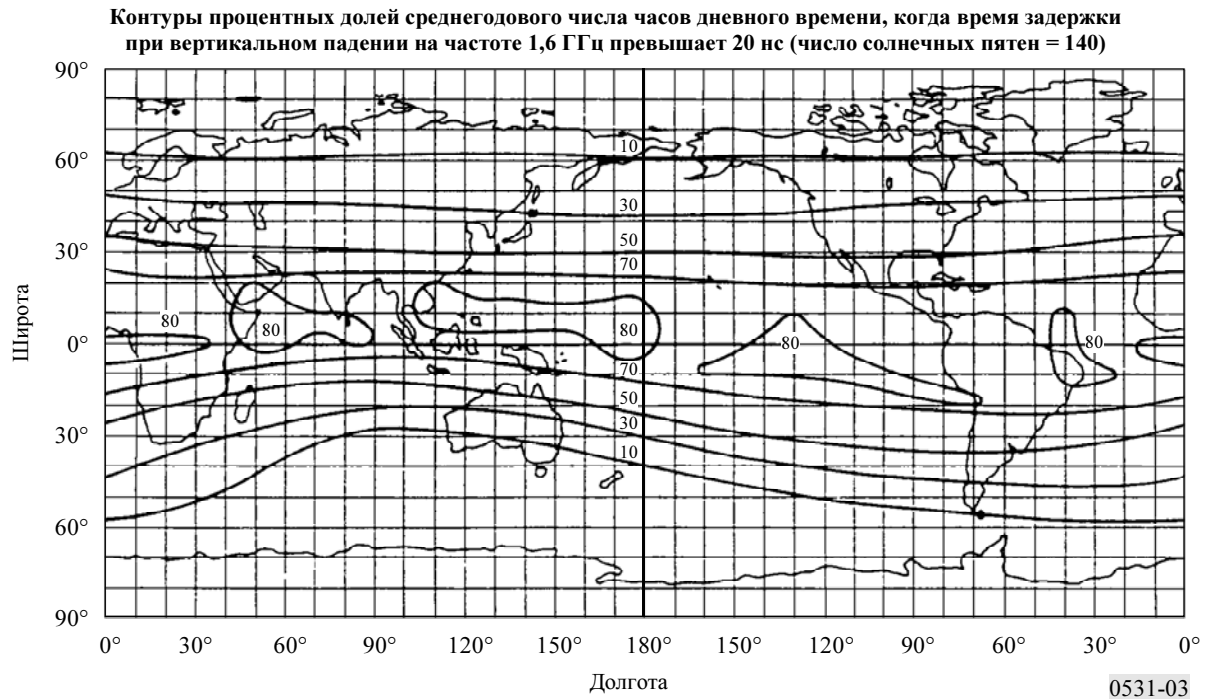
РИСУНОК 2

Ионосферная временная задержка в зависимости от частоты
для различных значений содержания электронов



В полосе частот около 1600 МГц групповая задержка сигнала изменяется примерно от 0,5 до 500 нс для ПСЭ от 10^{16} до 10^{19} эл/м². На рисунке 3 представлен годовой процент таких часов дневного времени суток, для которых время задержки превышает 20 нс в период относительно высокой солнечной активности.

РИСУНОК 3



3.4 Дисперсия

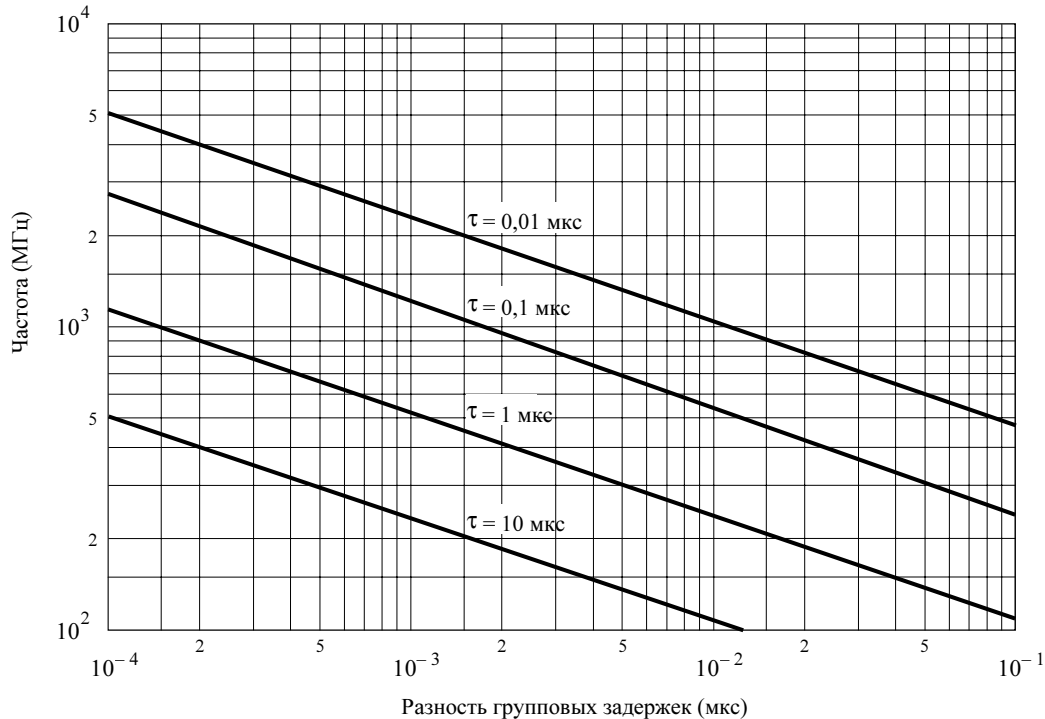
Если сигналы, проходящие через ионосферу, занимают значительную полосу частот, задержка распространения (являющаяся функцией частоты) приводит к дисперсии. Дифференциальная задержка в полосе пропорциональна интегральной плотности электронов вдоль трассы распространения луча. Для фиксированной ширины полосы относительная дисперсия обратно пропорциональна кубу частоты. Таким образом, в широкополосных системах передачи на ОВЧ и, возможно, на УВЧ этот эффект необходимо учитывать. Например, как показано на рисунке 4, при интегральной концентрации электронов порядка 5×10^{17} эл/м², импульсный сигнал длительностью 1 мкс будет испытывать дифференциальную задержку 0,02 мкс на частоте 200 МГц, тогда как на частоте 600 МГц эта задержка составила бы только 0,00074 мкс (см. рисунок 4).

3.5 Скорость изменения ПСЭ

Скорость изменения ПСЭ, наблюдаемая при нахождении спутника на орбите, частично обусловлена изменением направления траектории луча, а частично – изменениями самой ионосферы. В случае спутника, пересекающего на высоте 22 000 км авроральную зону, наблюдалась максимальная скорость изменения ПСЭ, равная $0,7 \times 10^{16}$ эл/м²/с. С точки зрения навигации такая скорость изменения соответствует наблюдаемой скорости порядка 0,11 м/с.

РИСУНОК 4

Различие временных задержек между нижней и верхней частотами спектра импульса заданной ширины τ , передаваемого через ионосферу в одном направлении



$$\int n_e ds = 5 \times 10^{17} \text{ эл/м}^2$$

0531-04

4 Основные искажения, обусловленные неоднородностями

4.1 Мерцания

Одно из наиболее сильных нарушений связи на трансionoсферных трассах на частотах ниже 3 ГГц обусловлено ионосферными мерцаниями. В основном за счет механизмов рассеяния вперед и дифракции маломасштабные неоднородности плотности ионизации вызывают мерцания, при которых постоянный сигнал на входе приемника уступает место сигналу, амплитуда, фаза и видимый угол прихода которого подвержены флуктуациям. Различные аспекты явления мерцания по-разному воздействуют на характеристики системы, в зависимости от вида модуляции системы. Наиболее широко употребляемым параметром, используемым для оценки интенсивности флуктуаций, является индекс мерцаний, S_4 , который определяется из уравнения (5):

$$S_4 = \left(\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где I – интенсивность сигнала, а $\langle \rangle$ означает среднее по ансамблю.

Индекс мерцаний, S_4 , связан с полным размахом флуктуаций интенсивности сигнала. Точное соотношение зависит от характера распределения интенсивности. Наилучшей аппроксимацией распределения интенсивности является распределение Накагами, которое действует в широком диапазоне значений S_4 . Когда S_4 приближается к 1,0, распределение интенсивности сигнала лучше описывается рэлеевским распределением. В отдельных случаях S_4 может превышать 1,0, достигая значений порядка 1,5. Происходит это из-за фокусировки радиоволн, вызванной ионосферными

неоднородностями. Для значений, меньших 0,6, зависимость S_4 от частоты носит характер $f^{-\nu}$, где ν – спектральный индекс, равный 1,5 в диапазонах ОВЧ и УВЧ, как показала большая часть исследований на многих частотах. Однако многочисленные наблюдения в экваториальных областях в гигагерцевом диапазоне показывают, что значение спектрального индекса может и превышать величину 1,5. По мере усиления мерцаний, когда S_4 превышает значение 0,6, величина спектрального индекса уменьшается. Это обусловлено явлением насыщения мерцаний рэлеевских замираний под влиянием многократного рассеяния.

В таблице 1 приведены соотношения между S_4 и полным размахом флуктуаций P_{fluc} (дБ), полученные эмпирическим путем. Это соотношение можно аппроксимировать с помощью выражения:

$$P_{fluc} = 27,5 S_4^{1,26}. \quad (6)$$

ТАБЛИЦА 1

Таблица соотношений между индексами мерцаний, полученная эмпирическим путем

S_4	P_{fluc} (дБ)
0,1	1,5
0,2	3,5
0,3	6
0,4	8,5
0,5	11
0,6	14
0,7	17
0,8	20
0,9	24
1,0	27,5

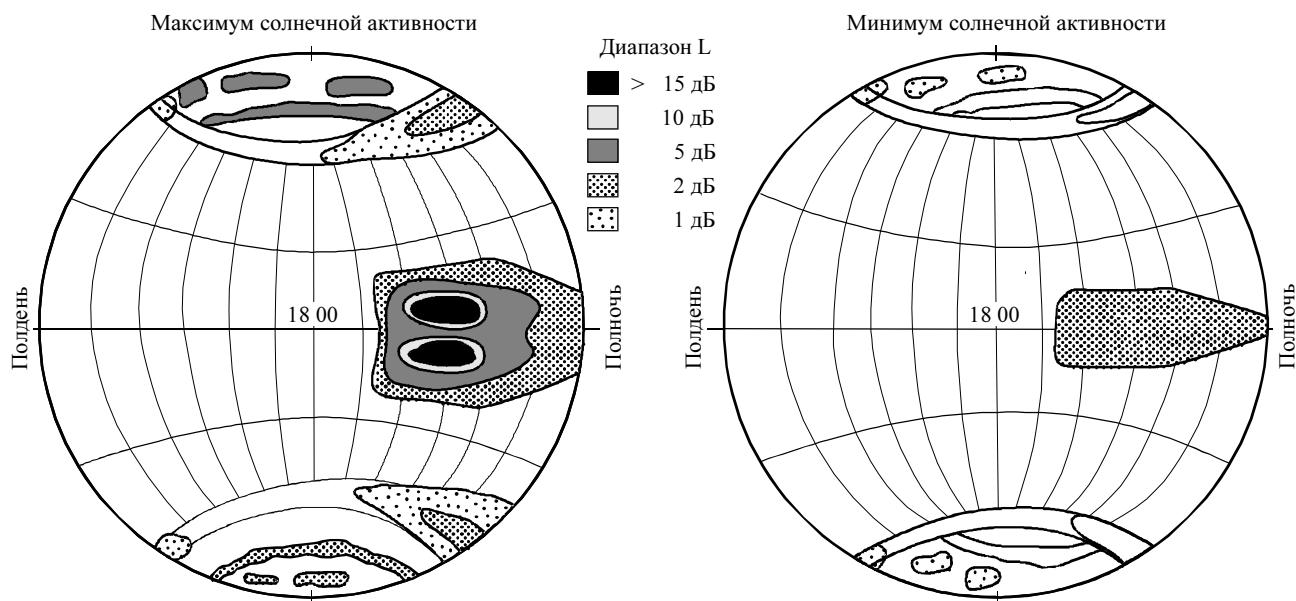
4.2 Зависимость мерцаний от географического местоположения, равноденствия и солнечной активности

С точки зрения географии существует две области интенсивных мерцаний, одна – на высоких широтах, а вторая – с центром в пределах $\pm 20^\circ$ от магнитного экватора, как показано на рисунке 5. Сильные мерцания в обеих этих областях наблюдались на частотах вплоть до гигагерцевого диапазона, тогда как на средних широтах мерцания в основном возникают в ОВЧ диапазоне. Во всех областях отмечается явно выраженный максимум интенсивности мерцаний в ночное время суток, что также показано на рисунке 5. В области экватора в гигагерцевом диапазоне наблюдался пик активности мерцаний во время весеннего равноденствия и высокая активность во время осеннего равноденствия.

С точки зрения временных характеристик интенсивность замираний ионосферных мерцаний колеблется от 0,1 до 1 Гц. Мерцания обычно начинаются после захода солнца и могут длиться от 30 мин. до нескольких часов. Для станций в области экватора в годы максимальной солнечной активности ионосферные мерцания возникают почти каждый вечер после захода солнца, причем полный размах флуктуаций уровня сигнала на 4 ГГц превышает 10 дБ.

РИСУНОК 5

Глубина замирания ионосферных мерцаний (пропорциональна плотности штриховки на рисунке) в диапазоне L в годы максимума и минимума солнечной активности



0531-05

4.3 Модель ионосферных мерцаний

Для прогнозирования интенсивности ионосферных мерцаний на трассах Земля-космос рекомендуется использовать глобальную модель ионосферных мерцаний (GISM). Модель GISM позволяет прогнозировать индекс S_4 , глубину амплитудных замираний, а также среднеквадратичные значения фазовых и угловых отклонений, обусловленных мерцаниями, в функции мест размещения, даты, времени и рабочей частоты спутниковых и наземных станций. Эта модель основана на методе многофазового экрана. Основные внутренние параметры модели установлены по умолчанию следующим образом:

- наклон спектра интенсивности, $p = 3$;
- средний размер неоднородностей, $L_0 = 500$ км;
- стандартное отклонение флуктуаций электронной плотности, $\sigma_{N_e} = 0,2$.

В подпрограмме, использующей ионосферную модель NeQuick, принимается во внимание отклонение лучей и вычисляются характеристики фоновой ионосферы. Исходный код модели GISM вместе с соответствующей документацией можно получить в разделе веб-сайта МСЭ-R, относящемся к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

4.4 Статистика мгновенных значений и свойства спектра

4.4.1 Статистика мгновенных значений

Считается, что при исследовании ионосферных мерцаний функция плотности вероятности Накагами адекватно описывает статистику мгновенных изменений амплитуды. Функция плотности интенсивности сигнала определяется как:

$$p(I) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} I^{m-1} \exp(-mI), \quad (7)$$

где " m -коэффициент" Накагами связан с индексом мерцаний, S_4 , соотношением:

$$m = 1/S_4^2. \quad (8)$$

В уравнении (7) средний уровень интенсивности, I , нормирован и равен 1,0. Вычисление доли времени, в течение которой сигнал превышает или находится ниже заданного порогового значения, упрощается благодаря тому факту, что функция распределения, соответствующая функции плотности Накагами, имеет замкнутую форму и выражается как:

$$P(I) = \int_0^I p(x) dx = \frac{\Gamma(m, mI)}{\Gamma(m)}, \quad (9)$$

где $\Gamma(m, mI)$ и $\Gamma(m)$ – неполная гамма-функция и гамма-функция, соответственно. С помощью уравнения (9) можно вычислить долю времени, когда сигнал превышает или находится ниже заданного порога в процессе того или иного ионосферного явления. Например, доля времени, в течение которого сигнал остается меньше среднего значения на величину более X дБ, равна $P(10^{-X/10})$, а доля времени, когда сигнал более чем на Y дБ превышает среднее значение, определяется как $1 - P(10^{Y/10})$.

4.4.2 Свойства спектра

Поскольку считается, что ионосферные мерцания вызываются ионосферными неоднородностями со сравнительно устойчивым индексом рефракции, перемещающимися в горизонтальном направлении мимо трассы распространения радиоволн, пространственный и временной энергетические спектры связаны между собой через скорость переноса. Фактический вид соотношения зависит от состава неоднородности (энергетический спектр) и ряда других физических факторов. В результате, как было обнаружено с помощью различных наблюдений, в энергетическом спектре можно видеть множество участков с разными наклонами, от f^{-1} до f^{-6} . Характерный спектр показан на рисунке 6. Применительно к системам, если нет данных прямых измерений, рекомендуется использовать участок с наклоном f^{-3} .

4.5 Геометрические факторы

4.5.1 Зависимость от зенитного угла

В большинстве моделей предполагается, что индекс S_4^2 пропорционален секансу зенитного угла трассы, i . Считается, что такая зависимость справедлива при значениях угла $i \approx 70^\circ$. При более высоких значениях зенитного угла следует пользоваться степенными функциями $\sec i$ с показателем степени, меняющимся в диапазоне от 1/2 до 1.

4.5.2 Зависимость от времени года и долготы

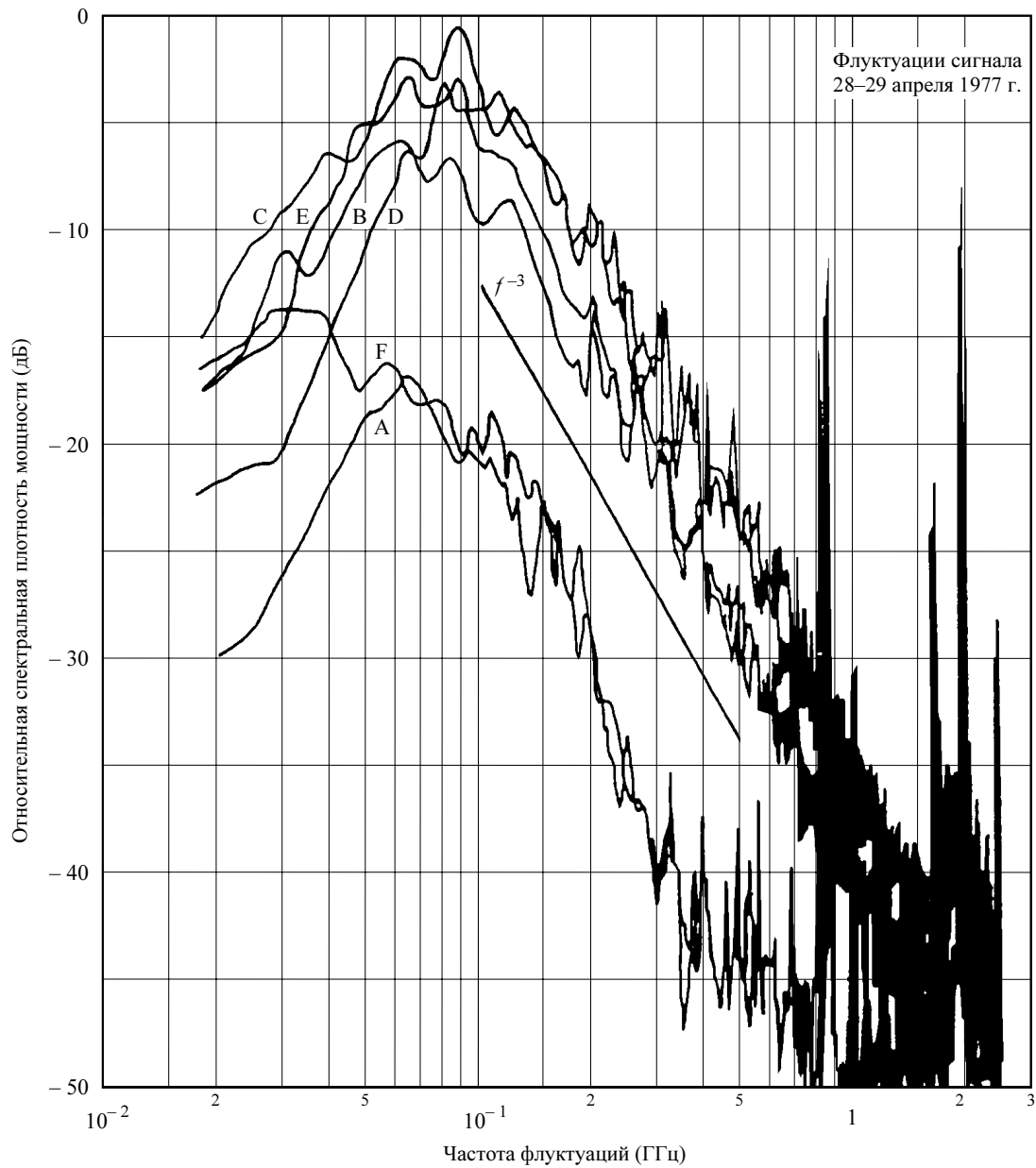
Возникновение мерцаний и величина индекса S_4 зависят от долготы, а также от времени года и могут быть описаны углом β в качестве параметра, как показано на рисунке 7b. β – это угол между границей захода солнца и местным магнитным меридианом с вершиной в точке пересечения этого меридиана с силовой линией магнитного поля, пересекающей линию прямой видимости на высоте неоднородности. Весовая функция зависимости от времени года/долготы имеет вид:

$$S_4 \propto \exp\left[-\frac{\beta}{W}\right], \quad (10)$$

где W – весовой коэффициент, зависящий от местоположения и календарного дня года. Например, используя данные, полученные в Тангуа, Гонконге и на островах Кваджалейн, весовые коэффициенты можно получить с помощью кривых, представленных на рисунке 8.

РИСУНОК 6

Спектральная функция плотности для геостационарного спутника
(Intelsat-IV) на частоте 4 ГГц



Мерцания наблюдались в вечернее время суток
28–29 апреля 1977 года на земной станции Тайбэй

0531-06

- A: 30 минут до наступления события
- B: начало
- C: 1 час спустя
- D: 2 часа спустя
- E: 3 часа спустя
- F: 4 часа спустя

РИСУНОК 7а

Пересечение трассы распространения с силовой линией магнитного поля
на высоте F-области

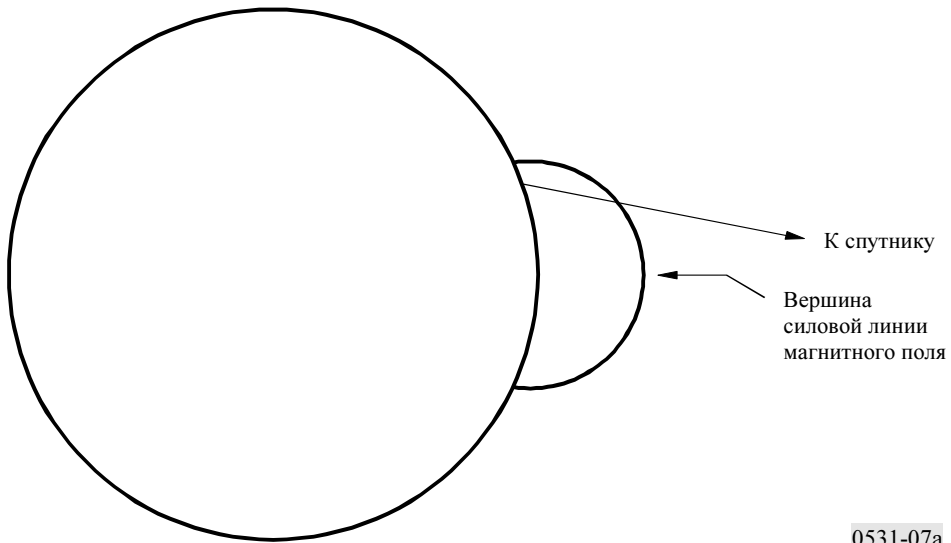


РИСУНОК 7б

Угол между местным магнитным меридианом в точке пересечения
с силовой линией магнитного поля, показанной на рисунке 7а,
и границей захода солнца

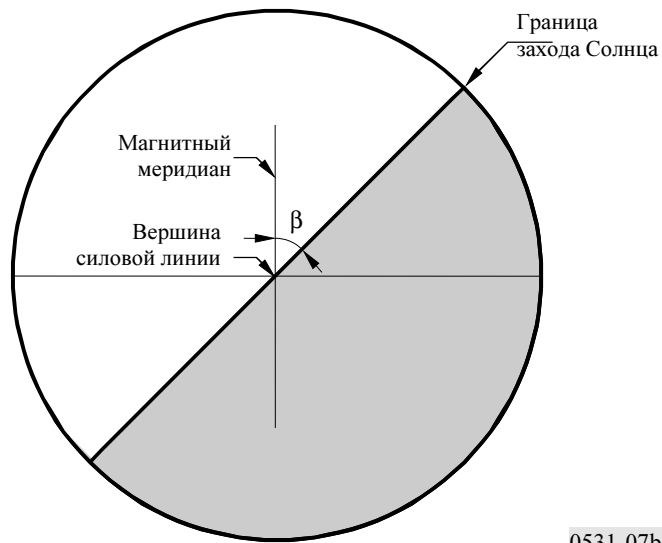
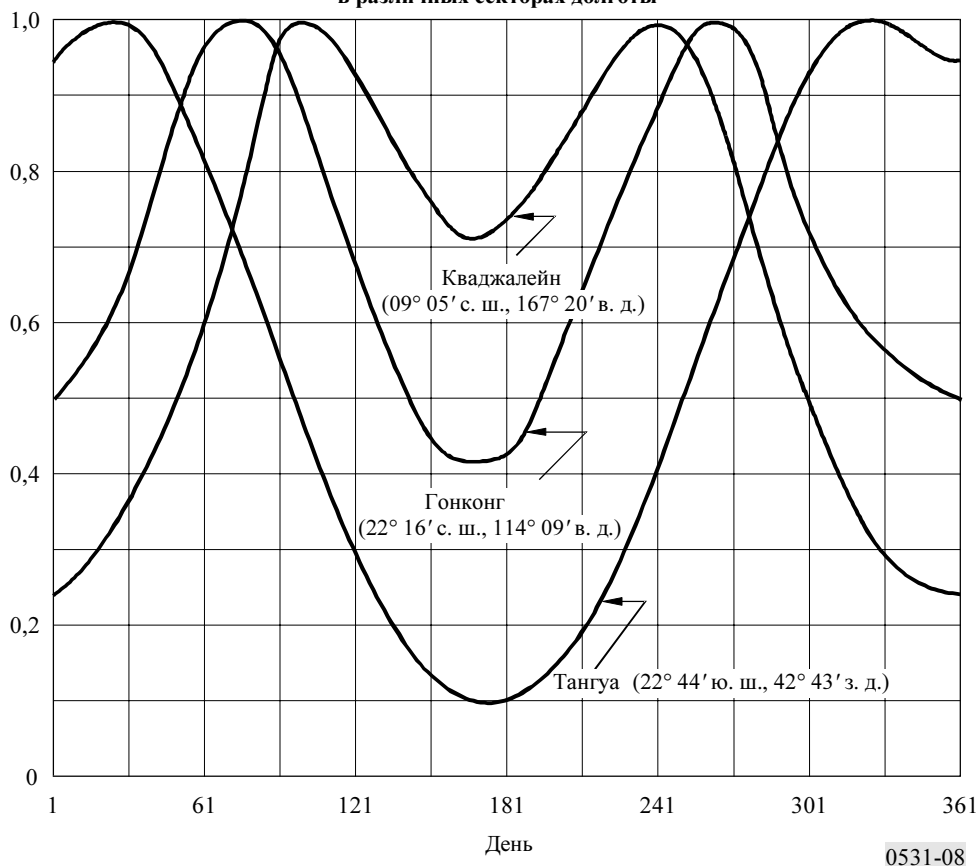


РИСУНОК 8
Сезонные весовые функции для станций, расположенных
в различных секторах долготы



4.6 Совокупные статистические данные

При проектировании спутниковых систем радиосвязи и оценке ситуации с совместным использованием частот инженерам связи приходится не только учитывать ухудшение работы систем и появление помех из-за описанных явлений, но и принимать во внимание совокупную долгосрочную статистику возникновения явлений. Для систем связи, в состав которых входит геостационарный спутник и которые представляют собой радиосистемы простейшей конфигурации, для оценки и масштабирования статистических данных возникновения аномальных явлений рекомендуется использовать рисунки 9 и 10. Указанное число солнечных пятен представляет собой среднее значение за 12 месяцев.

Долгосрочное кумулятивное распределение $P(I)$ уровня сигнала относительно его среднего значения может быть получено исходя из долгосрочных кумулятивных статистических данных, $F(\xi)$, размаха флуктуаций, ξ , как показано на рисунке 10, следующим образом:

$$P(I) = \sum_{i=0}^n f_i P_i(I), \quad (11)$$

где:

$$f_0 = F(\xi < \xi_1) \quad (11a)$$

$$f_i = F(\xi_i \leq \xi < \xi_{i+1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (11b)$$

$$f_n = F(\xi \geq \xi_n) \quad (11c)$$

и ξ_1 и ξ_n – минимальные и максимальные значения размаха флуктуаций, соответственно, а n – интервальное число ξ , представляющее интерес для пользователя:

$$P_i(I) = \Gamma(m_i, m_i I) / \Gamma(m_i) \quad (11d)$$

$$m_i = 1/S_{4i}^2 \quad (11e)$$

$$S_{40} = \left[\frac{1}{27,5} \cdot \frac{\xi_1}{2} \right]^{1/1,26} \quad (11f)$$

$$S_{4i} = \left[\frac{1}{27,5} \cdot \frac{\xi_i + \xi_{i+1}}{2} \right]^{1/1,26} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (11g)$$

$$S_{4n} = \left[\frac{1}{27,5} \cdot \frac{\xi_{n-1} + 3\xi_n}{4} \right]^{1/1,26} \quad (11h)$$

На рисунке 11 показан пример долгосрочного кумулятивного распределения уровня сигнала, полученного из кривой Р6 на рисунке 10.

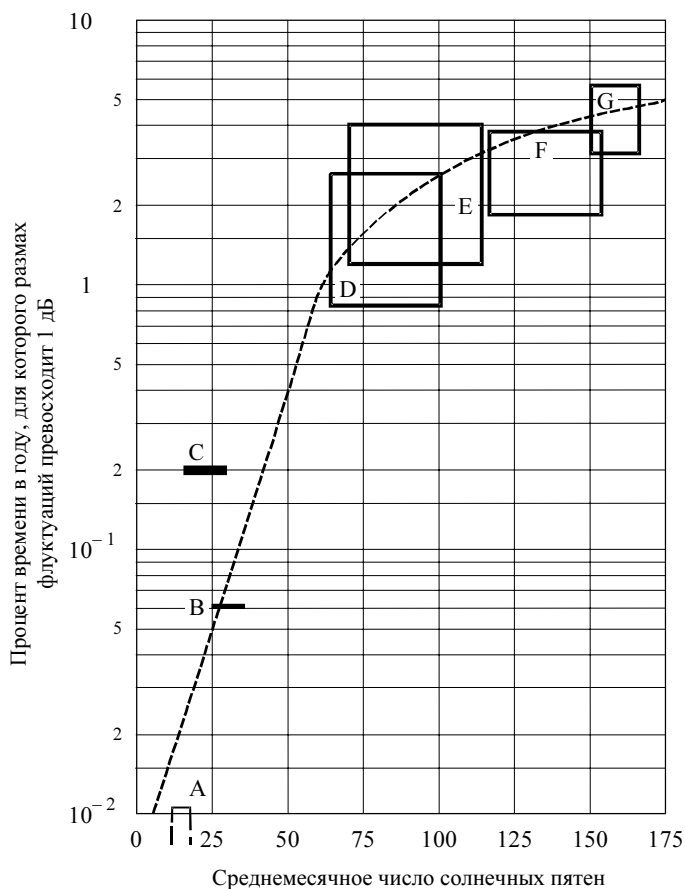
4.7 Одновременное возникновение ионосферных мерцаний и замирания вследствие дождя

Ионосферные мерцания и замирания, вызванные дождем, – это две причины ухудшения связи совершенно разного физического происхождения. Однако в экваториальной области в годы высокой солнечной активности возможно одновременное возникновение этих двух явлений в течение такого процента времени года, который нельзя не учитывать при разработке систем. Наблюдения на земной станции Джутилухар, Индонезия, показали, что общее время одновременного возникновения этих двух явлений на частоте 4 ГГц составляет примерно 0,06% от годового. Такой процент неприемлемо велик для систем типа ЦСИС.

Когда эти явления возникают одновременно, то они имеют свойства, сильно отличающиеся от свойств каждого из них, то есть мерцаний или замираний из-за дождя, в отдельности. Если ионосферные мерцания сами по себе не приводят к деполяризации, а замирание из-за дождя нельзя рассматривать как флуктуацию сигнала, то одновременное возникновение двух этих явлений сопровождается сильными флуктуациями сигналов и кросс-поляризацией. Умение распознавать оба этих явления при их одновременном возникновении необходимо для систем радиосвязи спутник-Земля, которые должны отличаться высокой готовностью.

РИСУНОК 9

Зависимость экваториальных ионосферных мерцаний на частоте 4 ГГц от среднемесячного числа солнечных пятен



Прямоугольники показывают диапазон вариаций в течение года для разных несущих

- A: 1975–1976 гг., Гонконг и Бахрейн, 15 несущих
- B: 1974 г., Лонговило, 1 несущая
- C: 1976–1977 гг., Тайбэй, 2 несущие
- D: 1970–1971 гг., 12 станций, > 50 несущих
- E: 1977–1978 гг., Гонконг, 12 несущих
- F: 1978–1979 гг., Гонконг, 10 несущих
- G: 1979–1980 гг., Гонконг, 6 несущих

0531-09

4.8 Модель мерцаний в гигагерцевом диапазоне

Для оценки последствий мерцания, которых можно ожидать в конкретной ситуации, можно предпринять следующие действия:

Шаг 1: На рисунке 10 приведена статистика возникновения мерцаний на экваториальных ионосферных трассах: полный размах флуктуаций, P_{fluc} , (дБ), на частоте 4 ГГц при приеме со спутников в Восточном полушарии при углах места порядка 20° (P – сплошные кривые) и в Западном полушарии при углах места порядка 30° (I – пунктирные кривые). Данные приведены для различных времен года и чисел солнечной активности (SSN).

Шаг 2: Поскольку на рисунке 10 приведены кривые для частоты 4 ГГц, то для их пересчета на другую частоту необходимо значения, найденные по данному рисунку, умножить на величину $(f/4)^{-1.5}$, где f – рассматриваемая частота (ГГц).

Шаг 3: Колебания P_{fluc} в зависимости от географического местоположения и времени суток можно качественно оценить с помощью рисунка 5.

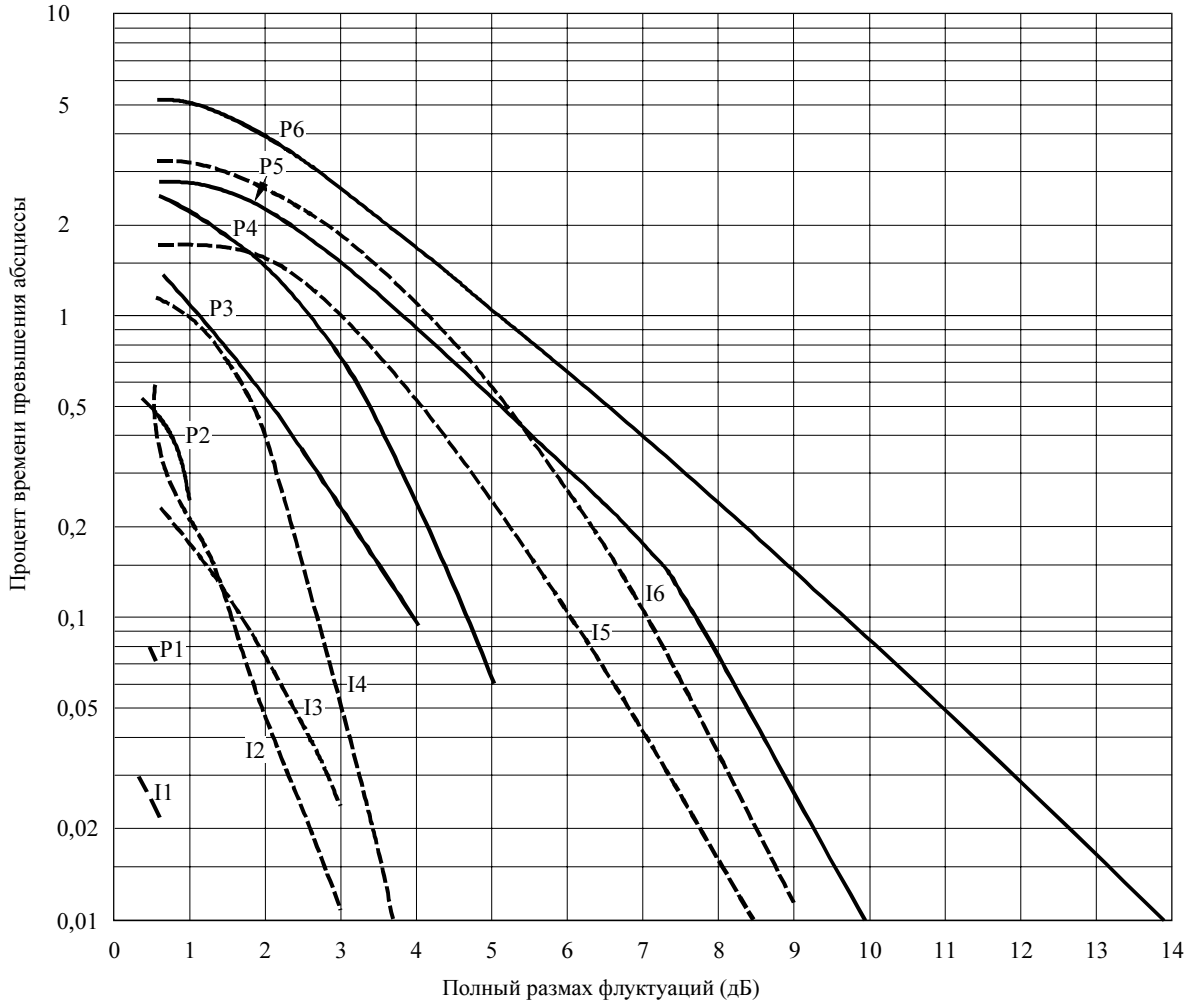
Шаг 4: P_{fluc} , как одна из составляющих бюджета линии связи, связана с потерями L_p соотношением:

$$L_p = P_{fluc} / \sqrt{2}.$$

Шаг 5: Определение индекса мерцаний, S_4 , параметра, который наиболее широко используется при описании мерцаний, дано в п. 4.1. Получить его можно, зная P_{fluc} и используя таблицу 1.

РИСУНОК 10

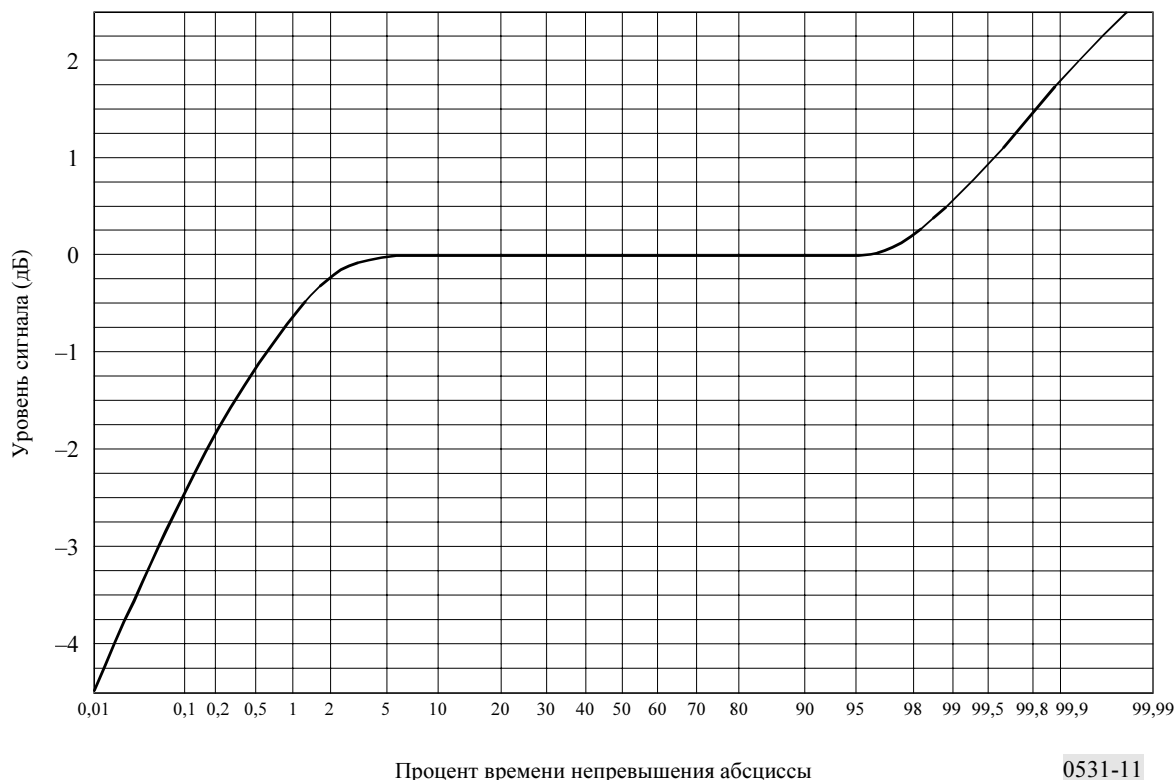
Годовая статистика полного размаха флуктуаций, наблюдавшихся на земной станции в Гонконге (кривые I1, P1, I3–16, P3–P6) и на земной станции Тайбэя (кривые P2 и I2)



Кривая	Период	Диапазон SSN
I1, P1	Март 75–76	10–15
I2, P2	Июнь 76–77	12–26
I3, P3	Март 77–78	20–70
I4, P4	Октябрь 77–78	44–110
I5, P5	Ноябрь 78–79	110–160
I6, P6	Июнь 79–80	153–165

РИСУНОК 11

Пример долгосрочных кумулятивных статистических данных уровней сигнала
(4 ГГц, угол места 20°)



0531-11

5 Поглощение

При отсутствии непосредственной информации потери за счет поглощения в ионосфере можно оценить с помощью имеющихся моделей в соответствии с соотношением $(\sec i) / f^2$ для частот выше 30 МГц, где i – зенитный угол траектории распространения в ионосфере. В экваториальных и среднеширотных районах на частотах выше 70 МГц радиоволны будут распространяться в ионосфере без заметного поглощения.

Измерения на средних широтах показывают, что типичные значения поглощения в нормальных условиях обычно составляют на частоте 30 МГц от 0,2 до 0,5 дБ для прохождения сквозь ионосферу в одном направлении при вертикальном падении. Во время солнечной вспышки поглощение будет возрастать, но не превысит 5 дБ. Усиленное поглощение может возникнуть на высоких широтах из-за явлений, связанных с полярной шапкой и авроральной зоной; эти два вида поглощения возникают с интервалами, которые являются случайными величинами, продолжительность их различна, а их влияние зависит от местоположения терминалов и угла места трассы. Следовательно, для наиболее эффективного проектирования систем эти явления следует описывать статистически, имея в виду, что продолжительность аврорального поглощения имеет порядок нескольких часов, а в области полярных шапок процесс поглощения длится несколько дней.

5.1 Авроральное поглощение

Авроральное поглощение возникает вследствие увеличения концентрации электронов в областях D и E при высыпаниях быстрых электронов. Поглощение наблюдается в полосе широт от 10° до 20°, центр которой расположен вблизи широты, где наблюдается максимальная частота появления видимых сияний. Оно происходит как ряд дискретных возрастных поглощений, длительность каждого из которых сравнительно невелика – от минут до нескольких часов при средней длительности около 30 мин., и обычно его временная структура нерегулярна. Ночные возрастные поглощения, как правило, состоят из плавных быстрых подъемов и медленных спадов. Типичные значения поглощения на частоте 127 МГц приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

Авроральное поглощение на частоте 127 МГц (дБ)

Процент времени	Угол места	
	20°	5°
0,1	1,5	2,9
1	0,9	1,7
2	0,7	1,4
5	0,6	1,1
50	0,2	0,4

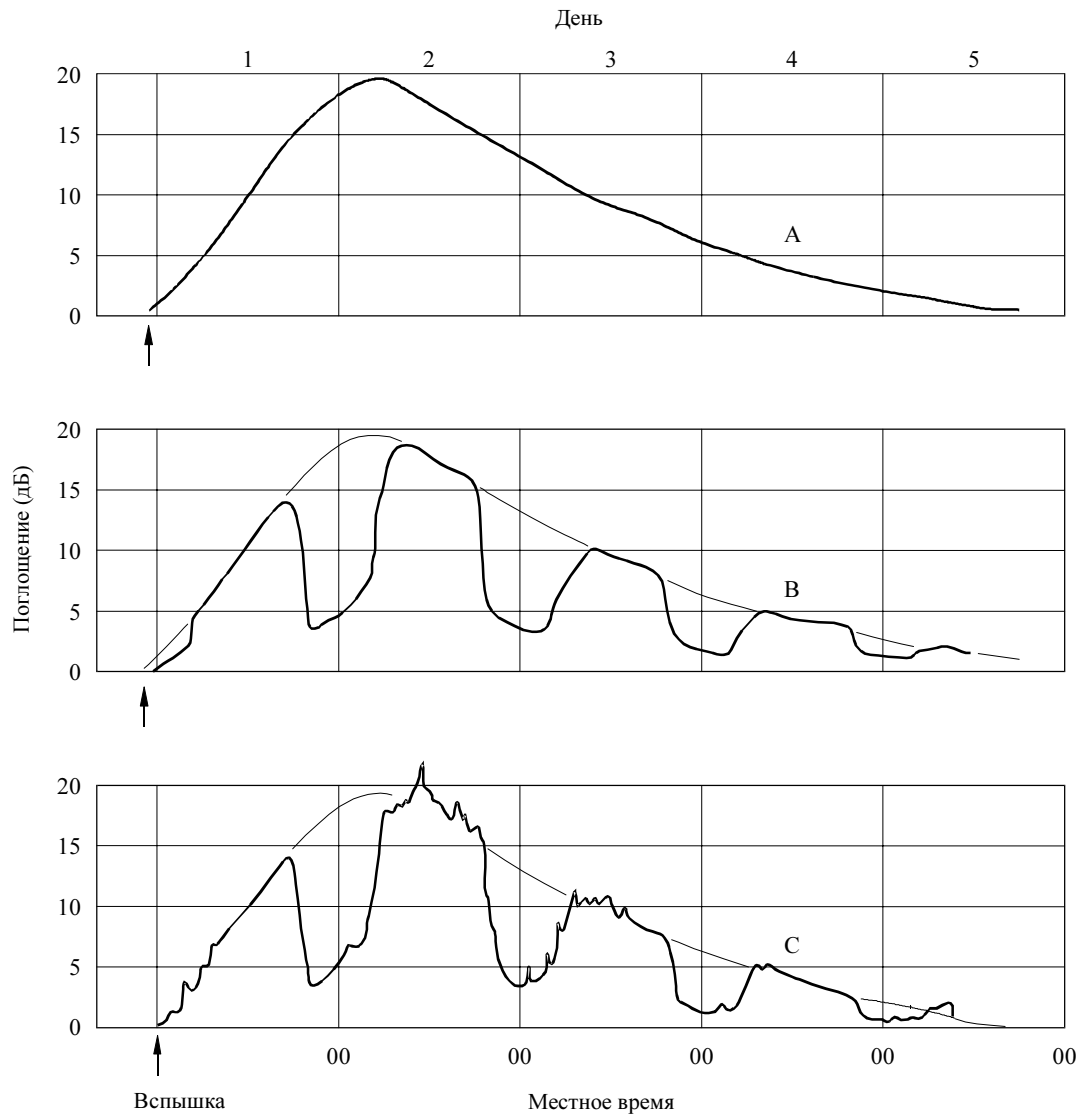
5.2 Поглощение в полярной шапке

Поглощение в полярной шапке, которое может возникнуть в периоды высокой солнечной активности, наблюдается на геомагнитных широтах выше 64°. Поглощение вызывается ионизацией на высотах более приблизительно 30 км. Обычно оно проявляется в виде дискретных, хотя иногда и перекрывающихся событий, которые почти всегда связаны с дискретными событиями на солнце. Поглощение продолжительно и регистрируется на освещенной части полярной шапки. Наиболее часто поглощение в полярной шапке происходит во время максимума цикла солнечной активности, когда в течение года может быть отмечено от 10 до 12 событий такого рода. Каждое событие может продолжаться до нескольких дней. В этом заключается отличие от аврорального поглощения, которое зачастую совершенно локально и имеет вариации порядка нескольких минут.

Примечательной чертой события поглощения в полярной шапке является значительное уменьшение поглощения в ночные часы для данной скорости образования электронов. Рисунок 12 представляет собой основанную на риометрических наблюдениях на разных широтах гипотетическую модель суточных вариаций поглощения в полярной шапке, последовавшего за крупной вспышкой на Солнце.

РИСУНОК 12

Гипотетическая модель поглощения в полярной шапке, следующего за крупной вспышкой на Солнце, по прогнозам наблюдений на риометрах на частоте около 30 МГц



- A: высокие широты – 24 часа освещенности Солнцем
 B: высокие широты – день и ночь равной продолжительности
 C: высокие частоты – авроральная зона

0531-12

6 Резюме

В таблице 3 приведены оценки максимальных значений ионосферных эффектов на частоте 1 ГГц. Предполагается, что полное содержание электронов в вертикальном столбе ионосферы составляет 10^{18} эл/м². Угол места считается равным примерно 30°. Величины даны для случая прохождения радиоволн через ионосферу в одном направлении.

ТАБЛИЦА 3

Оценки максимальных ионосферных эффектов на частоте 1 ГГц для углов места около 30° при пересечении ионосферы в одном направлении

Эффект	Величина	Зависимость от частоты
Фарадеевское вращение	108°	$1/f^2$
Задержка распространения	0,25 мкс	$1/f^2$
Рефракция	< 0,17 мрад	$1/f^2$
Изменение направления прихода	0,2 дугowych мин.	$1/f^2$
Поглощение (в полярной шапке)	0,04 дБ	$\sim 1/f^2$
Поглощение (авроральное + в полярной шапке)	0,05 дБ	$\sim 1/f^2$
Поглощение (среднеширотное)	< 0,01 дБ	$1/f^2$
Дисперсия	0–4 нс/МГц	$1/f^3$
Мерцания	См. п. 4	См. п. 4