

Анализируются материалы, посвященные оценке влияния ионосферных сцинтилляций на затухание в спутниковых радиоприемах, в том числе анализируются сведения, приведенные в рекомендации ITU-R P.531. Анализируются результаты моделирования и экспериментов, представленные в публикациях. Показано, что влияние ионосферных сцинтилляций на энергетический бюджет спутниковых радиоприемов может быть значительным на частотах ниже 3 ГГц, и приведены прогнозируемые максимальные значения дополнительного затухания в радиоприеме и эмпирическая формула для его оценки.

О проблеме учета ионосферных сцинтилляций при расчете энергетических бюджетов спутниковых радиоприемов



Валентин Анпилов

Заместитель генерального директора АО «ВИСАТ-ТЕЛ», к.т.н., доцент



Андрей Гриценко

Генеральный директор АО «ИКЦ «Северная корона», к.т.н.

Работы в области создания гибридных систем типа D2D применительно к прямому контакту типовых устройств сотовых сетей и сетей LPWAN с космическими аппаратами предполагают, что спутниковая компонента использует частоты ниже 3 ГГц, а ее

орбитальная группировка реализована на основе низкоорбитальных космических аппаратов (КА). В этом случае при расчете энергетического бюджета абонентских спутниковых радиоприемов необходимо учитывать эффекты, обусловленные влиянием ионосферы Земли, поэтому вопрос инженерной оценки потерь, определяемых ионосферными сцинтилляциями, является актуальным. Такая оценка необходима как для корректного определения требуемых параметров полезной нагрузки КА, так и для формализации и обоснования допустимой

плотности потока мощности на поверхности Земли, создаваемой спутниками орбитальной группировки.

Слои ионосферы и их влияние на распространение радиоволн

Исследованию ионосферы Земли посвящено множество научных работ. Активные исследования начались в 60-х гг., поскольку стало очевидно, что ионосфера вносит заметные ошибки в работу систем спутниковой навигации.

Ионосфера — верхняя часть атмосферы Земли с высокой концентрацией свободных электронов и ионов, что вызвано ультрафиолетовым и рентгеновским облучением Солнца и космическими лучами. Ионы и электроны находятся под действием гравитационного и магнитного полей и образуют неоднородности для прохождения электромагнитной волны. В зависимости от распределения по высоте концентрации заряженных частиц ионосферу разделяют на области (или слои): D — на высоте 60...90 км (в ночное время суток слой практически исчезает); E — на высоте 90...120 км (включает регулярный E- и спорадический Es-слой); F — выше

Ключевые слова:
ионосфера, амплитудные сцинтилляции, спутниковые системы



130 км (днем распадается на два слоя, F1 и F2). Степень ионизации и высота положения слоев зависят от времени суток и времени года, географической широты, плотности атмосферы и солнечной активности. Помимо указанных общих областей существуют:

- экваториальная аномалия (известна как “экваториальный фонтан”), расположенная в пределах $\pm 20^\circ$ от магнитного экватора и связанная с изменением в слое F2;
- авроральный слой (на высоте 100...150 км), кольцо-овал вокруг магнитных полюсов Земли, где происходит “высыпание” потоков находящихся в магнитосфере электронов;
- другие локализованные участки ионосферы, возникающие случайным образом, в том числе высокочастотные маломасштабные нестационарные структуры, обычно называемые ионосферными неоднородностями.

При этом в каждой области ионизированная среда не является ни однородной в пространстве, ни стационарной во времени.

На частотах ниже 3 ГГц ионосфера может приводить к возникновению ряда эффектов, а именно:

- вращение поляризации (вращение Фарадея);
- дополнительная задержка во времени;
- дисперсия задержки;
- ионосферное “мерцание” (флуктуации амплитуды и фазы сигнала).

На рис. 1 показаны слои ионосферы и указаны примерные их высоты.

Применительно к нашей задаче принципиальное значение имеют ионосферные амплитудные “мерцания”, поскольку они приводят к дополнительным потерям сигнала в радиолинии за счет рассеяния сигнала. Эти потери практически не увеличивают температуру шума. Важно, что “мерцания” приводят не только к дополнительным потерям сигнала, но к его как бы усилению в некоторых направлениях и в некоторые временные периоды. Зачастую оценивают размах амплитуды “мерцаний” (peak-to-peak) на основе измерения отношения “сигнал/шум” контрольным приемником, причем результат измерений зависит от многих факторов, в том числе и от ширины диаграммы направленности антенны.

Об амплитудных ионосферных сцинтилляциях

Подавляющее число исследований посвящено оценке сцинтилляций фазы сигнала и группового времени запаздывания (точнее, его неравномерности), что искажает оценку псевдодальности и влияет на точность определения географических координат абонента с использованием глобальной навигационной спутниковой системы. Предложены многочисленные модели оценки ионосферных сцинтилляций. Но известные научные работы не дают однозначного ответа, и эти исследования непрерывно продолжаются в научном и в экспериментальном плане.

В данном случае интересны не фазовые, а амплитудные “мерцания”, которые приводят к амплитудным флуктуациям электромагнитной волны и, как следствие, к дополнительным потерям в радиолинии системы связи.

Методической основой для оценки амплитудных флуктуаций является рекомендация ITU-R P.531, первая редакция которой относится к 1978 г. В период с 1990 г. вышло не менее 15 редакций, с 2023 г. действует редакция P.531-15 [2]. Все редакции базируются на данных 90-х гг., с небольшими уточнениями.

В P.531 указано, что явление амплитудных флуктуаций наиболее сильно проявляется на частотах ниже 3 ГГц, однако может изредка наблюдаться и на частотах до 10 ГГц. Наиболее сильно амплитуд-

ные флуктуации проявляются на коротких волнах в диапазоне частот от 3 до 30 МГц. Это подтверждается многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями. В данном случае интерес представляют оценки дополнительных потерь в спутниковых радиолиниях на более высоких частотах, примерно от 137 МГц до 3 ГГц.

Амплитудные флуктуации вызваны особенностями прохождения электромагнитной волны в неоднородной среде ионосферы. Неоднородности в этом диапазоне частот обусловлены повышенной электронной плотностью в отдельных участках ионосферы, которые можно представить как локальные образования в пространстве ионосферы, вызванные повышенной концентрацией электронов, причем эти образования могут быть различными по размерам, от крупных до 100 км до мелких, 10 м – 100 м, и различаться по плотности концентрации электронов. Эти неоднородности быстро перемещаются в пространстве, вызывают фокусировку/дефокусировку радиоволн, что приводит к флуктуациям амплитуды (“мерцанию”) сигнала за счет отражения, переотражения и рассеяния или фокусировки электромагнитной волны. Установлено, что в наибольшей степени этот эффект проявляется в зоне геомагнитного экватора (каждый день после захода Солнца и длится несколько часов) и в арктических широтах (в том числе в зонах полярных сияний). Эффект минимален на средних широтах, то

Ионосферные слои [1]

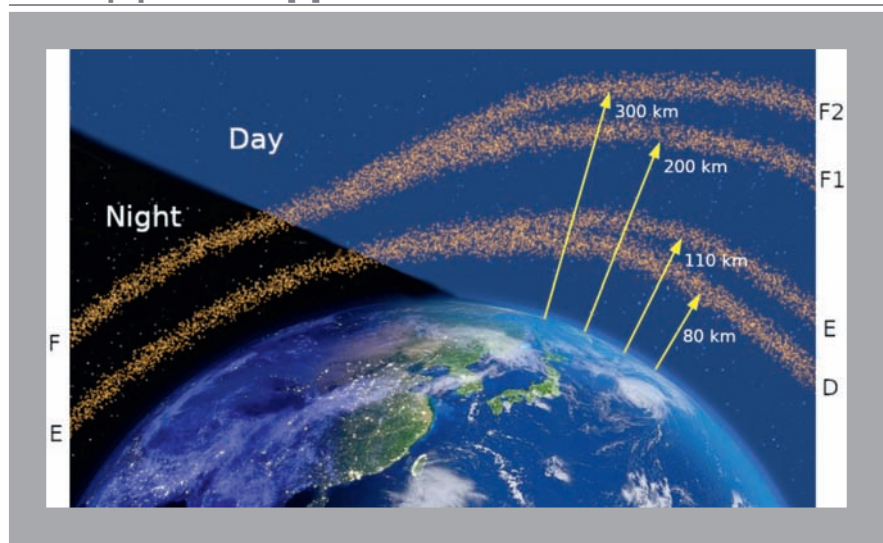


Рис. 1

Слой	Расстояния от Земли (примерно), км	Размер неоднородностей	Концентрация электронов (Ni) в м ³	
			День	Ночь
D	60–90	Десятки метров	8*10 ⁹	0
E	90–120	Сотни метров	2*10 ¹¹	2*10 ⁹
F1	120–200	Десятки километров	4*10 ¹¹	2*10 ⁹
F2	200–400		2*10 ¹²	3*10 ¹¹

Примечание: максимум концентрации электронов – на высоте 250 км.

Таблица 1

есть за пределами пояса +/-20° и примерно до широт 60° N и 60° S. Применительно к анализу работы спутниковых линий на территории России особый интерес имеет оценка дополнительных потерь в спутниковых радиолиниях при облучивании арктических широт.

Механизм ионосферных “мерцаний”

Гипотетически “мерцания” – это многомерный случайный процесс, который можно представить как сумму синусоид со случайной амплитудой и фазой или полиномами со случайными коэффициентами, что подобно многолучевому распространению электромагнитной волны, но с выраженной зависимостью от времени. Амплитуды лучей зависят от значения коэффициента отражения от неоднородностей на пути распространения волны. В данном случае такими неоднородностями являются локальные образования в пространстве ионосферы, образованные повышенной концентрацией электронов. Они могут быть различными по размерам и плотности концентрации электронов, причем они нестабильны во времени и пространстве.

Каждой неоднородности можно поставить в соответствие комплексный коэффициент отражения Γ_i для фиксированного момента времени. Коэффициент отражения характеризует рассеяние электромагнитной волны на неоднородности, и его следует представить как некий многополюсник (например, для упрощения как восьмиполосник). Таким образом, упрощенной гипотетической моделью для спутниковой радиолинии в ионосфере может служить цепочка многополюсников. С уверенностью можно принять, что модуль Γ_i значительно менее 1:

$$\Gamma_i = (n_i - 1)^2 / (n_i + 1)^2,$$

где $n_i = (1 - 80,8 N_i / f^2)^{0,5}$ – коэффициент преломления; f – частота сигнала, Гц; N_i – концентрация электронов в м³ (табл. 1).

Цепочка многополюсников приводит к цепочке четырехполюсников, и для электромагнитной волны, распространяющейся в радиолинии, можно записать следующее выражение для комплексного коэффициента передачи T между антенной КА и земной станцией (или наоборот) с учетом малости Γ_i ,

$$T = \Pi(1 + \Gamma_i)e^{-\gamma L_i} / (1 - \Sigma \Gamma_i \Gamma_k e^{-2\gamma L_{ik}}), \quad (1)$$

где γ – постоянная распространения в вакууме; L_{ik} – расстояния между взаимодействующими неоднородностями; L_i – расстояния между смежными неоднородностями. Π – обозначает произведение, равное числу взаимодействующих неоднородностей i .

Подобная задача рассматривается в [3, 4] применительно к волноводным системам при условии, что неоднородности стабильны во времени и пространстве. В этом случае процесс стационарный и эргодический. Но в данной задаче неоднородности нестабильны по величине, во времени и в пространстве, поэтому задача моделирования этого процесса корректного решения не имеет. Решение возможно только на основе эмпирических оценок. Но в то же время можно сделать некоторые качественные выводы, которые следуют из оценки выражения (1) для модуля коэффициента передачи:

$$|T| = \Pi |T_i| e^{-A} [1 + |\Gamma_i| |\Gamma_k| e^{-A_{ik}} \cos(2\beta L_{ik})], \quad (2)$$

где $A = 2,31g(4\pi L/\lambda)$ – уменьшение интенсивности сигнала в радиолинии, непер; $A_{ik} = 2,31g(4\pi L_{ik}/\lambda)$ – уменьшение интенсивности сигнала на линии взаимодействия неоднородностей, непер;

$\beta = 2\pi/\lambda$ – фазовая постоянная распространения волны.

А именно (2) обращает на себя внимание тем, что коэффициент передачи является быстро осциллирующей функцией, причем может возникнуть ситуация, при которой $|T| > 1$, то есть происходит не только уменьшение интенсивности сигнала, но и его как бы усиление на отдельных частотах по отношению к регулярной зависимости e^{-A} . Причем на частотах, где возникают максимумы за счет пульсации затухания, групповое время запаздывания уменьшается, то есть групповая скорость распространения волны увеличивается по отношению к групповой скорости распространения в вакууме, что является парадоксальным эффектом [5, 6]. Этот эффект несложно показать экспериментально при изменении группового времени запаздывания в линии передачи (например, в РЧ-кабеле) с неоднородностями, в простейшем случае с двумя неоднородностями на входе и выходе [5, 6].

Причем квазипериоды осцилляций затухания формируются из сложения синусоид с разными периодами $2\beta L_{ik}$. Полоса частот, в которой наблюдается размах затухания в процессе амплитудных “мерцаний”, зависит от расстояния взаимодействия неоднородностей:

$$\Delta f_{ik} = V_{gp} / 2L_{ik} \approx C / L_{ik}.$$

Применительно к спутниковым системам связи интерес представляют оценки не фазовых, а амплитудных сцинтилляций, с целью корректного учета затухания в радиолинии. Исследования в этой области по состоянию на 2023 г. в основном сконцентрированы в [2]. Дополнительные материалы представлены в рекомендациях ITU-R P.371, P. 618, P.844, P.1239 P.2097, P.2297.

Оценка потерь в радиолинии, вызванных ионосферными “мерцаниями”

Потери (L_p) от ионосферных сцинтилляций связаны с полным размахом флуктуаций P_{fluc} (дБ) следующей зависимостью [2]:



$$L_p = \frac{P_{fluc}}{\sqrt{2}}, \text{ [дБ]}.$$

Однако найти адекватное для той или иной ситуации значение P_{fluc} не всегда просто. Можно, например, воспользоваться следующим выражением:

$$P_{fluc} = 27,5 S_4^{1,26} \text{ [дБ]},$$

где S_4 – индекс мерцаний ($0 \leq S_4 \leq 1$). Индекс мерцаний принято определять из уравнения

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

где I – интенсивность сигнала (пропорциональная квадрату амплитуды сигнала), а знак $\langle \rangle$ означает среднее по ансамблю.

Мерцания характеризуют по степени их интенсивности (табл. 2) в зависимости от значения S_4 .

Прогнозное значение индекса S_4 , равно как и среднеквадратичные значения фазовых и угловых отклонений в функции мест размещения, даты, времени и рабочей частоты, позволяет получить модель GSM (глобальную модель ионосферных мерцаний) [7]. Однако для этого необходимо использовать специальное программное обеспечение, которое не всегда доступно.

Другим подходом является использование точечных данных годовой статистики полного размаха флуктуаций на частоте 4 ГГц, наблюдавшихся на широте 22° N в Гонконге (кривые I1, P1, I3–16, P3 – P6) и на широте 25° N в Тайбэе (кривые P2 и I2), представленные на рис. 2 [2]. Значение SSN соответствует за-

Классификация интенсивности ионосферных "мерцаний"

Интенсивность мерцаний	Значение S_4
Очень низкая	<0,3
Низкая	0,3–0,5
Средняя	>0,5–0,7
Высокая	>0,7

Таблица 2

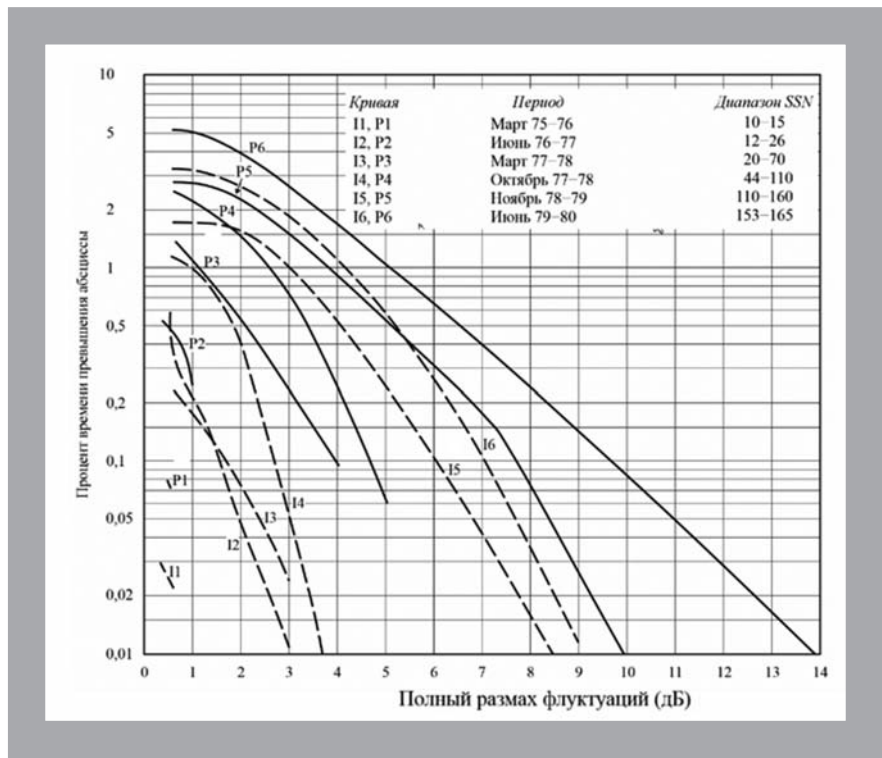


Рис. 2

фиксированному числу пятен на Солнце. Далее можно аппроксимировать результаты под конкретную задачу.

Пример оценки затухания по данным годовой статистики

Расчет выполним для рабочей частоты $F = 2$ ГГц. На первом шаге необходимо выбрать график (рис. 2), который наиболее полно соответствует условиям применения спутниковой радиолинии.

Предварительно необходимо задаться числом прогнозируемых солнечных пятен (R12 или SSN – sunspot number). Для этого можно воспользоваться [8]. Здесь необходимо отметить, что наш ГОСТ 25645.302-83, который решает эту задачу, уже устарел и не может использоваться в таких расчетах. Анализируем вероятный уровень солнечной активности на предполагаемый период функционирования проектируемой спутниковой системы. Закладываемся, например, на то, что в этот период сглаженное число солнечных пятен SSN не превысит значения 110.

Задаем процент времени превышения затухания, например $P = 1\%$. Из рис. 2 выбираем, например, P4. Из графика получаем, что

$P_{fluc}^* = 1,1$ дБ. Но это значение соответствует частоте $f = 4$ ГГц. Для перехода на частоту $f = 2$ ГГц воспользуемся формулой [2]:

$$P_{fluc} = P_{fluc}^* \left(\frac{F}{4} \right)^{-1,5}$$

Подставляем и получаем

$$P_{fluc} = 1,1 \times (2/4)^{-1,5} = 3,11 \text{ дБ}.$$

Тогда результирующие потери составят

$$L_p = P_{fluc} / 2^{0,5} = 3,11 / 2^{0,5} = 2,2 \text{ дБ}.$$

Отсюда можно записать эмпирическую формулу для оценки дополнительных потерь в спутниковой радиолинии:

$$L_p \approx \pi / f^{0,5}, \text{ дБ.} \tag{3}$$

Так как в примере были использованы данные наблюдения из экваториального района Земли, где амплитудные флуктуации максимальны, то он больше соответствует случаю, когда новая система предназначена для глобального обслуживания с заданной надежностью (мы приняли $P = 1\%$).

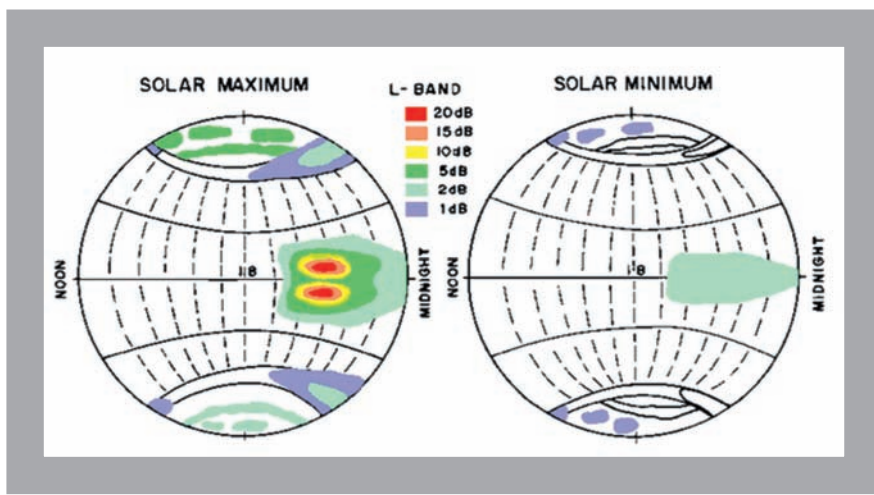


Рис. 3

Оценки потерь в спутниковых радиоприемах, вызванных амплитудными "мерцаниями"

Частота	Дополнительные потери, дБ	Источник информации
30 МГц	20	https://descanso.jpl.nasa.gov/propagation/1108/1108Chapter2.pdf CHAPTER 2, IONOSPHERIC EFFECTS, табл. 2.3, рис. 2.17
137 МГц	10–12	
254 МГц	10–12	
406 МГц	6,8	Назаров Л.Е. и др. Модели сцинтилляции сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиоприемам. РЭНСИТ. 2019. Том 11. № 1. С. 57–64. https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-stsintillyatsii-signalov-pri-rasprostraneni-po-ionosfernym-sputnikovym-radiolinyam?ysclid=m0niw5enw799571144
433 МГц	5,3	Roste T., Yang K., Wen Ch.m Satellite to buoy IoT communications in the Arctic Ocean, Sec. Ocean Observation, Volume 10, 2023. https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2023.1153798/full
868 МГц	2,3	
1500 МГц	2,0	
3400 МГц	≈0	
2000 МГц	2,2	3GPP TR 38.821 (табл. 6.1.3.2.1); TR 38 811 (раздел 6.6.6, стр. 56)

Таблица 3

Если система предназначена для обслуживания арктических регионов России, то эти значения следует рассматривать как предельно возможные.

Анализ публикаций, в которых приведены значения амплитудных "мерцаний"

Необходимо сразу отметить, что все публикации, которые были проанализированы, не содержат конкретных значений. В качестве примера неопределенности затухания от сцинтилляций могут служить результаты многочисленных исследований для систем ГНСС, приведенные на рис. 3.

Глубина амплитудных "мерцаний" на средних широтах

P, %	Частота, МГц			
	0,1	0,2	0,5	1,0
1,0	5,9	1,5	0,2	0,1
0,5	9,3	2,3	0,4	0,1
0,2	16,6	4,2	0,7	0,2
0,1	25,0	6,2	1,0	0,3

Таблица 4

В табл. 3 собраны сведения из различных источников, которые представляют о принятых потерях в спутниковых радиоприемах. Для наглядности данные таблицы приведены на рис. 4. На том же рисунке отмечены значения, которые вычислены на основе (3).

Глубина замираний, вызванных амплитудными "мерцаниями", на средних широтах незначительная и для разных процентов времени (P, %) представлена в табл. 4 [10].

Выводы

При разработке новых спутниковых систем, в том числе гибридных спутниковых систем IoT или D2D, работа которых планируется на глобальной основе или для обслуживания арктических регионов России в диапазонах частот ниже 6 ГГц, необходимо в расчете энергетических бюджетов радиоприема учитывать потери, возникающие вследствие ионосферных сцинтилляций, значение которых может существенно влиять на принимаемые технические решения, особенно в диапазоне частот ниже 3 ГГц.

Для повышения точности оценок амплитудных "мерцаний" целесообразны дополнительные исследования и измерения как на территории России, так и в зоне Арктики, с подготовкой соответствующей методики расчета дополнительных потерь в спутниковых радиоприемах.

Литература

- https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere#/media/File:Ionospheric_layers_from_night_to_day.png (дата обращения 06.12.2024).
- <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.531/> (дата обращения 06.12.2024).
- Анпилогов В. Головченко Г, Сахаров А. Групповое время запаздывания в протяженной линии передачи с учетом потерь и неоднородностей при одноволновой работе. Техника средств связи, серия: Техника радиосвязи. 1976. Выпуск 1. С. 171–178.
- Анпилогов В.Р., Николаев В.А. Статистическая оценка величины осцилляции группового времени запаздывания СВЧ-тракта в полосе частот. Техника средств связи. Серия: Техника радиосвязи. 1978. № 1, С. 103–110.
- Анпилогов В.Р. Головченко Г.С. Оценка пульсации группового времени запаздывания в линии передачи и ее влияние на передачу цифровой информации // Технологии и средства связи. 2014. № 2. С. 70–74.



Максимальные дополнительные потери (дБ), вызванные амплитудными "мерцаниями", в зависимости от частоты сигнала (МГц)

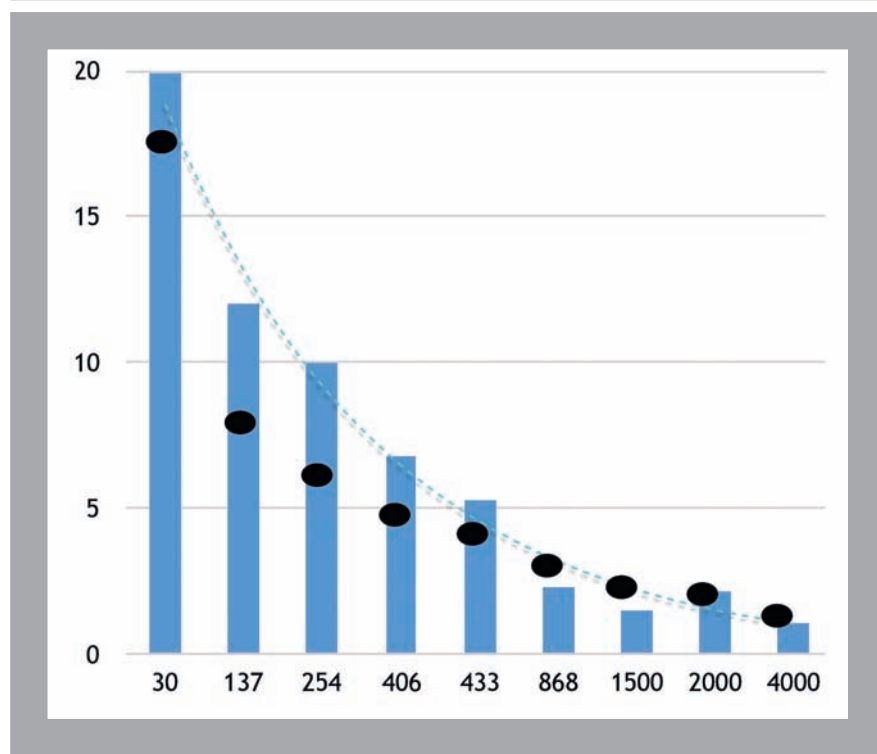


Рис. 4

<http://lib.tsonline.ru/articles2/sputnik/otsenka-pulsatsii-grupпового-vremeni-zapazdyvaniya-v-linii-peredachi-i-ee-vliyanie-na-peredachutsifrovoy-informatsii> (дата обращения 06.12.2024).

6. Анпилогов В.Р. Оценка групповой скорости распространения электромагнитной волны в неоднородной линии передачи: эффект сверхсветового распространения сигнала // Технологии и средства связи. 2014. № 3. С. 57–59.

<http://lib.tsonline.ru/articles2/sputnik/otsenka-grupповой-skorosti-rasprostraneniya-elektromagnitnoy-volny-v-neodnorodnoy-linii-peredachi-effekt-sverhsvetovogo-rasprostraneniya-signal-a> (дата обращения 06.12.2024).

7. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.2097-2007-PDF-E.pdf (дата обращения 06.12.2024).

8. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.371/en> (дата обращения 06.12.2024).

9. A Review of Ionospheric Scintillation Model, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-015-9319-1> (дата обращения 06.12.2024).

10. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-14-202308-I/en> (дата обращения 06.12.2024).

Решение о создании европейской низкоорбитальной системы IRIS² принято

Контракт на создание IRIS² (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security through Satellites) между Европейской комиссией, консорциумом SpaceRISE (SES, Eutelsat и Hispasat), Европейским космическим агентством (ЕКА) и, следовательно, государствами-членами согласован. Финансирование предусмотрено в размере 600 млн евро. История принятия этого решения отсчитывается от меморандума, подписанного на Совете министров ЕС в ноябре 2022 г. Комитет по промышленной политике ЕКА (IPC), который определяет и реализует промышленную политику Европейского космического агентства, одобрил заключение контрактов на проведение технологических (исследовательских) работ и технико-экономических обоснований с поставщиками оборудования для IRIS².

Эта часть проекта, инициированная ЕКА, предваряет и подкрепляет предстоящее подписание контракта на систему IRIS² в целом. Его общая сумма составляет более 10 млрд евро. Освое-

ние бюджета предусмотрено по договорам между Европейской комиссией и консорциумом SpaceRISE (идеологическая цель консорциума – Космический консорциум за устойчивую, взаимосвязанную и безопасную Европу). IRIS² – это программа, финансируемая Европейским союзом (ЕС) на сумму 2,4 млрд евро в рамках Многолетней финансовой программы (MFF) на 2021–2027 гг., дальнейшее финансирование предусмотрено на следующем этапе MFF, в 2028–2035 гг. Данное финансирование предоставляется также от ЕКА и частных коммерческих игроков в рамках концессионного договора.

Программа IRIS предусматривает создание спутниковой сети на основе низкоорбитальных и среднеорбитальных спутниковых группировок. Число спутников в сети – 290. Эта группировка обеспечит создание безопасной коммуникационной инфраструктуры для правительственных органов и агентств ЕС. Различные каналы связи между пользователями,

командными и контрольными линиями спутников будут защищены, а наземная инфраструктура также будет иметь специальное закрытие каналов. Таким образом, эта группировка призвана обеспечить стратегическую автономию ЕС в области защищенной правительственной связи. Наконец, созвездие должно позволить укрепить позиции Европы, ее промышленности и ее операторов в мире. Консорциум SpaceRISE был выбран Комиссией для управления концессионными договорами. IRIS² – это новый флагманский проект Европейского Союза в космосе после программ Galileo (спутниковая система навигации) и Copernicus (мониторинг климата).

Просматривается явная реакция Европы на Starlink (SpaceX) и на две китайские группировки ШПД.

Созвездие Ириса²: Европейское космическое агентство дало зеленый свет: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/en-space/iris2-secure-connectivity_en