

УДК 621.396

Методика прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы, возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции

Пашинцев В. П., Диптан П. А., Белоконь Д. А.

Постановка задачи: известно, что обцие (неселективные) замирания сигнала приводят к снижению пропускной способности канала связи на 20%. Разработана методика оценки пропускной способности канала спутниковой связи при возмущениях ионосферы, которые сопровождаются образованием мелкомасштабных неоднородностей, вызывающих обцие замирания принимаемых сигналов. Однако в определенных условиях принимаемые сигналы могут быть подвержены частотно-селективным замираниям и межсимвольной интерференции. **Цель работы:** разработка методики прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы и возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции. **Используемые методы:** применяется модельный подход к прогнозированию, при котором найдена функциональная зависимость прогнозируемого показателя (пропускной способности) от факторов, на него влияющих (параметров мелкомасштабных возмущений ионосферы и передаваемых сигналов). **Новизна:** в отличие от известных исследований, дополнительно учтено влияние мелкомасштабных неоднородностей ионосферы при ее возмущениях на уменьшение полосы когерентности канала спутниковой связи, возникновение частотно-селективных замираний принимаемых сигналов и межсимвольной интерференции. **Результат:** получены аналитические выражения для оценки зависимости пропускной способности канала спутниковой связи от отношения сигнал/шум на входе приемника, среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы, несущей частоты и полосы спектра частот сигнала при заданном угле наклона распространения радиоволн. Результаты прогнозирования показывают, что при искусственных возмущениях ионосферы, сопровождаемых увеличением среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания на 4 порядка возникающие частотно-селективные замирания принимаемых сигналов и межсимвольная интерференция приводит к снижению относительной пропускной способности на 65%. Повышение несущей частоты системы спутниковой связи с 390 МГц до 2,2 ГГц обеспечивает уменьшение относительной пропускной способности канала спутниковой связи всего на 21%. **Практическая значимость:** разработаны рекомендации по выбору частотно-временных параметров сигналов систем спутниковой связи на основе результатов мониторинга флуктуаций полного электронного содержания ионосферы при ее возмущениях для устранения частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции с целью увеличения пропускной способности канала спутниковой связи.

Ключевые слова: канал спутниковой связи, вероятность ошибки, помехоустойчивость, пропускная способность, полоса когерентности, частотно-селективные замирания, межсимвольная интерференция, ионосфера, полное электронное содержание, мелкомасштабные неоднородности.

Библиографическая ссылка на статью:

Пашинцев В. П., Диптан П. А., Белоконь Д. А. Методика прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы, возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 156-186. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-156-186

Reference for citation:

Pashintsev V. P., Diptan P. A., Belokon D. A. Procedure for prediction of satellite communication channel capacity in case of small-scale ionosphere disturbances, frequency-selective fading and intersymbol interference. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 1, pp. 156-186 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-156-186

Введение

Результаты мониторинга ионосферных мерцаний [1-4] принимаемых сигналов спутниковых глобальных навигационных систем показывают, что распространение радиоволн в канале спутниковой связи сопровождается рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы, появлением многолучевости и замираний принимаемых сигналов. По мере возрастания уровня диффузности ионосферы (т.е. интенсивности ее мелкомасштабных неоднородностей β) происходит возрастание глубины замираний и искажений принимаемых сигналов, снижение помехоустойчивости и пропускной способности канала спутниковой связи.

Проведенный анализ работ в области оценки помехоустойчивости и пропускной способности ионосферных каналов радиосвязи с общими и частотно-селективными замираниями (ЧСЗ), а также межсимвольной интерференцией (МСИ) показал, что по данному направлению вели и ведут работу большое число ученых: Л.М. Финк [5], Д.Д. Кловский [6, 7], В.А. Сойфер [7], R.L. Bogush, F.W. Guigliano, D.L. Knepp [8, 9], E.M. Biglieri, J.G. Proakis, S.S. Shamai [10], И.М. Лернер [11], М.И. Бахракова [12] и др.

В монографии [5] Л.М. Финк произвел оценку помехоустойчивости каналов связи с переменными параметрами (общими райсовскими и релеевскими замираниями), пропускную способность каналов с релеевскими замираниями.

В работах [6, 7] Д.Д. Кловский и В.А. Сойфер определили пропускную способность многолучевых каналов с общими райсовскими замираниями.

В статьях [8, 9] исследованы характеристики спутниковых каналов связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы и результирующие параметры принимаемых сигналов, подверженных ЧСЗ и МСИ.

В статье [10] авторами описаны статистические модели замираний, пропускная способность канала с ЧСЗ, методы выравнивания искажений сигналов в каналах связи с ЧСЗ (эквалайзеры).

В статье [11] проведен анализ методов обработки информации в частотно-селективных каналах связи с межсимвольными искажениями для выработки подходов к повышению их удельной пропускной способности.

В диссертации [12] разработаны методики и алгоритмы обработки сложного сигнала, используемого для наклонного зондирования ионосферных линий радиосвязи, с целью повышения помехоустойчивости и пропускной способности каналов связи.

Однако во всех вышеперечисленных работах не учитывается влияние на пропускную способность канала спутниковой связи с ЧСЗ и МСИ параметров мелкомасштабных неоднородностей ионосферы.

В монографии [13] разработан метод прогнозирования помехоустойчивости приема сигналов в канале спутниковой связи при одновременном проявлении замираний (общих или частотно-селективных) и межсимвольной интерференции.

В статье [14] разработан метод прогнозирования помехоустойчивости оптимального некогерентного приема сигналов с бинарной ортогональной ча-

стотной манипуляцией BFSK (binary frequency shift keying) в спутниковых системах в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы на основе результатов GPS-мониторинга мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы при произвольных углах возвышения трасс спутниковой связи и навигации. В рамках данного метода разработана методика определения зависимости вероятности ошибки некогерентного приема сигналов BFSK с райсовскими замираниями от несущей частоты и отношения сигнал/шум на входе приемника, а также флуктуаций ПЭС ионосферы на навигационной трассе распространения радиоволн.

Следует отметить, что в [13, 14] использован модельный подход к прогнозированию [15], согласно которому необходимо найти функциональную зависимость прогнозируемого показателя (помехоустойчивости спутникового канала связи) от факторов, на него влияющих (параметров мелкомасштабных возмущений ионосферы и передаваемых сигналов). Общая методика математического прогнозирования количественных характеристик какого-либо объекта известна [16] и включает в себя следующие этапы:

- 1) получение функциональной зависимости, связывающей подлежащие прогнозированию характеристики объекта с рядом независимых переменных;
- 2) определение интервалов приращений независимых переменных, на которых производится прогнозирование;
- 3) собственно прогнозирование, т.е. вычисление интересующих характеристик объекта при заданных значениях независимых переменных.

Недостатком исследований [13, 14] является то, что они не выходят за пределы прогнозирования помехоустойчивости и не рассматривают влияние ЧСЗ и МСИ в каналах спутниковой связи на пропускную способность.

В статье [17] разработана методика оценки влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы на пропускную способность канала спутниковой связи, которая ограничена рассмотрением случая возникновения только общих (гладких) замираний. На основе разработанной методики получены зависимости $\Delta C = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \bar{h}^2)$ относительной пропускной способности канала спутниковой связи от изменения среднеквадратического отклонения (СКО) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T} = 5 \cdot 10^{13} \dots 10^{18} \text{ м}^{-2}$) в ионосфере, выбора несущей частоты ($f_0 = 300 \dots 6700 \text{ МГц}$) и среднего отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемника $\bar{h}^2 = \bar{E}_r / N_0$, где $\bar{E}_r = \bar{P}_r T_s$ – средняя энергия сигнала (со средней мощностью \bar{P}_r и длительностью T_s) на входе приемника, N_0 – спектральная плотность мощности шума). Следует заметить, что согласно [5, 6] среднее отношение сигнал/шум (С/Ш) на входе приемника в канале с общими замираниями \bar{h}^2 принимается равной входному отношению С/Ш в канале без замираний: $\bar{h}^2 = h^2 = E_r / N_0$.

Основным недостатком методики [17] является то, что она учитывает влияние возрастания СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T} = 5 \cdot 10^{13} \dots 10^{18} \text{ м}^{-2}$) при возмущениях ионосферы на увеличение глубины

общих замираний, но не учитывает сужение полосы когерентности (иначе – полосы пропускания, неискаженной передачи) F_k канала спутниковой связи. Если ширина спектра передаваемого сигнала (F) окажется больше F_k , то принимаемые сигналы будут подвержены искажениям из-за ЧСЗ и МСИ, что приведет к снижению пропускной способности канала спутниковой связи. Кроме того, недостатком методики [17] является то, что она не учитывает угол наклона распространения радиоволн (θ) через ионосферу, увеличение которого приводит к возрастанию глубины общих замираний принимаемых сигналов спутниковой связи и степени их ЧСЗ и МСИ.

Целью статьи является разработка методики прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы и возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции.

Требуемым результатом является оценка зависимости $\Delta C = \psi(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ пропускной способности канала спутниковой связи с ЧСЗ и МСИ относительно случая отсутствия замираний от отношения С/Ш на входе приемника, несущей частоты и ширины спектра передаваемого сигнала, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и угла наклона распространения радиоволн.

Рамки исследования ограничены случаем передачи по каналу спутниковой связи сигналов BFSK и их оптимального некогерентного приема.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ условий возникновения частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции и их влияние на пропускную способность канала спутниковой связи;
- 2) разработать методику оценки зависимости относительной пропускной способности канала спутниковой связи от мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы;
- 3) выполнить прогнозирование относительной пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы.

Решение этих задач позволит обосновать рекомендации по выбору частотных параметров сигналов систем спутниковой связи (ССС) с целью устранения частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции для повышения пропускной способности канала спутниковой связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы.

Представленная работа является развитием исследований авторов [13-14, 17-22].

1. Анализ условий возникновения частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции и их влияние на пропускную способность канала спутниковой связи

Условия возникновения ЧСЗ и МСИ в канале спутниковой связи и их влияние на помехоустойчивость канала спутниковой связи рассмотрены в [13].

Анализ влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы на глубину замираний принимаемых сигналов в ССС [23-25] показывает, что на несущих частотах $f_0 < 7$ ГГц (что соответствует диапазонам частот Р, L, S и С) могут возникать как общие (гладкие) замирания, так и ЧЗЗ при использовании широкополосных сигналов, а также ЧЗЗ и МСИ одновременно при передаче простых сигналов с высокой скоростью.

На рис. 1 показан процесс распространения радиоволн с несущей частотой f_0 от космического аппарата (КА) ССС до приемника ССС через мелкомасштабное ионосферное образование (МИО) и возникновения замираний принимаемых сигналов [13].

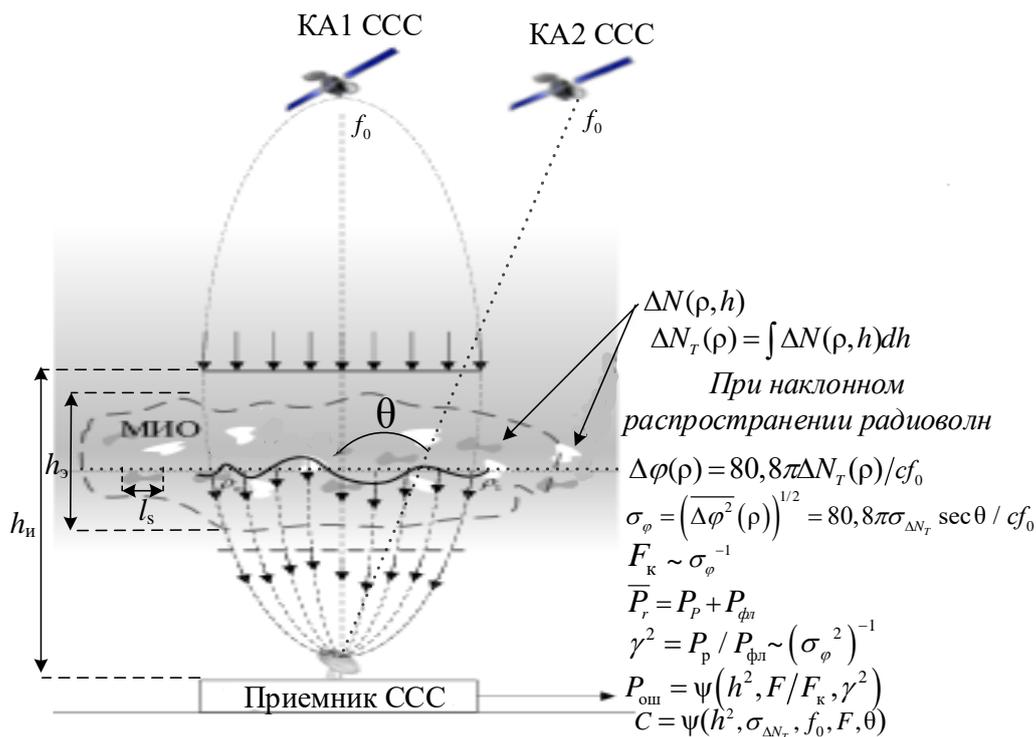


Рис. 1. Процесс возникновения ионосферных замираний при распространении радиоволн в ССС

Напомним, что для случая наклонного распространения радиоволн величина СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны σ_φ зависит от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$, угла наклона распространения радиоволны θ (здесь и далее в статье будем рассматривать наклонное СКО ПЭС $\sigma_{\Delta N_T}(\theta) = \sigma_{\Delta N_T} \sec\theta$) и несущей частоты f_0 сигнала как [13]

$$\sigma_\varphi = (\overline{\Delta\varphi^2}(\rho))^{1/2} = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T}(\theta) / cf_0 = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} \sec\theta / cf_0, \text{ [рад]}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi(\rho)$ – флуктуации (искажения) фазового фронта выходной волны, обусловленные мелкомасштабными флуктуациями интегральной электронной концентрации $\Delta N_T(\rho) = \int \Delta N(\rho, h) dh$ ионосферы, c – скорость света [м/с]. Входящая

в (1) величина СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы определяется как [13]

$$\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2}(\rho) \right)^{1/2} = \left(\pi^{1/2} l_s h_3 \sigma_{\Delta N}^2 \right)^{1/2} = \left(\pi^{1/2} l_s h_3 \right)^{1/2} \sigma_{\Delta N}, [\text{М}^{-2}], \quad (1a)$$

где l_s – характерный (средний) размер мелкомасштабных неоднородностей ионосферы [м], h_3 – эквивалентная толщина ионосферы [м], $\sigma_{\Delta N} = \left(\overline{\Delta N^2}(\rho, h) \right)^{1/2}$ – максимальное значение СКО мелкомасштабных флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ионосферы.

Параметр распределения Райса, который характеризует глубину общих (неселективных) замираний сигнала на входе приемника ССС, определяется через величину СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (σ_φ) как [13]

$$\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} = \left(\exp(\sigma_\varphi^2) - 1 \right)^{-1} = \left(\exp(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} \sec\theta / cf_0)^2 - 1 \right)^{-1}. \quad (2)$$

Полоса когерентности замираний в спутниковом канале (F_k), как и параметр глубины замираний γ^2 , зависит от несущей частоты (f_0), СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (σ_φ) и определяется как [13]

$$F_k = \frac{f_0}{\sqrt{\pi}\sigma_\varphi (1 + d_1^2/2)^{1/2}} = \frac{f_0^2}{80,8\pi\sqrt{\pi}\sigma_{\Delta N_T} \sec\theta (1 + d_1^2/2)^{1/2}}, [\text{Гц}]. \quad (3)$$

Здесь d_1^2 – коэффициент, характеризующий нарастание дифракционных эффектов во фронте волны по мере ее распространения внутри и за ионосферным слоем

$$d_1^2 = \frac{(3h_n^2 - 3h_n h_3 + h_3^2)c^2 \sec^2\theta}{192\pi^2 f_0^2 l_s^4},$$

где h_n – расстояние от верхней границы ионосферы до точки приема [м].

Согласно (1)-(3) возмущения ионосферы, сопровождаемые увеличением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$, приводят к увеличению СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны $\sigma_\varphi \sim \sigma_{\Delta N_T} \sec\theta / f_0$, которые приводят к уменьшению параметра распределения Райса и полосы когерентности:

$$\gamma^2 \sim (\sigma_\varphi^2)^{-1} \sim (f_0 / \sigma_{\Delta N_T} \sec\theta)^2; \quad F_k \sim (\sigma_\varphi)^{-1} \sim f_0^2 / \sigma_{\Delta N_T} \sec\theta.$$

Известно [6], что для простых (с базой $B_s = T_s F = 1$) двоичных сигналов (например, BFSK) скорость передачи зависит только от длительности передаваемого сигнала: $R = 1/T_s$ [бит/с]. Ширина спектра передаваемого простого сигнала $F = 1/T_s$ [Гц] численно равна скорости передачи (F [Гц] = $1/T_s = R$ [бит/с]). При возмущениях ионосферы из-за сужения полосы когерентности трансionoсферного канала связи F_k возрастает степень ЧЗ принимаемого простого сигнала (т.е. отношение F/F_k) и степень МСИ ($1/T_s F_k = R/F_k$).

Согласно [13] при передаче по трансionoсферному каналу спутниковой связи с ограниченной полосой частот $F_k \leq 100$ кГц простых сигналов

($B_s = T_s F = 1$) с высокой скоростью ($R = 1/T_s > 100$ кБод) условия возникновения ЧСЗ и МСИ выполняются одновременно: $F/F_k = 1/T_s F_k > 1$.

Поскольку ЧСЗ сопровождаются искажением формы огибающей принимаемых сигналов, то на выходе схемы их обработки появляются энергетические потери ($\eta_{\text{ч}} \leq 1$). Это эквивалентно уменьшению среднего отношения С/Ш на входе приемника ($\overline{h^2} \eta_{\text{ч}} \leq \overline{h^2}$) и приводит к увеличению вероятности ошибочного приема сигналов $P_{\text{ош}}$ при $\overline{h^2} = \text{const}$. Аналогично МСИ (т.е. наложение сигналов, соответствующих соседним символам 1 и 0 передаваемых сообщений) приводит к увеличению вероятности ошибочного приема сигналов $P_{\text{ош}}$ из-за межсимвольных энергетических потерь ($\eta_{\text{м}} \geq 0$).

Зависимость коэффициентов энергетических потерь при некогерентной обработке простых сигналов в каналах спутниковой связи от степени их ЧСЗ (F/F_k) и МСИ ($1/T_s F_k = F/F_k$) описывается выражениями [13]:

$$\eta_{\text{ч}} = \left[1 + \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{F}{F_k} \right)^2 \right] \operatorname{erf} \left(\frac{\pi F_k}{F} \right) - \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \left(\frac{F}{F_k} \right) \left\{ 2 - \exp \left[- \left(\frac{\pi F_k}{F} \right)^2 \right] \right\} \leq 1; \quad (4)$$

$$\eta_{\text{м}} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{1}{T_s F_k} \right)^2 \operatorname{erf} \left(\pi T_s F_k \right) - \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{T_s F_k} \right) \exp \left[- \left(\pi T_s F_k \right)^2 \right] \geq 0, \quad (5)$$

где $\operatorname{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(-y^2) dy$ – интеграл вероятностей, а полоса когерентности замираний описывается зависимостью (3) $F_k \sim f_0^2 / \sigma_{\Delta N_T} \sec \theta$.

В соответствии с выражениями (3)-(5) коэффициенты энергетических потерь при обработке сигналов в каналах спутниковой связи зависят от ширины спектра частот (F) и несущей частоты (f_0) передаваемого сигнала, СКО мелко-масштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$) и угла наклона распространения радиоволн (θ):

$$\{\eta_{\text{ч}}; \eta_{\text{м}}\} = \psi(F/F_k) = \psi(F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta).$$

Вероятность ошибочного приема сигналов в канале спутниковой связи с одновременным проявлением ЧСЗ и МСИ определяется для случая передачи различных комбинаций трех символов $a1c$ (т.е. 010, 011, 110, 111) как вероятность ошибочного различения центрального символа 1 в виде [13]

$$P_{\text{ош}} = 0,25 (P_{111} + P_{110} + P_{011} + P_{010}), \quad (6)$$

где парциальные вероятности ошибки P_{a1c} зависят от парциальных отношений С/Ш на выходе некогерентной схемы обработки W_{a1c} :

$$P_{a1c}(W_{a1c}) = \frac{\gamma^2 + 1}{W_{a1c} + 2(\gamma^2 + 1)} \exp \left(- \frac{\gamma^2 W_{a1c}}{W_{a1c} + 2(\gamma^2 + 1)} \right). \quad (7)$$

В выражении (7) параметр Райса определяется согласно (2), а парциальные отношения С/Ш $W_{a1c} = \psi(\overline{h^2}, \eta_{\text{ч}}, \eta_{\text{м}})$ зависят от среднего отношения С/Ш на входе

схемы обработки ($\overline{h^2}$) и коэффициентов (4), (5) энергетических потерь при обработке сигналов из-за ЧСЗ ($\eta_{\text{ч}} \leq 1$) и МСИ ($\eta_{\text{м}} \geq 0$) согласно выражениям [13]:

$$W_{111} = \overline{h^2} \eta_{\text{ч}}; \quad W_{010} = \frac{\overline{h^2} \eta_{\text{ч}} - 2\overline{h^2} \eta_{\text{м}}}{1 + 2\overline{h^2} \eta_{\text{м}}}; \quad W_{011} = W_{110} = \frac{\overline{h^2} \eta_{\text{ч}} - \overline{h^2} \eta_{\text{м}}}{1 + \overline{h^2} \eta_{\text{м}}}. \quad (7a)$$

В соответствии с выражениями (3)-(7) вероятность ошибочного приема сигналов в каналах спутниковой связи зависит от среднего отношения С/Ш на входе схемы обработки ($\overline{h^2}$), ширины спектра частот (F) и несущей частоты (f_0) передаваемого сигнала, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$) и угла наклона распространения радиоволн (θ):

$$P_{\text{ош}} = \psi(W_{\text{алс}}, \gamma^2) = \psi(\overline{h^2}, F/F_{\text{к}}, \gamma^2) = \psi(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta).$$

В свою очередь, вероятность ошибочного приема сигналов $P_{\text{ош}}$ существенно влияет на пропускную способность канала связи $C = \psi(P_{\text{ош}}, F)$ с полосой пропускания, соответствующей ширине спектра (F) передаваемого сигнала [5]

$$C = F(1 + P_{\text{ош}} \log_2 P_{\text{ош}} + (1 - P_{\text{ош}}) \log_2 (1 - P_{\text{ош}})) \quad (8)$$

Анализ выражений (1)-(8) указывает на наличие следующей зависимости: возмущения ионосферы, сопровождаемые увеличением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$), приводят к увеличению СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (σ_{φ}), уменьшению параметра распределения райсовских замираний (γ^2) принимаемого сигнала, сужению полосы когерентности ($F_{\text{к}}$) спутникового канала связи, увеличению вероятности ошибочного приема сигналов ($P_{\text{ош}}$), уменьшению пропускной способности канала связи (C).

В частном случае, отсутствия ЧСЗ и МСИ в канале спутниковой связи ($F/F_{\text{к}} \ll 1$, $\eta_{\text{ч}} = 1$, $\eta_{\text{м}} = 0$, $W_{\text{алс}} = \overline{h^2}$) выражение (7) сводится к известному виду для случая райсовских замираний [13].

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) = \frac{\gamma^2 + 1}{\overline{h^2} + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left(-\frac{\gamma^2 \overline{h^2}}{\overline{h^2} + 2(\gamma^2 + 1)}\right). \quad (7б)$$

В традиционно рассматриваемом для канала спутниковой связи случае отсутствия замираний принимаемого сигнала (когда $\gamma^2 = P_{\text{р}} / P_{\text{фл}} \rightarrow \infty$) выражение (7б) сводится к известному [5, 6] виду для некогерентного приема двоичных сигналов с частотной манипуляцией (BFSK):

$$P_{\text{ош}}(h^2) = 0,5 \exp(-0,5h^2) \quad (7в)$$

где $h^2 = E_r / N_0 = \overline{h^2} = \overline{E_r} / N_0$.

При подстановке (7в) в выражение (8) можно определить пропускную способность спутникового канала связи без замираний $C_{\text{бз}}$ и относительное уменьшение пропускной способности спутникового канала связи с ЧСЗ и МСИ (6)-(8) по сравнению с каналом без замираний: $\Delta C = C / C_{\text{бз}}$.

Тогда методика оценки пропускной способности канала спутниковой связи при возмущениях ионосферы сводится к известной работе [17], в которой получены зависимости $\Delta C = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \bar{h}^2)$ относительной пропускной способности канала спутниковой связи от изменения среднеквадратического отклонения (СКО) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T}$) в ионосфере, выбора несущей частоты (f_0) и среднего отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемника $\bar{h}^2 = \bar{E}_r / N_0$.

Отсюда следует, что при выполнении условия возникновения ЧСЗ и МСИ $F/F_k = 1/T_s F_k > 1$ пропускная способность канала спутниковой связи через функциональные зависимости (2) $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$, (3)-(7) $P_{\text{ош}} = \psi(\bar{h}^2, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ и (8) $C = \psi(P_{\text{ош}}, F)$ зависит от среднего отношения С/Ш на входе приемника (\bar{h}^2), несущей частоты (f_0) и ширины спектра частот передаваемого сигнала (F), СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$) и угла наклона распространения радиоволн (θ): $C = \psi(\bar{h}^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$. Поэтому и относительная пропускная способность канала спутниковой связи будет зависеть от тех же параметров: $\Delta C = C/C_{\text{бз}} = \psi(\bar{h}^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$.

2. Методика оценки зависимости пропускной способности канала спутниковой связи от мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы

Разработанная методика оценки является развитием работы [17] в направлении учета сужения полосы когерентности спутникового канала связи при возмущениях ионосферы, сопровождаемых возрастанием СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T}$), которые вызывают ЧСЗ и МСИ принимаемых сигналов. Эта методика включает следующие этапы:

1. Задаются исходные данные об интервалах приращений варьируемых параметров: $\sigma_{\Delta N_T}, f_0, F, R, \bar{h}^2, \theta$.

2. Определяется СКО флуктуаций фазового фронта волны с несущей частотой f_0 на выходе ионосферного слоя $\sigma_\varphi = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$ согласно выражению (1).

3. Определяется параметр распределения райсовских замираний принимаемых сигналов через величину СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (1) согласно выражению (2) $\gamma^2 = \psi(\sigma_\varphi^2)^{-1} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$.

4. Определяется полоса когерентности спутникового канала согласно выражению (3) $F_k = \psi(\sigma_\varphi^{-1}, f_0) = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$ и отношение F/F_k ширины спектра передаваемого сигнала к полосе когерентности замираний (т.е. степень ЧСЗ).

5. Определяются коэффициенты энергетических потерь при обработке сигналов из-за ЧСЗ ($\eta_{\text{ч}} \leq 1$) и МСИ ($\eta_{\text{м}} \geq 0$) согласно выражениям (4), (5): $\{\eta_{\text{ч}}, \eta_{\text{м}}\} = \psi(F / F_{\text{к}})$.

6. Определяется вероятность ошибочного приема сигналов согласно выражениям (6), (7) $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, F / F_{\text{к}}, \gamma^2) = \psi(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$.

7. Определяется пропускная способность спутникового канала связи с полосой частот F , зависящая от вероятности ошибочного приема сигналов с ЧСЗ и МСИ $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ согласно зависимости (8) $C = \psi(P_{\text{ош}}, F)$ как

$$C = F \left(1 + P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta) \log_2 P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta) + \right. \\ \left. + (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, F, f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)) \right). \quad (9)$$

8. Определяется пропускная способность спутникового канала связи без замираний, когда мелкомасштабные флуктуаций ПЭС в ионосфере отсутствуют ($\sigma_{\Delta N_T} = 0$) и в соответствии с (1)-(7) выражение (9) с учетом равенства $\overline{h^2} = h^2$ сводится к виду

$$C_{\text{бз}} = F \left(1 + P_{\text{ош}}(h^2) \log_2 P_{\text{ош}}(h^2) + (1 - P_{\text{ош}}(h^2)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(h^2)) \right), \quad (10)$$

где согласно (7в) $P_{\text{ош}}(h^2) = 0,5 \exp(-0,5h^2)$, и уменьшение пропускной способности спутникового канала связи с ЧСЗ и МСИ (9) относительно канала без замираний (10):

$$\Delta C = \frac{C}{C_{\text{бз}}} = \frac{F \left(1 + P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta) \log_2 P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta) + \right. \\ \left. + (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)) \right)}{F \left(1 + P_{\text{ош}}(h^2) \log_2 P_{\text{ош}}(h^2) + \right. \\ \left. + (1 - P_{\text{ош}}(h^2)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(h^2)) \right)}. \quad (11)$$

Таким образом, разработана усовершенствованная 8-этапная методика, позволяющая на основе аналитических выражений (2) $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, \theta, f_0)$, (7) $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ и (8) $C = \psi(P_{\text{ош}}, F)$ получить требуемую зависимость (11) $\Delta C = \psi(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ относительной пропускной способности канала спутниковой связи от отношения С/Ш на входе приемника, несущей частоты и ширины спектра передаваемого сигнала, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и угла наклона распространения радиоволн.

3. Прогнозирование пропускной способности канала спутниковой связи при возмущениях ионосферы

На основе разработанной методики выполним прогнозирование пропускной способности канала спутниковой связи для случая передачи сигналов BFSK и их некогерентного приема при различных значениях несущей частоты f_0 и ширины спектра F передаваемых сигналов и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$.

1 этап. Обоснование и конкретизация варьируемых параметров ($\sigma_{\Delta N_T}, f_0, F, \theta$), необходимых для дальнейших расчетов:

1.1. Обоснование интервала приращения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ при наклонном распространении радиоволн.

В [13] обоснованы интервалы приращений максимальных значений СКО мелкомасштабных флуктуаций электронной концентрации $\sigma_{\Delta N}$ при нормальном состоянии ионосферы и ее естественных и искусственных возмущениях. В [17] обоснованы соответствующие $\sigma_{\Delta N}$ приращения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы при вертикальном распространении радиоволн (1а) $\sigma_{\Delta N_T} = (\pi^{1/2} l_s h_3)^{1/2} \sigma_{\Delta N}$, рассчитанные при $h_3 = 5 \cdot 10^5$ м, $l_s = 400$ м. В таблице 1 для различных состояний ионосферы приведены значения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы при наклонном распространении радиоволн $\sigma_{\Delta N_T}(\theta) = \sigma_{\Delta N_T} \sec \theta$ под углом $\theta = 60^\circ$.

Таблица 1 – СКО флуктуаций ПЭС при различных состояниях ионосферы

Состояния и параметры неоднородной ионосферы	Нормальная (невозмущенная) ионосфера (НИ), день	Естественные возмущения ионосферы (ЕВИ)	Слабые искусственные возмущения ионосферы (ИВИ)	Сильные искусственные возмущения ионосферы (СИВИ)
вертикальное СКО ПЭС $\sigma_{\Delta N_T}$ [М ⁻²]	$8 \cdot 10^{13}$	10^{15}	10^{17}	10^{18}
наклонное СКО ПЭС $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ [М ⁻²]	$1,6 \cdot 10^{14}$	$1,9 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^{17}$	$1,9 \cdot 10^{18}$

Заметим, что фактические значения наклонного СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ могут быть получены комплексом прогнозирования помехоустойчивости ССС на основе GPS-зондирования ионосферы [19, 20].

1.2. Выбор несущих частот в ССС.

В качестве примера будем рассматривать несущие частоты $f_0 = 390$ МГц (в Р – диапазоне), $f_0 = 2,2$ ГГц (в S – диапазоне), которые входят в диапазон рабочих частот ССС Гонец–Д1М [26, 27].

1.3. Выбор ширины спектра частот сигналов ССС.

При проведении расчетов рассматривались полосы частот каналов для абонентских терминалов ССС Гонец–Д1М [26, 27]: $F=9,6$ кГц; $F=38,4$ кГц; $F=76,8$ кГц; $F=128$ кГц; $F=256$ кГц.

1.4. Выбор угла наклона распространения радиоволн θ .

При движении космического аппарата ССС угол наклона приходящей к приемнику волны может изменяться в интервале $\theta = 0^\circ \dots 85^\circ$. При проведении расчетов использовался угол наклона $\theta = 60^\circ$.

2 этап. В диапазоне (см. табл. 1) возможных значений СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,6 \cdot 10^{14} \dots 1,9 \cdot 10^{18} (\text{м}^{-2})$ с учетом угла наклона распространения радиоволн $\theta=60^\circ$ для двух значений несущей частоты ССС ($f_0 = 390$ МГц; $f_0 = 2,2$ ГГц) по формуле (1) определяется зависимость $\sigma_\varphi = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$ СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ ионосферы (рис. 2).

Анализ графиков (рис. 2) показывает, что при увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы с $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ (соответствующих (см. табл. 1) нормальной (НИ) ионосфере) до $\sigma_{\Delta N_T} = 1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ (при сильных искусственных возмущениях ионосферы (СИВИ)) и уменьшении несущей частоты с $f_0=2200$ ГГц до $f_0=390$ МГц СКО флуктуации фазового фронта возрастают в очень широком интервале $\sigma_\varphi \approx 6 \cdot 10^{-2} \dots 4 \cdot 10^3$ рад.

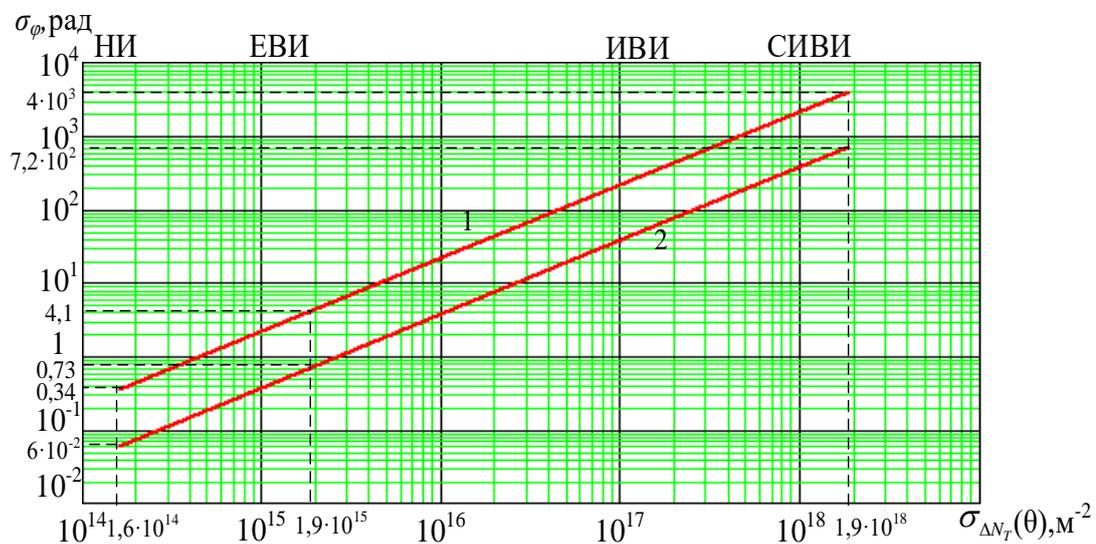


Рис. 2. Зависимость СКО флуктуации фазового фронта выходной волны σ_φ от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ при $\theta=60^\circ$ для двух значений несущей частоты: 1) $f_0=390$ МГц; 2) $f_0=2,2$ ГГц

3 этап. Согласно выражению (2) определяется зависимость $\gamma^2 = \psi(\sigma_\varphi^2)^{-1} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$ параметра райсовского распределения общих замираний принимаемого сигнала от СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (рис. 3) в диапазоне его значений $\sigma_\varphi \approx 6 \cdot 10^{-2} \dots 10$ рад.

Анализ рис. 3 показывает, что при СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны $\sigma_\varphi = 6 \cdot 10^{-2}$ рад параметр Райса составляет $\gamma^2 = 2,7 \cdot 10^2$, при $\sigma_\varphi \rightarrow 10$ рад параметр Райса $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \rightarrow 0$ (что соответствует случаю релейских замираний).

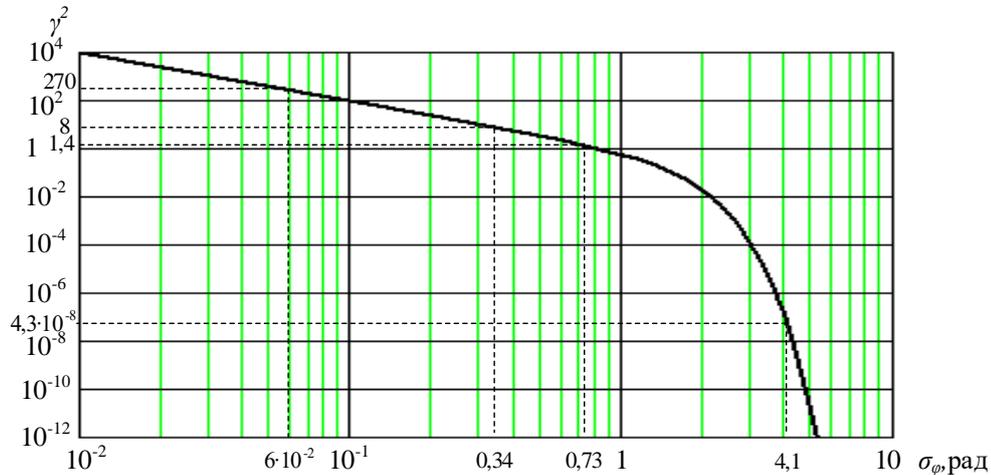


Рис. 3. Зависимость параметра Райса (γ^2) от СКО флуктуации фазового фронта волны в диапазоне $\sigma_\varphi \approx 6 \cdot 10^{-2} \dots 10$ рад

Анализ рис. 2 и рис. 3 показывает, что в условиях нормальной дневной ионосферы (НИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$) в диапазоне несущих частот $f_0 = 390 \text{ МГц} \dots 2,2 \text{ ГГц}$ флуктуации фазового фронта выходной волны очень малы $\sigma_\varphi = 6 \cdot 10^{-2} \dots 0,34$ рад. Это обуславливает отсутствие или очень малую глубину замираний принимаемых сигналов, соответствующих значениям параметра Райса $\gamma^2 \approx 270$ рад на несущей частоте $f_0 = 2,2 \text{ ГГц}$ и $\gamma^2 \approx 8$ на частоте $f_0 = 390 \text{ МГц}$.

В условиях естественных возмущений ионосферы (ЕВИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$) в диапазоне несущих частот $f_0 = 390 \text{ МГц} \dots 2,2 \text{ ГГц}$ флуктуации фазового фронта выходной волны возрастают до $\sigma_\varphi = 0,73 \dots 4,1$ рад. Это приводит к уменьшению параметра Райса до $\gamma^2 \approx 1,4 \dots 4,3 \cdot 10^{-8}$, что соответствует случаю глубоких замираний почти релейского типа.

В условиях искусственных (ИВИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$) и сильных искусственных (СИВИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$) возмущений ионосферы в диапазоне несущих частот $f_0 = 390 \text{ МГц} \dots 2,2 \text{ ГГц}$ флуктуации фазового фронта выходной волны возрастают до значений $\sigma_\varphi \gg 10$ рад. Это приводит к уменьшению параметра Райса до $\gamma^2 \ll 10^{-12}$, что соответствует общим (неселективным) замираниям релейского типа.

4 этап. Согласно выражению (3) определяется зависимость (рис. 4) полосы когерентности замираний $F_k = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$ принимаемого в спутниковом

канале связи сигнала от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС (с учетом угла наклона распространения радиоволн $\theta=60^\circ$) при 4 состояниях ионосферы (НИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$; ЕВИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$; ИВИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$; СИВИ, $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$) для двух значений несущей частоты ССС: 1) $f_0=390 \text{ МГц}$; 2) $f_0=2,2 \text{ ГГц}$.

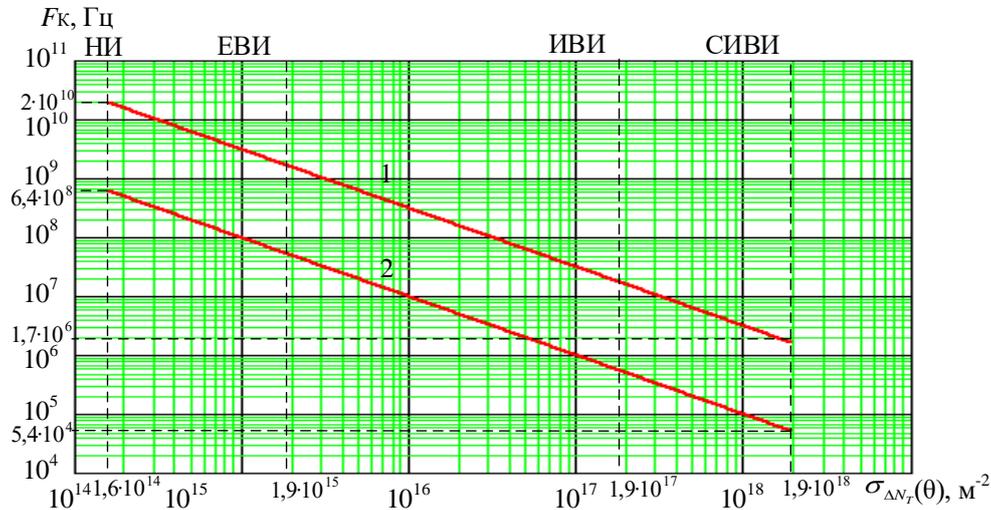


Рис. 4. Зависимость полосы когерентности F_k от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ при двух значениях несущей частоты: 1) $f_0=2,2 \text{ ГГц}$; 2) $f_0=390 \text{ МГц}$

Анализ рис. 4 показывает, что полоса когерентности F_k замираний в спутниковом канале сужается по мере увеличения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ и понижения несущей частоты f_0 сигнала. При возрастании СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы с величины $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$, характерной для НИ до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$, характерной для СИВИ, при выборе несущей частоты S-диапазона $f_0=2,2 \text{ ГГц}$ полоса когерентности замираний в спутниковом канале сужается с $F_k \approx 20 \text{ ГГц}$ до $F_k \approx 1,7 \text{ МГц}$. При выборе более низкой несущей частоты Р-диапазона $f_0=390 \text{ МГц}$ полоса когерентности замираний в спутниковом канале сужается с $F_k \approx 640 \text{ МГц}$ до $F_k \approx 54 \text{ кГц}$.

Поскольку выбор несущей частоты f_0 в ССС имеет большое значение для определения полосы когерентности замираний $F_k = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \theta)$ в условиях возмущений ионосферы (что подтверждается квадратичной зависимостью (3) $F_k \sim f_0^2 / \sigma_{\Delta N_T} \sec \theta$), то на рис. 5 приведена ее зависимость $F_k = \psi(f_0)$ от несущей частоты f_0 при 4 состояниях ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$: 1) НИ ($1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$), 2) ЕВИ ($1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$), 3) ИВИ ($1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$), 4) СИВИ ($1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$).

Анализ рис. 5 показывает, что при выборе наиболее низкой несущей частоты Р – диапазона $f_0=200 \text{ МГц}$ полоса когерентности замираний в спутниковом канале при СИВИ сужается до $F_k \approx 30 \text{ кГц}$, а при выборе несущей частоты X – диапазона $f_0=10 \text{ ГГц}$ полоса когерентности замираний в спутниковом канале сужается при СИВИ только до $F_k \approx 2 \text{ МГц}$.

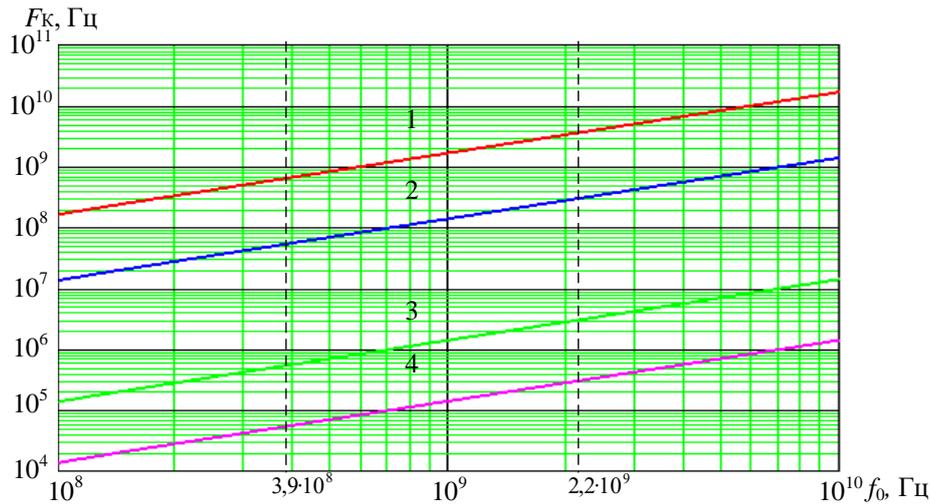


Рис. 5. Зависимость полосы когерентности F_k от несущей частоты f_0 сигналов при 4 состояниях ионосферы: 1) НИ; 2) ЕВИ; 3) ИВИ; 4) СИВИ

5 этап. Согласно выражениям (4), (5) определяются зависимости (рис. 6) коэффициентов энергетических потерь при обработке сигналов с ЧСЗ $\eta_{\text{ч}} = \psi(F/F_k)$ и МСИ $\eta_{\text{м}} = \psi(1/T_s F_k)$ от отношения $F/F_k = 1/T_s F_k$ ширины спектра (F) простых сигналов ($F = 1/T_s$) к полосе когерентности ионосферы (F_k).

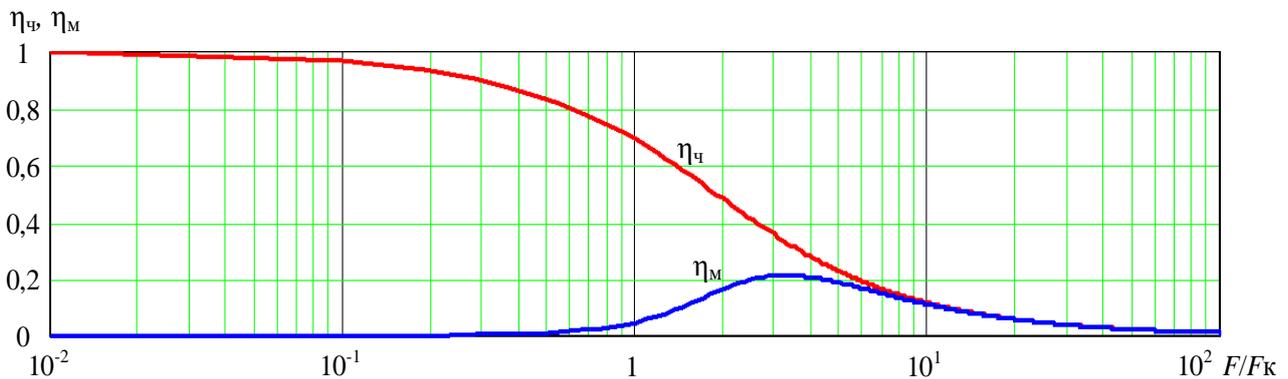


Рис. 6. Зависимость коэффициентов энергетических потерь при обработке сигналов с ЧСЗ ($\eta_{\text{ч}} \leq 1$) и МСИ ($\eta_{\text{м}} \geq 0$) от отношения $F/F_k = 1/T_s F_k$ ширины спектра сигналов к полосе когерентности ионосферы

Анализ графиков на рис. 6, приведенных в [18], показывает, что сужение полосы когерентности (F_k) ионосферы и увеличение степени ЧСЗ и МСИ принимаемых сигналов (F/F_k) приводит к уменьшению коэффициента энергетических потерь при обработке сигналов с ЧСЗ от $\eta_{\text{ч}}=1$ (при выполнении условия отсутствия ЧСЗ: $F/F_k \ll 1$) до $\eta_{\text{ч}}=0$ (при сильных ЧСЗ: $F/F_k \gg 1$). Коэффициент энергетических потерь при обработке сигналов с МСИ достигает максимального значения от $\eta_{\text{м}}=0,21$ при $F/F_k=3,3$, а затем убывает до $\eta_{\text{м}}=0$, сливаясь с кривой $\eta_{\text{ч}}$.

6 этап. Определяются зависимости (6), (7) вероятности ошибочного приема сигналов BFSK $P_{\text{ош}} = \psi(h^2, F/F_k, \gamma^2) = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ от отношения

С/Ш на входе приемника ССС $\overline{h^2} = h^2 = 10^{-1} \dots 10^4$ при различных частотных параметрах (f_0, F) передаваемых сигналов и состояниях ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$.

На рис. 7а-7в показаны результаты прогнозирования зависимости $P_{\text{ош}} = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ вероятности ошибочного приема ($P_{\text{ош}}$) сигналов BFSK от отношения С/Ш на входе приемника $\overline{h^2} = h^2$ при четырех состояниях ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ (1 – НИ ($1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$); 2 – ЕВИ ($1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$); 3 – ИВИ ($1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$); 4 – СИВИ ($1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$)) и передаче сигналов на несущей частоте $f_0 = 390 \text{ МГц}$ при различной ширине спектра: а) $F = 9,6 \text{ кГц}$; б) $F = 38,4 \text{ кГц}$; в) $F = 76,8 \text{ кГц}$.

На рис. 7г-7е показаны результаты прогнозирования зависимости $P_{\text{ош}} = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ при тех же состояниях ионосферы (1 – НИ, 2 – ЕВИ; 3 – ИВИ; 4 – СИВИ) и передаче сигналов на более высокой несущей частоте $f_0 = 2,2 \text{ ГГц}$ при более широком спектре частот: г) $F = 38,4 \text{ кГц}$; д) $F = 128 \text{ кГц}$; е) $F = 256 \text{ кГц}$.

Пунктирными линиями на рис. 7 показаны графики оценки помехоустойчивости некогерентного приема сигналов BFSK без замираний: $P_{\text{ош}}(h^2) = 0,5 \exp(-0,5h^2)$.

Анализ приведенных на рис. 7а...7в зависимостей $P_{\text{ош}} = \psi(h^2, F/F_k, \gamma^2) = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ показывает, что при НИ (графики 1) и выборе несущей частоты $f_0 = 390 \text{ МГц}$ и ширине спектра сигналов $F = 9,6 \dots 76,8 \text{ кГц}$ согласно рис. 3-5 выполняются условия отсутствия ЧСЗ и МСИ ($F/F_k \ll 1$) и возникновения неглубоких райсовских замираний ($\gamma^2 = 8$). В этом случае при реализации отношения С/Ш на входе приемника $h^2 = 31$ (т.е. 15 дБ) обеспечивается вероятность ошибки $P_{\text{ош}} \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$.

При ЕВИ (графики 2) выполняется условие возникновения релейских замираний ($\gamma^2 \approx 0$) и поэтому при $h^2 = 31$ обеспечивается более высокая вероятность ошибки $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$.

При ИВИ (графики 3) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F = 76,8 \text{ кГц}$ (см. рис. 7в) появляются признаки выполнения условия возникновения ЧСЗ и МСИ (поскольку $F_k = 538,6 \text{ кГц}$ и поэтому $F/F_k = 0,143$). В этом случае коэффициенты энергетических потерь согласно рис. 6 малы ($\eta_{\text{ч}} = 0,95$, $\eta_{\text{м}} = 1,084 \cdot 10^{-3}$) и поэтому при реализации $h^2 = 31$ обеспечивается небольшое возрастание вероятности ошибки до $P_{\text{ош}} \approx 3,3 \cdot 10^{-2}$.

При СИВИ (графики 4) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F = 76,8 \text{ кГц}$ (см. рис. 7в) выполняются условия возникновения ЧСЗ и МСИ (поскольку $F_k = 53,86 \text{ кГц}$ и поэтому $F/F_k = 1,425$). В этом случае коэффициенты энергетических потерь согласно рис. 6 достигают значений $\eta_{\text{ч}} = 0,591$, $\eta_{\text{м}} = 0,106$ и поэтому при $h^2 = 31$ обеспечивается существенное возрастание вероятности ошибки (до $P_{\text{ош}} \approx 1,7 \cdot 10^{-1}$) и появляется неустранимая ошибка (когда увеличение h^2 не приводит к уменьшению $P_{\text{ош}}$).

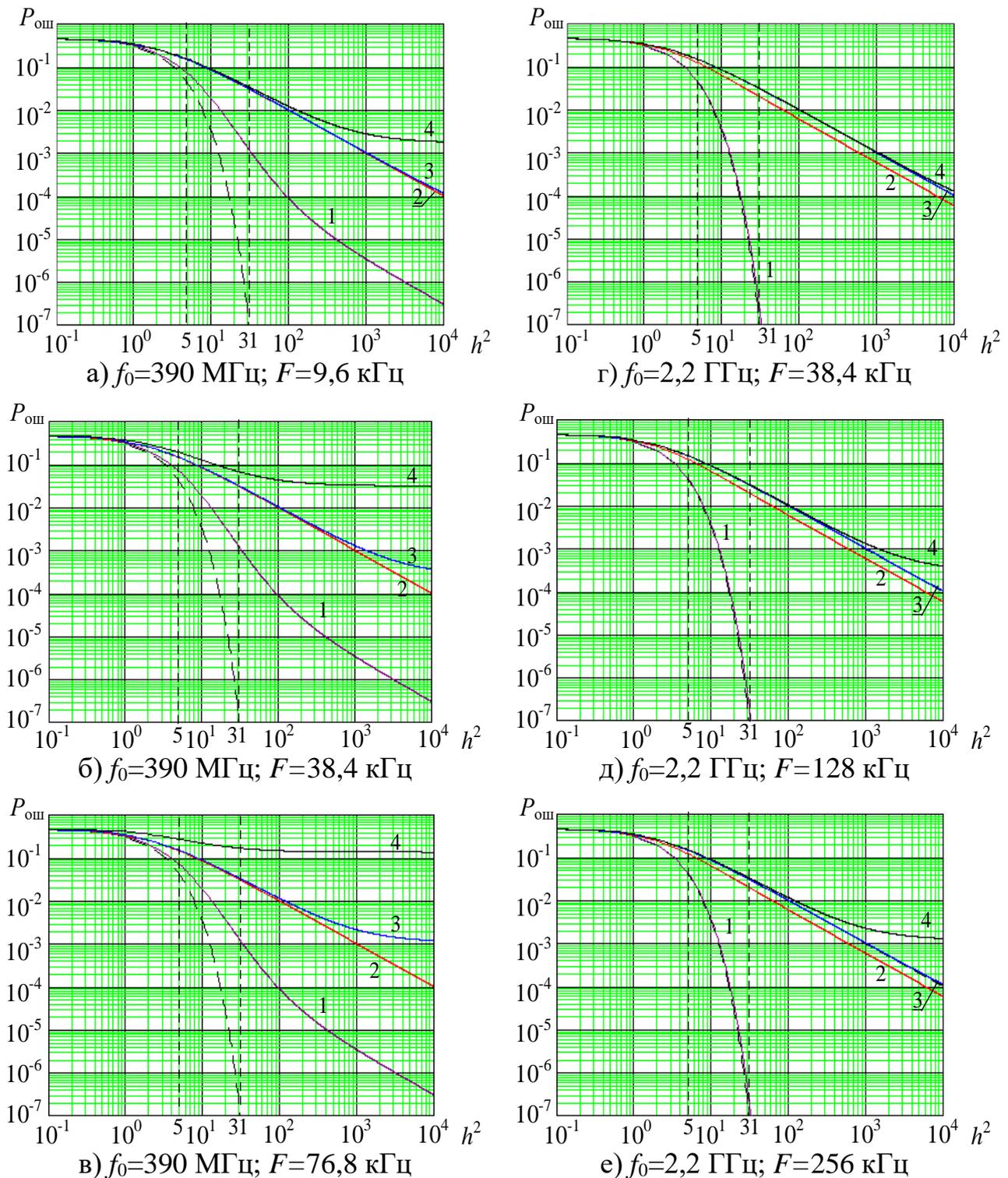


Рис. 7. Прогноз вероятности ошибки от отношения С/Ш на входе приемника ССС при различных значениях несущей частоты f_0 и ширины спектра F сигнала для 4-х состояний ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$: 1) НИ; 2) ЕВИ; 3) ИВИ; 4) СИВИ

Анализ приведенных на рис. 7г...7е зависимостей $P_{\text{ош}} = \psi(h^2, F/F_k, \gamma^2) = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ показывает, что при увеличении несущей частоты до $f_0=2,2$ ГГц в условиях НИ (графики 1) замирания в канале спутниковой связи будут отсутствовать (графики 1 совпадают с пунктирными линиями). В этом

случае при реализации $h^2=31$ обеспечивается очень маленькая вероятность ошибки $P_{\text{ош}} \approx 10^{-7}$.

При ЕВИ (графики 2) возникают глубокие замирания, близкие к релейским. При ИВИ (графики 3) возникают релейские замирания. В этом случае при реализации $h^2=31$ обеспечивается вероятность ошибки $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$.

В случае СИВИ (график 4) при увеличении ширины спектра частот сигнала до $F=256$ кГц (см. рис. 7е) появляются признаки выполнения условий возникновения ЧСЗ и МСИ (поскольку $F_k=1,7$ МГц и поэтому $F/F_k=0,149$). В этом случае коэффициенты энергетических потерь малы: $\eta_{\text{ч}}=0,947$, $\eta_{\text{м}}=1,13 \cdot 10^{-3}$ и при реализации $h^2=31$ обеспечивается небольшое увеличение вероятности ошибки до $P_{\text{ош}} \approx 3,3 \cdot 10^{-2}$.

7 этап. Согласно выражению (9) определяется (рис. 8) зависимость $C = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ пропускной способности спутникового канала связи с ЧСЗ и МСИ от отношения С/Ш на входе приемника ССС $\overline{h^2} = h^2 = 10^{-1} \dots 10^4$ при таких же, как на рис. 7 значениях частотных параметров сигналов ($f_0=390$ МГц, 2,2 ГГц; $F=9,6 \dots 256$ кГц) и состояниях $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ ионосферы: 1 – НИ ($1,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$); 2 – ЕВИ ($1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$); 3 – ИВИ ($1,9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$); 4 – СИВИ ($1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$).

Пунктирными линиями на рис. 8 показаны графики зависимости (10) пропускной способности канала связи без замираний от входного отношения С/Ш $\overline{h^2} = h^2$: $C_{\text{бз}} = \psi(P_{\text{ош}}(h^2))$, где $P_{\text{ош}}(h^2) = 0,5 \exp(-0,5h^2)$.

Анализ рис. 8а...8в показывает, что при несущей частоте $f_0=390$ МГц в условиях НИ (графики 1) пропускная способность канала спутниковой связи соответствует случаю неглубоких райсовских замираний ($\gamma^2=8$). При ЕВИ (графики 2) пропускная способность соответствует случаю возникновения релейских замираний ($\gamma^2 \approx 0$).

При ИВИ (графики 3) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F=76,8$ кГц (см. рис. 8в) пропускная способность канала спутниковой связи немного снижается по сравнению со случаем релейских замираний, поскольку появляются признаки выполнения условия возникновения ЧСЗ и МСИ (т.к. $F_k=538,6$ кГц и $F/F_k=0,143$).

При СИВИ (графики 4) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F=76,8$ кГц (см. рис. 8в) выполняются условия возникновения ЧСЗ и МСИ (поскольку $F_k=53,86$ кГц и $F/F_k=1,425$). Поэтому пропускная способность канала спутниковой связи существенно снижается по сравнению со случаем релейских замираний.

При увеличении несущей частоты до $f_0=2,2$ ГГц (рис. 8г...8е) в условиях НИ (графики 1) пропускная способность канала спутниковой связи соответствует случаю отсутствия замираний (графики 1 совпадают с пунктирными линиями).

При ЕВИ (графики 2) пропускная способность соответствует случаю возникновения глубоких райсовских замираний, а при ИВИ (графики 3) – релей-

ских замираний. В случае СИВИ (график 4) при увеличении ширины спектра частот сигнала до $F=256$ кГц (см. рис. 7е) появляются признаки выполнения условий возникновения ЧСЗ и МСИ (поскольку $F_k=1,7$ МГц и $F/F_k=0,149$). В этом случае снижение пропускной способности будет незначительным по сравнению со случаем релеевских замираний.

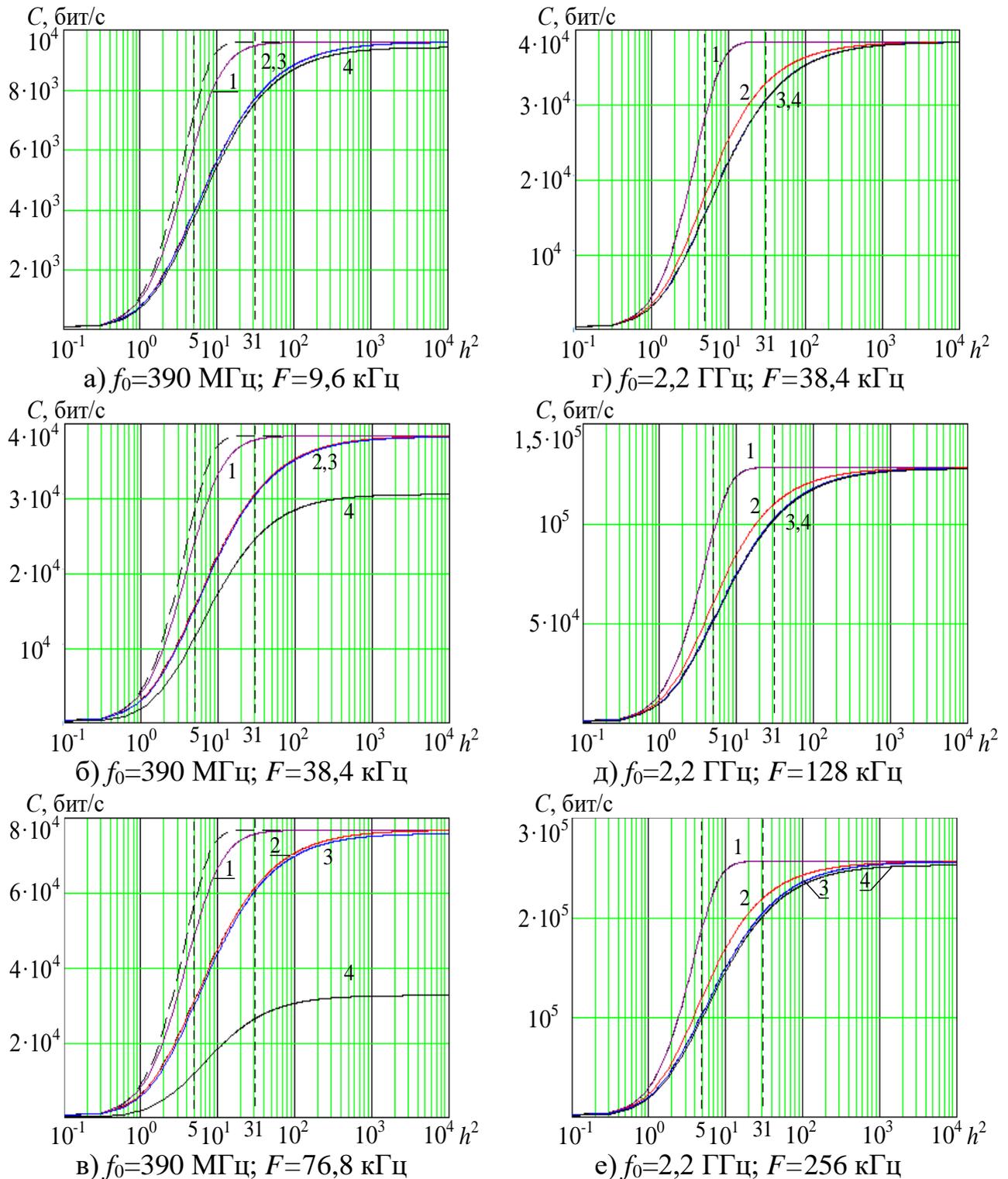


Рис. 8. Прогноз пропускной способности спутникового канала связи от входного отношения С/Ш при различных частотных параметрах сигнала (f_0, F) для 4-х состояний ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$: 1) НИ; 2) ЕВИ; 3) ИВИ; 4) СИВИ

8 этап. Согласно выражению (11) определяется (рис. 9) зависимость $\Delta C = C/C_{\text{бз}} = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ уменьшения пропускной способности спутникового канала связи от отношения С/Ш $\bar{h}^2 = h^2$ относительно канала связи без замираний при различных параметрах сигналов (f_0, F) и состояниях ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$), рассмотренных на 6, 7 этапах. Для сравнения пунктирными линиями обозначены графики, соответствующие замираниям релейского типа.

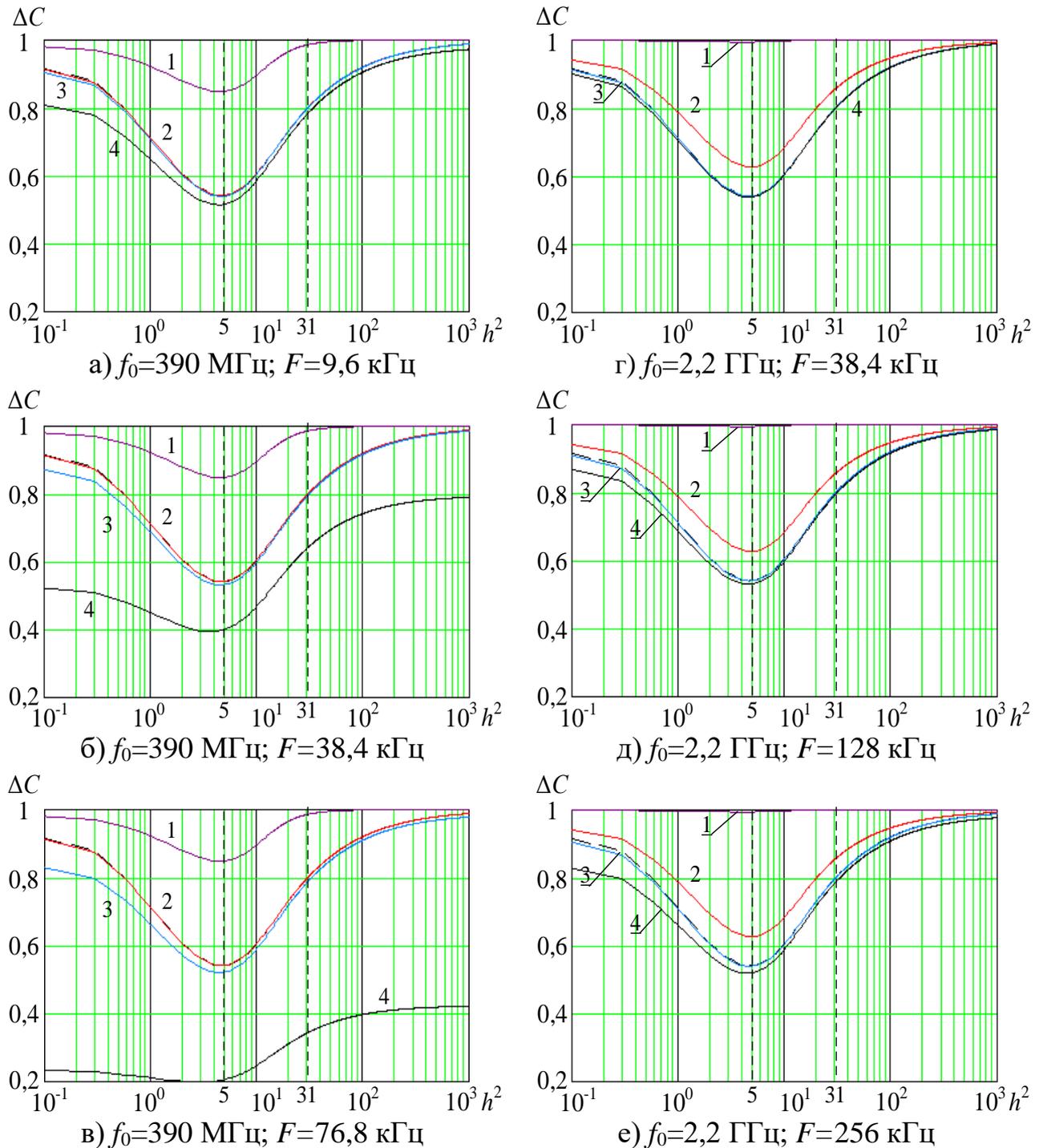


Рис. 9. Прогноз уменьшения пропускной способности $\Delta C = C/C_{\text{бз}}$ канала связи с ЧЗЗ и МСИ от отношения С/Ш на входе приемника при 4 состояниях ионосферы: 1) НИ; 2) ЕВИ; 3) ИВИ; 4) СИВИ, различных значениях несущей частоты f_0 и полосы спектра частот сигнала F

Анализ рис. 9а...9в показывает, что при выборе несущей частоты $f_0=390$ МГц в условиях НИ (графики 1) пропускная способность канала спутниковой связи при реализации отношения С/Ш на входе приемника ССС $\overline{h^2} = h^2=31$ будет такой же, как в канале связи без замираний, т.е. $\Delta C = C/C_{\text{бз}}=1$. При ЕВИ (графики 2) и ИВИ (графики 3) пропускная способность канала спутниковой связи практически соответствует случаю релеевских замираний. Поэтому при реализации $h^2=31$ относительная пропускная способность канала спутниковой составляет $\Delta C = C/C_{\text{бз}} \approx 0,8$ (т.е. уменьшается на 20% по сравнению с каналом без замираний).

При ИВИ (графики 3) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F=38,4$ кГц (см. рис. 9б) в канале спутниковой связи появляются признаки выполнения условий возникновения ЧСЗ и МСИ ($F/F_k=0,149$). При реализации $h^2=31$ относительная пропускная способность канала спутниковой составляет $\Delta C = C/C_{\text{бз}} \approx 0,8$ (т.е. уменьшается на 20% по сравнению с каналом без замираний).

При СИВИ (графики 4) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F=76,8$ кГц (см. рис. 9в) в канале спутниковой связи выполняются условия возникновения ЧСЗ и МСИ ($F/F_k=1,425$). Поэтому при реализации $h^2=31$ относительная пропускная способность канала спутниковой составляет $\Delta C = C/C_{\text{бз}} \approx 0,35$ (т.е. уменьшается на 65% по сравнению с каналом без замираний).

Заметим, что в условиях СИВИ при реализации меньшего отношения С/Ш на входе приемника ССС $h^2=5$ (т.е. 7дБ) относительная пропускная способность канала спутниковой связи снижается до $\Delta C = C/C_{\text{бз}} \approx 0,2$ (т.е. уменьшается на 80% по сравнению с каналом без замираний).

При увеличении несущей частоты до $f_0=2,2$ ГГц (рис. 9г...9е) даже в условиях СИВИ (графики 4) и выборе наибольшей ширины спектра сигналов $F=256$ кГц (см. рис. 9е) в канале спутниковой связи появляются признаки выполнения условий возникновения ЧСЗ и МСИ ($F/F_k=0,149$). Поэтому при реализации $h^2=31$ относительная пропускная способность канала спутниковой связи незначительно снижается по сравнению со случаем релеевских замираний и составляет $\Delta C = C/C_{\text{бз}} \approx 0,79$ (т.е. уменьшается на 21% по сравнению с каналом без замираний).

Таким образом, разработана 8-этапная методика прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы и возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции. В результате получена зависимость $\Delta C = \psi(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_r}, \theta)$ пропускной способности канала спутниковой связи с ЧСЗ и МСИ относительно случая отсутствия замираний от отношения С/Ш на входе приемника, несущей частоты и ширины спектра передаваемого сигнала, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и угла наклона распространения радиоволн. На основе этой зависимости проведено

прогнозирование пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы для случая передачи сигналов с частотной манипуляцией (BFSK). Установлено, что в условиях сильных искусственных возмущений ионосферы (см. рис. 9в, график 4) и выборе типовой для ССС Гонец-Д1М несущей частоты $f_0=390$ МГц и ширины спектра $F=76,8$ кГц сигналов в канале спутниковой связи выполняются условия возникновения ЧСЗ и МСИ ($F/F_k=1,425$). Поэтому при реализации $h^2=31$ относительная пропускная способность канала спутниковой связи уменьшается на 65% по сравнению с каналом без замираний и составляет $\Delta C = C/C_{\text{б3}} \approx 0,35$.

Решение этих задач позволяет обосновать рекомендации по выбору частотно-временных параметров сигнала системы спутниковой связи (ССС) с целью устранения частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции для повышения пропускной способности канала спутниковой связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы.

4. Рекомендации по выбору параметров сигналов ССС для устранения частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции и повышения пропускной способности канала спутниковой связи

В соответствии с приведенными на рис. 9в графиками зависимостей $\Delta C = \psi(h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ на рис. 10 показаны результаты прогнозирования относительной пропускной способности канала спутниковой связи при реализации отношения С/Ш на входе приемника $h^2=31$ и выборе сигналов с различной несущей частотой: 1) $f_0=390$ МГц; 2) $f_0=2,2$ ГГц и одинаковой шириной спектра $F=76,8$ кГц в зависимости от:

а) СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ при угле наклона распространения радиоволн $\theta=60^\circ$;

б) отношения F/F_k ширины спектра сигнала $F=76,8$ кГц к полосе когерентности ионосферы $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$.

Анализ рис. 10 показывает, что при отношении С/Ш $h^2=31$ (15 дБ), на более низкой несущей частоте ССС $f_0=390$ МГц (рис. 10а, график 1) в условиях НИ с увеличением СКО флуктуаций ПЭС в 5 раз в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{14} \dots 6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ происходит уменьшение относительной пропускной способности канала спутниковой связи с $\Delta C = C/C_{\text{б3}} = 1$ до 0,8 (т.е. на 20%). В условиях ЕВИ при увеличении СКО флуктуаций ПЭС с $\sigma_{\Delta N_T} \approx 1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{17} \text{ м}^{-2}$ относительная пропускная способность канала спутниковой связи сохраняется на уровне $\Delta C = C/C_{\text{б3}} = 0,8$, что характерно для канала с релеевскими замираниями. В условиях ИВИ и СИВИ при возрастании СКО флуктуаций ПЭС в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 2 \cdot 10^{17} \dots 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ относительная пропускная способность канала спутниковой связи снижается с $\Delta C = C/C_{\text{б3}} = 0,8$ до значения $\Delta C = C/C_{\text{б3}} = 0,35$, что характерно для канала спутниковой связи с ЧСЗ и МСИ.

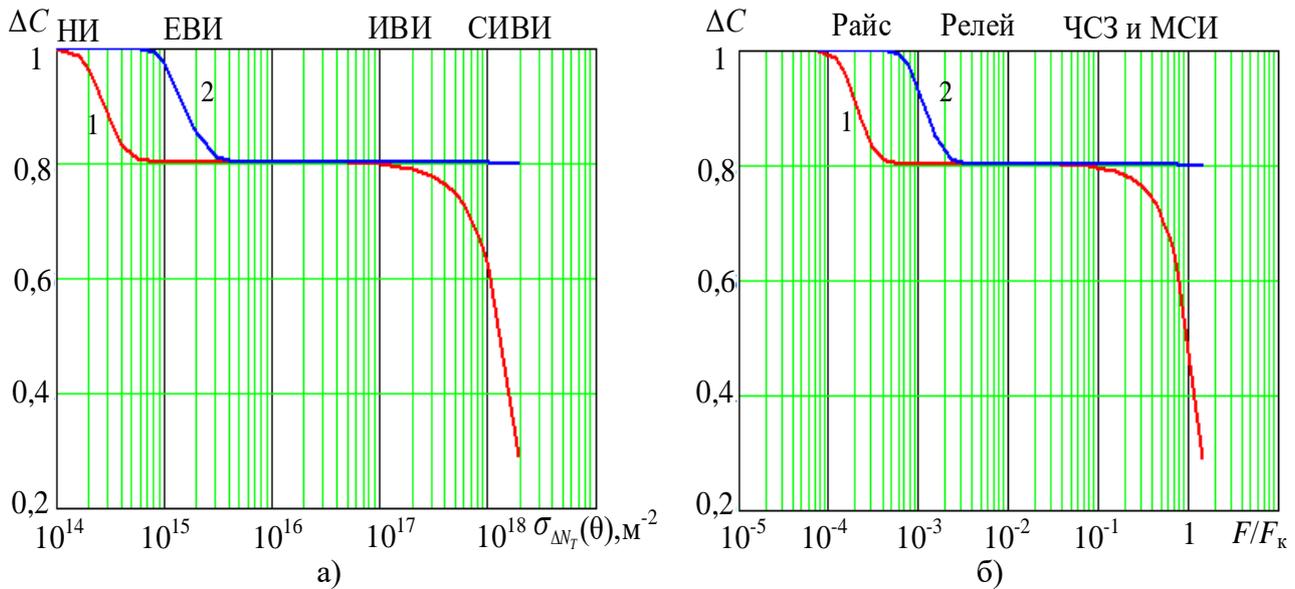


Рис. 10. Прогноз относительной пропускной способности ΔC в зависимости от а) СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$; б) отношения F/F_k при несущей частоте: 1. $f_0=390$ МГц; 2. $f_0=2,2$ ГГц, полосе спектра частот сигнала $F=76,8$ кГц, отношении С/Ш на входе приемника $h^2=31$ (15 дБ)

При увеличении несущей частоты до $f_0=2,2$ ГГц (рис. 10а, график 2) возрастание СКО флуктуаций ПЭС в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 2 \cdot 10^{17} \dots 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$, соответствующем возникновению ИВИ и СИВИ, относительная пропускная способность остается неизменной на уровне $\Delta C = C/C_{\text{ос}} = 0,8$, что характерно для канала спутниковой связи с релейевскими замираниями.

Анализ рис. 10б показывает, что при отношении С/Ш $h^2=31$ и низкой несущей частоте ССС ($f_0=390$ МГц) на графике 1 появляется снижение по сравнению с величиной $\Delta C=0,8$ относительной пропускной способности канала спутниковой связи из-за появления ЧСЗ и МСИ принимаемых сигналов. Если в качестве критерия допустимого снижения относительной пропускной способности канала спутниковой связи из-за ЧСЗ и МСИ принять величину 1% (т.е. до $\Delta C=0,79$), то согласно рис. 10б уточненное условие отсутствия ЧСЗ и МСИ в канале спутниковой связи можно записать в следующем виде:

$$F/F_k \leq 0,15, \text{ или } F \leq 0,15F_k. \quad (12)$$

Обеспечить выполнение условия (12) можно 2 путями:

1) за счет уменьшения ширины спектра передаваемого сигнала F по результатам предварительного расчета согласно (3) полосы когерентности замираний $F_k = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ в спутниковом канале связи на основе известных значений несущей частоты f_0 сигнала и угла θ наклона его распространения и результатов мониторинга СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$;

2) за счет повышения несущей частоты f_0 сигнала при заданной ширине его спектра с целью расширения полосы когерентности замираний

$F_k = \Psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}(\theta))$ в спутниковом канале связи на основе мониторинга СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$.

Возможность реализации 1-го пути подтверждается анализом рис. 9а, 9в и рис. 5. При передаче в ССС под углом $\theta=60^\circ$ сигнала с несущей частотой $f_0=390$ МГц в условиях СИВИ (когда $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)=1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$) полоса когерентности замираний в спутниковом канале связи согласно рис. 5 составляет $F_k \approx 54$ кГц. Поэтому при передаче сигнала с шириной спектра $F=76,8$ кГц условие (12) $F \leq 0,15F_k$ отсутствия ЧСЗ и МСИ не выполняется и относительная пропускная способность канала спутниковой связи согласно рис. 9в составляет $\Delta C = C/C_{\text{б3}}=0,35$ (т.е. на 65 % ниже, чем при отсутствии замираний). Однако при сужении ширины спектра сигнала до $F=9,6$ кГц условие (12) $F \leq 0,15F_k$ почти выполняется и относительная пропускная способность канала спутниковой связи согласно рис. 9а составляет $\Delta C = C/C_{\text{б3}}=0,79$. Это на 21% ниже, чем при отсутствии замираний и на 44% больше, чем при передаче сигнала с шириной спектра $F=76,8$ кГц при возникновении ЧСЗ и МСИ.

Возможность реализации 2-го пути подтверждается анализом рис. 9д и рис. 5. При передаче в ССС под углом $\theta=60^\circ$ сигнала с несущей частотой $f_0=2,2$ ГГц в условиях СИВИ (когда $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)=1,9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$) полоса когерентности замираний в спутниковом канале связи согласно рис. 5 составляет $F_k \approx 1,7$ МГц. Поэтому условие (12) $F \leq 0,15F_k$ отсутствия ЧСЗ и МСИ выполняется даже при передаче сигнала с шириной спектра $F=128$ кГц и относительная пропускная способность канала спутниковой связи согласно рис. 9д составляет $\Delta C = C/C_{\text{б3}}=0,8$ (т.е. на 20 % ниже, чем при отсутствии замираний).

Таким образом, рекомендации по выбору частотных параметров (f_0, F) передаваемых сигналов ССС для повышения пропускной способности канала спутниковой связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы сводятся к необходимости выполнения уточненного условия (12) отсутствия ЧСЗ и МСИ.

Выводы

На основе анализа процесса распространения радиоволн в ССС через мелкомасштабное ионосферное образование и возникновения замираний принимаемых сигналов (рис. 1) разработана 8-этапная методика прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы и возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции. В результате получена зависимость (11) $\Delta C = \Psi(\overline{h^2}, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}, \theta)$ пропускной способности канала спутниковой связи с ЧСЗ и МСИ относительно случая отсутствия замираний от отношения С/Ш на входе приемника, несущей частоты и ширины спектра передаваемого сигнала, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и угла наклона распространения радиоволн.

На основе этой зависимости проведено прогнозирование пропускной способности канала спутниковой связи на основе результатов мониторинга СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$ при ее возмущениях для случая передачи сигналов с частотной манипуляцией. Установлено, что в условиях сильных искусственных возмущений ионосферы (рис. 9) и выборе типовой для ССС Гонец-Д1М несущей частоты $f_0=390$ МГц и ширины спектра $F=76,8$ кГц сигналов в канале спутниковой связи выполняются условия возникновения ЧСЗ и МСИ ($F/F_k=1,425$). Поэтому при реализации $h^2=31$ относительная пропускная способность канала спутниковой связи уменьшается на 65% по сравнению с каналом без замираний и составляет $\Delta C = C/C_{03} \approx 0,35$.

По результатам решения задачи прогнозирования обоснованы рекомендации по выбору частотных параметров (f_0, F) передаваемых сигналов ССС для повышения пропускной способности канала спутниковой связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы на основе результатов мониторинга СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\theta)$, которые сводятся к необходимости выполнения уточненного условия (12) $F/F_k \leq 0,15$ устранения ЧСЗ и МСИ принимаемых сигналов.

В дальнейшем планируется развитие разработанной методики в направлении прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы при использовании частотно-эффективных сигналов с многократной фазовой (PSK) и квадратурно-амплитудной модуляции (QAM).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00295 (<https://rscf.ru/project/24-21-00295/>).

Литература

1. Yasyukevich Y. V., Kiselev A. V., Zhivetiev I. V., Edemskiy I. K., Syrovatskii S. V., Maletckii B. M., Vesnin A. M. SIMuRG: System for ionosphere monitoring and research from GNSS // GPS Solutions. 2020. Vol. 24. No. 3. P. 1–12. DOI: 10.1007/s10291-020-00983-2.
2. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems // Journal of interdisciplinary research. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 367–375. DOI: 10.33543/1001.
3. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Космическая погода: Факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 2. С. 30-52. DOI: 10.12737/szf-72202104.
4. Vasylyev D. Y., Béniguel Y., Volker W., Kriegel M., Berdermann J. Modeling of ionospheric scintillation // Journal of Space Weather and Space Climate. 2022. Vol. 12. P. 1–29. DOI: 10.1051/swsc/2022016.
5. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Издательство «Советское радио», 1970. 728 с.

6. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Издательство «Радио и связь», 1982. 304 с.

7. Кловский Д. Д., Сойфер В. А. Пропускная способность многолучевых каналов // Проблемы передачи информации. 1972. Т. 8. № 1. С. 16–25.

8. Bogush R. L., Guigliano F. W., Knepp D. L., Michelet A. H. Frequency-selective propagation effects on spread-spectrum receiver tracking // Proceeding of the IEEE. 1981. Vol. 69. No. 7. P. 787–796. DOI: 10.1109/PROC.1981.12073.

9. Bogush R. L., Guigliano F. W., Knepp D. L. Frequency-selective scintillation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links // Proceeding of the IEEE. 1983. Vol. 71. No. 6. P. 754–767. DOI: 10.1109/PROC.1983.12662.

10. Biglieri E. M., Proakis J. G., Shamai S. S. Fading channels: information-theoretic and communications aspects // IEEE transaction on information theory. 1998. Vol. 44. No. 6. P. 2619–2692. DOI: 10.1109/18.720551.

11. Лернер И. М., Файзуллин Р. Р., Хайруллин А. Н., Шушпанов Д. В., Ильин В. И., Рябов И. В. Повышение удельной пропускной способности как фундаментальная проблема теории связи. Стратегия развития в постшенноновскую эпоху. Часть 2. Ретроспективный обзор методов приема и обработки сигналов в частотно-селективных каналах связи при наличии межсимвольных искажений // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. № 2(77). С. 16–33. DOI: 10.18127/j20700784-202302-02.

12. Бахрамова М. И. Повышение помехоустойчивости и пропускной способности радиоканалов ионосферной связи с применением зондирующего линейно-частотно модулированного сигнала. Автореферат дис. ... канд. техн. наук – Казань: МарГТУ, 2010. 21 с.

13. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Инфокоммуникационные технологии (приложение к журналу). 2006. № 4. 357 с.

14. Пашинцев В. П., Копытов В. В., Михайлов Д. А., Бойченко И. А., Диптан П. А. Прогнозирование помехоустойчивости спутниковой системы Коспас-Сарсат на основе результатов GPS-мониторинга мелкомасштабных возмущений ионосферы // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 12. С. 1–44. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.12.1.

15. Качала В. В. Общая теория систем и системный анализ. М.: Горячая линия - Телеком, 2024. 432 с.

16. Чуев Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Издательство «Советское радио», 1975. 40 с.

17. Пашинцев В. П., Диптан П. А., Гринев Е. М., Киселев Н. В. Методика оценки пропускной способности спутникового канала связи с замираниями // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 243–266. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-243-266.

18. Пашинцев В. П., Песков М. В., Андреев В. Н. Анализ причин возникновения энергетических потерь при обработке сигналов с частотно-селективными замираниями и межсимвольной интерференцией // Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA – 2020: Доклады на

22 международной конференции (Москва, 14–15 апреля 2020 г.). Москва: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. С. 68-71.

19. Chemin Y.N.H. Ionosphere – New Perspectives. IntechOpen, 2023. 178 p. DOI: 10.5772/intechopen.1001520.

20. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Senokosov M. A., Mikhailov D. A., Skorik A. D. A system for measuring the scintillation index based on the results of monitoring of small-scale fluctuations in the total electron content of the ionosphere // *GPS Solutions*. 2024. Vol. 28. No. 1. P. 1–14. DOI: 10.1007/s10291-023-01550-1.

21. Пашинцев В.П., Коваль С. А., Скорик А. Д., Диптан П. А. Комплекс оценки полосы пропускания трансионосферного канала связи на основе результатов GPS–мониторинга ионосферы. // В сборнике: Распространение радиоволн. Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции. Йошкар-Ола, 2023. С. 164–167.

22. Пашинцев В. П., Диптан П. А., Гринев Е. М., Белоконь Д. А., Киселев Н. В. Пропускная способность спутникового канала связи с частотно-селективными замираниями и межсимвольной интерференцией. // В сборнике: Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (РЭУС-ИТ 2024). Доклады всероссийской конференции, посвященной «Дню Радио». Москва, 2024. С. 208-213.

23. Crane R.K. Ionospheric scintillation // *Proceeding of the IEEE*. 1977. Vol. 65. No. 2. P. 180–199. DOI: 10.1109/PROC.1977.10456.

24. Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations // *Proceeding of the IEEE*. 1982. Vol. 70. No. 4. P. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314.

25. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillation in the ionosphere // *Proceedings of the IEEE*. 1982. Vol. 70. No. 4. P. 324–359. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.

26. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems // *Journal of interdisciplinary research*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 367–375. DOI: 10.33543/1001.

27. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец–Д1М» // Презентация МСПСС «Гонец–Д1М» [Электронный ресурс]. 15.07.2024. – URL: <https://gonets.ru/rus/uslugi/sistema-gonets> (дата обращения 15.07.2024).

References

1. Yasyukevich Y. V., Kiselev A. V., Zhivetiev I. V., Edemskiy I. K., Syrovatskii S. V., Maletckii B. M., Vesnin A. M. SIMuRG: System for ionosphere monitoring and research from GNSS. *GPS Solutions*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 1–12. DOI 10.1007/s10291-020-00983-2.

2. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite

communication systems. *Journal of interdisciplinary research*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 367–375. DOI: 10.33543/1001.

3. Demyanov V. V., Yasyukevich Y. V. *Kosmicheskaya pogoda: Faktori riska dlya globalnikh navigatsionnikh sputnikovikh system* [Space weather: Risk factors for global navigation satellite systems]. *Solar-terrestrial physics*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 30-52 (in Russian). DOI: 10.12737/szf-72202104.

4. Vasylyev D. Y., Béniguel Y., Volker W., Kriegel M., Berdermann J. Modeling of ionospheric scintillation. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2022, vol. 12, pp. 1–29. DOI: 10.1051/swsc/2022016.

5. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenij* [Theory of discrete messages transmission]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1970. 728 p. (in Russian).

6. Klovkii D. D. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po radiokanalam* [Transmission of discrete messages via radio channels]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1982. 304 p. (in Russian).

7. Klovkii D. D., Soifer V. A. *Propusknaia sposobnost' mnogoluchevykh kanalov* [Capacity of multipath channels]. *Problems of information transmission*, 1972, vol. 8, no. 1, pp. 16–25 (in Russian).

8. Bogush R. L., Guigliano F. W., Knepp D. L., Michelet A. H. Frequency-selective propagation effects on spread-spectrum receiver tracking. *Proceeding of the IEEE*, 1981, vol. 69, no. 7, pp. 787–796. DOI: 10.1109/PROC.1981.12073.

9. Bogush R. L., Guigliano F. W., Knepp D. L. Frequency-selective scintillation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links. *Proceeding of the IEEE*, 1983, vol. 71, no. 6, pp. 754–767. DOI: 10.1109/PROC.1983.12662.

10. Biglieri E. M., Proakis J. G., Shamai S. S. Fading channels: information-theoretic and communications aspects. *IEEE transaction on information theory*, 1998, vol. 44, no. 6, pp. 2619–2692. DOI: 10.1109/18.720551.

11. Lerner I. M., Fayzullin R. R., Khairullin A. N., Shushpanov D. V., Il'in V. I., Ryabov I. V. Specify capacity increasing as a fundamental problem of communication theory. Strategy development in the post-Shannon era. Part 2. Retrospective review of methods for receiving and processing signals in frequency-selective communication channels in the presence of ISI. *Achievements of modern radioelectronics*, 2023, vol. 77, no. 2, pp. 16–33 (in Russian). DOI: 10.18127/j20700784-202302-02

12. Bastrakova M. I. *Povishenie pomekhoustoichivosti i propusknoi sposobnosti radiokanalov ionosfernoi svyazi s primeneniem zondiruyushchego lineino-chastotno modulirovannogo signala*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving noise immunity and throughput of ionospheric communication radio channels using a probing linear frequency modulated signal. Ph.D. Tesis]. Kazan, Volga State University of Technology, 2010. 21 p. (in Russian).

13. Maslov O. N., Pashintsev V. P. *Modeli transionosfernykh radiokanalov i pomekhoustoichivost' sistem kosmicheskoi svyazi* [Transionospheric radio channel models and noise immunity of space communication systems]. *Infocommunication Technologies*, (magazine supplement), 2006, vol. 4, 357 p. (in Russian).

14. Pashintsev V. P., Kopytov V. V., Mikhailov D. A., Boychenko I. A., Diptan P. A. Prediction of the noise immunity of the Cospas-Sarsat satellite system

based on the results of GPS-monitoring of small-scale ionospheric disturbances. *Journal of Radio Electronics*, 2024, no. 12, pp 1–44 (in Russian). DOI:10.30898/1684-1719.2024.12.1

15. Kachala V. V. *Obshchaya teoriya sistem i sistemnii analiz* [General systems theory and systems analysis]. Moscow, Scientific and technical Publ., 2024. 432 p.

16. Chuev Y. V., Mikhailov Y. B., Kuzmin V. I. *Prognozirovanie kolichestvennikh kharakteristik protsessov* [Process Quantity Prediction]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1975. 40 p. (in Russian).

17. Pashintsev V. P., Diptan P. A., Grinev E. M., Kiselev N. V. Methodology for estimating the bandwidth of a satellite communication channel with fading. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 243–266 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-243-266

18. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Andreev V. N. Analysis of the causes of energy losses when processing signals with frequency-selective fading and intersymbol interference. *Tsifrovaya obrabotka signalov i yee primeneniye. DSPA - 2020: Dokladi na 22 Mezhdunarodnoi konferentsii* [Digital signal processing and its application. DSPA - 2020: Reports at the 22nd International Conference]. Moscow, Russian scientific and technical society of radio engineering, electronics and communications named after Popov A. S., 2020, pp. 68-71.

19. Chemin Y.H.H. *Ionosphere – New Perspectives*. IntechOpen, 2023. 178 p. DOI:10.5772/intechopen.1001520.

20. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Senokosov M. A., Mikhailov D. A., Skorik A. D. A system for measuring the scintillation index based on the results of monitoring of small-scale fluctuations in the total electron content of the ionosphere. *GPS Solutions*, 2024, vol. 28, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s10291-023-01550-1.

21. Pashintsev V. P., Koval S. A., Skorik A. D., Diptan P. A. Complex for estimating of the bandwidth of the transionospheric communication channel based on the results of GPS-monitoring of the ionosphere. *V sbornike: Rasprostraneniye radiovoln. Sbornik dokladov XXVIII Vserossiiskoi otkritoi nauchnoi konferentsii* [In the collection: Propagation of radio waves. Collection of reports of the XXVIII All-Russian open scientific conference]. Yoshkar-Ola, 2023, pp. 164–167.

22. Pashintsev V. P., Diptan P. A., Grinev E. M., Belokon D. A., Kiselev N. V. Capacity of satellite communication channel with frequency-selective fading and intersymbol interference. *V sbornike: Radioelektronnie ustroistva i sistemi dlya infokommunikatsionnikh tekhnologii (REUS-IT 2024). Dokladi vsereossiiskoi konferentsii, posvyashchennoi «Dnyu Radio»* [In the collection: Radio-electronic devices and systems for infocommunication technologies (REUS-IT 2024). Reports of the all-Russian conference dedicated to "Radio Day"]. Moscow, 2024, pp. 208-213.

23. Crane R. K. Ionospheric scintillation. *Proceeding of the IEEE*, 1977, vol. 65, no. 2, pp. 180–199. DOI: 10.1109/PROC.1977.10456.

24. Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proceeding of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 4, pp. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314.

25. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillation in the ionosphere, *Proceedings of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 4, pp. 324–359. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313

26. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems. *Journal of interdisciplinary research*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 367–375. DOI: 10.33543/1001.

27. Multifunctional system of personal satellite communication and data transmission «Gonets-D1M». Presentation, 15.07.2024. Available at: <https://gonets.ru/rus/uslugi/sistema-gonets> (accessed 15.07.2024).

Статья поступила 9 марта 2025 г.

Информация об авторах

Паши́нцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики. Северо-Кавказский Федеральный Университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: pashintsevp@mail.ru

Диптан Павел Анатольевич – аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики. Северо-Кавказский Федеральный Университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи, телекоммуникационные сети, информационная безопасность. E-mail: pasha_stavarm@rambler.ru

Белоконь Дмитрий Александрович – аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение надежности декаметрового связи в условиях диффузной многолучевости. E-mail: ahoi8@yandex.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Procedure for prediction of satellite communication channel capacity in case of small-scale ionosphere disturbances, frequency-selective fading and intersymbol interference

V. P. Pashintsev, P. A. Diptan, D. A. Belokon

Problem statement: general (non-selective) signal fading is known to result in a 20% reduction in link capacity. A technique has been developed to estimate the throughput of a satellite communication channel during ionosphere disturbances, which are accompanied by the formation of small-scale inhomogeneities that cause general fading of received signals. However, under certain conditions, the received signals may be subject to frequency selective fading and intersymbol interference. **The purpose of the work:** development of a method for predicting the throughput capacity of a satellite communication channel with small-scale disturbances of the ionosphere and the occurrence of frequency-selective surges and intersymbol interference. **Methods used:** model approach to forecasting is applied, at which functional dependence of predicted indicator (throughput) on factors affecting it (parameters of small-scale disturbances of ionosphere and

transmitted signals) is found. **Novelty:** in contrast to known studies, the effect of small-scale inhomogeneities of the ionosphere with its disturbances on reducing the coherence band of a satellite communication channel, the occurrence of frequency-selective fading of received signals and intersymbol interference is additionally taken into account. **The result:** obtained are expressions for estimating dependence of throughput of a satellite communication channel on signal-to-noise ratio at the input of a receiver, root-mean-square deviation of small-scale fluctuations of total electronic content of the ionosphere, carrier frequency and frequency spectrum band of a signal at a given angle of inclination of propagation of radio waves. The prediction results show that with artificial disturbances of the ionosphere, accompanied by an increase in the standard deviation of small-scale fluctuations of the total electronic content by 4 orders, frequency-selective jamming of received signals and intersymbol interference occur, which leads to a decrease in relative throughput by 65% when implementing a signal-to-noise ratio at the input of the 15 dB receiver. Increasing the carrier frequency of the satellite communication system from 390 MHz to 2.2 GHz reduces the relative throughput of the satellite communication channel by only 21%. **Practical significance:** recommendations for selection of frequency-time parameters of signals of satellite communication systems based on the results of monitoring fluctuations in the total electronic content of the ionosphere during its disturbances to eliminate frequency-selective fading and intersymbol interference in order to increase the throughput of the satellite communication channel.

Key words: satellite communication channel, satellite link, error probability, noise immunity, throughput, capacity, bandwidth, coherence band, fading, frequency selective fading, intersymbol interference, ionosphere, total electronic content, small-scale heterogeneities.

Information about Authors

Vladimir Petrovich Pashintsev – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of Computational Mathematics and Cybernetics. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric perturbations on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: pashintsevp@mail.ru

Pavel Anatolevich Diptan – graduate student of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric perturbations on the quality indicators of satellite communication systems, telecommunication networks, information security. E-mail: pasha_stavarm@rambler.ru

Dmitry Alexandrovich Belokon – graduate student of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics. North Caucasus Federal University. Field of research: improving the reliability of decimeter communication in conditions of diffuse multipath. E-mail: ahoi8@yandex.ru.

Address: 355017, Russia, Stavropol, Pushkin street, 1.