

УДК 621.391

Методика оценки пропускной способности спутникового канала связи с замираниями

Пашинцев В. П., Диптан П. А., Гринев Е. М., Киселев Н. В.

Постановка задачи. Известно, что замирания сигнала приводят к снижению помехоустойчивости и пропускной способности канала связи. Существующие методики оценки пропускной способности канала спутниковой связи не учитывают влияние возмущений ионосферы, сопровождаемых образованием мелкомасштабных неоднородностей, на появление замираний принимаемых сигналов. **Целью работы:** является разработка методики оценки влияния мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы и выбора несущей частоты на пропускную способность канала спутниковой связи. **Результат:** получена совокупность аналитических выражений для оценки зависимости нормированной пропускной способности трансionoсферного канала связи от отношения сигнал/шум на входе приемника, среднеквадратического отклонения (СКО) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и несущей частоты сигнала. **Новизна** разработанной методики состоит в применении моделей изменения по высоте электронной концентрации в мелкомасштабном ионосферном образовании и процесса возникновения ионосферных замираний при распространении радиоволн в системах спутниковой связи (ССС) в качестве основы для получения зависимости пропускной способности спутникового канала связи с замираниями от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы. **Практическая значимость:** полученные результаты разработки методики позволяют выявить основные закономерности влияния несущей частоты ССС, отношения сигнал/шум на входе приемника и мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы при ее естественных и искусственных возмущениях на изменение пропускной способности канала спутниковой связи.

Ключевые слова: пропускная способность, вероятность ошибки, спутниковый канал связи, замирания, ионосфера, полное электронное содержание, мелкомасштабные неоднородности.

Введение

Известно [1], что системы спутниковой связи (ССС) могут функционировать в условиях возмущений ионосферы, сопровождаемых образованием мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации. В этом случае распространение радиоволн (РРВ) в ССС сопровождается рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы, появлением многолучевости и замираний (сцинтилляций, мерцаний) принимаемых сигналов. Последние могут существенно снижать помехоустойчивость приема сигналов и пропускную способность каналов спутниковой связи.

Проведенный анализ работ в области оценки пропускной способности каналов радиосвязи с замираниями показал, что по данному направлению вели и ведут работу большое число ученых: Д.Д. Кловский [2], В.А. Сойфер [2],

Библиографическая ссылка на статью:

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

Reference for citation:

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

Л.М. Финк [3], В.В. Дубровский [4]. Однако в этих работах не учитывается влияние на пропускную способность спутниковых радиоканалов параметров неоднородной ионосферы.

Известно [1], что влияние флуктуаций электронной концентрации (ΔN) в мелкомасштабных (10...1000 м) неоднородностях ионосферы по всей ее толщине на РРВ от космического аппарата (КА) ССС до наземного приемника интегрально описывается мелкомасштабными флуктуациями ПЭС ионосферы $\Delta N_T \sim \Delta N$. Последние характеризуются среднеквадратическим отклонением (СКО) мелкомасштабных флуктуаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2}\right)^{1/2}$, которые определяют параметры глубины замираний принимаемого сигнала с несущей частотой f_0 , например, параметр распределения Райса: $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$. При мелкомасштабных возмущениях ионосферы (увеличении $\sigma_{\Delta N_T}$ на 1...3 порядка) параметр Райса $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ в трансionoсферном канале связи может изменяться в широких пределах: от $\gamma^2 \rightarrow \infty$ (что соответствует отсутствию замираний) до $\gamma^2 = 0$ (что соответствует наиболее глубоким замираниям релейского типа).

Известно [3], что изменение параметра Райса в диапазоне возможных значений $\infty \geq \gamma^2 \geq 0$ существенно ухудшает помехоустойчивость приема сигналов, которая характеризуется функциональной зависимостью $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$ вероятности ошибки от среднего отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемника $\overline{h^2}$ и величины γ^2 . При неизменном отношении С/Ш на входе приемника $\overline{h^2} = 10...20$ дБ изменение параметра Райса в диапазоне $\infty \geq \gamma^2 \geq 0$ приводит к увеличению вероятности ошибочного приема сигналов $P_{\text{ош}}$ на 1...5 порядков.

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 F и ее нормированное значение $C/F = \psi(P_{\text{ош}})$. Отсюда следует, что нормированная пропускная способность трансionoсферного канала связи через функциональные зависимости $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$, $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$ и $C/F = \psi(P_{\text{ош}})$ должна зависеть от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и выбора несущей частоты ССС: $C/F = \psi(\overline{h^2}, \sigma_{\Delta N_T}, f_0)$.

Целью статьи является разработка методики оценки влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и выбора несущей частоты на пропускную способность канала спутниковой связи. Требуемым научным результатом разработки методики является получение аналитической зависимости $C/F = \psi(\overline{h^2}, \sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ нормированной пропускной способности C/F трансionoсферного канала связи от отношения С/Ш на входе приемника $\overline{h^2}$, СКО мелко-

масштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ и несущей частоты f_0 волны (сигнала) ССС.

Качественный анализ влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы на пропускную способность трансionoсферных каналов связи

Известно [1, 5], что причиной возникновения замираний в трансionoсферных каналах связи являются возмущения ионосферы, связанные с образованием локальных областей с интенсивными мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации (ЭК).

В таких мелкомасштабных ионосферных образованиях распределение ЭК в слоях (D, E, F) ионосферы описывается совокупностью (рис. 1а) изменения по высоте h среднего (фонового) значения $\bar{N}(h)$ и пространственных ($\rho = x, y$) флуктуаций $\Delta N(\rho, h)$ в неоднородностях ионосферы [1, 5]

$$N(\rho, h) = \bar{N}(h) + \Delta N(\rho, h), [\text{м}^{-3}]. \quad (1)$$

В слое F на высоте $h = h_{\max}$ максимума ионизации (см. рис. 1а) достигаются наибольшие значения средней ЭК $\bar{N}(h_{\max}) \geq \bar{N}(h)$ ионосферы и ее пространственных флуктуаций $\Delta N(\rho, h_{\max}) \geq \Delta N(\rho, h)$.

Связь между распределением ЭК ионосферы (1) $N(\rho, h)$ и ее ПЭС $N_T(\text{м}^{-2})$ при РРВ от КА ССС с высотой орбиты $h_{\text{КА}} > 500$ км через ионосферу толщиной $h_{\text{И}}$ определяется как сумма регулярной \bar{N}_T и флуктуационной составляющей $\Delta N_T(\rho)$:

$$\begin{aligned} N_T(\rho) &= \int_{h_{\text{КА}}} N(\rho, h) dh = \int_{h_{\text{И}}} (\bar{N}(h) + \Delta N(\rho, h)) dh = \\ &= \bar{N}_T + \Delta N_T(\rho), [\text{м}^{-2}]. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 1 показаны модели: а) изменения по высоте ЭК в мелкомасштабном ионосферном образовании (МИО); б) процесса РРВ с несущей частотой f_0 от КА ССС до приемника ССС через МИО и возникновения замираний.

Анализ влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы на глубину замираний принимаемых сигналов в ССС (рис. 1б) показывает следующее. Плоский фазовый фронт падающей волны на выходе из ионосферы будет искаженным. Флуктуации фазового фронта выходной волны прямо пропорциональны мелкомасштабным флуктуациям ПЭС [1, 5]

$$\Delta \varphi(\rho) = -\lambda_0 r_e \Delta N_T(\rho) \approx -80,8 \pi \Delta N_T(\rho) / c f_0, [\text{рад}], \quad (3)$$

где $\lambda_0 = c / f_0$ – длина волны (м); c – скорость света (м/с); f_0 – несущая частота, выраженная в (Гц); r_e – классический радиус электрона; 80,8 – коэффициент, имеющий размерность ($\text{м}^3/\text{с}^2$).

Различные участки ρ_i фазового фронта (3) $\Delta \varphi(\rho_i) \equiv \Delta \varphi(\rho)$ в пределах диаметра зоны Френеля ($2l_F$) формируют множество лучей ($i = 1 \dots M$), которые приходят в точку приема с соответствующими фазовыми сдвигами [1]:

$$\Delta \varphi_i = \Delta \varphi(\rho_i) \equiv \Delta \varphi(\rho) = -80,8 \pi \Delta N_T(\rho) / c f_0. \quad (4)$$

В результате интерференции множества приходящих лучей амплитуда сигнала на входе приемника ССС будет подвержена замираниям, которые описываются райсовским (обобщенным релеевским) законом распределения. Поэтому средняя мощность принимаемого сигнала будет иметь регулярную и флуктуационную составляющую $\bar{P}_r = P_p + P_{\text{фл}}$, значения которых зависят от $\Delta\varphi_i$. Их отношение характеризует параметр распределения Райса, который обратно пропорционально зависит от $\Delta\varphi_i$:

$$\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \sim 1 / \Delta\varphi_i \sim f_0 / \Delta N_T(\rho) \quad (5)$$

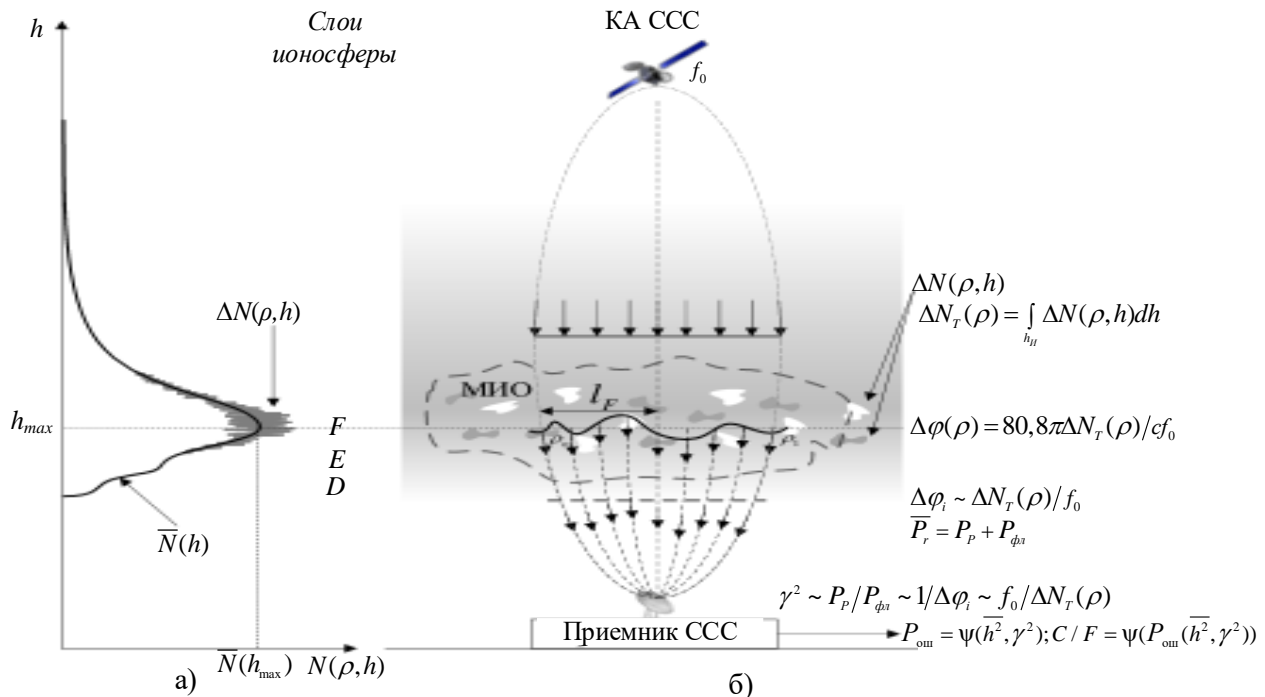


Рис. 1. Модели изменения по высоте электронной концентрации в мелкомасштабном ионосферном образовании (а) и процесса возникновения ионосферных замираний при распространении радиоволн в ССС (б)

Согласно зависимости (5) при заданной несущей частоте f_0 ССС по мере возрастания мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$ параметр Райса γ^2 будет уменьшаться (т.е. глубина замираний принимаемых сигналов в ССС возрастает). При неизменной величине среднего отношения С/Ш на входе приемника \bar{h}^2 (равной отношению С/Ш в каналах связи без замираний $h^2 = \bar{h}^2$) возрастание глубины замираний приводит к увеличению вероятности ошибочного приема сигналов $P_{\text{ом}}$ [2, 3], что обуславливает снижение нормированной пропускной способности $C/F = \psi(P_{\text{ом}}(\bar{h}^2, \gamma^2))$ канала связи.

Методика оценки влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и выбора несущей частоты на пропускную способность канала спутниковой связи

Методика оценки влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и выбора несущей частоты на пропускную способность канала спутниковой связи включает следующие этапы.

1. Задаются исходные данные: $\overline{h^2}$, f_0 , F , $\sigma_{\Delta N_T}$.

2. Определяется СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (3) как [1]:

$$\sigma_\varphi = \left(\overline{\Delta\varphi^2}(\rho) \right)^{1/2} = 80,8\pi \sigma_{\Delta N_T} / cf_0, \text{ [рад]}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2}(\rho) \right)^{1/2}$ – СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы (м^{-2}).

3. Определяется параметр распределения Райса через величину СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (6), который характеризует глубину замираний сигнала на входе приемника ССС [1]:

$$\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} = \left(\exp(\sigma_\varphi^2) - 1 \right)^{-1} = \left(\exp(80,8\pi \sigma_{\Delta N_T} / cf_0)^2 - 1 \right)^{-1}. \quad (7)$$

Анализ (5) – (7) показывает, что в условиях нормальной (невозмущенной) среднеширотной ионосферы, когда мелкомасштабные флуктуации ПЭС ионосферы практически отсутствуют $\sigma_{\Delta N_T} \approx 0$, величина $\sigma_\varphi \approx 0$ и параметр Райса $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \approx \infty$ (что обеспечивается, если флуктуации сигнала почти отсутствуют $P_{\text{фл}} \approx 0$). При сильных возмущениях ионосферы или применении в ССС пониженных несущих частот, когда выполняется условия $80,8\pi \sigma_{\Delta N_T} \gg cf_0$ и $\sigma_\varphi \gg 1$, параметр Райса $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \approx 0$ (что обеспечивается, если регулярная составляющая замираний сигнала почти отсутствует $P_p \approx 0$), что указывает на появление наиболее глубоких в ССС замираний релейского типа.

Заметим, что в частном случае $\sigma_\varphi \ll 1$ с учетом разложения $\exp(x) \approx 1 + x$ при $x \ll 1$ выражение (7) сводится к виду

$$\gamma^2 \approx 1/\sigma_\varphi^2 = (cf_0 / 80,8\pi \sigma_{\Delta N_T})^2, \quad (7a)$$

который соответствует качественной зависимости (5).

4. Определяется вероятность ошибочного приема сигналов, которая существенно зависит от глубины их замираний $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$. Например, вероятность ошибки при оптимальном некогерентном приеме сигналов с бинарной ортогональной частотной манипуляцией BFSK (binary frequency shift keying) в канале связи с райсовскими замираниями ($\infty < \gamma^2 < 0$) определяется согласно выражению [3, 6, 7]

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) = \frac{\gamma^2 + 1}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left(-\frac{\gamma^2 + \overline{h^2}}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \right). \quad (8)$$

В частных случаях замираний релейского типа (когда $\gamma^2 = 0$) и отсутствия замираний (когда $\gamma^2 = \infty$) выражение (8), с учетом равенства $\overline{h^2} = h^2$ среднего значения отношения С/Ш в каналах с замираниями отношению С/Ш при отсутствии замираний h^2 , сводится к известным [3, 8] видам:

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2 = 0) = P_{\text{ош}}(\overline{h^2}) = (2 + \overline{h^2})^{-1}; \quad (9)$$

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2 = \infty) = P_{\text{ош}}(h^2) = 0,5 \exp(-h^2 / 2). \quad (10)$$

Анализ функциональных зависимостей (8) – (10) показывает, что изменение параметра Райса в радиолиниях ССС в пределах $\infty \leq \gamma^2 \leq 0$ при неизменном отношении С/Ш (обычно $\overline{h^2} = h^2 = 10...15$ дБ) обуславливает возрастание вероятности ошибочного приема сигналов ($P_{\text{ош}}$) на 1...5 порядков.

5. Определяется пропускная способность симметричного бинарного канала связи с полосой частот F , зависящая от вероятности ошибочного приема сигналов $P_{\text{ош}}$ [2-4, 6]

$$C = F(1 + P_{\text{ош}} \log_2 P_{\text{ош}} + (1 - P_{\text{ош}}) \log_2 (1 - P_{\text{ош}})), \quad (11)$$

и ее нормированное (к полосе F) значение

$$C/F = (1 + P_{\text{ош}} \log_2 P_{\text{ош}} + (1 - P_{\text{ош}}) \log_2 (1 - P_{\text{ош}})). \quad (12)$$

На основе (12) и (8), (10) определяются нормированные значения пропускной способности канала связи с замираниями райсовского типа

$$C_\gamma = C(\infty < \gamma^2 < 0)/F = 1 + P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) \log_2 P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) + (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2)) \quad (13)$$

и канала связи без замираний

$$C_\infty = C(\gamma^2 = \infty)/F = 1 + P_{\text{ош}}(h^2) \log_2 P_{\text{ош}}(h^2) + (1 - P_{\text{ош}}(h^2)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(h^2)), \quad (14)$$

где параметр Райса согласно (7) $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ зависит от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ и от выбора несущей частоты f_0 сигналов ССС.

6. Определяется уменьшение пропускной способности канала связи с райсовскими замираниями (13) относительно канала связи без замираний (14):

$$C_{\text{фл}} = C_\gamma / C_\infty = (C(\infty < \gamma^2 < 0)/F) / (C(\gamma^2 = \infty)/F) = \frac{1 + P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) \log_2 P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) + (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2))}{1 + P_{\text{ош}}(h^2) \log_2 P_{\text{ош}}(h^2) + (1 - P_{\text{ош}}(h^2)) \log_2 (1 - P_{\text{ош}}(h^2))}. \quad (15)$$

Анализ (15) показывает, что при отсутствии замираний ($\gamma^2 = \infty$), когда согласно (8), (10) $P_{\text{ош}}(\overline{h^2}, \gamma^2) = P_{\text{ош}}(h^2)$, значение $C_{\text{фл}} = 1$, а при $\gamma^2 = 0$

(релеевских замираниях) уменьшение пропускной способности канала связи (значения $C_{\text{фл}}$ относительно 1) будет наибольшим.

Таким образом, разработана 6-этапная методика, позволяющая на основе аналитических выражений (7) $\gamma^2 = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ и (13) $C_\gamma = \psi(P_{\text{ош}}(\bar{h}^2, \gamma^2))$ получить требуемую зависимость $C_\gamma = \psi(\bar{h}^2, \sigma_{\Delta N_T}, f_0)$ нормированной пропускной способности спутникового канала связи от среднего отношения С/Ш на входе приемника \bar{h}^2 , СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ и выбора несущей частоты f_0 сигналов ССС.

В соответствии с представленной методикой разработан алгоритм оценки пропускной способности спутникового канала связи с замираниями [9].

Пример расчета пропускной способности канала спутниковой связи при различных несущих частотах и мелкомасштабных флуктуациях ПЭС ионосферы

Рассмотрим конкретный пример применения разработанной методики для случая передачи в ССС сигналов с частотной манипуляцией (BFSK) при различных значениях несущих частот и параметрах неоднородной ионосферы.

1 этап. Обоснование и конкретизация исходных данных ($h^2, f_0, F, \sigma_{\Delta N_T}$), необходимых для дальнейших расчетов:

1.1) обоснование энергетического отношения С/Ш (h^2) на входе приемника ССС. Обычно [6, 7] в ССС реализуются энергетические отношения С/Ш на входе приемника в диапазоне $h^2 = 5 \dots 20$ дБ. Кроме того, в ССС предусматривается энергетический запас на $3 \dots 10$ дБ [7, 8]. Поэтому дальнейшие расчеты целесообразно проводить для расширенного диапазона $h^2 = 1 \dots 1000$ (т.е. $h^2 = 0 \dots 30$ дБ);

1.2) выбор несущих частот (f_0) в ССС. Анализ влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы на глубину замираний принимаемых сигналов в ССС (рис. 16) показывает, что они могут проявляться на несущих частотах $f_0 < 7$ ГГц [5]. В качестве примера будем рассматривать следующие реальные значения несущих частот ССС:

$f_0 = 300$ МГц (в Р – диапазоне) – входит в частотный ССС MUOS (унаследованные каналы ССС Flitsatcom) [10] и ССС Гонец [1, 11, 12];

$f_0 = 406$ МГц (в Р – диапазоне) – частота излучения аварийных радиомаяков международной спутниковой поисково-спасательной системы Коспас-Сарсат (Cospas-Sarsat) [13, 14];

$f_0 = 1620$ МГц (в L – диапазоне) – входит в диапазон рабочих частот абонентской линии связи ССС Iridium [15];

$f_0 = 2200$ МГц (в S – диапазоне) – входит в диапазон рабочих частот абонентской линии связи ССС Гонец [11, 12];

$f_0 = 6700$ МГц (в С – диапазоне) – входит в диапазон рабочих частот фидерной линии связи ССС Гонец [11, 12];

1.3) выбор полосы спектра частот F сигналов ССС. В реальных ССС используется полоса частот от единиц кГц до десятков МГц. При проведении исследования для выявления качественных зависимостей была взята полоса частот $F = 31,5$ кГц (ширина полосы частот канала в абонентской линии ССС Iridium [15]) и $F = 5$ МГц (ширина полосы частот отдельной абонентской линии связи ССС MUOS для «нового» оборудования [10]);

1.4) обоснование СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$. Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit), равная 10^{16} (м^{-2}) [16]. Для расчета СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС используем ее зависимость от ряда физических параметров ионосферы [1]

$$\sigma_{\Delta N_T} = (\pi^{1/2} l_s h_3 (\bar{N}_{\max} \beta)^2)^{1/2} = (\pi^{1/2} l_s h_3 \sigma_{\Delta N}^2)^{1/2}, \quad [\text{м}^{-2}], \quad (16)$$

где h_3 – эквивалентная толщина ионосферы (м); l_s – характерный (средний) размер мелкомасштабных неоднородностей ионосферы); $\bar{N}_{\max} = \bar{N}(h_{\max})$ – максимальное среднее значение ЭК на высоте h_{\max} максимума ионизации (см. рис. 1а); $\beta = \sigma_{\Delta N}(h) / \bar{N}(h) = \sigma_{\Delta N}(h_{\max}) / \bar{N}(h_{\max}) = \sigma_{\Delta N} / \bar{N}_{\max} = \text{const}(h)$ – интенсивность неоднородностей ЭК (величина постоянная для всех высот h ионосферы, включая высоту максимума h_{\max} ионизации); $\sigma_{\Delta N} \equiv \sigma_{\Delta N}(h_{\max}) = \beta \bar{N}_{\max}$ – СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК ионосферы на высоте h_{\max} максимума ионизации (см. рис. 1а).

Анализ [1] физических параметров ионосферы (\bar{N}_{\max} , β) указывает на сильную зависимость от сезона, времени суток и солнечной активности. Усредненная по всем сезонам величина \bar{N}_{\max} для дня и ночи при максимуме солнечной активности (при различных состояниях ионосферы) представлена в таблице 1.

Заметим, что естественные возмущения ионосферы (ЕВИ) могут возникать из-за изменений солнечной активности в результате [1, 5]: вспышек на Солнце, солнечного терминатора, высыпания частиц и т.д. Кроме того, ЕВИ в слое F могут возникать под действием других естественных факторов: землетрясений, извержений вулканов, образования ураганов, молний. Искусственные возмущения ионосферы (ИВИ) в слое F , сопровождаемые образованием интенсивных ($\beta > 10^{-2}$) мелкомасштабных ($l_s \sim 10 \dots 10^3$ м) неоднородностей ЭК, возникают при осуществлении на высотах слоя F различного рода взрывов, инъекции химических легкоионизирующихся реагентов (бария, цезия), радионагрева мощным излучением и т.д.

Значения СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК ионосферы на высоте максимума ионизации, приведенные в таблице 1, рассчитаны в [1] по формуле $\sigma_{\Delta N} \equiv \sigma_{\Delta N}(h_{\max}) = \beta \bar{N}_{\max}$. На основе $\sigma_{\Delta N}$ рассчитываем СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы по формуле (16) $\sigma_{\Delta N_T} = \sigma_{\Delta N} (\pi^{1/2} l_s h_3)^{1/2}$ при конкретных значениях $h_3 = 5 \cdot 10^5$ м, $l_s = 400$ м. Параметры неоднородной ионосферы при 5 ее состояниях приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состояния и параметры неоднородной ионосферы в слое F

Состояния и параметры неоднородной ионосферы	\bar{N}_{\max} [M ⁻³]	β	$\sigma_{\Delta N} = \beta \bar{N}_{\max}$ [M ⁻³]	$\sigma_{\Delta N_T}$ [M ⁻²]
1. Нормальная (невозмущенная) ионосфера (НИ), ночь	$2,4 \cdot 10^{11}$	10^{-2}	$2,4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{13}$
2. Нормальная (невозмущенная) ионосфера (НИ), день	$1,4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^{13}$
3. Естественные возмущения ионосферы (ЕВИ)	$1,4 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{10}$	10^{15}
4. Слабые искусственные возмущения ионосферы (ИВИ)	10^{13}	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{12}$	10^{17}
5. Сильные искусственные возмущения ионосферы (ИВИ)	$5 \cdot 10^{13}$	1	$5 \cdot 10^{13}$	10^{18}

Фактические значения $\sigma_{\Delta N_T}$ могут быть получены комплексом прогнозирования помехоустойчивости систем спутниковой связи на основе GPS-зондирования ионосферы [17, 18].

2 этап. В диапазоне возможных значений СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы (таблица 1) $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 10^{18}$ (M⁻²) для пяти значений несущей частоты ССС f_0 (300 МГц; 406 МГц; 1620 МГц; 2200 МГц; 6700 МГц) по формуле (6) $\sigma_\varphi = 80,8\pi \sigma_{\Delta N_T} / cf_0$ определяется СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (рис. 2).

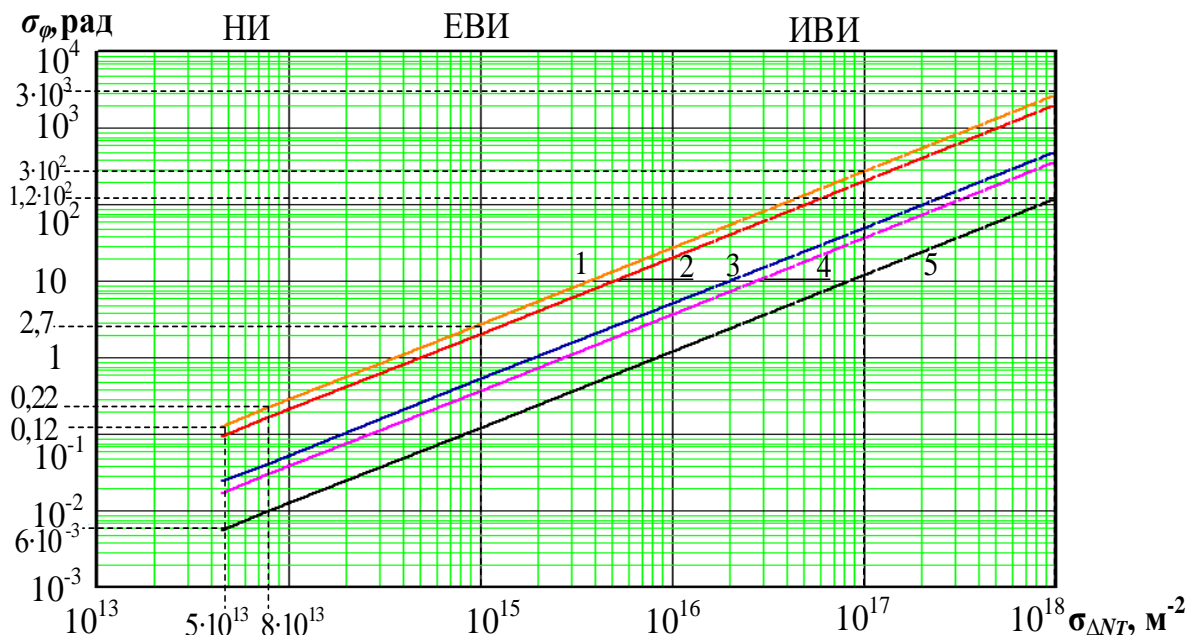


Рис. 2. Зависимость СКО флуктуации фазового фронта выходной волны σ_φ от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ при 5 значениях несущей частоты f_0 : 1) 300 МГц; 2) 406 МГц; 3) 1620 МГц; 4) 2200 МГц; 5) 6700 МГц

Анализ зависимостей (рис. 2) показывает, что при увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 10^{18}$ (м^{-2}) и уменьшении несущей частоты в интервале $f_0 = 6700 \dots 300$ МГц СКО флуктуации фазового фронта возрастают в интервале $\sigma_\phi \approx 6 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^3$.

3 этап. В диапазоне возможных значений СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (рис. 2) $\sigma_\phi \approx 6 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^3$ рад определяется (рис. 3а) параметр распределения Райса (γ^2) в соответствии с зависимостью (7) $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} = (\exp(\sigma_\phi^2) - 1)^{-1}$.

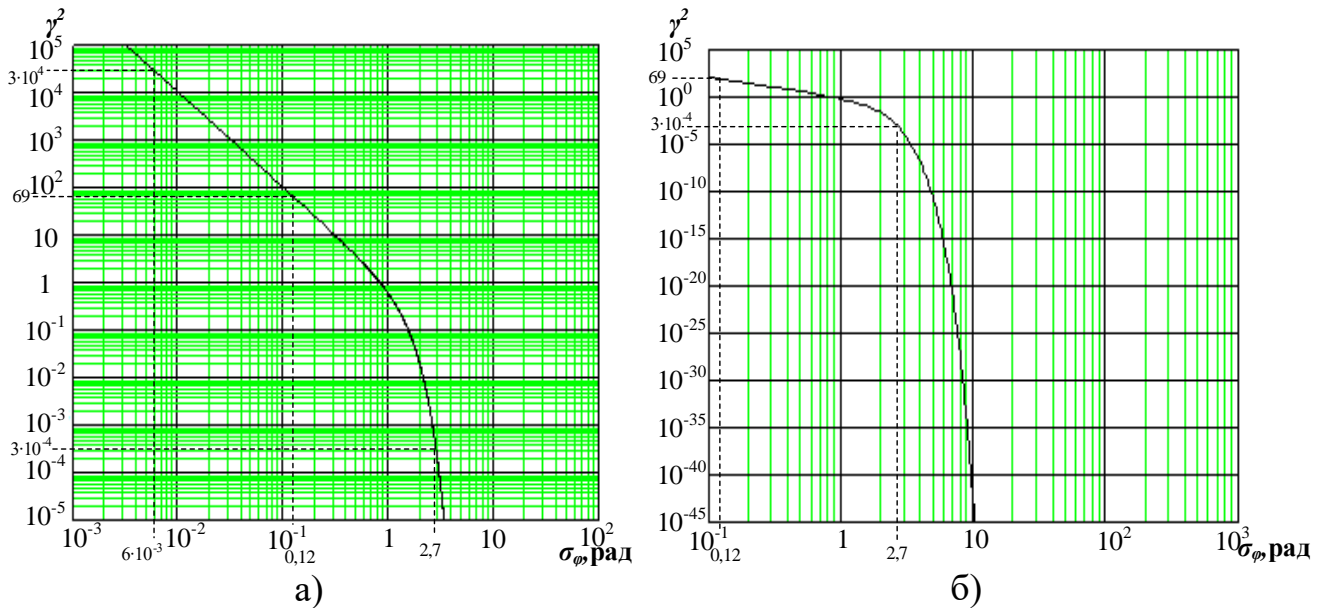


Рис. 3. Зависимость параметра Райса (γ^2) от СКО флуктуации фазового фронта в диапазонах $\sigma_\phi = 6 \cdot 10^{-3} \dots 10^2$ рад (а) и $\sigma_\phi = 0,1 \dots 10^3$ рад (б)

Анализ рис. 3а показывает, что в диапазоне возможных значений СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (рис. 2) $\sigma_\phi = 6 \cdot 10^{-3} \dots 2,7$ рад параметр Райса уменьшается на 8 порядков: с $\gamma^2 \approx 3 \cdot 10^4$ (что практически соответствует случаю отсутствия замираний $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \approx \infty$) до $\gamma^2 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ (что практически соответствует случаю релейевских замираний $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \approx 0$). Согласно рис. 3б. при $\sigma_\phi > 10$ рад параметр Райса $\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} \rightarrow 0$.

Анализ рис. 2 и рис. 3 показывает, что в условиях ЕВИ ($\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{15} \text{ м}^{-2}$) в диапазоне частот $f_0 = 6700 \dots 300$ МГц увеличение СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны до величины $\sigma_\phi = 0,12 \dots 2,7$ рад приводит к уменьшению параметра Райса на несущей частоте $f_0 = 6700$ МГц до $\gamma^2 \approx 69$ (что соответствует случаю очень слабых замираний), а на частоте $f_0 = 300$ МГц – до $\gamma^2 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ (что соответствует случаю глубоких замираний релейевского типа).

При этом в условиях невозмущенной дневной ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T} \approx (5 \dots 8) \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$) флуктуации фазового фронта выходной волны в диапазоне частот $f_0 = 6700 \dots 300 \text{ МГц}$ очень малы $\sigma_\varphi = 6 \cdot 10^{-3} \dots 0,22 \text{ рад}$, что обуславливает отсутствие или очень малую глубину замираний, соответствующих значениям параметра Райса $\gamma^2 \approx 3 \cdot 10^4$ на несущей частоте $f_0 = 6700 \text{ МГц}$ и $\gamma^2 \approx 19$ на частоте $f_0 = 300 \text{ МГц}$.

Аналогично по рис. 2 и 3 можно проанализировать влияние увеличения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 10^{18} \text{ (м}^{-2}\text{)}$ вплоть до сильных ИВИ и уменьшения несущей частоты в диапазоне $f_0 = 6700 \dots 300 \text{ МГц}$ на увеличение глубины замираний принимаемых в ССС сигналов (изменение параметра Райса в диапазоне $\gamma^2 \approx 3 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^4$ (таблица 2).

4 этап. Определяется зависимость (8) $P_{\text{ош}} = \psi(\bar{h}^2, \gamma^2)$ вероятности ошибочного приема сигналов BFSK от среднего отношения С/Ш на входе приемника ССС $\bar{h}^2 = h^2 = 1 \dots 10^3$ при различных значениях параметра Райса в диапазоне $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{-4}$ (рис. 4): 1) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4$; 2) $\gamma^2 = 69$; 3) $\gamma^2 = 36$; 4) $\gamma^2 = 20$; 5) $\gamma^2 = 10$; 6) $\gamma^2 = 7$; 7) $\gamma^2 = 3,6$; 8) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^{-4}$.

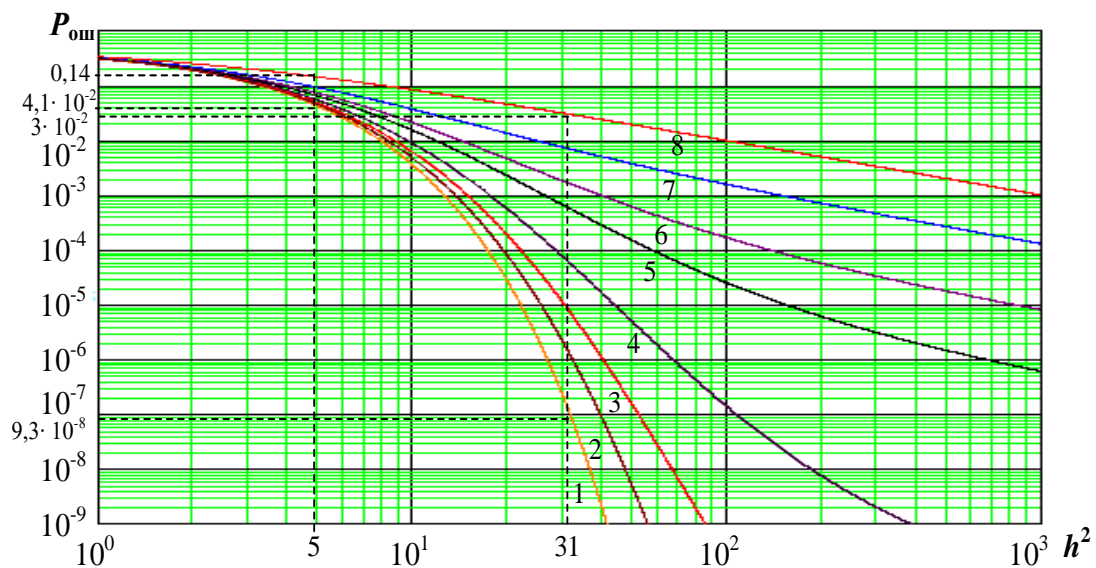


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибочного приема сигналов BFSK от среднего отношения С/Ш на входе приемника при параметре Райса:

- 1) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4$; 2) $\gamma^2 = 69$; 3) $\gamma^2 = 36$; 4) $\gamma^2 = 20$; 5) $\gamma^2 = 10$; 6) $\gamma^2 = 7$;
7) $\gamma^2 = 3,6$; 8) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^{-4}$

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4 и табл. 2 показывает, что в диапазоне значений $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{-4}$ при реализации на входе приемника ССС отношения С/Ш $h^2 = 5$ (т.е. 7 дБ) вероятность ошибочного приема сигналов BFSK увеличивается с $P_{\text{ош}} \approx 4 \cdot 10^{-2}$ до $P_{\text{ош}} \approx 0,14$ (т.е. в 3,5 раза), а при реализа-

ции $h^2=31$ (т.е. 15 дБ) вероятность ошибочного приема сигналов BFSK увеличивается с $P_{\text{ош}} \approx 10^{-7}$ до $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ (т.е. в $3 \cdot 10^5$ раз).

5 этап. Определяется зависимость (12) $C/F = \psi(P_{\text{ош}})$ нормированной пропускной способности симметричного бинарного канала связи от вероятности ошибочного приема сигналов BFSK с райсовскими замираниями $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$ в соответствии с выражениями (13) и (8).

На рис. 5 представлены зависимости нормированной (к полосе частот F) пропускной способности канала спутниковой связи $C/F = C(\infty < \gamma^2 < 0)/F$ ((бит/с)/Гц) от среднего отношения С/Ш на входе приемника $\overline{h^2} = h^2 = 0,1 \dots 10^2$ при рассмотренных выше (рис. 4) значениях параметра Райса: 1) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4$; 2) $\gamma^2 = 69$; 3) $\gamma^2 = 36$; 4) $\gamma^2 = 20$; 5) $\gamma^2 = 10$; 6) $\gamma^2 = 7$; 7) $\gamma^2 = 3,6$; 8) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^{-4}$.

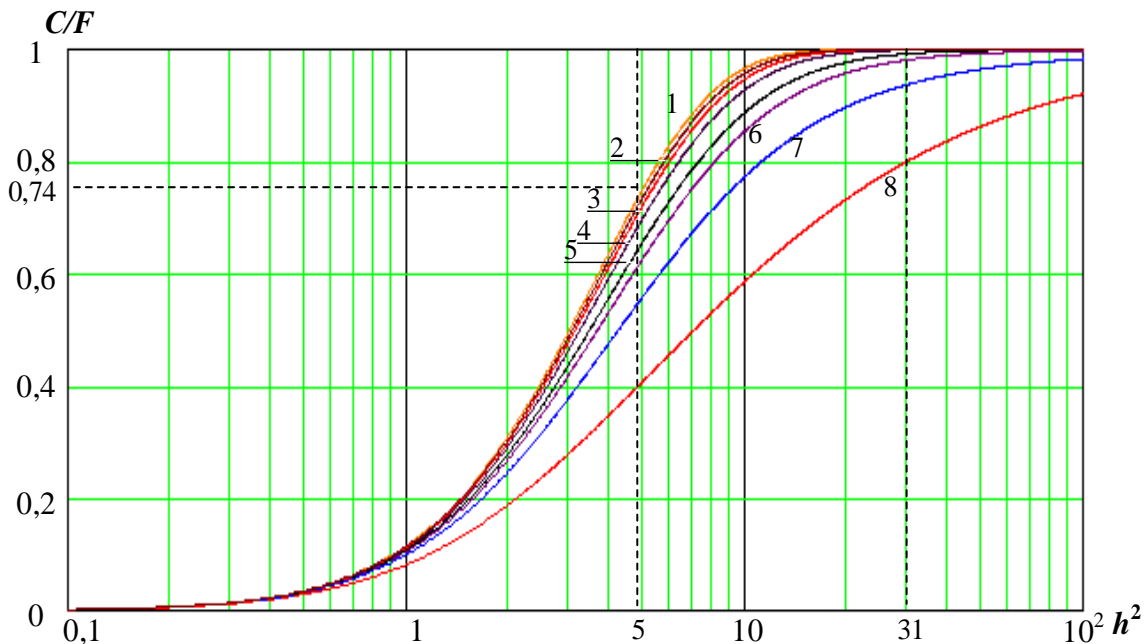


Рис. 5. Зависимость нормированной пропускной способности канала связи от отношения С/Ш при параметре Райса: 1) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4$; 2) $\gamma^2 = 69$; 3) $\gamma^2 = 36$; 4) $\gamma^2 = 20$; 5) $\gamma^2 = 10$; 6) $\gamma^2 = 7$; 7) $\gamma^2 = 3,6$; 8) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^{-4}$

Анализ зависимостей (рис. 5) показывает, что в диапазоне значений $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{-4}$ при реализации отношения С/Ш на входе приемника $h^2=5$ (т.е. 7 дБ) нормированная пропускная способность симметричного бинарного канала связи уменьшается с $C/F \approx 0,74$ до $C/F \approx 0,4$ (т.е. на 46%), а при реализации $h^2=31$ (т.е. 15 дБ) она уменьшается с $C/F \approx 1$ до $C/F \approx 0,8$ (т.е. на 20%).

6 этап. Определяется уменьшение пропускной способности канала связи с замираниями райсовского типа $C_\gamma = C(\infty < \gamma^2 < 0)/F = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$ относительно

канала связи без замираний $C_\infty = C(\gamma^2 = \infty)/F = \psi(h^2)$ согласно выражению (15) $C_{\text{фл}} = C_\gamma/C_\infty$ и рис. 5.

На рис. 6 представлены зависимости $C_{\text{фл}} = C_\gamma/C_\infty = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$ уменьшения относительной пропускной способности симметричного бинарного канала спутниковой связи от среднего отношения С/Ш на входе приемника $\overline{h^2} = h^2 = 0,1 \dots 10^2$ при рассмотренных выше (рис. 5) значениях параметра Райса: 1) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4$; 2) $\gamma^2 = 69$; 3) $\gamma^2 = 36$; 4) $\gamma^2 = 20$; 5) $\gamma^2 = 10$; 6) $\gamma^2 = 7$; 7) $\gamma^2 = 3,6$; 8) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^{-4}$.

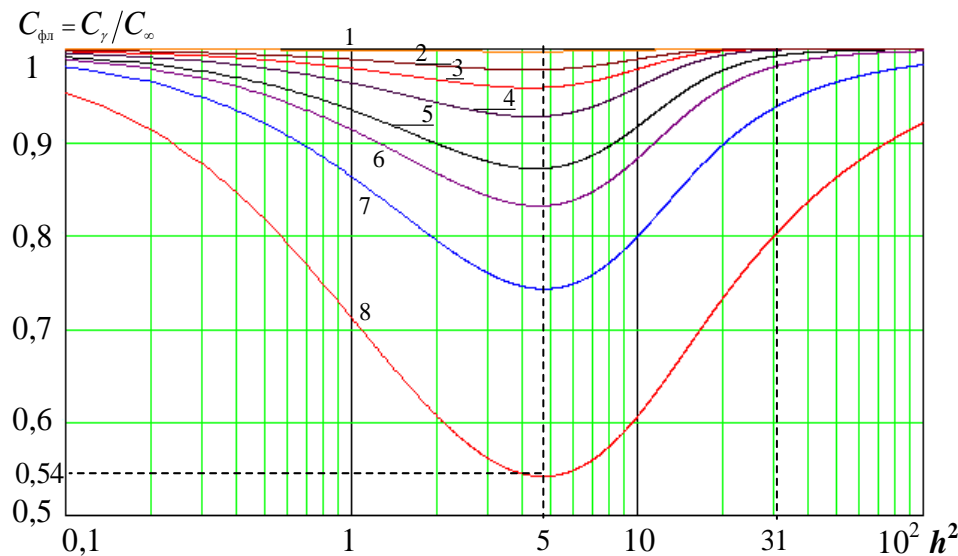


Рис. 6. Зависимость уменьшения пропускной способности $C_{\text{фл}} = C_\gamma/C_\infty$ канала связи от отношения С/Ш при параметре Райса: 1) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4$; 2) $\gamma^2 = 69$; 3) $\gamma^2 = 36$; 4) $\gamma^2 = 20$; 5) $\gamma^2 = 10$; 6) $\gamma^2 = 7$; 7) $\gamma^2 = 3,6$; 8) $\gamma^2 = 3 \cdot 10^{-4}$

Анализ зависимостей (рис. 6) показывает, что в диапазоне значений $\gamma^2 = 3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{-4}$ при реализации отношения С/Ш на входе приемника $h^2=5$ (т.е. 7 дБ) уменьшение относительной пропускной способности симметричного бинарного канала спутниковой связи достигает 46% ($C_{\text{фл}} \approx 0,54$), а при реализации $h^2=31$ (т.е. 15 дБ) – 20% ($C_{\text{фл}} \approx 0,8$).

В таблице 2 приведены оценки влияния СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T}$, м^{-2}) при 5 состояниях ионосферы их таблицы 1 (НИ ночь – $5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$; НИ день – $8 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$; ЕВИ – 10^{13} м^{-2} ; слабые ИВИ – 10^{17} м^{-2} ; сильные ИВИ – 10^{18} м^{-2}) и 5 значениях несущей частоты (f_0) сигналов ССС (300 МГц; 406 МГц; 1620 МГц; 2200 МГц; 6700 МГц) на величину СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны (σ_φ), параметра Райса γ^2 , вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ при приеме сигналов BFSK, а также на нормированную (к полосе частот F) пропускную способность канала спутниковой связи C/F ((бит/с)/Гц))

и уменьшение пропускной способности $C_{фл}$ при отношении $C/Ш$ на входе приемника $h^2=5$ и $h^2=31$.

Таблица 2 – Влияние состояния ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 10^{18}, \text{ м}^{-2}$) и выбора несущей частоты (f_0) на параметры спутникового канала связи ($\sigma_\varphi, \gamma^2, P_{\text{ош}}, C_{\text{фл}}$)

Несущая частота [МГц]	Параметры канала	Состояния ионосферы $\sigma_{\Delta N_T} [\text{м}^{-2}]$				
		НИ-ночь $5 \cdot 10^{13}$	НИ-день $8 \cdot 10^{13}$	ЕВИ 10^{15}	Слаб. ИВИ 10^{17}	Сильн. ИВИ 10^{18}
$f_0 = 300$	σ_φ [рад]	0,14	0,22	2,7	$2,8 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^3$
	γ^2	50	19	$3 \cdot 10^{-4}$	0	0
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=5$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=31$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
	C/F при $h^2=5$	0,73	0,7	0,4	0,4	0,4
	C/F при $h^2=31$	1	1	0,8	0,8	0,8
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=5$	0,97	0,93	0,54	0,54	0,54
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=31$	1	1	0,8	0,8	0,8
$f_0 = 406$	σ_φ [рад]	0,1	0,17	2	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$
	γ^2	91	36	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0	0
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=5$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=31$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
	C/F при $h^2=5$	0,74	0,72	0,4	0,4	0,4
	C/F при $h^2=31$	1	1	0,8	0,8	0,8
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=5$	0,98	0,96	0,54	0,54	0,54
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=31$	1	1	0,8	0,8	0,8
$f_0 = 1620$	σ_φ [рад]	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	0,5	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^3$
	γ^2	$1,5 \cdot 10^3$	$5,7 \cdot 10^2$	3,2	0	0
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=5$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,14
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=31$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
	C/F при $h^2=5$	0,75	0,75	0,55	0,4	0,4
	C/F при $h^2=31$	1	1	0,93	0,8	0,8
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=5$	0,99	0,99	0,73	0,54	0,54
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=31$	1	1	0,93	0,8	0,8
$f_0 = 2200$	σ_φ [рад]	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	0,39	38	$3,8 \cdot 10^2$
	γ^2	$2,7 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	6,3	0	0
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=5$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,14
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=31$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
	C/F при $h^2=5$	0,75	0,75	0,62	0,4	0,4
	C/F при $h^2=31$	1	1	0,98	0,8	0,8
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=5$	1	1	0,82	0,54	0,54
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=31$	1	1	0,98	0,8	0,8

Продолжение таблицы 2

Несущая частота [МГц]	Параметры канала	Состояния ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ [м ⁻²]				
		НИ-ночь $5 \cdot 10^{13}$	НИ-день $8 \cdot 10^{13}$	ЕВИ 10^{15}	Слаб. ИВИ 10^{17}	Сильн. ИВИ 10^{18}
$f_0 = 6700$	σ_φ [рад]	$6,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	0,12	13	$1,3 \cdot 10^2$
	γ^2	$3 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^3$	69	0	0
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=5$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,14
	$P_{\text{ош}}$ при $h^2=31$	$9,3 \cdot 10^{-8}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
	C/F при $h^2=5$	0,75	0,75	0,73	0,4	0,4
	C/F при $h^2=31$	1	1	1	0,8	0,8
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=5$	1	1	0,98	0,54	0,54
	$C_{\text{фл}}$ при $h^2=31$	1	1	1	0,8	0,8

На основе полученных результатов таблицы 2 на рис. 7–8 приведены графики зависимости $P_{\text{ош}} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \bar{h}^2)$ и $C_{\text{фл}} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \bar{h}^2)$ в ССС при 5 состояниях ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$ согласно таблицы 1) для 5 значений несущей частоты ($f_0 = 300 \dots 6700$ МГц) при отношении С/Ш $h^2=5$ (7 дБ) и $h^2=31$ (15 дБ).

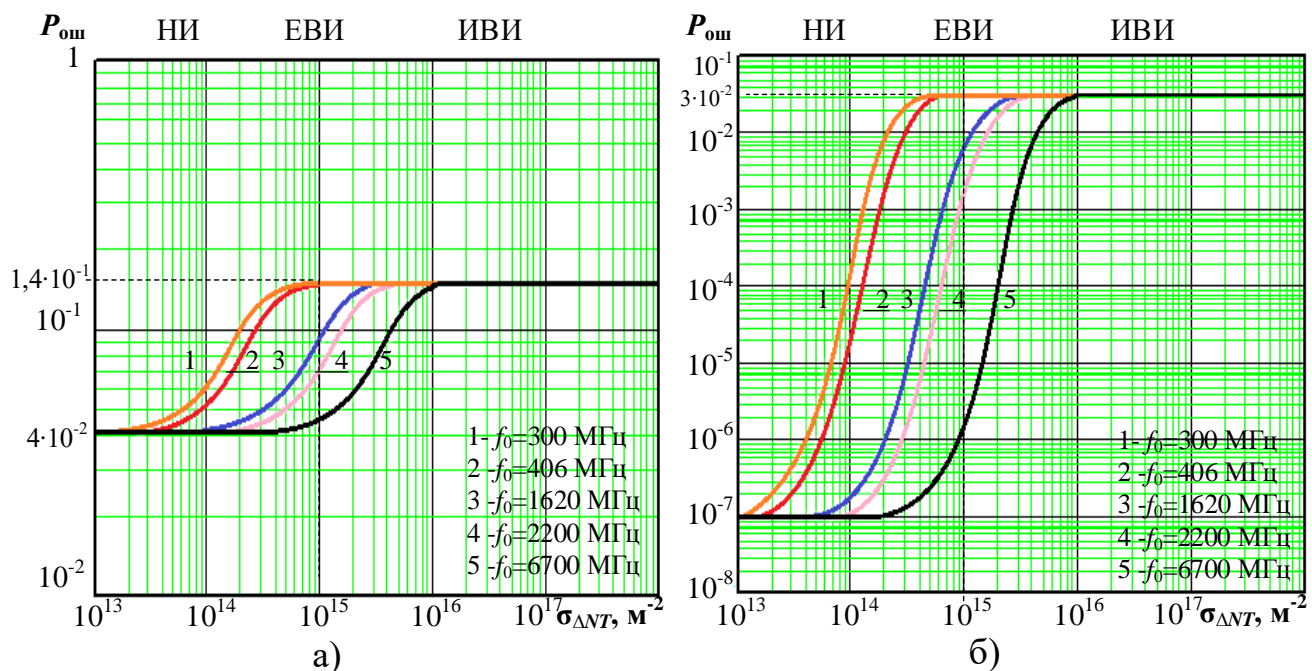


Рис. 7. Изменение помехоустойчивости ССС в зависимости от состояния ионосферы и выбора несущей частоты сигнала при: а) $h^2=5$ (7 дБ); б) $h^2=31$ (15 дБ)

Анализ зависимостей (рис. 7а) показывает, что при малом отношении С/Ш на входе приемника $h^2=5$ (7 дБ) при низкой несущей частоте ССС ($f_0 = 300$ МГц) с увеличением СКО флуктуации ПЭС с $\sigma_{\Delta N_T} 10^{13} \text{ м}^{-2}$ до значения $\sigma_{\Delta N_T} = 10^{15} \text{ м}^{-2}$, (соответствующего ЕВИ) происходит увеличение вероятности

ошибки с $P_{\text{ош}} = 4 \cdot 10^{-2}$ до $1,4 \cdot 10^{-1}$ (т.е. в 3,5 раза). При увеличении несущей частоты до $f_0 = 6700$ МГц в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{13} \dots 10^{15} \text{ м}^{-2}$ вероятность битовой ошибки практически не возрастает ($P_{\text{ош}} \approx 4 \cdot 10^{-2}$).

Анализ зависимостей (рис. 7б) показывает, что при отношении С/Ш $h^2=31$ (15 дБ), на низкой несущей частоте ССС ($f_0 = 300$ МГц) с увеличением СКО флуктуации ПЭС на 1 порядок $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ происходит увеличение вероятности битовой ошибки примерно на 4 порядка (с $P_{\text{ош}} = 2 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-2}$). При увеличении несущей частоты до $f_0 = 6700$ МГц в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 3 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ вероятность битовой ошибки увеличивается примерно на 5 порядков (с $P_{\text{ош}} = 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-2}$).

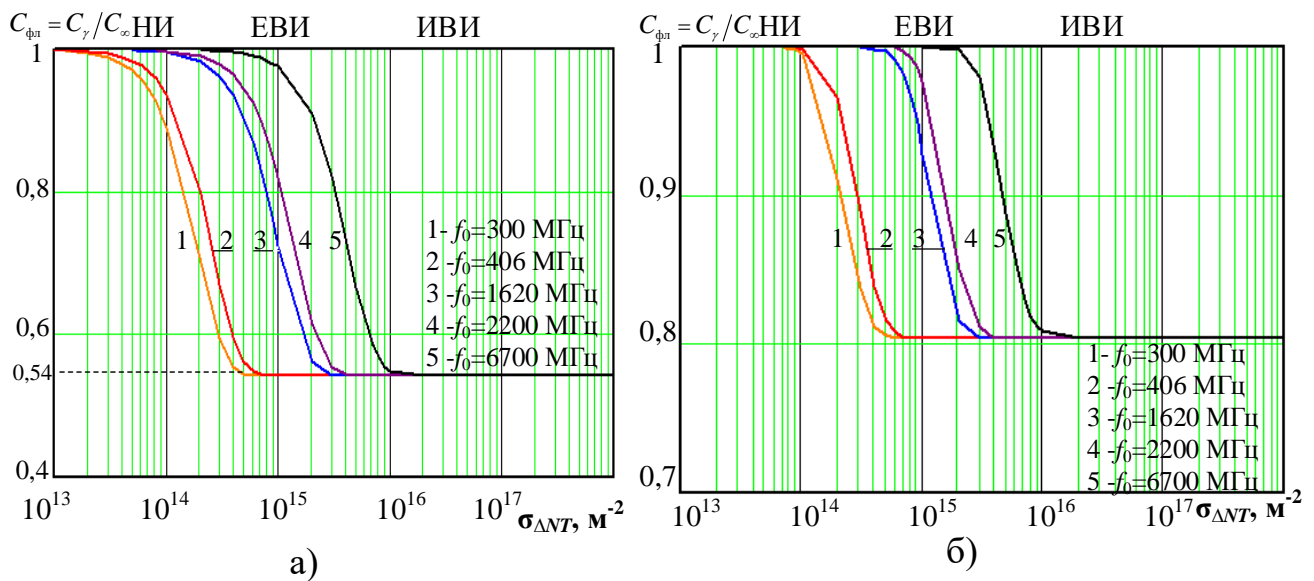


Рис. 8. Изменение пропускной способности канала спутниковой связи с замираниями относительно канала связи без замираний в зависимости от состояния ионосферы и несущей частоты при: а) $h^2=5$ (7 дБ); б) $h^2=31$ (15 дБ)

Анализ зависимостей (рис. 8а) показывает, что при малых отношениях С/Ш $h^2=5$ (7 дБ) и низкой несущей частоте ССС ($f_0 = 300$ МГц) с увеличением СКО флуктуаций ПЭС на 1 порядок $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{13} \dots 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ происходит уменьшение битовой пропускной способности канала спутниковой связи с замираниями райсовского типа относительно канала связи без замираний $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty}$ на 46% (с 1 до 0,54). При дальнейшем возрастании $\sigma_{\Delta N_T} > 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ пропускная способность не изменяется $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty} = 0,54$ (что согласно рис. 6 характерно для замираний релейского типа). При увеличении несущей частоты до $f_0 = 6700$ МГц в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ относительная пропускная способность канала спутниковой связи с замираниями практически не изменяется по сравнению с каналом без замираний $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty} = 1$. При возникновении ЕВИ и увеличении СКО флуктуации ПЭС в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{14} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ происходит уменьшение относительной пропускной способности канала спутниковой связи с замираниями райсовского типа на 46% (с $C_{\text{фл}} = 1$ до 0,54).

Анализ зависимостей (рис. 8б) показывает, что при отношении С/Ш $h^2=31$ (15 дБ) и низкой несущей частоте ССС ($f_0 = 300$ МГц) с увеличением СКО флуктуации ПЭС до значения $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ происходит уменьшение относительной пропускной способности канала спутниковой связи с замираниями райсовского типа на 20% (с $C_{\text{фл}} = C_\gamma / C_\infty = 1$ до 0,8). При дальнейшем возрастании $\sigma_{\Delta N_T}$ пропускная способность не изменяется $C_{\text{фл}} = C_\gamma / C_\infty \approx 0,8$ (замирания релейского типа). При увеличении несущей частоты до $f_0 = 6700$ МГц в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 5 \cdot 10^{13} \dots 2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ пропускная способность канала связи с замираниями практически не изменяется по сравнению с каналом без замираний $C_{\text{фл}} = C_\gamma / C_\infty = 1$. При возникновении ИВИ, увеличении СКО флуктуации ПЭС в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} \approx 2 \cdot 10^{15} \dots 2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ происходит уменьшение относительной пропускной способности канала связи с замираниями райсовского типа на 20% (с $C_{\text{фл}} = C_\gamma / C_\infty = 1$ до 0,8).

Таким образом, анализ графиков на рис. 7 и 8 указывает на наличие следующих закономерностей влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и выбора несущей частоты на помехоустойчивость и пропускную способность канала спутниковой связи.

1. При ЕВИ, сопровождаемых увеличением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС на 1...2 порядка (до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{15} \text{ м}^{-2}$), вероятность ошибки при некогерентном приеме в ССС сигналов BFSK с пониженными несущими частотами Р-диапазона ($f_0 = 300 \dots 406$ МГц) при невысоком отношении С/Ш на входе приемника $h^2=7$ дБ возрастает (см. кривые 1 и 2 на рис. 7а) всего в 3,5 раза (с $P_{\text{ош}} \approx 4 \cdot 10^{-2}$ до $P_{\text{ош}} \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$), но относительная пропускная способность канала спутниковой связи уменьшается (рис. 8а) на 46 % (с $C_{\text{фл}} = C_\gamma / C_\infty = 1$ до 0,54).

2. Повышение отношения С/Ш на входе приемника ССС до традиционных значений $h^2=15$ дБ при ЕВИ и пониженных несущих частотах ($f_0 = 300 \dots 406$ МГц) приводит (кривые 1 и 2 на рис. 7б и 8б) к увеличению вероятности ошибочки на 5 порядков (с $P_{\text{ош}} \approx 10^{-7}$ до $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ и уменьшению пропускной способности на 20 % (с $C_{\text{фл}} = 1$ до 0,8).

3. Повышение несущей частоты до традиционных значений в L и S – диапазонах $f_0 = 1620$ МГц и 2200 МГц (линии 3–4 на рис. 7б и 8б) обеспечивает в условиях ЕВИ при $h^2=15$ дБ уменьшение вероятности ошибки до $P_{\text{ош}} \approx 8 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ (т.е. в 4...15 раз меньше, чем на пониженных частотах $f_0 = 300 \dots 406$ МГц) и существенное повышение пропускной способности (до $C_{\text{фл}} = 0,93 \dots 0,98$).

4. Повышение несущей частоты до С-диапазона $f_0 = 6700$ МГц (линии 5 на рис. 7б и 8б) обеспечивает при ЕВИ и $h^2=15$ дБ уменьшение вероятности ошибки в ССС до $P_{\text{ош}} \approx 10^{-6}$ (т.е. на 4 порядка меньше, чем на пониженных частотах $f_0 = 300 \dots 406$ МГц) и повышение пропускной способности до $C_{\text{фл}} = 1$.

5. В условиях ИВИ, сопровождаемых увеличением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС на 4...5 порядка (до $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{17} \dots 10^{18} \text{ м}^{-2}$), повышение несущей частоты до С – диапазона $f_0 = 6700$ МГц (линии 5 на рис. 7б и 8б) и ре-

ализация традиционного отношения С/Ш на входе приемника $h^2=15$ дБ не обеспечивает уменьшение вероятности ошибки в ССС ниже $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ и повышение относительной пропускной способности выше $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty} = 0,8$.

На основе указанных тенденций можно дать несколько рекомендаций по повышению помехоустойчивости и пропускной способности канала спутниковой связи в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы.

1. В условиях ЕВИ возможно обеспечить незначительное уменьшение вероятности ошибки при некогерентном приеме в ССС сигналов BFSK за счет увеличения входного отношения С/Ш (согласно рис 7а и 7б при $f_0 = 300 \dots 406$ МГц и $h^2=7$ дБ обеспечивается $P_{\text{ош}} \approx 1,4 \cdot 10^{-1}$, тогда как при $h^2=15$ дБ обеспечивается $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$). При этом возрастает (см. рис. 8а и 8б) пропускная способность канала с $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty} = 0,54$ до 0,8.

2. Более эффективным является путь увеличения несущей частоты ССС. Согласно рис. 7б в условиях ЕВИ можно обеспечить уменьшение вероятности ошибки при $h^2=15$ дБ на 5 порядков (с $P_{\text{ош}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ до $P_{\text{ош}} \approx 10^{-6}$) за счет увеличения несущей частоты с $f_0 = 300 \dots 406$ МГц до $f_0 = 6700$ МГц. При этом возрастает (см. рис. 8б) пропускная способность канала с $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty} = 0,8$ до $C_{\text{фл}} \approx 0,95$.

Выводы

Разработана методика оценки влияния мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы и выбора несущей частоты на пропускную способность канала спутниковой связи (на примере некогерентного приема сигналов BFSK).

Основными этапами данной методики являются:

1) задание исходных данных для среднего отношения сигнал/шум на входе приемника $\overline{h^2} = h^2$, несущей частоты f_0 и ширины F спектра сигнала, СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$;

2) определение СКО флуктуации фазового фронта волны на выходе ионосферы (6) $\sigma_{\varphi} \sim \sigma_{\Delta N_T} / f_0$;

3) определение параметра распределения Райса, характеризующего глубину замираний сигнала на входе приемника ССС (7) $\gamma^2 \sim 1/\sigma_{\varphi}^2 \sim (f_0/\sigma_{\Delta N_T})^2$;

4) определение вероятности ошибочного приема сигналов с райсовскими замираниями (8) $P_{\text{ош}} = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$;

5) определение нормированной пропускной способности симметричного бинарного канала связи с райсовскими замираниями (12, 13) $C/F = C(\infty < \gamma^2 < 0)/F = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$;

6) определение величины (15) $C_{\text{фл}} = C_{\gamma} / C_{\infty} = \psi(\overline{h^2}, \gamma^2)$ уменьшения пропускной способности канала связи с замираниями райсовского типа $C_{\gamma} = C(\infty < \gamma^2 < 0)/F$ относительно канала связи без замираний $C_{\infty} = C(\gamma^2 = \infty)/F$.

Новизна разработанной методики состоит в применении моделей изменения по высоте электронной концентрации в мелкомасштабном ионосферном образовании и процесса возникновения ионосферных замираний при распространении радиоволн в ССС (рис. 1) в качестве основы для получения зависимости пропускной способности спутникового канала связи с замираниями от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$), величина которой может быть измерена разработанным в [17, 18] комплексом GPS- мониторинга ионосферы.

На основе разработанной методики получены графики зависимостей (рис. 7–8) вероятности ошибочного приема бинарных сигналов $P_{\text{ош}} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \overline{h^2})$ в ССС и относительной пропускной способности $C_{\text{фл}} = \psi(\sigma_{\Delta N_T}, f_0, \overline{h^2})$ канала спутниковой связи от изменения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T} = 10^{13} \dots 10^{18} \text{ м}^{-2}$) в ионосфере, выбора несущей частоты ($f_0 = 300 \dots 6700 \text{ МГц}$) и среднего отношения сигнал/шум на входе приемника ($\overline{h^2} = h^2$).

Анализ указанных графиков позволил выявить следующие основные закономерности.

1. Увеличение СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ($\sigma_{\Delta N_T}$) при естественных и искусственных возмущениях ионосферы приводит к значительному (на 1-5 порядков) возрастанию вероятности ошибочного приема (до $P_{\text{ош}} \sim 10^{-1}$) бинарных сигналов в ССС (рис. 7) и небольшому снижению относительной пропускной способности (до $C_{\text{фл}} = C_{\gamma}/C_{\infty} = 0,54 \dots 0,8$) канала спутниковой связи (рис. 8).

2. Повышение отношения С/Ш (h^2) на входе приемника ССС в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы обеспечивает незначительное уменьшение вероятности ошибочного приема и увеличение относительной пропускной способности канала.

3. Повышение несущей частоты ССС с $f_0 = 300 \text{ МГц}$ до 6700 МГц в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы обеспечивает значительное уменьшение вероятности ошибки (до 4–5 порядков) и увеличение относительной пропускной способности спутникового канала выше $C_{\text{фл}} = 0,8$.

На основе разработанной методики планируется исследование устойчивости телекоммуникационной сети спутниковой связи к деструктивным воздействиям [19] с целью оценки информационной доступности и вероятности доведения сообщения в системах спутниковой связи при интегральном воздействии активных и пассивных помех.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-21-00768 (<https://rscf.ru/project/22-21-00768>) «Методология построения структурно-физических моделей трансionoсферных радиоканалов и их применения к анализу спутниковых радиосистем при ионосферных сцинтилляциях».

Литература

1. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Инфокоммуникационные технологии. Приложение к журналу. 2006. № 4. 357 с.
2. Кловский Д. Д., Сойфер В. А. Пропускная способность многолучевых каналов // Проблемы передачи информации. 1972. Т. 8. № 1. С. 16–25.
3. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Издательство «Советское радио», 1963. 576 с.
4. Дубровский В. В., Отрох С И., Попова М. С. Оценка пропускной способности канала с аддитивными и мультипликативными помехами для сигнальной конструкции на основе фазовой манипуляции // Проблемы инфокоммуникаций. 2017. № 2 (6). С. 88–94.
5. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillation in the ionosphere // Proceedings of the IEEE. 1982. Vol. 70. No. 4. P. 324–359.
6. Чечин Г. В. Спутниковые системы связи на базе негеостационарных ретрансляторов. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 118 с.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2017. 1100 с.
8. Пенин П. И. Системы передачи цифровой информации. М.: Издательство «Советское радио», 1976. 368 с.
9. Диптан П. А. Алгоритм оценки пропускной способности спутникового канала связи с замираниями // Студенческая наука – для развития информационного общества: сборник научных трудов по материалам XIV Всероссийской научно-технической конференции (Ставрополь, 18 мая 2023 г.). Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2023. С. 124–127.
10. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи MUOS // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 89–116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306
11. 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
12. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец–Д1М» // Презентация МСПСС «Гонец–Д1М» [Электронный ресурс]. 11.09.2023. – URL: <https://gonets.ru/rus/uslugi/sistema-gonets> (дата обращения 11.09.2023).
13. Коверзнев Е. А., Сурков Д. М. Анализ надежности связи в системе КОСПАС-САРСАТ // Научный вестник Московского государственного университета гражданской авиации. 2006. № 99. С. 111–115.
14. Назаров Л. Е., Антонов Д. В., Батанов В. В., Зудилин А. С., Смирнов М. Т. Модели сцинтилляции сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиоприемам // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2019. № 11 (1). С. 57–64.

15. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1–34. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf>.

16. Афраймович Э. Л., Астафьева Э. И., Воейков С. В., Гаврилюк Н. С., Едемский И. К., Живетьев И. В., Ишин А. Б., Косогоров Е. А., Леонович Л. А., Лесюта О. С., Паламарчук К. С., Первалова Н. П., Полякова А. С., Смольков Г. Я., Ясюкевич Ю. В. Исследования ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирования в ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика. 2011. № 18 (131). С. 24–39.

17. 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. № 1. P. 1–14. DOI: 10.1007/s10291-023-01550-1

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

19. Диптан П. А. Актуальные вопросы повышения устойчивости телекоммуникационной сети спутниковой связи к деструктивным воздействиям // Наука в современном обществе: закономерности и тенденции развития: сборник статей Международной научно-практической конференции (Оренбург, 27 июня 2021 г.). Уфа, 2021. С. 28–32.

References

1. 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).

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

3. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenij* [Theory of discrete messages transmission]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1963. 576 p. (in Russian).

4. Dubrovsky V. V., Otrok S. I., Popova M. S. The capacity estimation of a channel with additive and multiplicative interference for a phase shift-keying signal. *Problems of infocommunication*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 88–94 (in Russian).

5. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillation in the ionosphere, *Proceedings of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 4, pp. 324–359.

6. Chechin G. V. *Sputnikovye sistemy svyazi na baze negeostatsionarnykh retransliatorov* [Satellite communication systems based on non-geostationary repeaters]. Moscow, Hot line–Telecom Publ., 2020. 118 p. (in Russian).

7. Sklar Bernard. *Digital Communication Fundamentals and Application*. Prentice Hall Publ., 2017. 1104 p.

8. Penin P. I. *Sistemy peredachi tsifrovoi informatsii* [Digital information transmission systems]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1976. 368 p. (in Russian).

9. Diptan P. A. Algoritm otsenki propusknoi sposobnosti sputnikovogo kanala sviazi s zamiraniiami [Fading satellite link throughput estimation algorithm]. *Studencheskaia nauka – dlia razvitiia informatsionnogo obshchestva: sbornik nauchnykh trudov po materialam XIV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Student Science for the Development of the Information Society: Collection of Scientific papers based on the Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference]. Stavropol, North-Caucasian Federal University, 2023, pp. 124–127 (in Russian).

10. Makarenko S. I. Descriptive Model of MUOS satellite communication system. *System of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 89–116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306 (in Russian).

11. 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.

12. Multifunctional system of personal satellite communication and data transmission «Gonets-D1M». Presentation, 11.09.2023. Available at: <https://gonets.ru/rus/uslugi/sistema-gonets> (accessed 11.09.2023).

13. Koverznev E. A., Surkov D. M. Reliability Analysis of the COSPAS-SARSAT channel. *Civil Aviation high technologies*, 2006, no. 99, pp. 111–115 (in Russian).

14. Nazarov L. E., Antonov D. V., Batanov V. V., Zudilin A. S., Smirnov M. T. The scintillation models for signal propagation through satellite ionospheric channels. *Radioelectronic. Nanosystems. Informatsionnyye tekhnologii*, 2019, vol. 1, no. 11, pp. 57–64 (in Russian).

15. Makarenko S. I. Descriptive Model of Iridium Satellite Communication System. *System of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 1–34. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf> (in Russian).

16. Afraymovich E. L., Astafyeva E. I., Voeikov S. V., Gavrilyuk N. S., Edemsky I. K., Zhivetyev I. V., Ishin A. B., Kosogorov E. A., Leonovich L. A., Lesyuta O. S., Palamarchuk K. S., Perevalova N. P., Polyakova A. S., Smolkov G. Ya., Yasyukevich Yu. V. Issledovanie sredneshirotnykh ionosferno-magnitosfernykh vozmushchenii, vliiaushchikh na funktsionirovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem [Investigation of average latitude ionospheric-magnetospheric disturbances affecting functioning of satellite radio navigation systems. *Solar–terrestrial physics*, 2011, vol. 131, no. 18, pp. 24–39 (in Russian).

17. 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.

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

19. Diptan P. A. Aktual'nye voprosy povysheniia ustoichivosti telekommunikatsionnoi seti sputnikovoi sviazi k destruktivnym vozdeistviyam [Actual issues of improving the stability of the telecommunications network of

satellite communications to destructive influences]. *Nauka v sovremennom obshchestve: zakonomernosti i tendentsii razvitiia: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Science in modern society: patterns and development trends: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. Orenburg, 2021, pp. 28–32 (in Russian).

Статья поступила 10 ноября 2023 г.

Информация об авторах

Пашинцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем. 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 информационной безопасности автоматизированных систем. 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

Гринеv Евгений Михайлович – аспирант кафедры информационной безопасности автоматизированных систем. Северо-Кавказский Федеральный Университет. Область научных интересов: повышение качества коротковолновой связи в условиях диффузности ионосферы, влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи. E-mail: saru3d@yandex.ru

Киселеv Николай Владимирович – соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры информационной безопасности автоматизированных систем. Северо-Кавказский Федеральный Университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи. E-mail: vkicelev@rambler.ru

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

Methodology for estimating the bandwidth of a satellite communication channel with fading

V. P. Pashintsev, P. A. Diptan, E. M. Grinev, N. V. Kiselev

Problem statement: It is known that signal fading leads to a decrease in interference immunity and bandwidth of the communication channel. Existing methods for estimating the capacity of a satellite communication channel do not take into account the influence of ionospheric perturbations accompanied by the formation of small-scale inhomogeneities on the occurrence of fading of received signals. **The purpose of the work:** is to develop a methodology for assessing the impact of small-scale fluctuations in the total electron content (TEC) of the ionosphere and the choice of the carrier frequency on the capacity of the satellite communication channel. Result: a set of analytical expressions was obtained to estimate the dependence of the normalized bandwidth of the transionospheric communication channel on the signal-to-noise ratio at the receiver input, the standard deviation of small-scale fluctuations of the ionospheric TPP and the carrier fre-

quency of the signal. **Novelty:** the novelty of the developed methodology lies in the application of models of changes in the height of the electron concentration in small-scale ionospheric formation and the process of ionospheric fading during the propagation of radio waves in satellite communication systems as a basis for obtaining the dependence of the capacity of the satellite communication channel with fading on the standard deviation of small-scale fluctuations of the ionospheric TEC. **Practical significance:** the results obtained from the development of the methodology allow us to identify the main regularities of the influence of the increase in the carrier frequency of the satellite communication system, the signal-to-noise ratio at the receiver input and small-scale fluctuations of the total electronic content of the ionosphere at its natural and artificial perturbations on the change in the capacity of the satellite communication channel

Key words: capacity, bandwidth, probability of error, satellite link, fading, ionosphere, total electronic content, TEC, small-scale heterogeneities.

Information about Authors

Vladimir Petrovich Pashintsev – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of Information Security of Automated Systems. 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 Information Security of Automated Systems. 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

Evgeny Mikhailovich Grinev – graduate student of the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: improving the quality of shortwave communication in diffuse ionospheric conditions, the influence of ionospheric perturbations on the quality indicators of satellite communication systems. E-mail: saru3d@yandex.ru

Nikolaj Vladimirovich Kiselev – doctoral student at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric perturbations on the quality indicators of satellite communication systems. E-mail: vkicelev@rambler.ru

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