

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.2>

УДК: 621.396

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДИФФУЗНОСТИ ИОНОСФЕРЫ И ВЫБОРА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ

В.П. Пашинцев¹, Д.А. Белоконь¹, В.А. Цимбал², С.А. Коваль³, Д.А. Скорик¹

¹ Северо-Кавказский федеральный университет,
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д.1

² Военная академия ракетных войск стратегического назначения
(филиал в г. Серпухов, Московской области),
142210, г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

³ Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко
350063, Краснодар, ул. Красина, д. 4.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2024 г.

Аннотация. Известно, что помехоустойчивость коротковолновых каналов связи с одним дискретным лучом (модой) зависит от глубины замираний принимаемых сигналов. Последняя, в свою очередь, зависит от диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты волны. В одномодовом коротковолновом канале связи замирания сигнала обычно описываются распределением Райса. Известна методика оценки параметра райсовских замираний в одномодовом коротковолновом канале от выбора рабочей частоты. Однако ее целесообразно развить в направлении определения зависимости параметра Райса от отношения рабочей частоты к максимально применимой частоте и уровня диффузности ионосферы. Целью статьи является разработка методики оценки вероятности ошибочного приема сигналов с бинарной ортогональной частотной модуляцией в одномодовом коротковолновом канале связи в зависимости от уровня диффузности ионосферы и выбора отношения рабочей частоты волны к максимально применимой частоте. Данная методика разработана в 2 этапа:

1) определения зависимости параметра Райса от отношения рабочей частоты к максимально применимой и уровня диффузности ионосферы; 2) определения зависимости вероятности ошибочного приема сигналов от отношения рабочей частоты к максимально применимой частоте и уровня диффузности ионосферы. Установлено, что при сильной диффузности ионосферы замирания в одномодовом коротковолновом канале связи в диапазоне отношений рабочих частот к максимально применимой частоте от 1 до 0,4 будут близкими к релейевским, а при нормальном уровне диффузности значение параметра Райса может изменяться в широких пределах: от 0,2 до 100. Получены аналитические выражения для определения зависимости вероятности ошибочного приема сигналов с бинарной ортогональной частотной модуляцией от отношения рабочей частоты к максимально применимой частоте и уровня диффузности ионосферы. Проанализировано влияние возрастания диффузности ионосферы при ее возмущениях на величину допустимого для обеспечения требуемой вероятности ошибки отношения сигнал/шум на входе приемника при различном отношении рабочей частоты к максимально применимой частоте. На этой основе разработаны рекомендации по выбору отношения рабочей частоты к максимально применимой частоте, которые обеспечивают снижение допустимого отношения сигнал/шум на входе приемника при различных уровнях диффузности ионосферы.

Ключевые слова: однолучевый коротковолновый канал связи, бинарная ортогональная частотная модуляция, ионосфера, диффузность, замирания, параметр Райса, помехоустойчивость.

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

Автор для переписки: Белоконь Дмитрий Александрович, ahoi8@yandex.ru

Введение

Известно [1-7], что невысокая помехоустойчивость и скорость передачи информации в коротковолновых (КВ) каналах связи объясняется наличием дискретной и диффузной многолучевости при распространении радиоволн (РРВ), которые вызывают появление замираний и межсимвольной интерференции принимаемых сигналов. Дискретная многолучевость обусловлена отражением волны от различных слоев ионосферы и поверхности Земли. Диффузная многолучевость обусловлена рассеянием отраженной волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы.

В настоящее время известно несколько способов устранения дискретной многолучевости в КВ каналах связи:

1) выбор рабочей частоты f_0 ближе к максимально применимой частоте (МПЧ) f_m , радиолинии, поскольку с увеличением f_0 уменьшается число дискретных лучей, достигающих точки приема, и при равенстве $f_0 = f_m$ (т.е. отношении $f_0/f_m = 1$) точка приема достигает только один дискретный луч [3, 4];

2) применение выносных ретрансляторов на расстояние 2000...3000 км, при котором наблюдается наибольшая вероятность распространения волны одним скачком по траектории одного дискретного луча (моды) [1, 2, 4, 5]; 3) передача широкополосных сигналов (ШПС) для разделения дискретных лучей по времени их прихода и последующего сложения результатов обработки [8, 9]; 4) применение цифровых фазированных антенных решеток (ЦФАР) с узкой диаграммой направленности (в т. ч. и кольцевых ЦФАР с веером диаграмм направленностей) для выделения одного из дискретных лучей (одной моды) [10, 11] и слежения за изменением направления его прихода с помощью современных зондов – пеленгаторов [12].

Первый способ устранения дискретной многолучевости в КВ каналах связи на практике не используется из-за неточного знания МПЧ и необходимости обеспечения надежного (не ниже 90%) отражения волны от ионосферы. Поэтому традиционно оптимальная рабочая частота (ОРЧ) по условию отражения волны выбирается ниже МПЧ в диапазоне $f_0/f_m = 0,8...0,9$ в средних широтах (или до

$f_0/f_m = 0,6$ – в высоких широтах), что обуславливает возможность прихода в точку приема нескольких дискретных лучей [2-7]. Применение второго способа требует построения сети КВ связи с размещением ретрансляторов на 2000...3000 км и при этом не гарантирует приход в точку приема одного дискретного луча. Третий способ (применение ШПС) разделения дискретных лучей обеспечивается за счет расширения полосы спектра сигналов. Поэтому его возможности ограничены из-за небольшой частотной емкости КВ диапазона частот (3...30 МГц) и высокой вероятности попадания в полосу ШПС сосредоточенных помех.

Способ выделения одного дискретного луча с помощью ЦФАР с узкой диаграммой направленности представляется наиболее перспективным для создания однолучевого (одномодового) КВ канала связи, в котором замирания принимаемого сигнала возникают по причине только диффузной многолучевости, формируемой из-за рассеяния отраженной волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы. Известно [1, 6, 13 - 15], что в КВ канале связи с одним дискретным лучом (модой) и диффузной многолучевостью замирания амплитуды принимаемого сигнала чаще всего описываются распределением Райса, которое характеризуется параметром γ^2 с широким диапазоном значений: $0 \leq \gamma^2 \leq 121$ [7]. В [8, 13, 14, 16, 17] установлена аналитическая зависимость $P_{\text{ош}} = \psi(\gamma^2, h^2)$ вероятности ошибки ($P_{\text{ош}}$) при оптимальном некогерентном приеме сигналов с бинарной ($M=2$) ортогональной частотной модуляцией (*BFSK*) от параметра распределения Райса γ^2 и отношения сигнал/шум (С/Ш) h^2 на входе приемника.

Согласно экспериментальным данным [1, 4, 5] в одномодовом КВ канале параметр Райса γ^2 , характеризующий глубину общих (неселективных) замираний принимаемых сигналов, зависит от выбора рабочей частоты f_0 относительно максимально применимой частоты (МПЧ) f_m . По мере приближения рабочей частоты к МПЧ (т.е. роста отношения f_0/f_m) параметр Райса уменьшается (т.е. $\gamma^2 \sim (f_0/f_m)^{-1}$) и при отношении $f_0/f_m > 0,9$ параметр Райса $\gamma^2 < 1$. При $\gamma^2 = 0$ замирания будут наиболее глубокими и описываться релеевским распределением.

Поскольку в условиях диффузности ионосферы глубина замираний принимаемых сигналов в одномодовом КВ канале связи при неизменном отношении $f_0/f_m = const$ возрастает (т.е. параметр Райса $\gamma^2 \sim (f_0/f_m)^{-1}$ уменьшается), то практические рекомендации по повышению устойчивости КВ связи в этих условиях сводятся к уменьшению отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ [18, 19]. Однако в руководстве по организации ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы [20] рекомендуется при возникновении диффузности ионосферы выбирать рабочую частоту ближе к МПЧ (т.е. повышать отношение f_0/f_m) и изменять вид работ (т.е. вид модуляции). Ввиду противоречивости существующих практических рекомендаций относительно выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ задача оценки зависимости помехоустойчивости одномодового КВ канала связи с различными видами модуляции от параметров диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты относительно МПЧ является актуальной.

1. Постановка задачи

Очевидно, что глубина замираний принимаемого сигнала в одномодовом КВ канале связи с диффузной многолучевостью должна зависеть не только от выбора рабочей частоты относительно МПЧ (f_0/f_m), но и от параметра, характеризующего первопричину диффузной многолучевости: мелкомасштабных неоднородностей ионосферы. Таким параметром являются относительные флуктуации электронной концентрации в мелкомасштабных (100...1000 м) неоднородностях ионосферы, которые описываются их интенсивностью β_n [21-22]. В [23] обосновано, что в однолучевом КВ канале связи величина интенсивности неоднородностей ионосферы ($0 \leq \beta_n \leq 1$) характеризует уровень (степень) диффузности ионосферы.

Отсюда следует, что параметр Райса в одномодовом КВ канале связан функциональной зависимостью $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m, \beta_n)$ с отношением f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ и уровнем диффузности ионосферы β_n .

Заметим, что в настоящее время разработано 2 способа мониторинга величины интенсивности ($\beta_{и}$) неоднородностей ионосферы: по данным вертикального зондирования [24] и по данным GPS-мониторинга с помощью спутниковых радионавигационных систем [25, 26].

В [27] разработана методика расчета зависимости $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m)$ параметра Райса в одномодовом КВ канале связи от выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ. Однако указанные расчеты ограничены случаем рассмотрения уровня диффузности в нормальной (невозмущенной) ионосфере и не предусматривают оценку влияния возрастания уровня диффузности $\beta_{и}$ при возмущениях ионосферы на изменение параметра Райса γ^2 . Поэтому необходимо разработать методику [27] для получения зависимости $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m, \beta_{и})$ параметра Райса в одномодовом КВ канале связи не только от выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ, но и уровня диффузности ионосферы $\beta_{и}$.

В [28] установлена аналитическая зависимость $P_{ош} = \psi(f_0, \beta_{и}, h^2)$ вероятности ошибки при оптимальном некогерентном приеме сигналов *BFSK* в одномодовом КВ канале от выбора рабочей частоты f_0 , уровня диффузности ионосферы $\beta_{и}$ и отношения С/Ш h^2 на входе приемника. Однако решение задачи оценки показателей качества функционирования КВ связи предполагает на начальном этапе определение МПЧ радиолинии и выбор отношения f_0/f_m рабочей частоты к максимально применимой частоте [3, 4, 13]. Поэтому методику [28] целесообразно развить в направлении установления зависимости вероятности ошибочного приема сигналов *BFSK* от выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к максимально применимой частоте КВ радиолинии, т.е. $P_{ош} = \psi(f_0/f_m, \beta_{и}, h^2)$.

Целью статьи является разработка методики оценки вероятности ошибочного приема сигналов с бинарной ортогональной частотной модуляцией (*BFSK*) в одномодовом коротковолновом канале связи в зависимости от уровня диффузности ионосферы и выбора отношения рабочей частоты волны к максимально применимой частоте.

Данная методика должна включать следующие этапы определения:

1) зависимости $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m, \beta_n)$ параметра Райса в одномодовом КВ канале связи от отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы β_n ;

2) зависимости $P_{\text{ош}}(f_0/f_m, \beta_n, h^2)$ вероятности ошибочного приема сигналов с *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы β_n .

Эти зависимости позволят на основе результатов [24-27] ионосферного зондирования мелкомасштабных неоднородностей ионосферы (β_n) выработать научно обоснованные практические рекомендации по выбору таких отношений рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_m) в одномодовом КВ канале связи, которые обеспечат допустимое значение вероятности ошибочного приема сигналов с *BFSK*.

2. Зависимость параметра Райса в одномодовом КВ канале связи от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы

Согласно [29] диффузность ионосферы можно условно разделить на пять уровней: 1) отсутствия диффузности $\beta_n = 10^{-3}$; 2) слабой (или нормальной) – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$; 3) умеренной – $\beta_n = 10^{-2}$; 4) средней – $\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-2}$; 5) сильной – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$.

Известно выражение для определения параметра Райса в одномодовом КВ канале связи [27]

$$\gamma^2 = \left\{ \exp \left[\sigma_\varphi^2 (f_0, \beta_n) \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где σ_φ^2 – дисперсия флуктуаций фазы во фронте отраженной волны на выходе неоднородной ионосферы. Выражение для среднеквадратического отклонения (СКО) флуктуаций фазового фронта отраженной определяется как

$$\sigma_\varphi = \pi f_0 \beta_n / c K_s^2 \sec^2 \varphi_0 (\sqrt{\pi} r_0 L_s)^{0,5}, \quad (2)$$

где c – скорость света; K_s – поправочный коэффициент на сферичность Земли и ионосферы; φ_0 – угол падения волны на нижнюю границу h_0 отражающего слоя F

ионосферы; r_0 – характерный (средний) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (200...500 м); L_3 – эквивалентный однородный путь волны в слое $F2$ ионосферы (зависящий от его критической частоты f_{F2} , высоты нижней границы h_0 и максимума ионизации h_m слоя $F2$ ионосферы, дальности радиосвязи d). Входящие в (2) параметры детально описаны в [27].

Выражение (2) можно выразить через отношение f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ и уровень диффузности ионосферы $\beta_{и}$ как

$$\sigma_\varphi = \pi(f_0/f_m)\beta_{и}f_m/cK_s^2 \sec^2 \varphi_0 (\sqrt{\pi r_0 L_3})^{0,5}. \quad (3)$$

Подстановка (3) в (1) позволяет получить аналитическую зависимость $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m, \beta_{и})$ параметра Райса в одномодовом КВ канале связи от выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы $\beta_{и}$ в следующем виде:

$$\gamma^2 = \left\{ \exp \left[\left(\pi(f_0/f_m)\beta_{и}f_m/cK_s^2 \sec^2 \varphi_0 \right)^2 \sqrt{\pi r_0 L_3} \right] - 1 \right\}^{-1}. \quad (4)$$

На рисунке 1 представлены зависимости параметра Райса в КВ канале связи от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы. Они получены на основе выражения (4) и исходных данных, представленных в [28, 30] для дневного (12:00) сеанса связи и пяти уровней диффузности ионосферы: 1) отсутствия диффузности – $\beta_{и} = 10^{-3}$; 2) слабой (нормальной) – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$; 3) умеренной – $\beta_{и} = 10^{-2}$; 4) средней – $\beta_{и} = 2,5 \cdot 10^{-2}$; 5) сильной – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$.

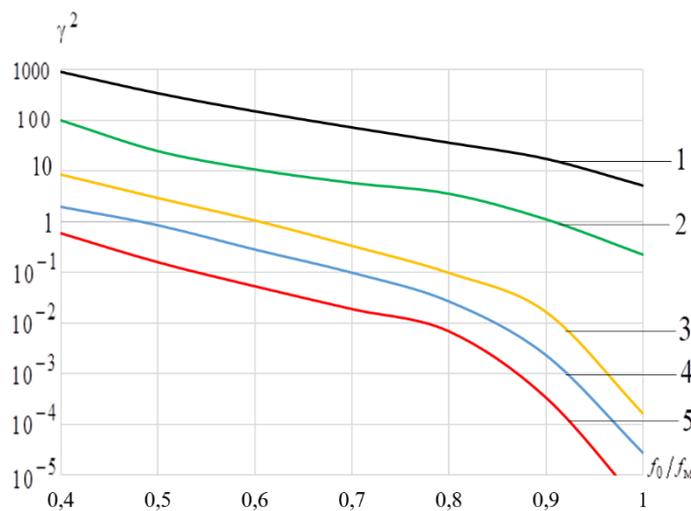


Рис. 1. Зависимость параметра Райса от отношения рабочей частоты к МПЧ при различной диффузности ионосферы: отсутствия диффузности – $\beta_{и} = 10^{-3}$ (линия 1), слабой – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$ (линия 2), умеренной – $\beta_{и} = 10^{-2}$ (линия 3), средней – $\beta_{и} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (линия 4), сильной – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$ (линия 5).

Анализ изменения параметра Райса на рисунке 1 показывает, что при отсутствии диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$ (линия 1) и отношении рабочей частоты к МПЧ в диапазоне $f_0/f_m = 0,8 \dots 0,6$ значение параметра Райса будет очень большим $\gamma^2 = 40 \dots 120$ (что свидетельствует об отсутствии замираний принимаемых сигналов и соответствует экспериментальным данным [7], согласно которым $\gamma^2 \leq 121$). При равенстве рабочей частоты МПЧ ($f_0/f_m = 1$) будут наблюдаться заметные замирания принимаемых сигналов, поскольку значение параметра Райса составляет $\gamma^2 = 5$. Это соответствует шкале [13, 20] оценки диффузности 0 баллов, когда диффузности нет или наблюдаются ее признаки с приближением частоты к критической (что обеспечивает приближение рабочей частоты к МПЧ: $f_0/f_m \rightarrow 1$).

При нормальном уровне диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ (линия 2) и отношении рабочей частоты к МПЧ $f_0/f_m = 1$ наблюдаются достаточно глубокие замирания, при которых $\gamma^2 = 0,2$ (т.е. близкие к релеевским), при понижении отношения рабочей частоты к МПЧ до $f_0/f_m = 0,4$ значение параметра Райса увеличится до $\gamma^2 = 99,5$ при котором замирания сигнала будут практически отсутствовать. При умеренной $\beta_{\text{и}} = 10^{-2}$ (линия 3) и средней ионосферной диффузности $\beta_{\text{и}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (линия 4) и отношении рабочей частоты к МПЧ $f_0/f_m = 1$ значения параметра Райса близки к нулю ($\gamma^2 \approx 0$), что указывает на наиболее глубокие замирания релеевского типа. При понижении отношения рабочей частоты к МПЧ до $f_0/f_m = 0,4$ в условия умеренной диффузности значения параметра Райса составит $\gamma^2 = 8,3$, что свидетельствует о незначительных замираниях сигнала, в условиях средней диффузности значения параметра Райса составит $\gamma^2 = 2$, что указывает на почти релеевский характер замираний. При сильной диффузности $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ значения параметра Райса будут $\gamma^2 < 1$.

Отсюда можно сделать вывод, что при сильной диффузности ионосферы замирания в одномодовом КВ канале связи в диапазоне рабочих частот $f_0/f_m = 1 \dots 0,4$ будут близкими к релеевским $\gamma^2 = 0 \dots 0,58$, а при умеренном и нормальном уровне диффузности значения параметра Райса может изменяться в

широких пределах: $\gamma^2 = 0,0002\dots 9$ и $\gamma^2 = 0,2\dots 100$. В условиях отсутствия диффузности ионосферы параметр Райса имеет значения $\gamma^2 = 6\dots 880$ ().

Таким образом, на основе полученного аналитического выражения (4) на рис. 1 представлена искомая зависимость $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m, \beta_{и})$ параметра Райса в одномодовом КВ канале связи от выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы $\beta_{и}$. Достоверность приведенной на рис. 1 зависимости подтверждается экспериментальными данными [5], согласно которым при нормальной ионосфере в одномодовом КВ канале связи при отношении $f_0/f_m > 0,9$ значение параметра Райса $\gamma^2 < 1$, а при $f_0/f_m < 0,9$ величина $\gamma^2 > 1$.

3. Зависимость вероятности ошибочного приема сигналов *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы

Известна [8, 13, 14, 16, 17] аналитическая зависимость вероятности ошибки $P_{ош}$ при оптимальном некогерентном приеме сигналов с бинарной ортогональной частотной модуляцией (*BFSK*) от параметра распределения Райса γ^2 ($0 \leq \gamma^2 \leq \infty$) и отношения $C/\text{Ш}$ h^2 на входе приемника

$$P_{ош} = \frac{\gamma^2 + 1}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp \left[-\frac{\gamma^2 h^2}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \right]. \quad (5)$$

Подстановка в (5) полученной аналитической зависимости (4) $\gamma^2 = \psi(f_0/f_m, \beta_{и})$, конкретизированной на рис. 1, позволяет получить искомую зависимость $P_{ош}(f_0/f_m, h^2, \beta_{и})$ вероятности ошибочного приема сигналов *BFSK* в КВ канале связи от выбора отношения f_0/f_m рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы $\beta_{и}$. На рисунке 2 представлены графики зависимости $P_{ош} = \psi(f_0/f_m, h^2, \beta_{и})$, полученные при различных уровнях диффузности ионосферы: а) отсутствия диффузности – $\beta_{и} = 10^{-3}$, б) слабой – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$, в) умеренной – $\beta_{и} = 10^{-2}$, г) средней – $\beta_{и} = 2,5 \cdot 10^{-2}$, д) сильной – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$ и различных отношениях рабочей частоты к МПЧ: $f_0/f_m = 1$; $f_0/f_m = 0,8$; $f_0/f_m = 0,4$.

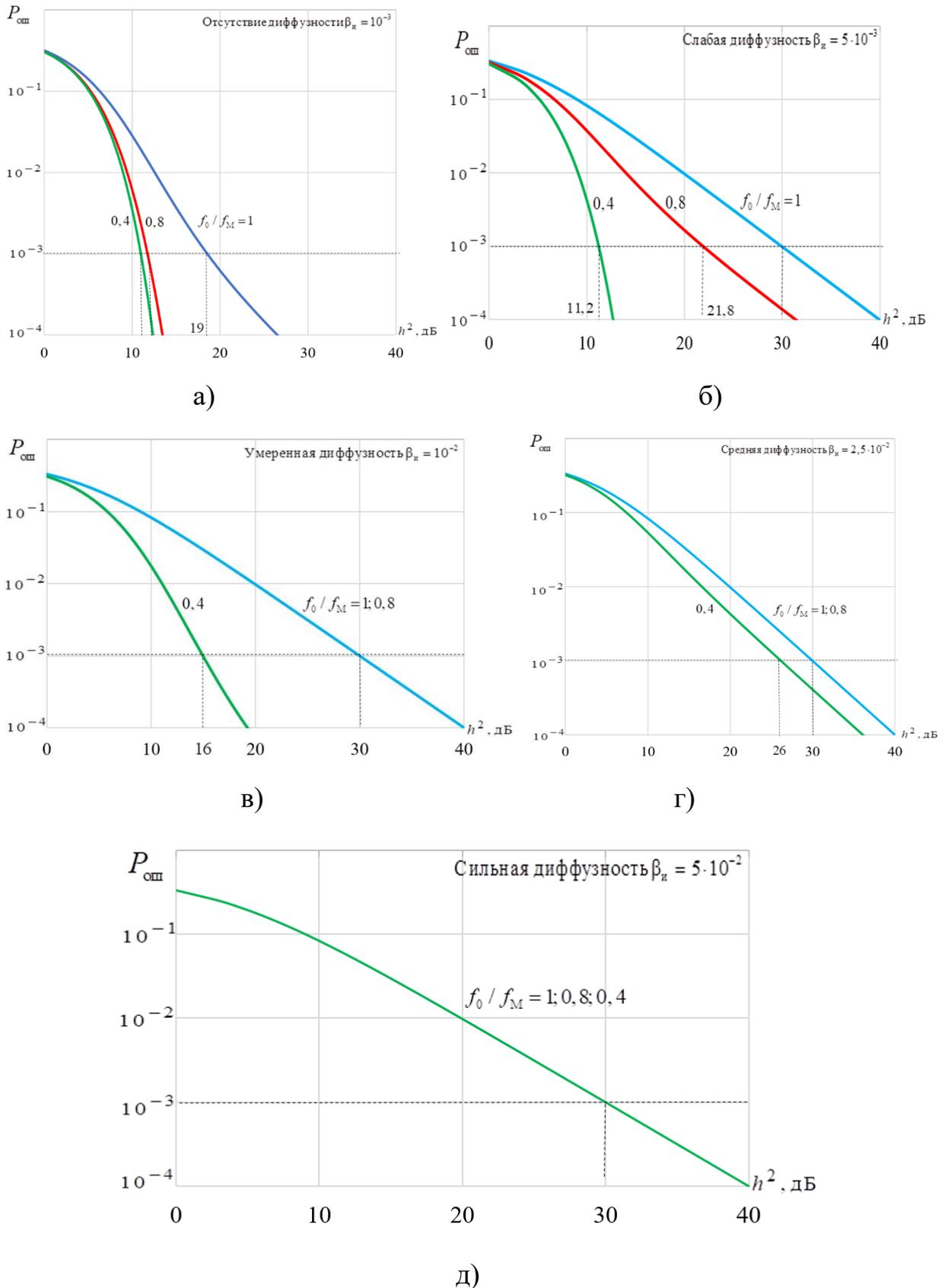


Рис. 2. Зависимости $P_{\text{ош}}(f_0/f_M, h^2, \beta_n)$ вероятности ошибочного приема сигналов BFSK в КВ канале связи от отношения С/Ш при различных отношениях рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_M) и уровнях диффузности: а) отсутствия диффузности – $\beta_n = 10^{-3}$, б) слабой – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$, в) умеренной – $\beta_n = 10^{-2}$, г) средней – $\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-2}$, д) сильной – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$.

Анализ рис. 2а показывает, что при отсутствии диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$) для обеспечения допустимого в КВ каналах связи значения вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$ необходимо реализовать следующие значения допустимого отношения С/Ш $h^2 = h^2_{\text{доп}}$, выраженного в децибелах (дБ): $10\lg h^2_{\text{доп}} = h^2_{\text{доп}} \text{ (дБ)} = 19$ дБ при $f_0/f_{\text{м}} = 1$; $h^2_{\text{доп}} = 12$ дБ при $f_0/f_{\text{м}} = 0,8$; $h^2_{\text{доп}} = 11$ дБ при $f_0/f_{\text{м}} = 0,4$. При слабой (нормальной) диффузности ($\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$) ионосферы (рис. 2б) для обеспечения допустимого в КВ каналах связи значения вероятности ошибки $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$ необходимо реализовать следующие значения допустимого отношения С/Ш $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ при $f_0/f_{\text{м}} = 1$; $h^2_{\text{доп}} = 21,8$ дБ при $f_0/f_{\text{м}} = 0,8$; $h^2_{\text{доп}} = 11,2$ дБ при $f_0/f_{\text{м}} = 0,4$. Снижение допустимого отношения С/Ш на входе приемника с $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ до 11,2 дБ с уменьшением отношения рабочей частоты к МПЧ с $f_0/f_{\text{м}} = 1$ до 0,4 в одномодовом КВ канале объясняется (см. рис. 1, линия 2) значительным снижением глубины замираний (т.е. увеличением параметра Райса с $\gamma^2 = 0,2$ до 100).

При умеренной диффузности ($\beta_{\text{и}} = 10^{-2}$) ионосферы (рис. 2в) для обеспечения $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$ необходимо реализовать $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ при отношении рабочей частоты к МПЧ $f_0/f_{\text{м}} = 1$ и $f_0/f_{\text{м}} = 0,8$. При уменьшении отношения рабочей частоты к МПЧ до $f_0/f_{\text{м}} = 0,4$ допустимое отношение С/Ш на входе приемника уменьшается до $h^2_{\text{доп}} = 16$ дБ (поскольку с уменьшением $f_0/f_{\text{м}} = 0,8$ до 0,4 согласно рис. 1 (линия 3) параметр Райса возрастает с $\gamma^2 = 10^{-4}$ до 10). При средней диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$, рис. 2г) для обеспечения $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$ необходимо реализовать $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ при отношении рабочей частоты к МПЧ $f_0/f_{\text{м}} = 1$ и $f_0/f_{\text{м}} = 0,8$. При уменьшении отношения рабочей частоты к МПЧ до $f_0/f_{\text{м}} = 0,4$ допустимое отношение С/Ш на входе приемника уменьшается до $h^2_{\text{доп}} = 26$ дБ (поскольку с уменьшением $f_0/f_{\text{м}} = 0,8$ до 0,4 согласно рис. 1 (линия 4) параметр Райса возрастает с $\gamma^2 = 10^{-4}$ до 2, что говорит о замираниях близких к релейевским).

Согласно рис. 2д при сильном уровне диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ для обеспечения $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$ необходимо реализовать $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ при любом отношении рабочей частоты к МПЧ в диапазоне от $f_0/f_{\text{м}} = 1$ до 0,4. Неизменность

допустимого отношения С/Ш на входе приемника $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ с уменьшением отношения f_0/f_M с 1 до 0,4 в одномодовом КВ канале объясняется (см. рис. 1, линия 5) тем, что глубина замираний в этом диапазоне изменяется от $\gamma^2 \approx 10^{-5}$ до 0,58 и практически соответствует замираниям релейского типа (когда $\gamma^2 = 0$).

Таким образом, на основе полученного (4) и известного (5) аналитических выражений установлены искомые зависимости $P_{\text{ош}}(f_0/f_M, \beta_{\text{и}}, h^2)$ вероятности ошибочного приема сигналов с *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы, представленные на рис. 2.

4. Рекомендации по выбору отношений рабочей частоты к МПЧ в одномодовом КВ канале связи

Полученные зависимости $P_{\text{ош}}(f_0/f_M, \beta_{\text{и}}, h^2)$ вероятности ошибочного приема сигналов с *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы (рис. 2) позволяют определить допустимые (для обеспечения требуемой вероятности ошибки в КВ канале связи $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$) значения отношения сигнал/шум на входе приемника $h^2_{\text{доп}}(\beta_{\text{и}}, f_0/f_M, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$.

Они дают возможность проанализировать влияние роста диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$, при ее возмущениях на величину $h^2_{\text{доп}}(\beta_{\text{и}}, f_0/f_M, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ при выборе различных отношений рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_M). На этой основе можно выработать рекомендации по выбору отношения рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_M), которые обеспечивают снижение допустимого отношения сигнал/шум на входе приемника $h^2_{\text{доп}}(\beta_{\text{и}}, f_0/f_M, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ при различных уровнях диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$.

На основе выражений (4, 5) и рисунков 2а–2д на рисунке 3 приведены графики зависимости $h^2_{\text{доп}}(\beta_{\text{и}}, f_0/f_M, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* в одномодовом КВ канале связи от возрастания уровня диффузности ионосферы в диапазоне от $\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$ до $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ при различном отношении рабочей частоты к МПЧ: $f_0/f_M = 1; f_0/f_M = 0,8; f_0/f_M = 0,4$.

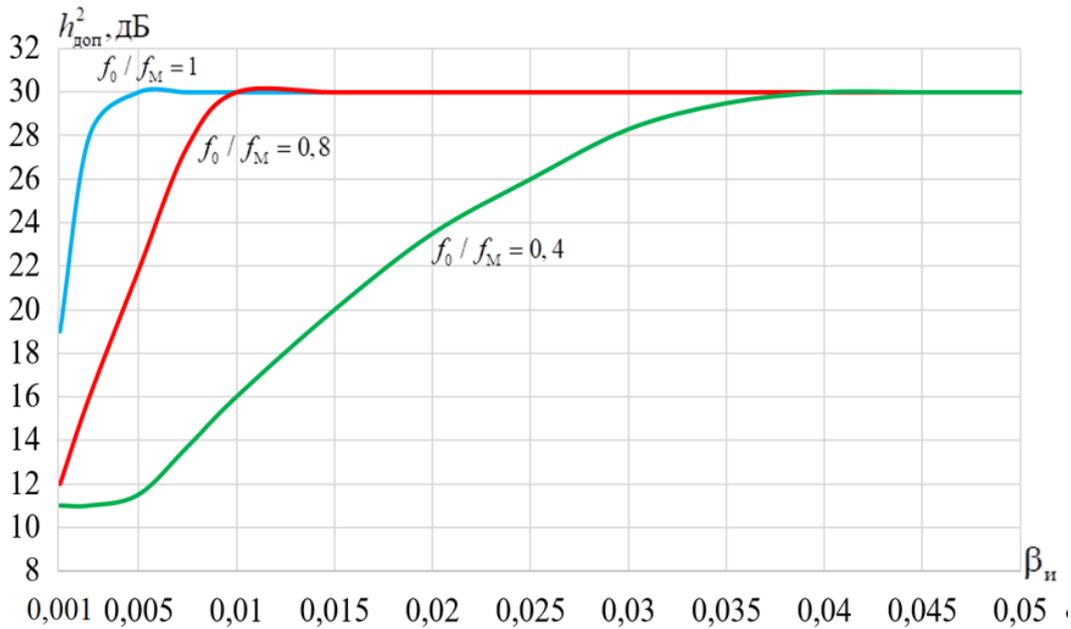


Рис. 3. Зависимости $h^2_{\text{доп}}(f_0/f_M, \beta_n, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ допустимого отношения С/Ш на входе приемника *BFSK* в одномодовом КВ канале от уровня диффузности β_n ионосферы при различном отношении рабочей частоты к МПЧ: $f_0/f_M = 1; f_0/f_M = 0,8; f_0/f_M = 0,4$.

По результатам рисунков 2а–2д на рисунке 4 приведены графики зависимости $h^2_{\text{доп}}(f_0/f_M, \beta_n, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ при различном уровне диффузности ионосферы: отсутствия диффузности – $\beta_n = 10^{-3}$ (линия 1), слабой – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$ (линия 2), умеренной – $\beta_n = 10^{-2}$ (линия 3), средней – $\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (линия 4), сильной – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$ (линия 5).

Анализ рисунка 3 показывает, что повышение уровня диффузности ионосферы в диапазоне от $\beta_n = 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ приводит к увеличению допустимого для обеспечения $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$ отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* в одномодовом КВ канале связи на 12–19 дБ при различных отношениях рабочей частоты к МПЧ ($f_0/f_M = 1 \dots 0,4$). При традиционном [3, 4, 13] отношении рабочей частоты к МПЧ $f_0/f_M = 0,8$ возрастание диффузности ионосферы в диапазоне $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-2}$, характерном для нормальной среднеширотной ионосферы [3, 21], обуславливает увеличение допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* с $h^2_{\text{доп}} = 12$ дБ (что соответствует практически отсутствию замираний сигнала) до 30 дБ (что соответствует замираниям релейского типа). При равенстве

рабочей частоты МПЧ ($f_0/f_m = 1$) увеличение допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* до $h_{\text{доп}}^2 = 30$ дБ обеспечивается при возрастании диффузности ионосферы до нормального (слабого) уровня $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$. При понижении отношения рабочей частоты к МПЧ до $f_0/f_m = 0,4$ возрастание диффузности ионосферы в диапазоне $\beta_{\text{и}} = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ обуславливает увеличение допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* с $h_{\text{доп}}^2 = 11$ дБ до 16 дБ. При этом возможно увеличение допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* до $h_{\text{доп}}^2 = 30$ дБ, если диффузность ионосферы увеличится почти до сильного уровня $\beta_{\text{и}} = 4 \cdot 10^{-2}$.

По результатам рисунков 2а–2д на рисунке 4 приведены графики зависимости $h_{\text{доп}}^2(f_0/f_m, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ при различной диффузности ионосферы: отсутствия диффузности – $\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$, слабой – $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$, умеренной – $\beta_{\text{и}} = 10^{-2}$, средней – $\beta_{\text{и}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$, сильной – $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$.

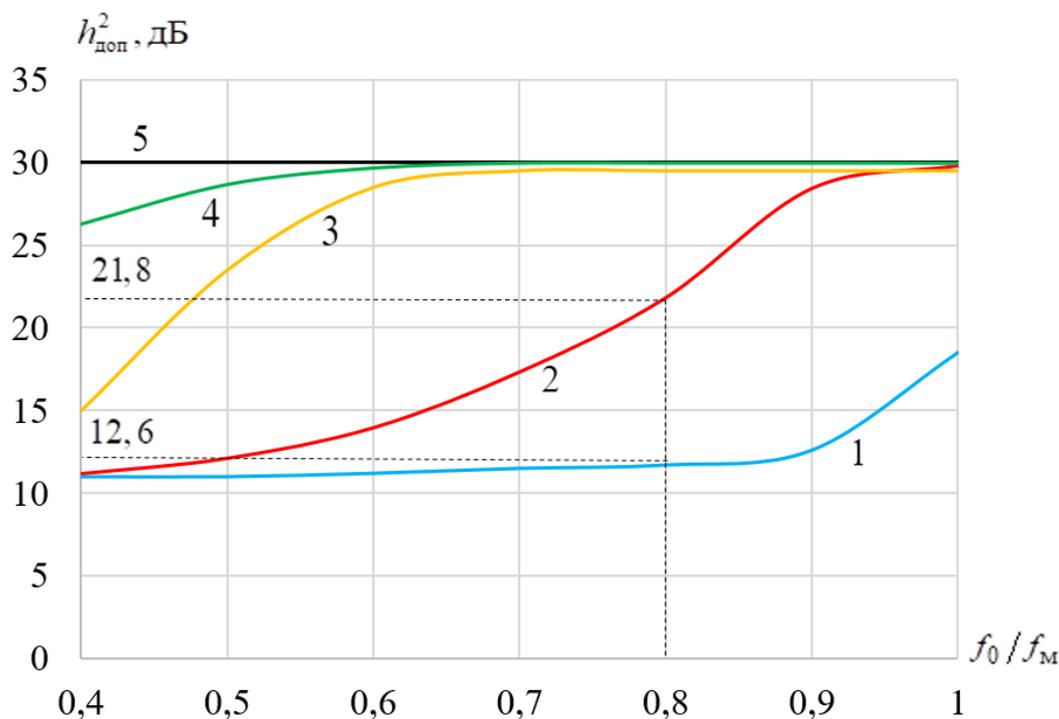


Рис. 4. Зависимости $h_{\text{доп}}^2(f_0/f_m, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош доп}} = 10^{-3})$ допустимого отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ при различной диффузности ионосферы: отсутствия диффузности – $\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$ (линия 1), слабой – $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ (линия 2), умеренной – $\beta_{\text{и}} = 10^{-2}$ (линия 3), средней – $\beta_{\text{и}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (линия 4), сильной – $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ (линия 5).

Анализ рисунка 4 показывает, что понижение отношения рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_m) позволяет существенно уменьшить допустимое отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK* при уровне диффузности, лежащем в диапазоне $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-2}$, характерном для нормальной среднеширотной ионосферы [3, 21]. В условиях средней – $\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-2}$ и сильной – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$ диффузности понижение f_0/f_m не позволяет существенно уменьшить допустимое отношения С/Ш на входе приемника сигналов *BFSK*.

Согласно рис. 4. в условиях слабой, умеренной, средней и сильной диффузности при отношении рабочей частоты к МПЧ $f_0/f_m = 1$ допустимое отношение С/Ш составит $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ. При $f_0/f_m = 0,8$ в условиях сильной и умеренной диффузности допустимое отношение С/Ш $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ будет выше, чем при слабой диффузности $h^2_{\text{доп}} = 21,8$ дБ на 8,2 дБ. При $f_0/f_m = 0,4$ допустимое отношение С/Ш при сильном уровне диффузности $h^2_{\text{доп}} = 30$ дБ будет выше, чем при умеренной диффузности $h^2_{\text{доп}} = 15$ дБ на 15 дБ, а при слабой диффузности $h^2_{\text{доп}} = 11,2$ дБ – на 18,8 дБ. В условиях сильной диффузности допустимое отношение С/Ш будет неизменно на всем диапазоне рабочих частот от $f_0/f_m = 1$ до $f_0/f_m = 0,4$.

Заключение

Разработана методика оценки вероятности ошибочного приема сигналов с бинарной ортогональной частотной модуляцией (*BFSK*) в одномодовом коротковолновом канале связи в зависимости от уровня диффузности ионосферы и выбора отношения рабочей частоты волны к максимально применимой частоте. Получена аналитическая зависимость (4) параметра Райса в одномодовом КВ канале связи от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы, представленная на рис. 1. На основе полученного (4) и известного (5) аналитических выражений установлены зависимости вероятности ошибочного приема сигналов с *BFSK* от отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы, представленные на рис. 2.

Проведен анализ влияния роста диффузности ионосферы при ее возмущениях на величину допустимого (для обеспечения требуемой вероятности ошибки в КВ канале связи $P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$) отношения сигнал/шум на входе приемника *BFSK* при различном отношении рабочей частоты к МПЧ (рис. 3).

На этой основе разработаны рекомендации по выбору отношения рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_m), которые обеспечивают снижение допустимого отношения сигнал/шум на входе приемника *BFSK* при различных уровнях диффузности ионосферы (рис. 4).

Дальнейшее развитие разработанной методики целесообразно провести для сигналов с многократными цифровыми видами модуляции.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 24-21-00295 (<https://rscf.ru/project/24-21-00295/>).

Литература

1. Березовский В.А., Дулькейт И.В., Савицкий О.К. *Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы*. М., Радиотехника, 2011. 444 с.
2. Чернов Ю.А. *Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания*. М., Техносфера. 2018. 688 с.
3. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. *Распространение радиоволн и работа радиолиний*. М., Связь. 1971.
4. Черенкова Л.Е., Чернышов О.В. *Распространение радиоволн*. М., Радио и связь, 1984. 272 с.
5. Хмельницкий Е.А. *Оценка реальной помехоустойчивости приема сигналов в КВ диапазоне*. М., Связь, 1975. 232 с.
6. Фабрицио Д.А. *Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение*. М., Техносфера. 2018. 936 с.

7. Кирилов Н.Е. *Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами*. М., Сов. Радио. 1971. 256 с.
8. Финк Л.М. *Теория передачи дискретных сообщений*. М., Сов. Радио. 1970, 728 с.
9. Жуков Г.А., Будко П.А. Широкополосные и узкополосные сигналы в радиолиниях декаметрового диапазона волн. *Морская радиоэлектроника*. 2020. № 2. С. 32–37.
10. Жуков Г.А., Будко П.А., Дяченко А.Н. Повышение скорости обмена данными в направлениях «берег-море-берег» по радиотрактам декаметрового диапазона волн. *Системы управления, связи и безопасности*. 2023. № 2. С. 147–174. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-2-147-174>
11. Орощук И.М., Сучков А.Н., Кадочников М.И. Формирование однолучевых декаметровых каналов связи с помощью цифровых антенных решеток, размещенных на естественных склонах. *Журнал радиоэлектроники*. 2023. № 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.12>
12. Орощук И.М., Гуреев И.Е., Сучков А.Н., Соловьев М.В. Результаты исследования пространственно-корреляционных характеристик однолучевого ионосферного декаметрового канала связи. *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. № 1. Том 2. С. 145–150.
13. *Военные системы радиосвязи*. Часть 1 / Под ред. В.В. Игнатова. – Л.: ВАС, 1989. – 386 с.
14. Кловский Д.Д. *Передача дискретных сообщений по радиоканалам*. М., Радио и связь. 1982. 304 с.
15. Barnes R.I. Spread – E_s structure producing apparent small scale structure in the F – region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. Vol. 54 (3-4). 1992. P. 373–389.
16. Sklar B. *Digital communications: fundamentals and applications*. Pearson. 2021. 1104 p.
17. Simon K., Alouini M.S. *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. New York. John Wiley&Sons. 2000. 544 p.

18. Красовский В.Н., Первышин Ю.И., Слюсарев П.В., Филлипов В.В., Хомский Е.В., *Электромагнитная доступность радиоизлучений и антенные устройства*. Л., ВАС. 1984. 204 с.
19. Слюсарев П.В. *Электромагнитная доступность радиоизлучений и антенные устройства*. Л., ВАС. 1978. 108 с.
20. *Руководство по организации ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы на узлах связи Вооруженных сил СССР*. М., Военное издательство. 1990. 96 с.
21. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. *Распространение радиоволн*. М., ЛЕНАНД, 2009, 496 с.
22. Yeh K.H., Liu C-H. *Radio Wave Scintillations in the Ionosphere*. Proceedings of the IEEE. Vol. 70. No. 4. April 1982. P. 324-360. <https://doi.org/10.1109/proc.1982.12313>
23. Пашинцев В.П., Омельчук А.В., Коваль С.А., Галушко Ю.И. Метод определения величины интенсивности неоднородностей по данным ионосферного зондирования. *Двойные технологии*, 2009, №1, с. 38–41.
24. *Способ определения величины интенсивности неоднородностей ионосферы по данным вертикального зондирования // Патент РФ на изобретение №2403592 от 10.11.2010. Бюл. № 31. Галушко Ю.И., Коваль С.А., Сенокосов А.В., Грибанов Е.В.*
25. Пашинцев В.П., Коваль С.А., Стрекозов В.И., Бессмертный М.Ю. Обнаружение искусственных ионосферных образований с помощью спутниковых радионавигационных систем. *Теория и техника радиосвязи*. 2013. №1. С.112-117.
26. *Устройство двухчастотного измерения интенсивности неоднородностей ионосферы // Патент РФ на полезную модель №108150 от 10.09.2011. Бюл. №25. Грибанов Е.В., Цимбал В.А., Шиманов С.Н., Порсев А.В., Потягов Д.А., Сенокосова А.В., Бибарсов М.Р., Белов А.Д., Коваль С.А., Коротков С.Ю.*

27. Пашинцев В.П., Тишкин С.А., Иванников А.И., Боровлев И.И. Расчет параметра глубины замираний в однолучевой декаметровой радиолнии. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2001. Том 44. № 12. С. 57–65.
28. Пашинцев В. П., Белоконь Д. А., Коваль С. А., Скорик А. Д., Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолнии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2022. Том 25. № 6. С. 22–39. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-6-22-39>
29. Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Коваль С.А., Киселев Д.П., Сенокосов М.А. Зависимость надежности связи в декаметровой радиолнии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. № 4. С. 300–322. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10412>
30. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang, X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space weather*. 2017. Vol. 15, P. 418–429. <https://doi.org/10.1002/2016SW00159>

Для цитирования:

Пашинцев В.П., Белоконь Д.А., Цимбал В.А., Коваль С.А., Скорик А.Д. Методика оценки влияния диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты на помехоустойчивость коротковолновой связи // Журнал радиоэлектроники. – 2024 – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.2>