

УДК 621.396.24

Шифр специальности ВАК: 2.2.13, 2.3.1

А.Д. Скорик

Использование мониторинга помех и неоднородностей ионосферы для повышения надежности коротковолновой связи

Актуальность. Надёжность радиосвязи в диапазоне коротких волн является ключевым параметром систем дальней связи, а статические модели расчёта, регламентированные рекомендациями ITU-R, не могут гарантировать точность прогноза из-за изменчивости реальных условий ионосферного канала. **Цель исследования.** Провести анализ существующих методик оценки надёжности КВ-радиолиний, основанных на рекомендациях ITU-R, показать разброс оценок при различной полноте учёта факторов и обосновать необходимость перехода к адаптивным системам, использующим данные мониторинга ионосферы. **Методы.** Сравнительное моделирование трёх подходов на примере радиолинии с телеграфией F1B: базового (по Рекомендации МСЭ-R P.842-5 с фиксированным допустимым отношением сигнал/шум из Рекомендации МСЭ-R F.339), уточнённого (с учётом частотной зависимости вариаций помех) и объединённого (включающего также частотно-зависимое допустимое отношение сигнал/шум, обусловленное диффузностью ионосферы). **Научная новизна.** Разработан объединённый подход к расчёту надёжности КВ-связи, отличающийся от известных изолированных подходов (прежде всего ITU-R) установлением сквозной аналитической связи между динамическим энергетическим порогом $Z_{\text{доп}}(f, \beta_i)$, рабочей частотой (f), текущим состоянием диффузности ионосферы (β_i) и частотно-зависимым СКО флуктуаций помех ($\sigma_z(f)$). Впервые показано, что совместный учёт этих факторов выявляет немонотонный характер зависимости надёжности от частоты, что позволяет предиктивно определять оптимальную рабочую частоту для конкретных гелиогеофизических условий. **Результаты.** Базовый подход даёт максимальную надёжность около 64% на максимально применимой частоте; учёт частотной зависимости помех повышает оценки на низких частотах; объединённый подход приводит к значениям надёжности 80–87% с выраженным оптимумом в области 2–3 МГц. Разброс оценок достигает десятков процентных пунктов. **Практическая значимость.** Результаты расчётов обосновывают достижимость надёжности КВ-связи на уровне 86,8% для рассмотренных гелиогеофизических условий и подтверждают необходимость перехода к проактивным адаптивным системам КВ-связи с постоянным пассивным мониторингом состояния канала.

Ключевые слова: КВ-радиосвязь, надёжность связи, диффузность ионосферы, допустимое отношение сигнал/шум, атмосферные помехи, адаптивная радиосвязь, пассивный мониторинг ионосферы, рекомендации ITU-R.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-57-63

Введение

Надёжность радиосвязи в диапазоне коротковолновых (КВ) частот (1,5–30 МГц) является ключевым параметром для систем дальней связи, особенно в условиях отсутствия альтернативных каналов. Ионосферный канал характеризуется значительной изменчивостью, обусловленной зависимостью параметров ионосферы от солнечной активности, времени суток, сезона и географического положения [1]. Для описания регулярных (медианных) свойств ионосферы разработаны глобальные эмпирические модели, например, международная справочная модель ионосферы IRI [2]. Прогнозирование надёжности требует учёта множества факторов, включая статистические характеристики сигнала и помех, поглощение радиоволн в ионосфере [3], замирания и возможности несённого приёма.

Международным союзом электросвязи (МСЭ) разработан ряд рекомендаций, регламентирующих методы расчёта надёжности КВ-радиолиний: МСЭ-R P.533 [4] – прогнозирование медианных уровней сигнала, МСЭ-R P.372 [5] – статистика шумов (помех), МСЭ-R P.842 [6] – расчёт основной надёжности линии (BCR – basic circuit reliability). В рекомендации МСЭ-R F.339 [7] приведены требуемые отношения сигнал/шум для различных классов излучения и условий.

Однако, как показывают современные исследования [8, 9], прямое использование табличных значений без учёта частотной зависимости как допустимого отношения сигнал/помеха, так и статистических характеристик помех может приводить к существенным погрешностям расчёта надёжности КВ-связи. В работе [8] установлена связь допустимого отношения сигнал/помеха с уровнем диффузности ионосферы и рабочей частотой, а в [9] показано, что среднеквадратическое отклонение (СКО) отношения сигнал/помеха также зависит от частоты из-за вариаций атмосферных помех.

Цель настоящей статьи – на примере конкретной радиолинии продемонстрировать разброс оценок надёжности КВ-радиолинии, получаемых при различной полноте учёта факторов, обосновать новый объединённый критерий оперативной надёжности, а также доказать необходимость перехода к адаптивным системам, использующим пассивный мониторинг ионосферы для оперативной коррекции рабочих параметров.

Описание общих подходов

Согласно [6], основная надёжность КВ-радиолинии BCR определяется как вероятность превышения $(S/N)_{\text{med}} \geq (S/N)_r$ или непревышения $(S/N)_{\text{med}} < (S/N)_r$ медианным отношением сигнал/помеха $(S/N)_{\text{med}}$ на входе приёмника требуемого (допустимого) отношения сигнал/шум $(S/N)_r$ согласно выражению (1):

$$BCR = \begin{cases} 130 - \frac{80}{1 + \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{med}} - \left(\frac{S}{N}\right)_r}{D_u(SN)}} \%, \\ \text{при } \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{med}} \geq \left(\frac{S}{N}\right)_r; \\ \max \left(\frac{80}{1 + \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{med}} - \left(\frac{S}{N}\right)_r}{D_u(SN)}} - 30,0 \right) \%, \\ \text{при } \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{med}} < \left(\frac{S}{N}\right)_r, \end{cases} \quad (1)$$

где $D_u(SN)$ – верхнее децильное отклонение среднего отношения сигнал/помеха, характеризующее разброс значений сигнал/помеха. Величины $(S/N)_{\text{med}}$ и $D_u(SN)$ рассчитываются с использованием данных о сигнале по [4], о помехах и шумах – по [5], а также децильных отклонений сигнала и шума.

Рассмотрим КВ-радиолинию с параметрами, близкими по значениям к использованным в примерах расчётов из [8, 9]:

1) координаты точки отражения $56,84^\circ$ с.ш., $53,78^\circ$ в.д.;

2) дата 08.08.2019 (лето);

3) время 00:00 местного (21:00 UTC);

4) дальность 2000 км;

5) мощность передатчика 1 кВт (30 дБВт), коэффициенты усиления передающей $G_t = 3$ дБ и приёмной $G_r = 2$ дБ антенн (индексы t и r – от англ. transmitting и receiving), полоса приёмника $B = 180$ Гц, сельская местность (мощность промышленных помех 5 дБ).

Анализ проведём в диапазоне частот от $f = 1$ МГц до 10 МГц; максимальная применимая частота (МПЧ) $f_{\text{МПЧ}} = 10$ МГц. В настоящей работе значения $(S/N)_{\text{med}}(f)$ получены расчётом по методике [4]. Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Для определения требуемого $(S/N)_r$ воспользуемся данными рекомендации [7, табл. 1] для класса излучения F1B MFSK 6-tone ITA2 10 знаков/с – одного из широко распространённых сервисов Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности судоходства (ГМССБ). Документ устанавливает, что при обеспечении вероятности ошибки $P_c = 0,01$ и использовании двойного разнесённого приёма (dual diversity) необходимое отношение сигнал/помеха $(S/N)_r = 31$ дБ, а без разнесённого приёма это значение должно быть увеличено на 10 дБ, т.е. составит 41 дБ.

Для обеспечения корректности последующего сравнительного анализа параметры сигнала, использованные при расчетах, были максимально согласованы с условиями из [8, 9] и практических ситуаций для ГМССБ. В [8, 9] использовались сигналы частотной телеграфии с шириной полосы сигнала не более

300 Гц, что физически сопоставимо с предписанной рекомендацией МСЭ-R F.339-7 и стандартами ГМССБ полосой приемника 180 Гц для класса излучения F1B MFSK 6-tone ITA2 10 знаков/с, причем требования к верности приема приняты на уровне $P_{\text{ош}} = 10^{-2}$.

Переход к требуемой вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$ ужесточит требования не менее чем на 4 дБ. При этом МСЭ-R F.339-7 однозначно задает требования лишь к одиночному и двойному разнесённому приёму, а состояние ионосферы учитывается качественно (или обычное, или возмущенное), предлагаемый в методике критерий $D_{\text{св}}$ через учет параметра диффузности β_n позволяет проводить такую оценку в более широких пределах, опираясь на конкретные данные пассивного мониторинга ионосферы, что подтверждает дополнительные преимущества от перехода к динамическому критерию $D_{\text{св}}$.

Децильные отклонения сигнала $D_u S_d$ определены по табл. 2 Рекомендации [6] для геомагнитной широты $< 60^\circ$: для $f/f_{\text{МПЧ}} \leq 0,8$ принимается $D_u S_d = 6$ дБ (суммарное верхнее децильное отклонение отношения сигнал/помеха, возникающее из-за изменений условий ото дня ко дню в течение месяца), при $f/f_{\text{МПЧ}} = 0,9 \dots 1 - D_u S_d = 8$ дБ. Краткосрочные отклонения (в пределах одного конкретного часа) $D_u S_h = 8$ дБ, как того требует Рекомендация [6]. В первом приближении вариации шума не учитывались ($N_u = N_{\text{med}}$), поэтому

$$D_u(SN) = \sqrt{(D_u S_d)^2 + (D_u S_h)^2}. \quad (2)$$

Таблица 1

Медианные значения $(S/N)_{\text{med}}$ для различных частот (расчёт по [4])

f , МГц	$f/f_{\text{МПЧ}}$	$(S/N)_{\text{med}}$, дБ
1,0	0,1	22,5
2,0	0,2	25,5
3,0	0,3	27,4
4,0	0,4	28,4
5,0	0,5	28,5
6,0	0,6	29,4
7,0	0,7	31,6
8,0	0,8	32,4
9,0	0,9	33,4
10,0	1,0	33,5

Таблица 2

Базовый упрощённый расчёт надёжности по методике [6] (методика 1)

f , МГц	$f/f_{\text{МПЧ}}$	$(S/N)_{\text{med}}$, дБ	$D_u(SN)$, дБ	$\Delta = (S/N)_{\text{med}} - 31$, дБ	$\Delta = 31 - (S/N)_{\text{med}}$, дБ	BCR, %
1,0	0,1	22,5	10,0	–	8,5	13,2
2,0	0,2	25,5	10,0	–	5,5	21,6
3,0	0,3	27,4	10,0	–	3,6	28,8
4,0	0,4	28,4	10,0	–	2,6	33,5
5,0	0,5	28,5	10,0	–	2,5	34,0
6,0	0,6	29,4	10,0	–	1,6	39,0
7,0	0,7	31,6	10,0	0,6	–	54,5
8,0	0,8	32,4	10,0	1,4	–	59,8
9,0	0,9	33,4	11,3	2,4	–	64,0
10,0	1,0	33,5	11,3	2,5	–	64,5

На основе частотных зависимостей $(S/N)_{\text{med}}(f)$ и $D_u(SN)(f)$ производился расчёт основной надёжности КВ-связи BCR(f) согласно (1).

Результаты расчёта BCR с применением базового подхода (методика 1)

Результаты расчёта по базовой методике [6] приведены в табл. 2.

Максимальная надёжность, рассчитанная по методике 1, достигается на частоте $f_{\text{МПЧ}} = 10$ МГц (64,5%), однако на практике работа на частотах, равных МПЧ или превышающих её, часто запрещена, и диапазон рабочих частот обычно ограничен значением $f/f_{\text{МПЧ}} = 0,9$. Следует отметить, что при отсутствии разнесённого приёма требуемое $(S/N)_r$ было бы на 10 дБ выше, что привело бы к существенно более низким значениям BCR. Таким образом, применение разнесённого приёма является важным условием достижения приемлемой надёжности в данном случае.

Расчёт надёжности с учётом частотной зависимости помех (методика 2)

В работе [9] показано, что децильные отклонения отношения сигнал/помеха существенно зависят от частоты из-за частотной зависимости вариаций атмосферных помех. Согласно [6; табл. 1, этап 6], полное выражение для $D_u(SN)$ должно включать вклад от флуктуаций шума

$$D_u(SN) = \sqrt{(D_u S_d)^2 + (D_u S_h)^2 + \left[10 \lg \left(\frac{N_u}{N_{\text{med}}} \right) \right]^2}, \quad (3)$$

где N_u и N_{med} – мощности шума, соответствующие верхней децили и медиане соответственно. Эти величины зависят от частоты, времени суток, сезона и географического положения и определяются по Рекомендации [5]. В работе [9] на основе Рекомендации [5] получены частотно-зависимые значения СКО отношения сигнал/помеха $\sigma_z(f)$ для условий летней ночи [9; рис. 3, б]. Верхнее децильное отклонение $D_u(SN)$ согласно соотношению, обоснованному в [9], рассчитывается как (4)

$$D_u(SN)(f) = 1,28 \sigma_z(f). \quad (4)$$

Полученные значения $\sigma_z(f)$ приведены в третьем столбце табл. 3, а результаты расчёта BCR – в последнем столбце. Расчёт возможен, поскольку моделируемые условия весьма близки; BCR рассчитывается по формуле (1) с теми же $(S/N)_{\text{med}}$.

Максимум расчётной надёжности достигается на частоте $f_{\text{МПЧ}} = 10$ МГц (61,8%). Сравнение с табл. 2 показывает, что учёт помеховых вариаций повышает оценку на низких частотах (например, с 13,2 до 20,1% на частоте 1 МГц) и незначительно изменяет её на высоких. Это объясняется более реалистичным описанием разброса отношения сигнал/шум, который на низких частотах увеличивается из-за сильных вариаций атмосферных помех.

Расчёт BCR на основе объединённого подхода (методика 3)

В работе [8] допустимое отношение сигнал/помеха $Z_{\text{доп}}$ (фактически это $(S/N)_r$ по [6]) ставится в зависимость от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы β_n (интенсивности мелкомасштабных неоднородностей). Для умеренной диффузности

($\beta_n = 10^{-2}$) значения $Z_{\text{доп}}(f)$ взяты из [8, рис. 4, а] для ночных условий; для частот, не указанных явно на графике, использована линейная интерполяция. Подставив их в формулу надёжности вместе с $\sigma_z(f) = D_u(SN)/1,28$ из [9], получим

$$D_{\text{св}} = F \left(\frac{\left(\frac{S}{N} \right)_{\text{med}} - Z_{\text{доп}}(f, \beta_n)}{\sigma_z(f)} \right), \quad (5)$$

где $F(\cdot)$ – функция Лапласа (интеграл вероятности). Результаты расчёта для частот $f = 1\text{--}10$ МГц приведены в табл. 4.

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от базовых рекомендаций ITU-R, использующих консервативный статический порог для ситуации типа «наихудший случай», и частных методик [8, 9], предложенный критерий оперативной надёжности ($D_{\text{св}}$) (5) выступает функцией динамического состояния канала и зависит от состояния ионосферы в конкретный момент времени, т.е. он позволяет связать параметры радиолинии с физикой среды распространения, что, в свою очередь, позволяет непосредственно в процессе пассивного мониторинга использовать оценку надёжности как предиктивный инструмент управления частотным и энергетическим ресурсом.

Результат демонстрирует качественно иное поведение расчётной надёжности КВ-радиолинии: появляется ярко выраженный максимум в области 2–3 МГц (86,8% на 3 МГц, 86,5% на 2 МГц), и в целом диапазон расчётных значений надёжности (80–87%) значительно превышает полученные в табл. 2 и 3 значения (13–64%). Это объясняется двумя обстоятельствами:

- адаптивный (нестатичный) учёт требуемого $(S/N)_r$, зависящего от реального уровня диффузности в канале, позволяет использовать значительно меньшее допустимое отношение сигнал/шум, которое оказывается гораздо ниже консервативной оценки 31 дБ, заложенной в [7];

- учёт влияния уровня помех и частотной зависимости СКО сигнал/помеха приводит к дополнительному выигрышу в области низких частот.

Столь существенное влияние зависимости допустимого отношения сигнал/шум $Z_{\text{доп}}(f, \beta_n)$ от выбора рабочей частоты f и уровня диффузности ионосферы β_n на основную надёжность КВ-связи обуславливает необходимость использования в комплексах КВ-связи аппаратно-программных комплексов (АПК) пассивного мониторинга интенсивности мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации в ионосфере [10, 11] во всём диапазоне рабочих частот.

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ трёх методик (табл. 5, рис. 1) показывает, что разброс оценок надёжности для одной и той же радиолинии может достигать десятков процентных пунктов. Методики 1 и 2, использующие фиксированный порог $(S/N)_r = 31$ дБ (напомним, достигнутый за счёт двойного разнесённого приёма), дают близкие результаты, причём их кривые почти совпадают.

Таблица 3

Расчёт надёжности с учётом частотной зависимости помех (по данным [9])

f , МГц	$(S/N)_{\text{med}}$, дБ	$\sigma_z(f)$ [9], дБ	$D_u(SN)=1,28\sigma_z$, дБ	$31-(S/N)_{\text{med}}$, дБ	$(S/N)_{\text{med}}-31$, дБ	BCR, %
1,0	22,5	11,4	14,6	8,5	–	20,1
2,0	25,5	11,3	14,5	5,5	–	27,8
3,0	27,4	11,1	14,2	3,6	–	33,6
4,0	28,4	10,8	13,8	2,6	–	37,1
5,0	28,5	10,6	13,6	2,5	–	37,3
6,0	29,4	10,3	13,2	1,6	–	41,2
7,0	31,6	10,2	13,1	–	0,6	53,2
8,0	32,4	10,3	13,2	–	1,4	57,5
9,0	33,4	10,8	13,8	–	2,4	61,6
10,0	33,5	10,8	13,8	–	2,5	61,8

Таблица 4

Расчёт надёжности с учётом объединения частотно-зависимых $Z_{\text{доп}}$ и σ_z (методика 3), по данным [8, 9]

f , МГц	$(S/N)_{\text{med}}$, дБ	$Z_{\text{доп}}(f)$, дБ	$D_u(SN)$ [9], дБ	$\sigma_z(f)$, дБ	ξ	$D_{\text{св}}$, %
1,0	22,5	12	14,6	11,4	0,921	82,1
2,0	25,5	13	14,5	11,3	1,106	86,6
3,0	27,4	15	14,2	11,1	1,117	86,8
4,0	28,4	17	13,8	10,8	1,056	85,4
5,0	28,5	18	13,6	10,6	0,991	83,9
6,0	29,4	19	13,2	10,3	1,010	84,4
7,0	31,6	21	13,1	10,2	1,039	85,1
8,0	32,4	22	13,2	10,3	1,010	84,4
9,0	33,4	23	13,8	10,8	0,963	83,2
10,0	33,5	24	13,8	10,8	0,88	81,1

Таблица 5

Сравнение рассчитанной основной надёжности для различных методик, %

Модель	1 МГц	2 МГц	3 МГц	4 МГц	5 МГц	6 МГц	7 МГц	8 МГц	9 МГц	10 МГц
Базовая ITU-R (см. табл. 2)	13,2	21,6	28,8	33,5	34,0	39,0	54,5	59,8	64,0	64,5
С учётом помех [9] (см. табл. 3)	20,1	27,8	33,6	37,1	37,3	41,2	53,2	57,5	61,6	61,8
Объединённая [8, 9] (см. табл. 4)	82,1	86,6	86,8	85,4	83,9	84,4	85,1	84,4	83,2	81,1

Небольшие различия между ними обусловлены только учётом частотной зависимости вариаций помех в методике 2, что несколько корректирует разброс, но не меняет принципиально характер зависимости: монотонный рост с частотой и максимум на МПЧ. Обращает на себя внимание небольшой перегиб в районе 7 МГц, связанный с переходом от формулы для $(S/N)_{\text{med}} < (S/N)_r$ к формуле для случая превышения порога $(S/N)_{\text{med}} \geq (S/N)_r$.

Методика 3 принципиально отличается: она учитывает частотно-зависимое допустимое отношение сигнал/шум $Z_{\text{доп}}(f)$, которое на низких и средних частотах оказывается значительно ниже фиксированного порога 31 дБ.

Благодаря этому на частотах 2–7 МГц достигается высокая надёжность (80–87%) даже без использования разнесённого приёма. На частотах, близких к МПЧ, значение $Z_{\text{доп}}(f)$ возрастает, приближаясь к 31 дБ, и надёжность методики 3 сближается с надёжностью методик 1 и 2.

Важно подчеркнуть, что методика 3 не является простым математическим усложнением. Она отражает принципиальный сдвиг в подходе к проектированию КВ-радиолиний: от жёсткого нормирования, основанного на фиксированных таблицах, к динамическому учёту реальной физической обстановки.

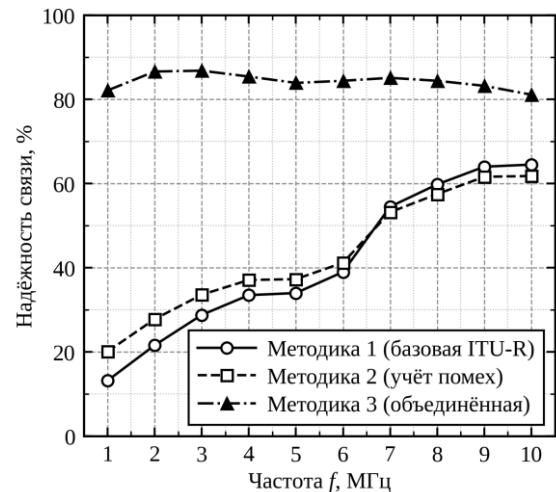


Рис. 1. Частотные зависимости надёжности КВ-связи, рассчитанные по различным методикам

В методиках 1 и 2 допустимое отношение сигнал/шум задаётся априори (как константа, достигнутая аппаратной реализацией), тогда как методика 3 исходит из того, что этот порог сам является функцией состояния ионосферы и помеховой обстановки. Это отражение физической реальности: ионосфера нестационарна, и её свойства меняются во времени и

по частоте. Именно поэтому реализация такого подхода невозможна без непрерывного мониторинга: только зная текущие значения диффузности и вариаций помех, можно обоснованно выбирать рабочую частоту, мощность и другие параметры канала. Мониторинг ионосферы и помеховой обстановки превращает потенциальные преимущества методики 3 в реальный инструмент повышения надёжности и эффективности использования частотного ресурса.

Современные комплексы радиоконтроля, такие как VRB-12-141 [12], обеспечивают автоматическое измерение отношения сигнал/шум, анализ спектра и идентификацию типов сигналов, что создаёт техническую основу для внедрения адаптивных алгоритмов выбора частоты. Похожие возможности реализованы и в отечественных разработках (например, в комплексе адаптивной радиосвязи ПИРС АО «РИМП» или в комплексах радиоконтроля типа ЧВА-001-04РП-Э НИИ «Вектор»), что подтверждает практическую реализуемость предлагаемого подхода.

Таким образом, практическая надёжность перестаёт быть фиксированной характеристикой, закладываемой на этапе проектирования, и становится функцией эффективности адаптивных алгоритмов. Представленные в статье модели служат важным инструментом предварительного анализа и выбора потенциально пригодных диапазонов частот, однако окончательное решение о параметрах связи должно приниматься с учётом данных реального времени.

Заключение

Выполнен анализ существующих методов оценки надёжности КВ-радиолиний, основанных на рекомендациях МСЭ-R. На примере линии с телеграфией F1B MFSK 6-tone ITA2 продемонстрировано следующее.

1. Базовая методика МСЭ-R P.842-5 с фиксированным допустимым отношением сигнал/шум из МСЭ-R F.339 даёт максимальную надёжность около 64% на МПЧ с учётом двойного разнесения по приёму (см. табл. 2).

2. Учёт частотной зависимости децильных отклонений (за счёт вариаций помех) по [9] повышает оценки на низких частотах, но максимум остаётся на МПЧ – 61,8% (см. табл. 3).

3. Введение частотно-зависимого допустимого отношения сигнал/шум, обусловленного диффузностью ионосферы [8], в комбинации с уточнённым СКО приводит к изменениям зависимости надёжности связи от частоты. Для конкретных гелиогеофизических условий достигнуты значения надёжности 80–87% с ярко выраженным оптимумом в области 2–3 МГц, т.е. при $f/f_{МПЧ} = 0,2–0,3$ (см. табл. 4).

Разброс оценок, достигающий десятков процентных пунктов, указывает на ограниченную применимость статических моделей для гарантированного обеспечения качества связи. Переход к адаптивным системам, использующим пассивный мониторинг ионосферы и помеховой обстановки, позволяет подстраиваться под текущие условия и реализовывать потенциальные возможности, заложенные в

физически обоснованных моделях. Мониторинг даёт возможность динамически выбирать рабочую частоту, мощность и схему связи, обеспечивая требуемую надёжность даже при изменении условий распространения. Современные технические средства [11, 12] и отечественные разработки подтверждают возможность практической реализации такого подхода.

Расширение и распространение результатов на другие гелиогеофизические условия (иные уровни диффузности, время суток, сезоны) составляет предмет дальнейших исследований.

Необходимость постоянного мониторинга состояния ионосферы в канале связи и оптимизации параметров непосредственно под текущие условия отмечается и в последних публикациях зарубежных исследователей [13–16].

Литература

1. Coster A.J. Ionospheric irregularities, space weather impact on GNSS, and spacecraft anomalies // Proceedings of the United Nations/Germany Workshop on the International Space Weather Initiative. ISWI 2024. – Singapore: Springer, 2026. – P. 131–141. DOI: 10.1007/978-981-95-1121-1_15.
2. The International Reference Ionosphere model: a review and description of an ionospheric benchmark / D. Bilitza, M. Pezzopane, V. Truhlik, D. Altadill, B.W. Reinisch, A. Pignalberi // Reviews of Geophysics. – 2022. – Vol. 60, No. 4. – Art. no. e2022RG000792. DOI: 10.1029/2022RG000792.
3. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere / K.A. Zawdie, D.P. Drob, D.E. Siskind, C. Coker // Radio Science. – 2017. – Vol. 52, No. 6. – P. 767–783. DOI: 10.1002/2017RS006256.
4. ITU-R Recommendation P.533-14. Method for the prediction of the performance of HF circuits. – Geneva: ITU, 2019. – 42 p.
5. ITU-R Recommendation P.372-15. Radio noise. – Geneva: ITU, 2021. – 58 p.
6. ITU-R Recommendation P.842-5. Computation of reliability and compatibility of HF radio systems. – Geneva: ITU, 2013. – 16 p.
7. ITU-R Recommendation F.339-7. Bandwidths, signal-to-noise ratios and fading allowances in complete systems. – Geneva: ITU, 2006. – 12 p.
8. Зависимость надёжности связи в дециметровых радиолиниях от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы / В.П. Пашинцев, А.Д. Скорик, С.А. Коваль, Д.П. Киселев, М.А. Сенокосов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 300–322. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412.
9. Методика определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха в дециметровых радиолиниях от выбора частоты / В.П. Пашинцев, Е.М. Гринев, А.Д. Скорик, Д.А. Белоконов // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 63–80. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-63-80.
10. Метод определения величины интенсивности неоднородностей по данным ионосферного зондирования / В.П. Пашинцев, А.В. Омельчук, С.А. Коваль, Ю.И. Галушко // Двойные технологии. – 2009. – № 1(46). – С. 38–41.
11. Аппаратно-программный комплекс для оперативного мониторинга ионосферы в интересах обеспечения коротковолновой связи / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова,

В.Н. Скобелкин, С.И. Тынянкин // Радиолокация и радиосвязь: матер. IV Всерос. конф. – М.: ИПЭ РАН, 2010. – С. 43–47.

12. VRB-12-141/A(V/UHF) V/UHF Radio Monitoring [Электронный ресурс]. – URL: <https://mindex-center.ir/en/products/vrb-12-141-avuhf-vuhf-radio-monitoring> (дата обращения: 08.03.2026).

13. Capacity and reliability of ionosphere communication channel based on multi-carrier modulation technique and LUF–MUF variation / V. Dear, A.S. Mardiani, N. Dedi, P. Abadi, B.H. Prananto, Iskandar // IEICE Transactions on Communications. – 2024. – Vol. E107-B, No. 4. – P. 357–367. DOI: 10.1587/transcom.2023EBP3099.

14. A frequency selecting method for high-frequency communication based on ionospheric oblique backscatter sounding / C. Cai, G. Yang, T. Liu, C. Jiang // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – Art. no. 4095. DOI: 10.3390/rs16214095.

15. Development of methods for spectral monitoring of HF interference to determine the availability of ionospheric radio channels / V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, N.V. Ryabova, R.R. Belgibaev // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2024. – P. 1–5. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10581396.

16. Chen Z. Adaptive modulation and coding based on data-driven learning algorithm in polar HF OFDM-CPM system / Z. Chen, X. Zhang // 2024 5th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA). – Hangzhou, China: IEEE, 2024. – P. 485–488. DOI: 10.1109/ICCEA62105.2024.10604266.

Скорик Александр Дмитриевич

Генеральный директор АО «Концепт»
Лесная ул. (мкр. Юбилейный), 14а, г. Королёв,
Московская обл., Россия, 141092
ORCID: 0009-0005-6204-9445
Тел.: +7-929-638-63-60
Эл. почта: alexander_skorik@mail.ru

Поступила в редакцию: 26.07.2026.

Принята к публикации: 21.09.2026.

Skorik A.D.

Using monitoring of interference and ionospheric irregularities to improve the reliability of high-frequency communication

Relevance. The reliability of high-frequency (HF) radio communication is a key parameter of long-range communication systems. The ionospheric channel is highly variable, and static models regulated by ITU-R recommendations cannot guarantee prediction accuracy under real conditions. **Purpose of the study.** To analyze the existing ITU-R-based methods for estimating the reliability of HF radio links, to demonstrate the spread of estimates under differing degrees of factor consideration, and to justify the transition to adaptive systems employing ionospheric monitoring data. **Methods.** The study employs comparative modeling of three approaches using an F1B radio-telegraphy link as a case study: the basic one (according to Recommendation ITU-R P.842-5 with a fixed required signal-to-noise ratio from Recommendation ITU-R F.339), a refined one

(taking into account the frequency dependence of interference variations) and a combined one (also incorporating the frequency-dependent required signal-to-noise ratio caused by ionospheric diffuseness). **Scientific Novelty.** A combined approach to calculating HF communication reliability has been developed. Unlike existing isolated methods (primarily ITU-R), this approach establishes an end-to-end analytical relationship between the dynamic energy threshold $Z_{perm}(f, \beta_i)$, the operating frequency (f), the current state of ionospheric diffuseness (β_i), and the frequency-dependent standard deviation of interference fluctuations ($\sigma_z(f)$). For the first time, it is demonstrated that the combined consideration of these factors reveals a non-monotonic relationship between reliability and frequency, enabling the predictive determination of the optimum operating frequency for specific heliogeophysical conditions. **Results.** The basic approach yields a maximum reliability of approximately 64% at the maximum usable frequency; accounting for the frequency dependence of interference improves estimates at lower frequencies; the combined approach results in reliability values of 80–87% with a pronounced optimum at 2–3 MHz. The spread of estimates reaches tens of percentage points. **Practical significance.** The calculation results substantiate that an HF communication reliability of 86.8% is achievable under the considered heliogeophysical conditions and confirm the necessity of transitioning to proactive adaptive HF communication systems featuring continuous passive channel state monitoring. **Keywords:** HF radio communication, communication reliability, ionospheric diffuseness, required signal-to-noise ratio, atmospheric radio noise, adaptive radio communication, passive ionospheric monitoring, ITU-R recommendations.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-57-63

References

1. Coster A.J. Ionospheric irregularities, space weather impact on GNSS, and spacecraft anomalies. Proceedings of the United Nations/Germany Workshop on the International Space Weather Initiative. ISWI 2024. Singapore, Springer, 2026, pp. 131–141. DOI: 10.1007/978-981-95-1121-1_15.
2. Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., Altadill D., Reinisch B.W., Pignalberi A. The International Reference Ionosphere model: a review and description of an ionospheric benchmark. *Reviews of Geophysics*, 2022, vol. 60, no. 4, e2022RG000792. DOI: 10.1029/2022RG000792.
3. Zawdie K.A., Drob D.P., Siskind D.E., Coker C. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere. *Radio Science*, 2017, vol. 52, no. 6, pp. 767–783. DOI: 10.1002/2017RS006256.
4. ITU-R Recommendation P.533-14. Method for the prediction of the performance of HF circuits. Geneva, ITU, 2019, 42 p.
5. ITU-R Recommendation P.372-15. Radio noise. Geneva, ITU, 2021, 58 p.
6. ITU-R Recommendation P.842-5. Computation of reliability and compatibility of HF radio systems. Geneva, ITU, 2013, 16 p.
7. ITU-R Recommendation F.339-7. Bandwidths, signal-to-noise ratios and fading allowances in complete systems. Geneva, ITU, 2006, 12 p.
8. Pashintsev V.P., Skorik A.D., Koval S.A., Kiselev D.P., Senokosov M.A. [Decameter radio line communication reliability dependence of the operating frequency choice taking into account the signal-noise situation and ionosphere diffuseness]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 300–322 (in Russ.). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412.
9. Pashintsev V.P., Grinev E.M., Skorik A.D., Belokon D.A. [Method for determining the dependence of the standard

deviation from the signal-interference in a decameter radio link on the choice of frequency]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 63–80 (in Russ.). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-63-80.

10. Pashintsev V.P., Omelchuk A.V., Koval S.A., Galushko Yu.I. [Method of irregularity intensity value determination according to ionosphere sounding]. *Dvoynye tekhnologii*, 2009, no. 1(46), pp. 38–41 (in Russ.).

11. Smirnov V.M., Smirnova E.V., Skobelkin V.N., Tynyankin S.I. *Apparato-programmnyy kompleks dlya operativnogo monitoringa ionosfery v interesakh obespecheniya korotko-volnovoy svyazi* [Hardware-software complex for operational monitoring of the ionosphere in the interests of providing HF communication]. *Radiolokatsiya i radiosvyaz* [Radar and Radio Communication], Proc. of the IV All-Russian conf., Moscow, IRE RAS, 2010, pp. 43–47 (in Russ.).

12. VRB-12-141/A(V/UHF) V/UHF Radio Monitoring. Available at: <https://mindex-center.ir/en/products/vrb-12-141-avuhf-vuhf-radio-monitoring> (accessed: 08 March 2026).

13. Dear V., Mardiani A.S., Dedi N., Abadi P., Prananto B.H., Iskandar. Capacity and reliability of ionosphere communication channel based on multi-carrier modulation technique and LUF–MUF variation. *IEICE Transactions on Communications*, 2024, vol. E107-B, no. 4, pp. 357–367. DOI: 10.1587/transcom.2023EBP3099.

14. Cai C., Yang G., Liu T., Jiang C. A frequency selecting method for high-frequency communication based on ionospheric oblique backscatter sounding. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16, no. 21, art. no. 4095. DOI: 10.3390/rs16214095.

15. Ivanov V.A., Ivanov D.V., Ryabova N.V., Belgibaev R.R. Development of methods for spectral monitoring of HF interference to determine the availability of ionospheric radio channels. *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russia, IEEE, 2024, pp. 1–5. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10581396.

16. Chen Z., Zhang X. Adaptive modulation and coding based on data-driven learning algorithm in polar HF OFDM-CPM system. *2024 5th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*, Hangzhou, China, IEEE, 2024, pp. 485–488. DOI: 10.1109/ICCEA62105.2024.10604266.

Alexander D. Skorik

General Director, JSC «Concept»

14a, Lesnaya St. (Yubileyny microdistrict), Korolev, Moscow region, Russia, 141092

ORCID: 0009-0005-6204-9445

Phone: +7-929-638-63-60

Email: alexander_skorik@mail.ru

Received: 26.07.2026.

Accepted: 21.09.2026.