

УДК 621.396

Методика определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха в декаметровый радиолинии от выбора частоты

Пашинцев В. П., Гринев Е. М., Скорик А. Д., Белоконов Д. А.

Постановка задачи: известно, что случайные изменения мощности принимаемых сигналов и помех в декаметровом диапазоне волн существенно влияют на надежность радиосвязи (вероятность связи с достоверностью не хуже допустимой). Для поддержания допустимой надежности связи требуется своевременная смена рабочих частот. Надежность связи определяется величиной среднего отношения сигнал-помеха на входе приемника относительно его допустимого значения, которые зависят от выбора рабочей частоты, и среднеквадратического отклонения входного отношения сигнал-помеха. Последнее при расчетах надежности декаметровой связи полагается неизменным и равным 14 дБ. Однако согласно экспериментальным данным среднеквадратическое отклонение отношения мощности сигнала к мощности помех на входе приемника декаметровой связи зависит от частоты, что может повлиять на достоверность расчета надежности. **Целью статьи** является разработка методики определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты и оценки ее влияния на надежность связи в одномодовой декаметровой радиолинии. **Новизна** заключается в теоретическом обобщении методик расчета надежности связи в одномодовой декаметровой радиолинии через функцию Лапласа и через отклонения нижней и верхней децилей для определения частотной зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха. **Результат:** получено аналитическое выражение для оценки среднеквадратического отклонения отношения средних мощностей сигнала и помех на входе приемника от выбора рабочей частоты в одномодовой декаметровой радиолинии. **Практическая значимость:** при расчете надежности связи в одномодовой декаметровой радиолинии необходимо учитывать зависимость среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха от выбора рабочей частоты. Расхождение в расчетах надежности связи при отсутствии учета этой частотной зависимости в среднем составляет 5,6 %, а наибольшая разница достигает 8,1 %.

Ключевые слова: одномодовая декаметровая радиолиния, надежность связи, среднее отношение сигнал-помеха, среднеквадратическое отклонение, нижняя дециль отношения сигнал-помеха.

Введение

За последние десятилетия активность использования декаметрового (ДКМ) диапазона волн в системах радиосвязи непрерывно возрастает. Расширяется использование адаптивных систем ДКМ связи, внедряются программы защиты информации от шумов и преднамеренных помех, в радиовещании продолжают использоваться опытные передачи с цифровой модуляцией. ДКМ системы опове-

Библиографическая ссылка на статью:

Пашинцев В. П., Гринев Е. М., Скорик А. Д., Белоконов Д. А. Методика определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха в декаметровой радиолинии от выбора частоты // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 63-80. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-63-80

Reference for citation:

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 Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-63-80

щения, предупреждения и помощи при бедствиях не имеют альтернативы. Все это многоплановое использование систем ДКМ диапазона требует достаточно точных методов энергетического расчета радиолиний, зон обслуживания и назначения рабочих частот [1].

Основные недостатки ДКМ диапазона заключаются в том, что его частотная емкость невелика (27 МГц), а изменчивость ионосферы и подверженность ее отражающего слоя $F2$ возмущениям приводят к необходимости смены рабочих частот. Кроме того, даже при однократном (одномодовом) отражении ДКМ волны от слоя $F2$ наблюдается ее диффузное рассеяние на неоднородностях ионосферы, что приводит к появлению глубоких интерференционных (быстрых) замираний принимаемых сигналов [2]. Вследствие медленных изменений состояния ионосферы и мощности внешних помех в различных участках частот ДКМ диапазона отношение сигнал-помеха на входе приемника \bar{Z} будет случайным. Поэтому основным показателем качества функционирования системы связи ДКМ диапазона является вероятность (или надежность) связи с достоверностью не хуже допустимой $D_{\text{св}} = \psi\left(\frac{\bar{Z} - Z_{\text{доп}}}{\sigma_z}\right)$, которая зависит от среднего \bar{Z} отношения сигнал-помеха на входе приемника, его допустимого $Z_{\text{доп}}$ значения и среднеквадратического отклонения (СКО) σ_z входного отношения сигнал-помеха.

Известно [1-8], что в одномодовой ДКМ радиолинии среднее отношение сигнал-помеха на входе приемника \bar{Z} возрастает по мере увеличения рабочей частоты f и ее приближения к максимально применимой частоте (МПЧ). Это позволяет при неизменных значениях $Z_{\text{доп}} = \text{const}$ и $\sigma_z = \text{const}$ определить надежность ДКМ связи на любой рабочей частоте f согласно зависимости $D_{\text{св}}(f) = F\left(\frac{\bar{Z}(f) - Z_{\text{доп}}}{\sigma_z}\right)$, где $F(\xi)$ – функция Лапласа.

В [9] разработан метод определения зависимости $Z_{\text{доп}} = \psi(f)$ допустимого отношения сигнал-помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты в одномодовой ДКМ радиолинии. В [10] разработана методика определения частотной зависимости $D_{\text{св}}(f) = F\left(\frac{\bar{Z}(f) - Z_{\text{доп}}(f)}{\sigma_z}\right)$ надежности связи в одномодовой ДКМ радиолинии от разности среднего и допустимого отношения сигнал-помеха при неизменном значении СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника $\sigma_z = \text{const}$. Обосновано, что ночью (при слабом ионосферном поглощении) при уменьшении рабочей частоты f относительно максимально применимой частоты (МПЧ) может обеспечиваться максимальное значение надежности связи $D_{\text{св}}(f) = \text{max}$ в одномодовой ДКМ радиолинии. Поэтому имеется оптимальное значение рабочей частоты $f = f_{\text{орч}}$ по критерию обеспечения наибольшей надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}(f) = \text{max}$. По мере увеличения уровня диффузности ионосферы (т.е. интенсивности ее мелкомасштабных неоднородностей $\beta_{\text{и}}$) оптимальное значение рабочей частоты $f = f_{\text{орч}}$ относи-

тельно МПЧ уменьшается и может быть составлять $f = f_{\text{орч}} = 0,25$ МПЧ, что существенно меньше традиционно выбираемой оптимальной рабочей частоты (0,85 МПЧ).

Следует отметить, что согласно [5] величина СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника ДКМ радиолинии может существенно изменяться: от $\sigma_z = 6...11$ дБ днем до $\sigma_z = 10...16$ дБ ночью. Учет столь значительного разброса значений σ_z может существенно повлиять на точность расчетов надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}(f) = F\left(\left(\bar{Z}(f) - Z_{\text{доп}}(f)\right)/\sigma_z\right)$. Поэтому традиционно для расчетов надежности ДКМ связи используют усредненные значения σ_z , полученные по результатам статистических данных. Так, в методике расчета ДКМ радиолиний [6] рекомендуется одинаковое значение $\sigma_z = 14$ дБ при любых значениях рабочих частот. В методике [5] значение σ_z существенно зависит от времени суток, сезона и выбора рабочей частоты. Так, в летний сезон ночью при выборе рабочей частоты $f = 7$ МГц значение $\sigma_z = 16,2$ дБ, а днем при выборе частоты $f = 7,5$ МГц значение $\sigma_z = 10,8$ дБ. Однако зависимость СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты $\sigma_z = \psi(f)$ в [6] не устанавливается. Поэтому отсутствует возможность установления более точной зависимости $D_{\text{св}}(f) = F\left(\left(\bar{Z}(f) - Z_{\text{доп}}(f)\right)/\sigma_z(f)\right)$ надежности связи в одномодовой ДКМ радиолинии от выбора рабочей частоты.

Целью статьи является разработка методики определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты $\sigma_z(f)$ и оценки ее влияния на надежность связи $D_{\text{св}}(f)$ в одномодовой декаметровый радиолинии.

Обоснование зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха в декаметровый радиолинии от выбора частоты

Известно [3-5], что для систем радиосвязи основным показателем качества функционирования является помехоустойчивость (достоверность) приема, которая характеризуется зависимостью $P_{\text{ош}} = \psi(h^2)$ вероятности ошибки от отношения $h^2 = P_c/P_n$ средних (медианных) значений мощности сигнала P_c и помех P_n на входе приемника. При быстрых (интерференционных) замираниях допустимое значение вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош доп}}$ достигается при допустимом отношении сигнал-помеха по мощности $h^2 = h_{\text{доп}}^2$, которое может на порядки превышать допустимое отношение сигнал-помеха в отсутствие быстрых замираний.

Поскольку в ДКМ радиолиниях одновременно с быстрыми замираниями сигналов имеют место и медленные замирания сигналов и помех на входе при-

емника, то показателем качества их функционирования является вероятность P связи с достоверностью не хуже допустимой (т.е. $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}$) [1, 3-6]:

$$D_{\text{св}} = P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) = P(Z \geq Z_{\text{доп}}) = F\left(\frac{\bar{Z} - Z_{\text{доп}}}{\sigma_z}\right) = F(\xi). \quad (1)$$

Здесь $Z = 10 \lg h^2 = 10 \lg(P_c/P_n)$ – отношение сигнал-помеха по мощности на входе приемника, выраженное в децибелах (дБ); $\bar{Z} = 10 \lg \bar{h}^2 = 10 \lg(\bar{P}_c/\bar{P}_n)$ – среднее (медианное) отношение сигнал-помеха на входе приемника (дБ) при быстрых замираниях, равное отношению сигнал-помеха при отсутствии замираний ($\bar{Z} = Z$); $Z_{\text{доп}} = 10 \lg h_{\text{доп}}^2$ – допустимое отношение сигнал-помеха (дБ); σ_z – СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника при медленных замираниях сигналов и помех (дБ); $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}})/\sigma_z$; $F(\xi) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-0,5t^2) dt$ – функция Лапласа.

Следует отметить, что зависимость от частоты среднего отношения сигнал-помеха на входе приемника $\bar{Z}(f)$ в методиках [10, 11] определялась на основе расчета частотных зависимостей медианных значений напряженности поля сигнала $\bar{E}_c(f)$ и помех $\bar{E}_n(f)$. Однако более наглядным представляется определение частотной зависимости отношения $\bar{Z}(f) = 10 \lg(\bar{P}_c(f)/\bar{P}_n(f))$ средней мощности сигнала к средней мощности помех на входе приемника в полосе его пропускания b (Гц), выраженного в дБ: $\bar{Z}(f)_{\text{дБ}} = \bar{P}_c(f)_{\text{дБ}} - \bar{P}_n(f)_{\text{дБ}}$.

Для определения зависимости СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты $\sigma_z = \psi(f)$ можно воспользоваться методикой, состоящей из 2 этапов: 1) установления зависимости СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника от величины отклонения нижней $D_l \bar{Z}$ и верхней $D_u \bar{Z}$ децили среднего отношения сигнал-помеха $\sigma_z = \psi(D_{l,u} \bar{Z})$; 2) установления зависимости отклонения нижней $D_l \bar{Z}$ и верхней $D_u \bar{Z}$ децили от выбора рабочей частоты $D_{l,u} \bar{Z} = \psi(f)$. Для решения этой задачи следует учесть, что для инженерных расчетов надежности ДКМ связи используют Рекомендацию МСЭ-R P.842-5 «Расчет надежности и совместимости ВЧ радиосистем» [12], согласно которой вместо СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника σ_z (дБ) для расчета $D_{\text{св}}$ используются отклонения нижней $D_l \bar{Z}$ (дБ) и верхней $D_u \bar{Z}$ (дБ) децили среднего отношения сигнал-помеха.

В соответствии с рекомендациями [12] расчет $D_{\text{св}}$ осуществляется для двух случаев:

- 1) если среднее отношение сигнал-помеха больше допустимого значения (т.е. $\bar{Z} > Z_{\text{доп}}$), то $D_{\text{св}}$ определяется величиной нижней децили среднего отношения сигнал-помеха $D_l \bar{Z}$ как

$$D_{\text{св}} = 130 - 80 \left(1 + \frac{\bar{Z} - Z_{\text{доп}}}{D_l \bar{Z}} \right)^{-1} (\%), \quad (2)$$

2) если $\bar{Z} < Z_{\text{доп}}$, то $D_{\text{св}}$ определяется величиной верхней децили среднего отношения сигнал-помеха $D_u \bar{Z}$ как

$$D_{\text{св}} = 80 \left(1 + \frac{Z_{\text{доп}} - \bar{Z}}{D_u \bar{Z}} \right)^{-1} - 30 (\%). \quad (3)$$

Анализ выражений (2) и (3) показывает, что при равенстве $\bar{Z} = Z_{\text{доп}}$ они приобретают значения $D_{\text{св}} = 50 \%$. Это соответствует результату расчета по выражению (1) $D_{\text{св}} = F(\xi = 0) = 0,5$ при $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_z = 0$.

При условии $\bar{Z} > Z_{\text{доп}}$ и равенстве $(\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / D_l \bar{Z} = 1$, т.е. $D_l \bar{Z} = \bar{Z} - Z_{\text{доп}}$, выражение (2) принимает значение

$$D_{\text{св}} = 130 - 80 \left(1 + \frac{\bar{Z} - Z_{\text{доп}}}{D_l \bar{Z}} \right)^{-1} = 130 - 80 \cdot 2^{-1} = 90 \%.$$

К такому же значению $D_{\text{св}} = 0,9$ сводится выражение (1) при равенстве $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_z = 1,28$, т.е. при $1,28\sigma_z = \bar{Z} - Z_{\text{доп}}$, когда $D_{\text{св}} = F(\xi = 1,28) = 0,9$. Анализ равенств $D_l \bar{Z} = \bar{Z} - Z_{\text{доп}}$ и $1,28\sigma_z = \bar{Z} - Z_{\text{доп}}$ показывает на взаимосвязь $\sigma_z = D_l \bar{Z} / 1,28$.

При условии $\bar{Z} < Z_{\text{доп}}$ и равенстве $(Z_{\text{доп}} - \bar{Z}) / D_u \bar{Z} = 1$, т.е. $D_u \bar{Z} = Z_{\text{доп}} - \bar{Z}$, выражение (3) принимает значение

$$D_{\text{св}} = 80 \left(1 + \frac{Z_{\text{доп}} - \bar{Z}}{D_u \bar{Z}} \right)^{-1} - 30 = 80 \cdot 2^{-1} - 30 = 10 \%.$$

Это соответствует результату расчета по выражению (1) $D_{\text{св}} = F(\xi = -1,28) = 1 - F(\xi = 1,28) = 1 - 0,9 = 0,1$ при $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_z = -1,28$, т.е. при $1,28\sigma_z = Z_{\text{доп}} - \bar{Z}$, когда $D_{\text{св}} = F(\xi = -1,28) = 0,1$. Анализ равенств $D_l \bar{Z} = Z_{\text{доп}} - \bar{Z}$ и $1,28\sigma_z = Z_{\text{доп}} - \bar{Z}$ показывает, что $\sigma_z = D_u \bar{Z} / 1,28$.

Следовательно, при расчете надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}$ параметр СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника σ_z определяется величиной отклонения нижней $D_l \bar{Z}$ и верхней $D_u \bar{Z}$ децили среднего отношения сигнал-помеха согласно выражениям:

$$\sigma_z = D_l \bar{Z} / 1,28, \quad (4)$$

$$\sigma_z = D_u \bar{Z} / 1,28. \quad (5)$$

Достоверность зависимостей (4, 5) подтверждается их совпадением с известными выражениями [13].

С учетом (4) и выражения $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_z$ формулу (2) для $\bar{Z} > Z_{\text{доп}}$ можно записать в виде

$$D_{\text{св}} = 130 - 80 \left(1 + \frac{\bar{Z} - Z_{\text{доп}}}{1,28\sigma_z} \right)^{-1} = 130 - 80 \left(1 + \frac{\xi}{1,28} \right)^{-1} (\%), \quad (6)$$

а формулу (3) для $\bar{Z} < Z_{\text{доп}}$ как

$$D_{\text{св}} = 80 \left(1 + \frac{Z_{\text{доп}} - \bar{Z}}{1,28\sigma_z} \right)^{-1} - 30 = 80 \left(1 - \frac{\xi}{1,28} \right)^{-1} - 30 (\%). \quad (7)$$

В соответствии с формулами (1, 6, 7) на графиках рис. 1 представлены кривые зависимости надежности связи $D_{\text{св}}$ от показателя $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_z$ при среднем отношении сигнал-помеха меньше допустимого значения ($\bar{Z} < Z_{\text{доп}}$) (рис. 1а) и при среднем отношении сигнал-помеха больше допустимого значения ($\bar{Z} > Z_{\text{доп}}$) (рис. 1б).

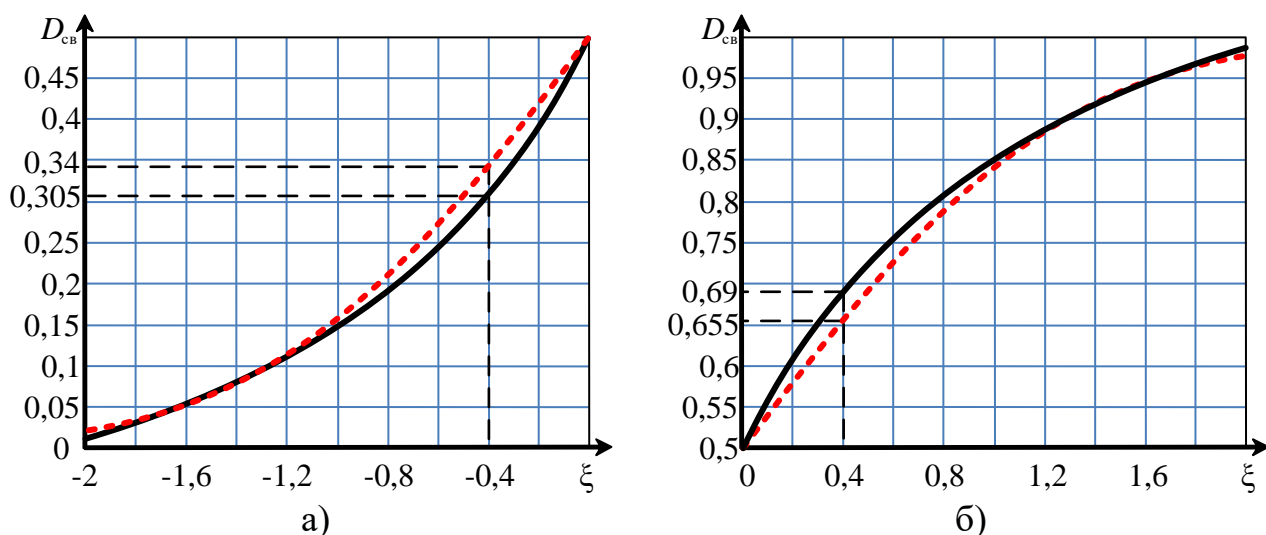


Рис. 1. Зависимость надежности связи $D_{\text{св}}$ от показателя $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_z$ при: а) $\bar{Z} < Z_{\text{доп}}$; б) $\bar{Z} > Z_{\text{доп}}$

На рис. 1 пунктирной линией показана зависимость надежности связи $D_{\text{св}}$ от показателя ξ по формуле (1), сплошной линией – по формулам (6, 7). Анализ представленных графиков показывает, что значения зависимости надежности связи $D_{\text{св}}$ от показателя ξ в области низких (рис. 1а) значений $D_{\text{св}} = 0,02 \dots 0,15$ и в области высоких (рис. 1б) значений $D_{\text{св}} = 0,8 \dots 0,98$ практически совпадают (погрешность менее 1 %). В области средних значений $D_{\text{св}} = 0,15 \dots 0,8$ максимальная разница составляет 3,5 % при $\xi = -0,4$ и $\xi = 0,4$. Следовательно, при традиционно высоких требованиях к надежности ДКМ связи $D_{\text{св доп}} = P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) \geq 0,8$ и допустимой вероятности ошибки

$P_{\text{ош доп}} = (3...5) \cdot 10^{-3}$ [5] погрешность расчетов надежности связи $D_{\text{св}}$ по формулам (1) и (2, 6) не превышает 1%. Поэтому далее будем производить расчеты по формуле (2), применимой при $D_{\text{св}} > 0,5$.

Напомним, что согласно формулы (4) СКО отношения сигнал-помеха σ_z на входе приемника определяется отклонением нижней децили $D_l \bar{Z}$ среднего отношения сигнал-помеха $\sigma_z = D_l \bar{Z} / 1,28$. Поскольку известно [5, 12, 13], что отклонение нижней децили $D_l \bar{Z}$ среднего отношения сигнал-помеха зависит от рабочей частоты f , то СКО также будет зависеть от частоты: $\sigma_z(f) = D_l \bar{Z}(f) / 1,28$.

Таким образом, методика определения зависимости СКО отношения сигнал-помеха $\sigma_z(f)$ и надежности связи $D_{\text{св}}(f)$ от выбора рабочей частоты f должна включать следующие этапы:

- 1) определение частотной зависимости отношения $\bar{Z}(f) = 10 \lg(\bar{P}_c(f) / \bar{P}_n(f))$ средней мощности сигнала к средней мощности помех на входе приемника;
- 2) определение частотных зависимостей отклонения нижней децили $D_l \bar{Z}(f)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_z(f) = D_l \bar{Z}(f) / 1,28$ отношения сигнал-помеха;
- 3) определение частотной зависимости надежности $D_{\text{св}}(f)$ декаметровый радиосвязи.

Определение частотной зависимости отношения средней мощности сигнала к средней мощности помех на входе приемника

Частотная зависимость отношения мощности сигнала к мощности помехи определяется как

$$\bar{Z}(f)_{\text{дБ}} = \bar{P}_c(f)_{\text{дБВт}} - \bar{P}_n(f)_{\text{дБВт}}, \quad (8)$$

где \bar{P}_c – средняя мощность полезного сигнала на входе приемника, выраженная в децибелах относительно ватта (дБВт), \bar{P}_n – средняя мощность помех с выхода эквивалентной антенны без потерь (дБВт).

В соответствии с рекомендациями [7] средняя номинальная мощность полезного сигнала \bar{P}_c на входе приемника в случае приема на антенну без потерь в диапазоне расстояний до 7000 км, рассчитывается по формуле

$$\bar{P}_c(f) = E_c(f) + G_{\text{пр}} - 20 \lg f - 107,2 \text{ (дБВт)}, \quad (9)$$

где E_c – напряженность поля пространственной волны (дБ относительно 1 мкВ/м), $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления приемной антенны без потерь (относительно изотропного излучателя) в направлении прихода сигнала (дБ), f – рабочая частота (МГц).

Подробный расчет частотной зависимости напряженности поля пространственной волны $E_c(f)$ представлен в методике [10].

В соответствии с исходными данными (табл. 1) и результатами, полученными в методике [10], при мощности передатчика $P_{пер} = 100$ Вт на рис. 2а представлена кривая частотной зависимости средней мощности полезного сигнала $\overline{P_c}(f)$ на входе приемника, полученная по формуле (9).

Таблица 1 – Координаты и технические параметры для организации ДКМ радиосвязи

Координаты приемника $\rho_{прм}$	58,14° с.ш., 70,32° в.д.
Координаты точки отражения от ионосферы $\rho_{отр}$	56,84° с.ш., 53,78° в.д.
Коэффициент усиления приемной антенны $G_{пр}$, дБ	2
Дата проведения исследования $t_{дт}$	08.08.2022
Время проведения исследования $t_{вр}$	00 часов 00 минут
Категория окружающей среды	Сельская местность
Наибольший размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей r_0 , м	200
Критическая частота слоя F2 f_{F2} , МГц	3,3
Высота максимума ионизации h_m , км	328,6
Дальность радиосвязи d , км	2000

Частотная зависимость средней мощности помех $\overline{P_{п}}$ с выхода эквивалентной антенны без потерь определяется в соответствии с рекомендациями [8]

$$\overline{P_{п}}(f) = F_a(f) + 10 \lg b - 204 \text{ (дБВт)}, \quad (10)$$

где F_a – коэффициент внешнего шума (дБ), b – ширина полосы пропускания приемника (Гц).

Расчет частотной зависимости коэффициента внешнего шума F_a представлен в методике [11]. Величина этого коэффициента определяется значениями медиан мощности атмосферных помех $F_{ам а}$, соответствующими уровнями промышленных помех $F_{ам п}$ и интенсивности галактического шума $F_{ам г}$, а также зависит от выбора рабочей частоты f , координат приемника $\rho_{прм}$, даты $t_{дт}$ и времени суток $t_{вр}$ организации радиосвязи.

В соответствии с исходными данными (табл. 1) и результатами, полученными в методике [11], на рис. 2а представлена кривая частотной зависимости $\overline{P_{п}}(f)$ средней мощности помех с выхода эквивалентной антенны, полученная по формуле (10), в полосе частот приемника $b = 200$ Гц, для летнего сезона в 00 часов 00 минут.

В соответствии с кривыми на рис. 2а для средней мощности полезного сигнала на входе приемника $\overline{P_c}(f)$ и средней мощности помех с выхода экви-

валентной антенны $\overline{P}_n(f)$ на рис. 2б представлена частотная зависимость среднего отношения сигнал-помеха, полученная по формуле (8), в полосе частот приемника $b = 200$ Гц, для летнего сезона в 00 часов 00 минут.

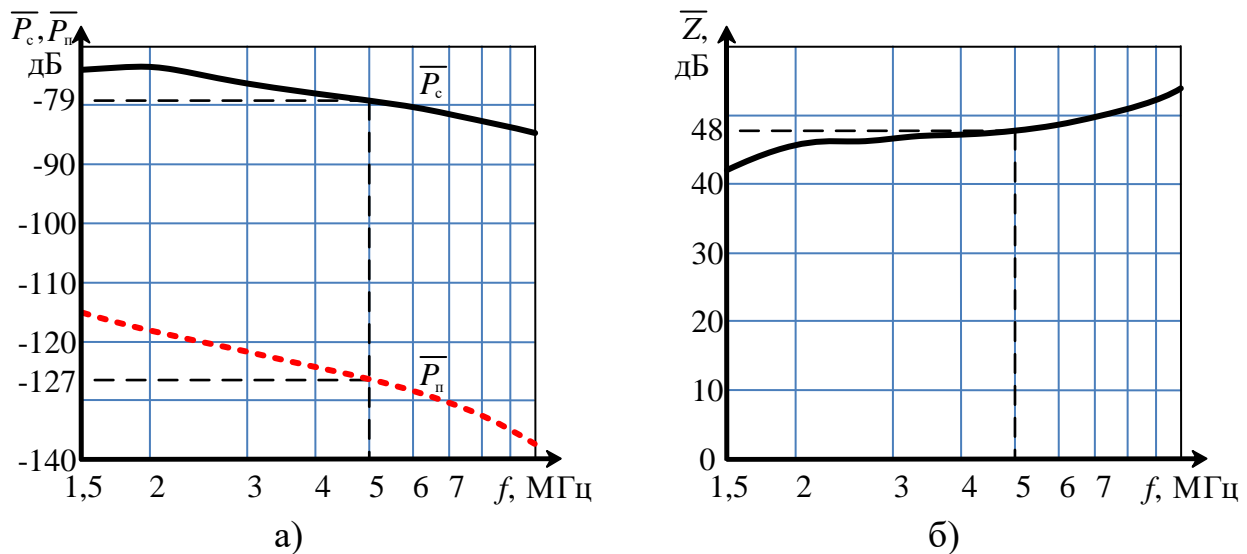


Рис. 2. Частотные зависимости: а) средних значений мощности сигнала $\overline{P}_c(f)$, помех $\overline{P}_n(f)$; б) среднего отношения сигнал-помеха $\overline{Z}(f)$

Анализ представленных графиков рис. 2 показывает, что при повышении рабочей частоты f средние значения мощности сигнала \overline{P}_c и помех \overline{P}_n уменьшаются, а среднее отношение сигнал-помеха \overline{Z} возрастает. На частоте $f = 5$ МГц среднее отношение сигнал-помеха составляет $\overline{Z} = \overline{P}_c - \overline{P}_n = -79 - (-127) = 48$ дБ, что подтверждается расчетами, представленными в методике [10].

Определение частотных зависимостей отклонения нижней децили и среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха

Согласно выражению (1, 2), при расчете надежности связи величина СКО отношения сигнал-помеха на входе приемника σ_z из-за медленных замираний сигналов и помех определяется величиной нижней децили $D_l \overline{Z}$ этого отношения.

В соответствии с рекомендациями [12] отклонение нижней децили $D_l \overline{Z}$ среднего отношения сигнал-помеха определяется по формуле:

$$D_l \overline{Z} = \left((D_l P_{cd})^2 + (D_l P_{ch})^2 + (D_u F_{avg})^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left((D_l P_{cd})^2 + (D_l P_{ch})^2 + \left(10 \log \left(\frac{10^{\frac{F_{am a} + D_{u a}}{10}} + 10^{\frac{F_{am p} + D_{u p}}{10}} + 10^{\frac{F_{am g} + D_{u g}}{10}}}{10^{\frac{F_{am a}}{10}} + 10^{\frac{F_{am p}}{10}} + 10^{\frac{F_{am g}}{10}}} \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{дБ}), \quad (11)$$

где $D_l P_{cd}$ – отклонение нижней децили сигнала день ото дня (дБ), $D_l P_{ch}$ – отклонение нижней децили сигнала в течение часа (дБ), $D_u F_{apg}$ – отклонение верхней децили суммарной мощности (комбинации) атмосферных (a), промышленных (p) и галактических (g) помех (дБ).

Ряд параметров, входящих в (11), зависит от рабочей частоты f следующим образом.

Известно [12], что для длительных замираний сигнала (день ото дня) отклонение нижней децили $D_l P_{cd}$ зависят от отношения рабочей частоты f к основной МПЧ трассы. Частотная зависимость $D_l P_{cd}(f)$ приведена в таблице 2 рекомендации [12].

В соответствии с рекомендацией [7] краткосрочные отклонения (в течение часа) нижней децилей сигнала от сезона года, времени суток и от частоты не зависят и составляет $D_l P_{ch} = 8$ дБ.

Определение частотных зависимостей входящих в (11) медианных значений мощности атмосферных $F_{ama}(f)$, промышленных помех $F_{amp}(f)$ и галактического шума $F_{amg}(f)$ детально описаны в методике [11], которая учитывает данные реферативной модели IRI-2016 [14].

Частотные зависимости отклонения верхней децили $D_{ua}(f)$ атмосферных помех определяют с помощью данных об изменчивости и характере атмосферных помех в зависимости от частоты f и времени суток и года, представленных на рисунках 13с-36с рекомендации [8].

Согласно [8] отклонения верхней децили промышленных помех D_{up} и галактического шума D_{ug} не зависят от сезона года, времени суток и от частоты f и устанавливаются на одном уровне: $D_{up} = D_{ug} = 2$ дБ.

С учетом частотных зависимостей $D_l P_{cd}(f)$, $F_{ama}(f)$, $F_{amp}(f)$, $F_{amg}(f)$ и $D_{ua}(f)$ формула (11) для определения отклонения нижней децили $D_l \bar{Z}$ среднего отношения сигнал-помеха принимает следующий вид:

$$D_l \bar{Z}(f) = \left((D_l P_{cd}(f))^2 + (D_l P_{ch})^2 + (D_u F_{apg}(f))^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left((D_l P_{cd}(f))^2 + \right. \\ \left. + (D_l P_{ch})^2 + \left(10 \log \left(\frac{10^{\frac{F_{ama}(f)+D_{ua}(f)}{10}} + 10^{\frac{F_{amp}(f)+D_{up}}{10}} + 10^{\frac{F_{amg}(f)+D_{ug}}{10}}}{10^{\frac{F_{ama}(f)}{10}} + 10^{\frac{F_{amp}(f)}{10}} + 10^{\frac{F_{amg}(f)}{10}}} \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Таким образом, в полученном выражении (12) помимо постоянных параметров ($D_l P_{ch} = 8$ дБ, $D_{up} = D_{ug} = 2$ дБ) входит ряд частотных зависимостей, которые определяются: $D_l P_{cd}(f)$ – согласно таблице 2 рекомендации [12];

$F_{ama}(f)$, $F_{amp}(f)$, $F_{amg}(f)$ согласно методике [11], $D_{ua}(f)$ – согласно рекомендации [8].

В соответствии с выражением (12) и исходными данными, используемыми в методиках [8, 10, 11], на графике рис. 3а представлены результаты расчета частотной зависимости отклонения нижней децили $D_l\bar{Z}(f)$ среднего отношения сигнал-помеха в полосе частот приемника $b = 200$ Гц, для летнего сезона в 00 часов 00 минут.

В соответствии с приведенной на рис. 3а зависимостью (12) $D_l\bar{Z}(f)$ на рис. 3б представлена частотная зависимость СКО $\sigma_z(f)$ отношения сигнал-помеха по мощности на входе приемника одномодовой ДКМ радиолинии:

$$\sigma_z(f) = \frac{D_l\bar{Z}(f)}{1,28} = 0,78 \left((D_l P_{cd}(f))^2 + (D_l P_{ch})^2 + \left(10 \log \left(\frac{10^{\frac{F_{ama}(f)+D_{ua}(f)}{10}} + 10^{\frac{F_{amp}(f)+D_{up}}{10}} + 10^{\frac{F_{amg}(f)+D_{ug}}{10}}}{10^{\frac{F_{ama}(f)}{10}} + 10^{\frac{F_{amp}(f)}{10}} + 10^{\frac{F_{amg}(f)}{10}}} \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Пунктирной линией на рис. 3б показано неизменное значение СКО $\sigma_z = \text{const} = 14$ дБ, рекомендуемое в [6].

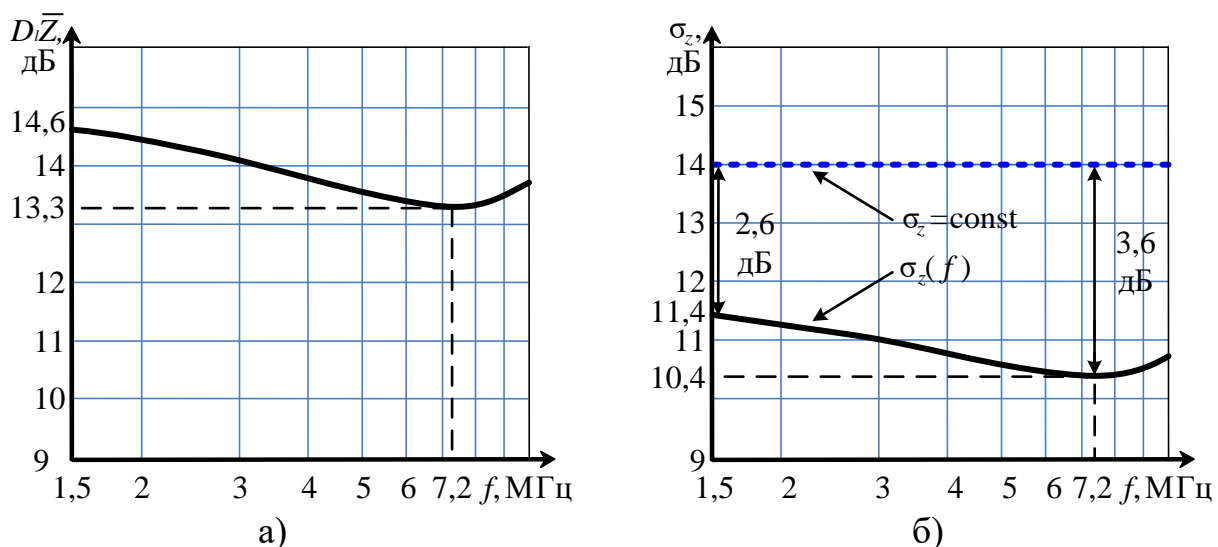


Рис. 3. Частотная зависимость: а) отклонения нижней децили $D_l\bar{Z}(f)$ среднего отношения сигнал-помеха; б) СКО отношения сигнал-помеха $\sigma_z(f)$

Анализ графика рис. 3б показывает, что рассчитанные согласно выражению (13) значения СКО отношения сигнал-помеха $\sigma_z(f) = D_l\bar{Z}(f)/1,28$ существенно зависят от рабочей частоты: наибольшее значение СКО составляет $\sigma_z = 11,4$ дБ на частоте $f = 1,5$ МГц, а наименьшее – $\sigma_z = 10,4$ дБ на частоте $f = 7,2$ МГц. Полученные значения соответствуют экспериментальным дан-

ным [5], где в летний сезон ночью величина СКО на входе приемника ДКМ радиолинии может изменяться от $\sigma_z = 10...16$ дБ. Результаты расчета $\sigma_z(f)$ ниже традиционно рекомендуемого значения СКО $\sigma_z = 14$ дБ на $\Delta\sigma_{z \min} = 14 - 11,4 = 2,6$ дБ при частоте $f = 1,5$ МГц и на $\Delta\sigma_{z \max} = 14 - 10,4 = 3,6$ дБ при частоте $f = 7,2$ МГц, что может существенно повлиять на достоверность расчета надежности ДКМ связи.

Определение частотной зависимости надежности декаметровая радиосвязи

Полученные результаты (рис. 3б) определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты (13) $\sigma_z(f) = D_l \bar{Z}(f)/1,28$ позволяют установить зависимость надежности связи (1) в одномодовой ДКМ радиолинии от выбора рабочей частоты согласно выражению:

$$D_{cb}(f) = F\left(\left(\bar{Z}(f) - Z_{доп}(f)\right)/\sigma_z(f)\right) = F\left(\left(\Delta Z(f)\right)/\sigma_z(f)\right), \quad (14)$$

и сравнить ее с аналогичной частотной зависимостью при традиционно используемом значении $\sigma_z = const = 14$ дБ:

$$D_{cb}(f) = F\left(\left(\bar{Z}(f) - Z_{доп}(f)\right)/\sigma_z\right) = F\left(\left(\Delta Z(f)\right)/\sigma_z\right). \quad (15)$$

Входящая в (14) частотная зависимость среднего отношения сигнал-помеха $\bar{Z}(f)$ для одинаковых с $\sigma_z(f) = D_l \bar{Z}(f)/1,28$ условий (лето, ночь) представлена на графике рис. 2б.

Для определения частотной зависимости допустимого отношения сигнал-помеха $Z_{доп}(f)$ воспользуемся результатами известной методики [10] и указанными исходными данными (табл. 1) при среднем уровне диффузности ионосферы $\beta_{и} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ для летнего сезона в 00 часов 00 минут. Частотная зависимость допустимого отношения сигнал-помеха $Z_{доп}(f) = Z_{доп}(f, \beta_{и})$ представлена на графике рис. 4а. Здесь же пунктиром показана частотная зависимость $\Delta Z(f) = \bar{Z}(f) - Z_{доп}(f)$ превышения среднего значения отношения сигнал-помеха на входе приемника (рис. 2б) над допустимым значением.

На графике рис. 4б представлена зависимость надежности связи $D_{cb}(f)$ от выбора рабочей частоты в одномодовой ДКМ радиолинии, построенная по формуле (14) на основе приведенных на графиках рис. 4а и рис. 3а частотных зависимостей $\Delta Z(f)$ и $\sigma_z(f)$. Здесь же пунктирной линией представлена зависимость $D_{cb}(f)$, построенная по формуле (15) при $\sigma_z = const = 14$ дБ

Анализ графиков рис. 4б показывает, что максимальные значения надежности связи D_{cb} в одномодовой ДКМ радиолинии наблюдаются на частоте $f = 2,1$ МГц (которая при МПЧ=10 МГц составляет всего 0,21 МПЧ) и достигает $D_{cb} = 0,97$ при учете частотной зависимости $\sigma_z(f)$ СКО отношения сигнал-

помеха и $D_{cb} = 0,94$ – при неизменном традиционном СКО $\sigma_z = \text{const} = 14$ дБ. Минимальные значения D_{cb} наблюдаются на частоте $f = 5,3$ МГц (которая составляет 0,53 МПЧ) и составляет $D_{cb} = 0,86$ при учете $\sigma_z(f)$ и $D_{cb} = 0,79$ при $\sigma_z = \text{const} = 14$ дБ.

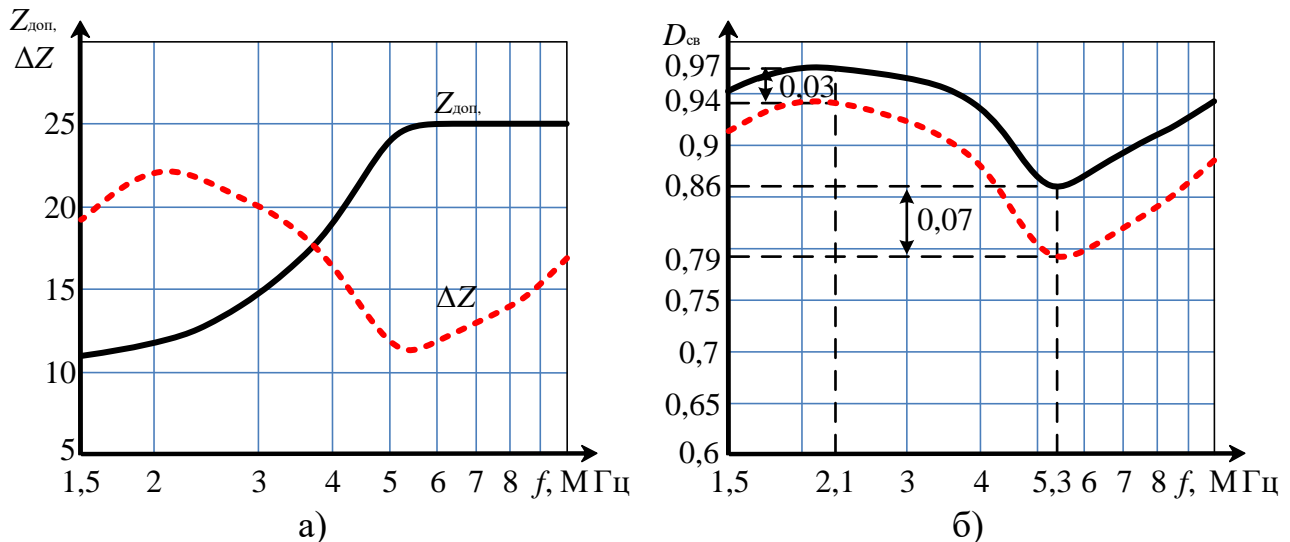


Рис. 4. Частотная зависимость: а) допустимого отношения сигнал-помеха $Z_{\text{доп}}(f)$ и превышения над ней среднего отношения сигнал-помеха $\Delta Z(f)$, б) надежности связи $D_{cb}(f)$ в одномодовой ДКМ радиолинии

Следует отметить, что расчет надежности связи $D_{cb}(f)$ в соответствии с рекомендацией [12] по формулам (2) и (12) дает близкие результаты со значениями на графике рис. 4б: отклонения составляют менее 1 % в области самых высоких и самых низких значений.

Сравнительный анализ полученных на графиках рис. 4б частотных зависимостей надежности связи $D_{cb}(f)$ в одномодовой ДКМ радиолинии при расчете по формуле (14) с учетом частотной зависимости СКО отношения сигнал-помеха $\sigma_z(f)$ и результатов расчета согласно (15) при неизменном СКО $\sigma_z = \text{const} = 14$ дБ показывает, что они отличаются между собой: наименьшая разница составляет $D_{cb} = 0,97 - 0,94 = 0,03$ (что составляет $((0,97 - 0,94)/0,97) \cdot 100\% = 3,1\%$) на частоте $f = 2,1$ МГц, наибольшая – $D_{cb} = 0,86 - 0,79 = 0,07$ (что составляет $((0,86 - 0,79)/0,86) \cdot 100\% = 8,1\%$) на частоте $f = 5,3$ МГц. В среднем это отличие составляет 5,6 %.

Заключение

1. Разработана методика определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха $\sigma_z(f)$ и надежности связи $D_{cb}(f)$ от выбора рабочей частоты f , которая включает 3 этапа:

- а) определение частотной зависимости отношения $\bar{Z}(f) = 10 \lg(\bar{P}_c(f)/\bar{P}_n(f))$ средней мощности сигнала к средней мощности помех на входе приемника (пример которой для летней ночи приведен на графике рис. 2б);
- б) определение частотной зависимости (13) среднеквадратического отклонения $\sigma_z(f)$ отношения сигнал-помеха на входе приемника (пример которых для летней ночи приведен на графике рис. 3б);
- в) определение частотной зависимости надежности связи в одномодовой декаметровый радиолинии $D_{cb}(f)$ согласно (14) с учетом частотной зависимости (13) среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха $\sigma_z(f)$ на входе приемника (пример которой для летней ночи приведен на графике рис. 4б).

2. Сравнительный анализ полученных на графиках рис. 4б частотных зависимостей надежности связи $D_{cb}(f)$ в одномодовой декаметровый радиолинии с учетом зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха от частоты $\sigma_z(f)$ и при неизменном традиционном значении $\sigma_z = \text{const} = 14$ дБ показывает, что отличие между ними составляет от 3,1 % на частоте $f = 2,1$ МГц до 8,1 % на частоте $f = 5,3$ МГц.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 22-21-00768 (<https://rscf.ru/project/22-21-00768>).

Литература

1. Чернов Ю. А. Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. – М.: Техносфера, 2018. – 688 с.
2. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
3. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
4. Жуков В. А., Серков В. П., Филиппов В. В. Радиочастотная служба и антенные устройства. – Л.: ВАС, 1989. – 264 с.
5. Игнатов В. В., Килимник Ю. П., Никольский И. Н., Пивоваров В. Ф. Военные системы связи. Ч. 1. – Л.: ВАС, 1989. – 386 с.
6. Мешалкин В. А., Сосунов Б. В. Основы энергетического расчета радиоканалов. – Л.: ВАС, 1991. – 110 с.
7. Рекомендации МСЭ-R P.533-14. Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий // Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс] URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.533-14-201908-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 13.01.2023).

8. Рекомендации МСЭ-R P.372-15 (09/2021). Радиосум // Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс] URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-15-202109-S!!PDF-R.pdf> (дата обращения: 24.01.2022).

9. Пашинцев В. П., Тишкин С. А., Иванников А. И., Солчатов М. Э. Определение оптимальной рабочей и наименьшей применимой частоты декаметровой радиолинии с учетом глубины быстрых замираний // Электросвязь. 2001. №12. С. 16–19.

10. Пашинцев В. П., Скорик А. Д., Коваль С. А., Киселев Д. П., Сенокосов М. А. Зависимость надежности связи в декаметровой радиолинии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 300-322. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10412.

11. Пашинцев В. П., Гринев Е. М., Коваль С. А., Скорик А. Д. Методика определения частотной зависимости напряженности поля помех и надежности декаметровой связи в различные сезоны года // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 61-79. doi: 10.24412/2410-9916-2022-2-61-79.

12. Рекомендации МСЭ-R P.842-5. Расчет надежности совместимости ВЧ радиосистем // Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс] URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.842-5-201309-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 02.02.2023).

13. Серков В. П. Распространение радиоволн и антенные устройства. – Л.: ВАС, 1981. – 468 с.

14. Bilitza D. D., Altadill V., Truhlik V., Shubin I., Galkin B., Huang X. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*, 2017, vol. 15, pp. 418-429. doi: 10.1002/2016SW001593.

References

1. Chernov Yu. A. *Spetsial'nyye voprosy rasprostraneniya radiovoln v setyakh svyazi i radioveshchaniya* [Special issues of radio wave propagation in communication and radio broadcasting networks]. Moscow, Technosphere Publ., 2018. 688 p. (in Russian).

2. Dolukhanov M. P. *Rasprostraneniye radiovoln* [Propagation of radio waves]. Moscow, Svyaz' Publ., 1972. 336 p. (in Russian).

3. Komarovich V. F., Sosunov V. N. *Sluchainyye pomekhi i nadezhnost' KV svyazi* [Random hindrances and reliability of HF communication]. Moscow, Svyaz' Publ., 1977. 136 p. (in Russian).

4. Zhukov V. A., Serkov V. P., Filippov V. V. *Radiochastotnaya sluzhba i antennyye ustroystva* [Radio frequency service and antenna devices]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1989. 264 p. (in Russian).

5. Ignatov V. V., Kilimnik Yu. P., Nikolsky I. N., Pivovarov V. F. *Voyennyye sistemy svyazi. Chast' 1* [Military communication systems. Part I]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1989. 386 p. (in Russian).

6. Meshalkin V. A., Sosunov B. V. *Osnovy energeticheskogo rascheta radiokanalov* [Fundamentals of energy calculation of radio channels]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1991. 110 p. (in Russian).

7. Recommendation ITU-R P. 533-14 (08/2019). Method for the prediction of the performance of HF circuits. P Series. Radiowave propagation. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.533-14-201908-I!!PDF-R.pdf (accessed 13 January 2023).

8. Recommendation ITU-R P.372-15 (09/2021). Radio noise. P Series. Radiowave propagation. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-15-202109-S!!PDF-R.pdf> (accessed 24 January 2023).

9. Pashintsev V. P., Tishkin S. A., Ivannikov A. I., Solchatov M. E. Determination of the optimal operating and lowest applicable decameter radio frequency taking into account the depth of fast fading. *Electrosvyaz*, 2001, no. 12, pp. 16-19 (in Russian).

10. 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. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10412 (in Russian).

11. Pashintsev V. P., Grinev E. M., Koval S. A., Skorik A. D. Method for determining the frequency dependence of the strength of the interference field and the reliability of decameter communication in different seasons of the year. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 61-79. doi: 10.24412/2410-9916-2022-2-61-79 (in Russian).

12. Recommendation ITU-R P.842-5 (09/2013). Computation of reliability and compatibility of HF radio systems. P Series. Radiowave propagation. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.842-5-201309-I!!PDF-R.pdf (accessed 2 February 2023).

13. Serkov V. P. *Rasprostraneniye radiovoln i antennoye ustroystva* [Radio wave propagation and antenna devices]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1981. 468 p. (in Russian).

14. Bilitza D. D., Altadill V., Truhlik V., Shubin I., Galkin B., Huang X. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*, 2017, vol. 15, pp. 418-429. doi: 10.1002/2016SW001593.

Статья поступила 18 марта 2023 г.

Информация об авторах

Пашинцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: pasintsevp@mail.ru

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

Гринев Евгений Михайлович – аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Область научных интересов: повышение качества коротковолновой связи в условиях диффузности ионосферы. E-mail: saru3d@yandex.ru

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

Скорик Александр Дмитриевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Заместитель технического директора. АО «Российский институт мощного радиостроения». Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем декаметровой связи. E-mail: alexander_skorik@mail.ru

Адрес: 199178, Санкт-Петербург, В.О., 11-я линия, д. 66.

Белоконь Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Область научных интересов: повышение надежности декаметровой связи в условиях диффузной многолучевости. E-mail: ahoi8@yandex.ru

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

Method for determining the dependence of the standard deviation from the signal-interference in a decameter radio link on the choice of frequency

V. P. Pashintsev, E. M. Grinev, A. D. Skorik, D. A. Belokon

Problem statement: *it is known that random changes in the power of received signals and interference in the decameter wave range significantly affect the reliability of radio communications (the probability of communication with reliability is not worse than the permissible one). To maintain acceptable communication reliability, a timely change of operating frequencies is required. Communication reliability is determined by the value of the average signal-to-noise ratio at the receiver input relative to its allowable value, which depend on the choice of operating frequency, and the standard deviation of the input signal-to-noise ratio. The latter, when calculating the reliability of decameter communication, is assumed to be unchanged and equal to 14 dB. However, according to experimental data, the root-mean-square deviation of the ratio of signal power to noise power at the input of a decameter communication receiver depends on frequency, which can affect the reliability of the reliability calculation. The aim of the work is to develop a technique for determining the dependence of the standard deviation of the signal-to-noise ratio at the receiver input on the choice of the operating frequency and assessing its impact on the reliability of communication in a single-mode decameter radio link. The novelty lies in the theoretical generalization of methods for calculating the reliability of communication in a single-mode decameter radio link through the Laplace function and*

through the deviations of the lower and upper deciles to determine the frequency dependence of the standard deviation of the signal-to-noise ratio. **Result:** an analytical expression is obtained for estimating the root-mean-square deviation of the ratio of the average signal powers and interference at the receiver input from the choice of the operating frequency in a single-mode decameter radio link. **Practical significance:** when calculating the reliability of communication in a single-mode decameter radio link, it is necessary to take into account the dependence of the standard deviation of the signal-to-noise ratio on the choice of operating frequency. The discrepancy in the calculations of communication reliability in the absence of this frequency dependence is on average 5,6%, and the largest difference reaches 8,1%.

Keywords: single-mode decameter radio link, communication reliability, average signal-to-noise ratio, standard deviation, lower signal-to-noise ratio decile.

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 disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: pasintsevp@mail.ru

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

Evgeny Mikhailovich Grinev – graduate student of at 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. E-mail: saru3d@yandex.ru

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

Aleksandr Dmitrievich Skorik – Doctoral student. Deputy Technical Director. Joint-Stock Company «Russian Institute of Powerful Radio Engineering». Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of HF communication systems. E-mail: alexander_skorik@mail.ru

Address: Russia, 199178, Saint Petersburg, 11th line V. O., h. 66.

Dmitry Aleksandrovich Belokon – graduate student of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: improving the reliability of decameter communication in conditions of diffuse multipath. E-mail: ahoi8@yandex.ru

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