

## Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы

В. П. Пашинцев<sup>1</sup>, Д. А. Белоконь<sup>1✉</sup>, С. А. Коваль<sup>2</sup>, А. Д. Скорик<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

<sup>2</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Российский институт мощного радиостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ ahoi8@yandex.ru

### Аннотация

**Введение.** Известна методика оценки зависимости надежности связи в коротковолновой (КВ) радиолинии с одним дискретным лучом и диффузным рассеянием волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и уровня диффузности ионосферы. В данной методике для описания интерференционных замираний принимаемого сигнала используется *m*-распределение Накагами. Однако в КВ однолучевой радиолинии замирания амплитуды сигнала в 90 % всех случаев описываются распределением не Накагами, а Райса, или обобщенным распределением Рэлея. При этом применение распределения Накагами для аппроксимации замираний и анализа их влияния на качество связи дает хорошее совпадение с распределением Райса только в двух частных случаях: распределения Рэлея и полного отсутствия замираний.

**Цель работы.** Разработать методику оценки надежности связи в однолучевой коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями и сравнить ее результаты с надежностью связи при замираниях Накагами.

**Материалы и методы.** Для оценки влияния рабочей частоты и диффузности ионосферы на параметры распределения замираний в однолучевой КВ-радиолинии использовались методы моделирования трансфоносферных каналов связи на основе радиофизического метода фазового экрана. Для оценки влияния параметров замираний с распределением Райса на надежность КВ-связи использовалась среда MatLab. Исходные данные о параметрах ионосферы получены с использованием модели IRI-2016.

**Результаты.** Разработана 3-этапная методика оценки надежности связи в однолучевой КВ-радиолинии с райсовскими замираниями и осуществлено сравнение ее результатов с надежностью связи при замираниях Накагами. Получены зависимости надежности связи в однолучевой КВ-радиолинии ночью и днем от выбора рабочей частоты относительно максимально применимой частоты и от уровня диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами.

**Заключение.** Анализ полученных результатов показывает, что при различном уровне диффузности ионосферы надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Накагами может быть существенно завышена (до 12 %) по сравнению с замираниями Райса.

**Ключевые слова:** однолучевая коротковолновая радиолиния, ионосфера, диффузность, флуктуации фазового фронта, замирания, распределение Райса, распределение Накагами, надежность связи

**Для цитирования:** Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы / В. П. Пашинцев, Д. А. Белоконь, С. А. Коваль, А. Д. Скорик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 22–39. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-22-39

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 22-21-00768.

Статья поступила в редакцию 17.07.2022; принята к публикации после рецензирования 31.10.2022; опубликована онлайн 29.12.2022

## Methodology for Estimating Communication Reliability in Shortwave Radio-Frequency Transmission Channels with Rician Fading Given Ionospheric Diffusivity

Vladimir P. Pashintsev<sup>1</sup>, Dmitry A. Belokon<sup>1✉</sup>, Stanislav A. Koval<sup>2</sup>, Alexander D. Skorik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

<sup>2</sup>Military Academy of Communication named after Marshal  
of the Soviet Union S. M. Budyonny, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Russian Institute of Powerful Radio Engineering, St Petersburg, Russia

✉ahoi8@yandex.ru

### Abstract

**Introduction.** There exists a technique for estimating the dependence of communication reliability in a shortwave radio-frequency transmission channel (SWRC) with a single discrete beam and diffuse wave scattering across small-scale ionospheric inhomogeneities on the selected operating frequency taking into account the given signal-to-noise ratio and ionospheric diffusivity. In this technique, the Nakagami  $m$ -distribution is used to describe interference fading of the received signal. However, in a single-beam SWRC, fading signal amplitudes are described by the Rician or generalized Rayleigh, rather than by Nakagami, distribution in 90 % of all cases. At the same time, the results obtained using the Nakagami distribution to approximate fading and to assess its effect on communication quality agrees well with those obtained by the Rician distribution only in two cases: the presence of Rayleigh distribution or the complete absence of fading.

**Aim.** To develop a methodology for estimating communication reliability in a single-beam SWRC with Rician fading and to compare its results with that under Nakagami fading.

**Materials and methods.** The effect of operating frequency and ionospheric diffusivity on fading distribution parameters in a single-beam SWRC was estimated by simulating transionospheric communication channels based on a radio-physical phase screen method. The effect of Rician fading parameters on communication reliability was simulated in the MatLab environment. The initial data on ionospheric parameters were obtained using the IRI-2016 model.

**Results.** A three-stage methodology for estimating communication reliability in a single-beam SWRC with Rician fading was developed; its results were compared with that under Nakagami fading. Dependencies were obtained to describe communication reliability in a single-beam SWRC during the day and at night on the selected operating frequency relative to the maximum applicable frequency and on the level of ionospheric diffusivity during Rician and Nakagami fading.

**Conclusion.** The conducted analysis showed that, at different levels of ionospheric diffusivity, communication reliability in a single-beam SWRC with Nakagami fading can be significantly overestimated (up to 12 %), compared to that under Rician fading.

**Keywords:** single-beam shortwave radio-frequency transmission channel, ionosphere, diffusivity, phase front fluctuations, fading, Rician distribution, Nakagami distribution, communication reliability

**For citation:** Pashintsev V. P., Belokon D. A., Koval S. A., Skorik A. D. Methodology for Estimating Communication Reliability in Shortwave Radio-Frequency Transmission Channels with Rician Fading Given Ionospheric Diffusivity. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 22–39. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-22-39

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgements.** The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation within the framework of project no. 22-21-00768.

Submitted 17.07.2022; accepted 31.10.2022; published online 29.12.2022

**Введение.** Известна [1, 2] методика оценки диолинии с одним дискретным лучом (модой) и надежности связи в коротковолновой (KB) радиодиффузным рассеянием волны на мелкомасштаб-

ных неоднородностях ионосферы в зависимости от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы. В данной методике для описания интерференционных замираний принимаемого сигнала используется  $m$ -распределение Накагами. Помимо распределения Накагами для описания интерференционных замираний сигналов в однолучевой КВ-радиолинии (канале связи) широко используется распределение Райса, или обобщенное распределение Рэлея [3–10]. Однако, как показано в [5], применение распределения Накагами для аппроксимации замираний сигнала в КВ-канале связи дает хорошее совпадение с распределением Райса только в двух частных случаях: распределения Рэлея и полного отсутствия замираний. Известно [4, 5], что в КВ-канале связи распределение замираний амплитуды сигнала чаще всего описывается распределением не Накагами, а Райса (в 90 % всех случаев, включая случаи чисто рэлеевских замираний).

Целью статьи является разработка методики оценки надежности связи ( $D_{св}$ ) в однолучевой коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями и сравнение ее результатов с надежностью связи при замираниях Накагами.

Известно [3], что надежность (вероятность) связи в КВ-радиолинии описывается как вероятность ( $P$ ) того, что значение вероятности ошибки ( $P_{ош}$ ) при приеме сигналов будет не хуже допустимого значения ( $P_{ош.доп}$ ):

$$D_{св} = P(P_{ош} \leq P_{ош.доп}) = F\left[\frac{(\bar{Z} - Z_{доп})/\sigma_Z}{\sigma_Z}\right] = F(\Delta Z/\sigma_Z) = F(\xi), \quad (1)$$

где  $F(\xi) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-0.5t^2) dt$  – функция

Лапласа;  $\xi = (\bar{Z} - Z_{доп})/\sigma_Z = \Delta Z/\sigma_Z$ ;  $\bar{Z}$  – среднее (медианное) отношение (превышение) сигнал/помеха (С/П) на входе приемника (ПРМ) в условиях замираний, равное отношению С/П при отсутствии замираний ( $Z = \bar{Z}$ ), дБ;  $Z_{доп}$  – допустимое превышение С/П на входе ПРМ, определяемое по функциональной зависимости  $P_{ош} = P_{ош}(Z = \bar{Z})$  при допустимом значении ве-

роятности ошибки  $P_{ош} = P_{ош.доп}$  в условиях замираний принимаемых сигналов, дБ;  $\sigma_Z$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) превышения С/П из-за медленных замираний сигналов и помех (которое не зависит от рабочей частоты и в среднем за месяц составляет  $\sigma_Z = 14$  дБ [3]).

Существующая методика оценки надежности в однолучевой КВ-радиолинии [1, 2] включает три этапа:

1) определение зависимости  $\bar{Z} = \bar{Z}(f_0)$  среднего отношения С/П от выбора рабочей частоты  $f_0$ ;

2) определение зависимости  $Z_{доп} = Z_{доп}(f_0, \beta_{и}, P_{ош.доп})$  допустимого отношения С/П на входе ПРМ от рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{и}$  (т. е. относительного значения СКО флуктуаций электронной концентрации в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы), вызывающего замирания с  $m$ -распределением Накагами;

3) определение зависимости  $D_{св}(f_0, \beta_{и}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{и})/\sigma_Z]$  надежности связи в КВ-радиолинии от выбора рабочей частоты  $f_0$  с учетом возможного изменения разности  $\Delta Z(f_0, \beta_{и}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{доп}(f_0, \beta_{и}, P_{ош.доп})$  среднего и допустимого отношения С/П на входе ПРМ из-за изменения сигнально-помеховой обстановки, характеризуемой  $\bar{Z}(f_0)$ , и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{и}$ , определяющей  $Z_{доп}(f_0, \beta_{и}, P_{ош.доп})$ .

Для достижения поставленной цели представляется целесообразным разработать методику оценки надежности в однолучевой КВ-радиолинии, включающую следующие этапы:

1) сравнительный анализ зависимости параметров замираний с распределением Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{и})$  и Накагами  $m(f_0, \beta_{и})$  от рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{и}$ ;

2) определение зависимостей допустимого отношения С/П на входе ПРМ от рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности  $\beta_{и}$  ионосферы при замираниях Райса и Накагами:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош. доп}}) = Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}}); \quad (2)$$

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}}(m, P_{\text{ош. доп}}) = Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}}); \quad (3)$$

3) оценка зависимости надежности связи в однолучевой КВ-радиолинии от выбора рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности  $\beta_{\text{и}}$  ионосферы при замираниях Райса и Накагами:

$$D_{\text{св}} = F \left\{ \left[ \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош. доп}}) \right] / \sigma_Z \right\} = F \left\{ \left[ \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}}) \right] / \sigma_Z \right\}; \quad (4)$$

$$D_{\text{св}} = F \left\{ \left[ \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(m, P_{\text{ош. доп}}) \right] / \sigma_Z \right\} = F \left\{ \left[ \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}}) \right] / \sigma_Z \right\}. \quad (5)$$

**Сравнительный анализ зависимости параметров Райса и Накагами от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы.** Основой для определения допустимого превышения С/П  $Z_{\text{доп}}$  в методике [1, 2] является аналитическая зависимость  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  вероятности ошибки при некогерентном приеме ортогональных сигналов с замираниями Накагами от отношения С/П  $(h^2)$  на входе приемника [3, 5]:

$$P_{\text{ош}} = 0.5 \left( \frac{2m}{h^2 + 2m} \right)^m, \quad (6)$$

где отношение С/П на входе приемника  $h^2$  связано с величиной  $\bar{Z}$  как  $\bar{Z} = Z = 10 \lg h^2$ . Параметр Накагами характеризует отношение квадрата средней мощности принимаемого сигнала  $\bar{P}_r$  к дисперсии мгновенной мощности сигнала [5]:

$$m = (\bar{P}_r)^2 / [\overline{P_r^2} - (\bar{P}_r)^2]. \quad (7)$$

Параметр Накагами принимает значения в диапазоне  $m = 0.5 \dots \infty$ . Значение  $m = \infty$  соответствует случаю отсутствия замираний;  $m = 1$  – случаю рэлеевских замираний;  $m = 0.5$  – случаю односторонне-нормальных замираний. Входящая в (7) средняя мощность принимаемого сигнала  $\bar{P}_r$  в диапазоне значе-

ний  $m = 1 \dots \infty$  определяется совокупностью ее регулярной  $P_r$  и флуктуационной  $P_{\text{ф}}$  составляющих и равна мощности принимаемого сигнала при отсутствии замираний  $P_0$  (что обеспечивает равенство  $Z = \bar{Z}$  отношений С/П при наличии и отсутствии замираний) [5, 11]:

$$\begin{aligned} \bar{P}_r &= P_r + P_{\text{ф}} = \alpha_p^2 P_0 + 2\sigma^2 P_0 = \\ &= P_0 (\alpha_p^2 + 2\sigma^2) = P_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\alpha_p^2$  и  $2\sigma^2$  – регулярная и флуктуационная составляющие коэффициента передачи канала связи с замираниями. Согласно (8) сумма  $\alpha_p^2 + 2\sigma^2 = 1$  для обеспечения равенства  $\bar{P}_r = P_0$ .

Для КВ-каналов связи эти составляющие определяются методами моделирования транс-ионосферных каналов связи с мелкомасштабными неоднородностями на основе радиофизического метода фазового экрана. Их значения зависят от дисперсии флуктуаций фазового фронта отраженной волны  $\sigma_{\text{ф}}^2$  на выходе неоднородной ионосферы как [10–12]

$$\alpha_p^2 = \exp(-\sigma_{\text{ф}}^2); \quad (9)$$

$$2\sigma^2 = 1 - \exp(-\sigma_{\text{ф}}^2), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ф}}^2(f_0, \beta_{\text{и}}) &= \\ &= \sqrt{\pi} \cdot r_0 L_3 \left( \pi f_0 \beta_{\text{и}} / (c K_s^2 \sec^2 \varphi_0) \right)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $r_0 = 200 \dots 500$  м – характерный (средний) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей;  $L_3$  – эквивалентный однородный путь волны в слое  $F_2$  ионосферы (зависящий от его критической частоты  $f_{F_2}$ , высоты нижней границы  $h_0$ , максимума ионизации  $h_{\text{мах}}$ , дальности радиосвязи  $d$ );  $c$  – скорость света;  $K_s$  – поправочный коэффициент на сферичность Земли и ионосферы;  $\varphi_0$  – угол падения волны на нижнюю границу  $h_0$  отражающего слоя  $F$  ионосферы.

Анализ (11) показывает, что величина  $\sigma_{\text{ф}}$  прямо пропорционально зависит от выбора ра-

бочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы, который может изменяться в очень широких пределах [1]:  $\beta_{\text{и}} = 10^{-3} \dots 10^{-1}$ . Входящие в (11) параметры  $L_{\text{э}}$ ,  $K_s$ ,  $\varphi_0$  тоже зависят от  $f_0$ . Более детальное описание этих функциональных зависимостей приведено в [10].

В табл. 1 представлены значения критической частоты слоя ионосферы  $F_2$  и высоты максимума ионизации  $h_{\text{max}}$ , полученные с помощью модели IRI-2016 [13], для координат точки отражения волны от ионосферы 56.84 с. ш., 53.78 в. д. при организации связи 8 августа 2019 г.

На рис. 1 представлен график зависимости  $\sigma_{\varphi}(f_0)$  СКО флуктуаций фазового фронта отраженной волны  $\sigma_{\varphi}$  на выходе неоднородной ионосферы от выбора рабочей частоты  $f_0$  при дальности радиосвязи  $d = 2000$  км в разное время суток: *a* – полночь (00:00); *б* – полдень (12:00).

Табл. 1. Параметры ионосферы, полученные с использованием модели IRI-2016

Tab. 1. Ionospheric parameters obtained using the IRI-2016 model

Время суток ( $t_{\text{отп}}$ ), ч	0:00	12:00
Критическая частота ( $f_{F_2}$ ), МГц	4.004	4.928
Высота максимума ионизации ( $h_{\text{max}}$ ), км	350.6	302.4

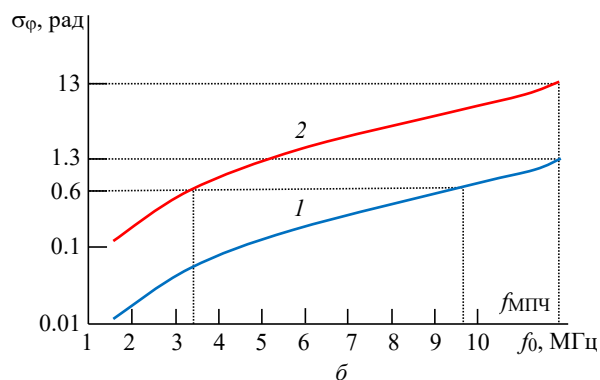
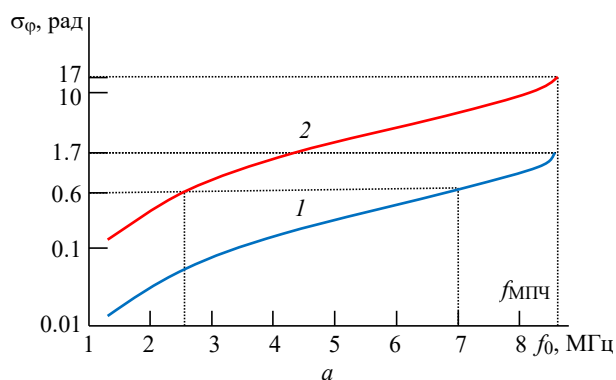


Рис. 1. Зависимости СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы от выбора рабочей частоты при уровне диффузности  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (1) и  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (2) для разного времени суток: *a* – 00:00; *б* – 12:00

Fig. 1. Dependencies of the phase front root-mean-squared fluctuations (RMSF) at the output of an inhomogeneous ionosphere on the selected operating frequency at the diffusivity level  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (1) and  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (2) for different times of the day: *a* – 00:00; *б* – 12:00

Значения  $\sigma_{\varphi}$  при разных значениях  $f_0$  рассчитаны по (11) при нормальной (невозмущенной) ионосфере, когда  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (линия 1), и возмущенной (диффузной) ионосфере, когда  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (линия 2), для исходных данных, представленных в табл. 1, и значениях  $r_0 = 200$  м,  $K_s \approx 1$ .

Методика расчета частотных зависимостей  $L_{\text{э}}(f_0)$ ,  $\varphi_0(f_0)$  и  $\sigma_{\varphi}(f_0)$  подробно изложена в [10].

Анализ рис. 1, *a* показывает, что в ночное время при нормальной ионосфере (линия 1), дисперсия флуктуаций фазового фронта с увеличением рабочей частоты  $f_0$  плавно возрастает и на максимально применимой частоте (МПЧ)  $f_{\text{МПЧ}} = 8.6$  МГц составляет  $\sigma_{\varphi} \approx 1.7$  рад. При возмущенной ионосфере (линия 2) значение  $\sigma_{\varphi}$  с увеличением рабочей частоты резко возрастает и при МПЧ достигает  $\sigma_{\varphi} \approx 17$  рад.

Для обеспечения неизменного значения СКО флуктуаций фазового фронта отраженной волны на выходе неоднородной ионосферы (11)  $\sigma_{\varphi} \sim f_0 \beta_{\text{и}}$  при возрастании уровня диффузности  $\beta_{\text{и}}$  ионосферы необходимо пропорционально уменьшить рабочую частоту  $f_0$  (а точнее, ее отношение к МПЧ  $f_0/f_{\text{МПЧ}}$ ). Например, для поддержания  $\sigma_{\varphi} = 0.6$  рад в ночное время (рис. 1, *a*)

необходимо выбрать  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}} \approx 7$  МГц при нормальной ионосфере ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ , линия 1), а при возрастании уровня диффузности до  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (линия 2) необходимо уменьшить рабочую частоту до  $f_0 \approx 0.3 f_{\text{МПЧ}} \approx 2.6$  МГц.

В дневное время рис. 1, б при  $f_{\text{МПЧ}} = 11.9$  МГц и нормальной ионосфере ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ , линия 1) дисперсия флуктуаций фазового фронта составляет  $\sigma_{\varphi} \approx 1.3$  рад. При возмущенной ионосфере ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ , линия 2) на МПЧ значение  $\sigma_{\varphi}$  достигает 13 рад. Для обеспечения неизменного значения СКО флуктуаций фазового фронта отраженной волны на выходе неоднородной ионосферы  $\sigma_{\varphi} = 0.6$  рад необходимо выбрать  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}} \approx 9.7$  МГц при нормальной ионосфере ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ , линия 1), а при возрастании уровня диффузности до  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (линия 2) необходимо уменьшить рабочую частоту до  $f_0 \approx 0.3 f_{\text{МПЧ}} \approx 3.4$  МГц.

Параметр Накагами  $m$  (7) можно выразить через дисперсию флуктуаций фазового фронта отраженной волны  $\sigma_{\varphi}^2$  на выходе неоднородной ионосферы (11) следующим образом. Известно [14], что  $m$  – параметр в трансionoсферном канале связан обратно пропорциональной зависимостью с индексом мерцаний (сцинтилляции) принимаемых сигналов  $S_4^2 = 1/m$ . Индекс мерцаний определяется через регулярную составляющую (9)  $\alpha_p^2 = \exp(-\sigma_{\varphi}^2)$  коэффициента передачи канала связи с замираниями согласно выражению  $S_4^2 = 1 - (\alpha_p^2)^2$  [15]. Отсюда следует искомая зависимость

$$m(f_0, \beta_{\text{и}}) = 1/S_4^2 = \left[1 - (\alpha_p^2)^2\right]^{-1} = \left\{1 - \exp\left[-2\sigma_{\varphi}^2(f_0, \beta_{\text{и}})\right]\right\}^{-1}. \quad (12)$$

Анализ (12) показывает, что в частном случае отсутствия флуктуаций фазового фронта отраженной волны ( $\sigma_{\varphi}^2 = 0$ ) на выходе неоднородной ионосферы параметр  $m \rightarrow \infty$ , что характерно в случае отсутствия замираний. При значительных

флуктуациях фазового фронта отраженной волны ( $\sigma_{\varphi}^2 \gg 1$ ) на выходе ионосферы параметр  $m = 1$ , что характерно в случае рэлеевских замираний принимаемого сигнала.

Известно [6], что в однолучевой (т. е. с одной модой) КВ-радиолинии при выборе рабочей частоты  $f_0$ , близкой  $f_{\text{МПЧ}}$ , когда их отношение  $f_0/f_{\text{МПЧ}} > 0.9$ , наблюдается рэлеевское распределение замираний амплитуды принимаемого сигнала. При выборе рабочей частоты меньше МПЧ, когда  $f_0/f_{\text{МПЧ}} < 0.9$ , глубина замираний принимаемых сигналов уменьшается и описывается райсовским (обобщенным рэлеевским) законом распределения. Известно выражение для вероятности ошибки при оптимальном некогерентном приеме ортогональных сигналов с райсовскими замираниями [3, 5]:

$$P_{\text{ош}} = \frac{\gamma^2 + 1}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left[-\frac{\gamma^2 h^2}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)}\right], \quad (13)$$

где  $\gamma^2$  – параметр распределения Райса ( $0 \leq \gamma^2 \leq \infty$ ), который характеризует отношение регулярной (9) и флуктуационной (10) составляющих замираний и зависит от выбора рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  через величину дисперсии флуктуаций фазы отраженной волны (11) на выходе неоднородной ионосферы как [10, 15]

$$\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}}) = \alpha_p^2 / (2\sigma^2) = \left\{\exp\left[\sigma_{\varphi}^2(f_0, \beta_{\text{и}})\right] - 1\right\}^{-1}. \quad (14)$$

Анализ (9), (10) и (14) показывает, что в частном случае отсутствия флуктуаций фазового фронта отраженной волны ( $\sigma_{\varphi}^2 = 0$ ) на выходе ионосферы флуктуационная составляющая замираний отсутствует ( $2\sigma^2 = 0$ , при  $\alpha_p^2 = 1$ ) и параметр  $\gamma^2 = \alpha_p^2 / (2\sigma^2) \rightarrow \infty$ , что характерно при отсутствии замираний. При значительных флуктуациях фазового фронта отраженной волны ( $\sigma_{\varphi}^2 \sim 1$ ) на выходе ионосферы и отсутствии

регулярной составляющей замираний ( $\alpha_p^2 = 0$ ) параметр  $\gamma^2 = 0$ , что характерно в случае рэле-евских замираний принимаемого сигнала.

Параметры распределения Накагами и Райса связаны между собой известной зави-симостью [5]

$$m = \frac{(1 + \gamma^2)^2}{1 + 2\gamma^2} = 1 + \frac{\gamma^4}{1 + 2\gamma^2}. \quad (15)$$

На рис. 2 представлены графики зависимо-сти параметров Накагами  $m$  и Райса  $\gamma^2$  от СКО флуктуаций фазового фронта отраженной волны на выходе неоднородной ионосферы  $\sigma_\varphi$ , построенные в соответствии с (12) и (14).

В табл. 2 приведено соответствие пара-метров Райса и Накагами принимаемых сиг-налов в КВ-радиолинии трем значениям СКО флуктуаций фазового фронта отраженной вол-ны на выходе неоднородной ионосферы со-гласно выражениям (12), (14), (15) и рис. 2.

Таким образом, приведенные выражения

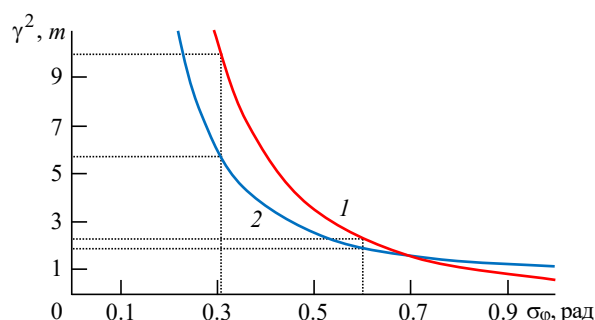


Рис. 2. Зависимости параметров Райса (1) и Накагами (2) от СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы

Fig. 2. Dependencies of Rician (1) and Nakagami (2) parameters on the phase front RMSF at the output of an inhomogeneous ionosphere

Табл. 2. Соответствие параметров Райса и Накагами значениям СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны

Tab. 2. Correspondence of the Rician and Nakagami parameters to the phase front RMSF of the output wave

СКО флуктуаций фазы ( $\sigma_\varphi$ )	Параметр Райса ( $\gamma^2$ )	Параметр Накагами ( $m$ )
0.31	10	5.8
0.6	2.2	1.9
3.16	0	1

(11), (12), (14) и графики на рис. 1 и 2 устанавли-вают искомые для первого этапа разрабаты-ваемой методики зависимости параметров Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$  и Накагами  $m(f_0, \beta_{\text{и}})$  от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы.

**Определение зависимости допустимого отношения С/П от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами.** На рис. 3 представлены графики зависимости (13)  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  вероят-ности ошибки от отношения С/П и параметра Райса при трех его значениях, приведенных в табл. 2:  $\gamma^2 = 0$  (линия 1);  $\gamma^2 = 2.2$  (линия 2);  $\gamma^2 = 10$  (линия 3). Для сравнения на рис. 3 при-ведены зависимости (6)  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  вероятно-сти ошибки от отношения С/П и параметра Накагами при трех его значениях, соответствую-щих (табл. 2) значениям параметра Райса:  $m = 1$  (линия  $1_m$ , которая совпадает с линией 1);  $m = 1.9$  (штриховая линия  $2_m$ );  $m = 5.8$  (штри-ховая линия  $3_m$ ).

Анализ приведенных зависимостей на рис. 3 показывает, что графики зависимостей  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  и  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  будут совпадать только при значениях  $\gamma^2 = 0$  (линия 1) и  $m = 1$  (линия  $1_m$ ), характерных для наиболее глубо-ких рэлеевских замираний в канале связи. При двух других парах соответствующих значений параметров Райса и Накагами ( $\gamma^2 = 2.2$  и  $m = 1.9$ ;  $\gamma^2 = 10$  и  $m = 5.8$ ) графики зависимо-стей  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  и  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$ , представлен-ные линиями 2 и  $2_m$ , а также 3 и  $3_m$ , будут раз-личаться. Наибольшее отличие будет наблюдат-ся между ходом линий 2 и  $2_m$ , что обусловит наибольшую разницу допустимых значений С/П  $h^2 = h_{\text{доп}}^2$  при распределениях Райса и Накагами для обеспечения одинаковой допустимой вероят-ности ошибки  $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош. доп}}$ .

В соответствии с рис. 3 по мере увеличения параметров  $\gamma^2$  и  $m$  допустимые превышения



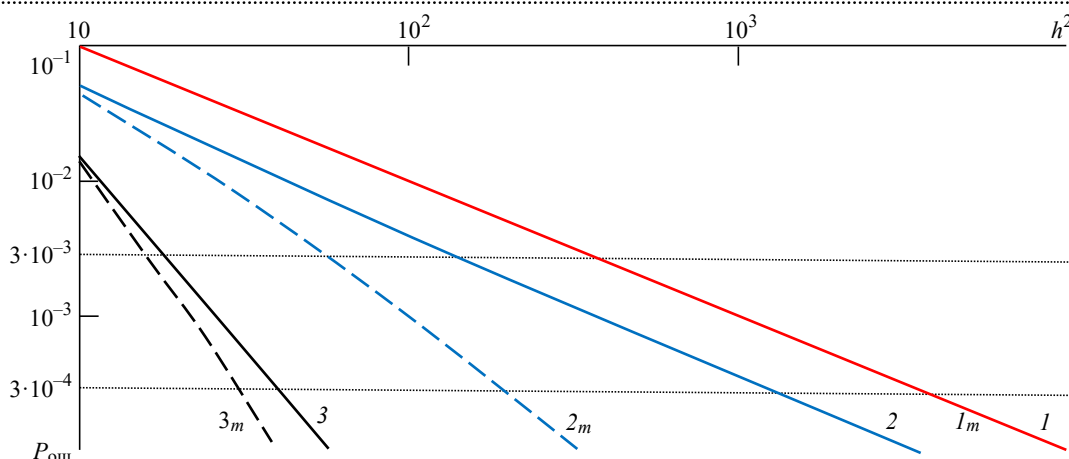


Рис. 3. Зависимости  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  и  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  при трех парах соответствующих значений параметров Райса и Накагами:

$$1 - \gamma^2 = 0; 1_m - m = 1; 2 - \gamma^2 = 2.2; 2_m - m = 1.9; 3 - \gamma^2 = 10; 3_m - m = 5.8$$

Fig. 3. Dependencies  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  and  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  for three pairs of corresponding values of Rician and Nakagami parameters:

$$1 - \gamma^2 = 0; 1_m - m = 1; 2 - \gamma^2 = 2.2; 2_m - m = 1.9; 3 - \gamma^2 = 10; 3_m - m = 5.8$$

С/П  $Z = 10 \lg h^2 = 10 \lg h_{\text{доп}}^2 = Z_{\text{доп}}$  для обеспечения допустимой в КВ-каналах вероятности ошибки [4]  $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$  будут принимать значения, приведенные в табл. 3. Здесь же приведены значения  $h_{\text{доп}}^2$  и  $Z_{\text{доп}}$  при уменьшенном значении  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Согласно табл. 3 при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$  наибольшая разность допустимых отношений С/П при замираниях Райса и Накагами составляет всего  $\Delta Z_{\text{доп}} = 21 - 17.2 = 3.8$  дБ и обеспечивается при  $\gamma^2 = 2.2$  и  $m = 1.9$ . Согласно табл. 2

такие параметры замираний Райса и Накагами будут наблюдаться при СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы  $\sigma_{\phi} = 0.6$  рад. Анализ рис. 3 с учетом роста современных требований к уменьшению допустимой вероятности ошибки в системах КВ-связи до  $P_{\text{ош. доп}} = 10^{-3} \dots 10^{-4}$  [16] показывает, что разность допустимых отношений С/П  $\Delta Z_{\text{доп}}$  может существенно возрасти. Например, согласно рис. 3 и табл. 3 с уменьшением  $P_{\text{ош. доп}}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$  наибольшая разность допустимых отношений С/П, полученных с применением распре-

Табл. 3. Соответствие параметров Райса и Накагами допустимым превышениям С/П

$$h_{\text{доп}}^2 (Z_{\text{доп}}, \text{дБ}) \text{ при } P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ и } P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$$

Tab. 3. Correspondence of the Rician and Nakagami parameters under the permissible excess of the signal-to-noise ratio

$$h_{\text{доп}}^2 (Z_{\text{доп}}, \text{дБ}) \text{ at } P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ and } P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$$

Параметр Райса ( $\gamma^2$ )	Допустимое превышение С/П ( $h_{\text{доп}}^2 (Z_{\text{доп}})$ ), дБ	Параметр Накагами ( $m$ )	Допустимое превышение С/П ( $h_{\text{доп}}^2 (Z_{\text{доп}})$ ), дБ	$\Delta Z_{\text{доп}}$
$P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$				
0	331 (25.2)	1	331 (25.2)	0
2.2	126 (21)	1.9	53 (17.2)	3.8
10	17.8 (12.5)	5.8	16.2 (12.1)	0.4
$P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$				
0	3311 (35.2)	1	3311 (35.2)	0
2.2	1212 (30.8)	1.9	189 (22.8)	8
10	39 (15.9)	5.8	29.5 (14.7)	1.2



делений Райса и Накагами при  $\sigma_\varphi = 0.6$  (когда  $\gamma^2 = 2.2$  и  $m = 1.9$ ), возрастает до  $\Delta Z_{\text{доп}} = 8$  дБ.

В дальнейшем при оценках допустимых отношений С/П ( $Z_{\text{доп}}$ ) и надежности связи ( $D_{\text{св}}$ ) в КВ-радиолинии будем считать, что допустимая вероятность ошибки составляет  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Отметим, что аналитическое выражение для определения допустимого превышения С/П  $Z_{\text{доп}} = 10 \lg h_{\text{доп}}^2$  известно только для случая замираний Накагами. Оно определяется на основе зависимости (6)  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  при  $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош. доп}}$  в виде [1–3]

$$Z_{\text{доп}} = 10 \lg \left[ 2m(2P_{\text{ош. доп}})^{-1/m} - 1 \right]. \quad (16)$$

При райсовском распределении замираний на основе более сложной формулы (13) для  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  невозможно получить точное аналитическое выражение для определения зависимости  $Z_{\text{доп}} = 10 \lg h_{\text{доп}}^2$  от  $P_{\text{ош. доп}}$  и параметра  $\gamma^2$ . Однако  $Z_{\text{доп}}$  можно приближенно определить из (13)  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  с помощью численных методов, встроенных в пакет прикладных программ MatLab [17].

На рис. 4 приведены графики зависимости

$Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош. доп}})$ , полученные при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  с помощью численных методов (кривая 1), и зависимости  $Z_{\text{доп}}(m, P_{\text{ош. доп}})$ , полученные (кривая 2) с помощью (16), при различных значениях параметров Райса и Накагами.

Анализ графиков (рис. 4) показывает, что в случае рэлеевских замираний, когда  $\gamma^2 = 0$ ,  $m = 1$ , значения допустимого превышения С/П будут примерно одинаковы  $Z_{\text{доп}} \approx 35$  дБ, а по мере увеличения параметров Райса и Накагами значения  $Z_{\text{доп}}$  будут сначала расходиться, а при  $\gamma^2 \rightarrow \infty$ ,  $m \rightarrow \infty$  – снова сближаться.

При параметре Райса  $\gamma^2 = 2.2$  допустимое отношение С/П будет равно  $Z_{\text{доп}} \approx 30.8$  дБ, а при соответствующем значении параметра Накагами  $m = 1.9$  допустимое отношение С/П будет равно  $Z_{\text{доп}} \approx 22.8$  дБ. Следовательно, значение допустимого отношения С/П, полученное при распределении Райса, будет выше, чем при распределении Накагами на  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 30.8 - 22.8 = 8$  дБ (что соответствует данным табл. 3).

При параметре Райса  $\gamma^2 = 10$  допустимое отношение С/П будет равно  $Z_{\text{доп}} \approx 15.9$  дБ, а при соответствующем значении параметра Накагами  $m = 5.8$  допустимое отношение С/П

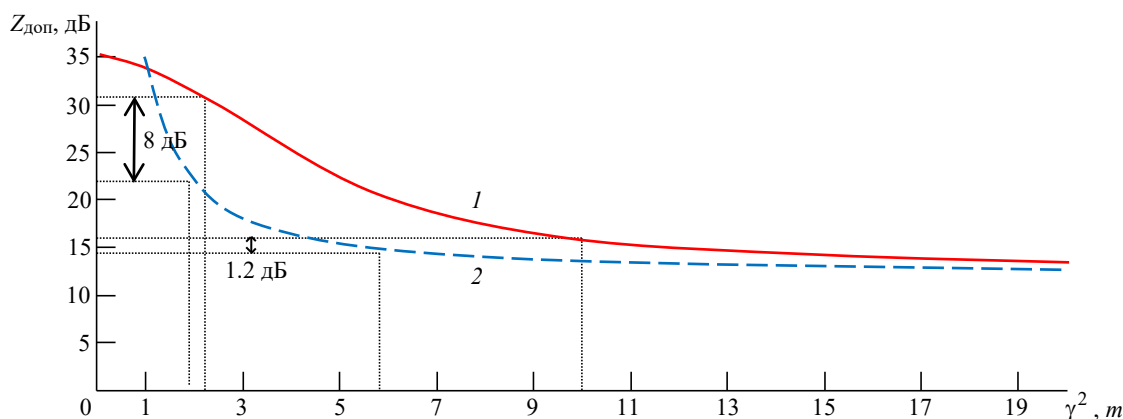


Рис. 4. Зависимости  $Z_{\text{доп}}$  при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  от параметров Райса (1) и Накагами (2)

Fig. 4. The dependence of the permissible excess of signal-to-noise ratio  $Z_{\text{доп}}$  at  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  on the Rician (1) and Nakagami (2) parameter

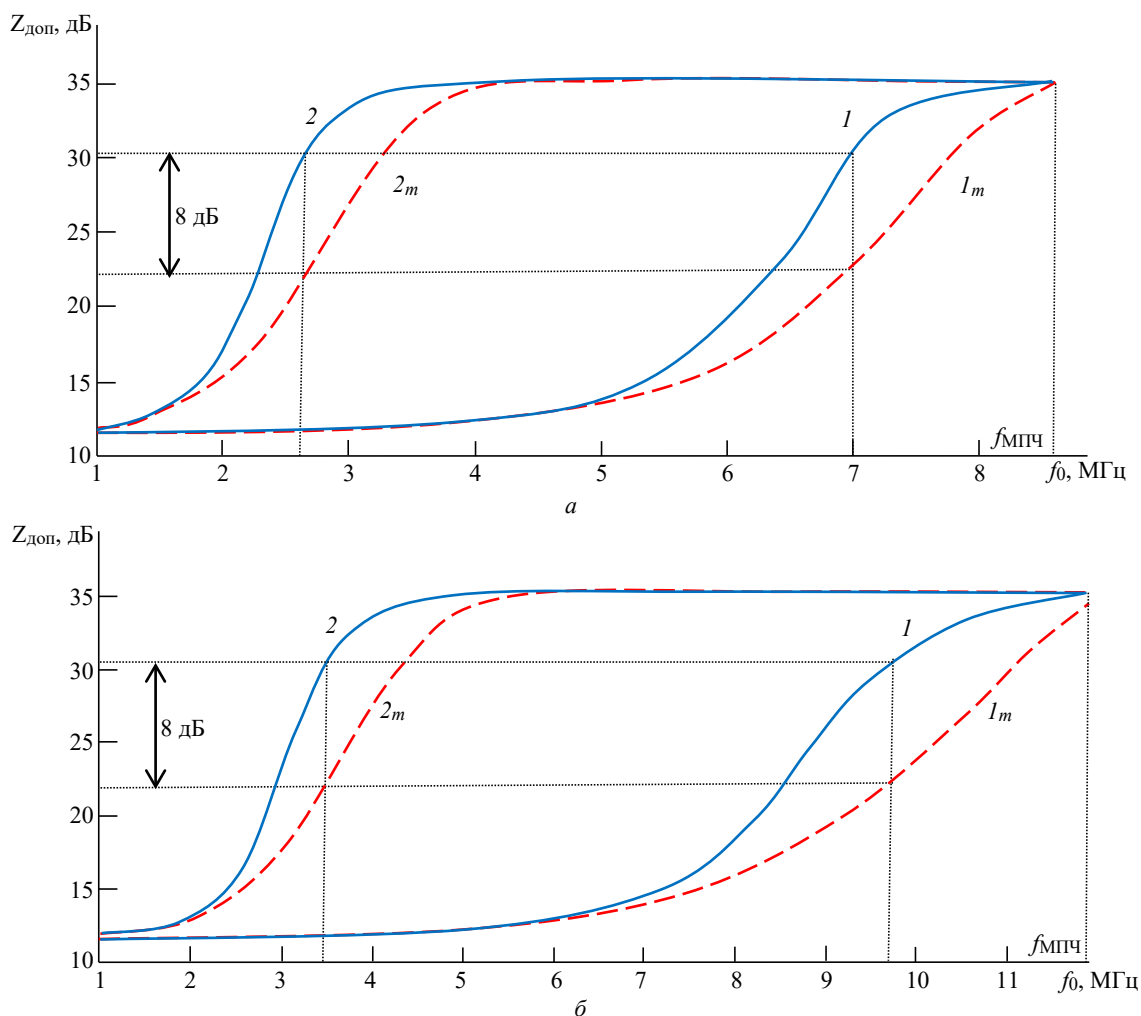


Рис. 5. Зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0)$  при замираниях Райса, обусловленных слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (2) диффузностью, и замираниях Накагами при  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  ( $1_m$ ) и  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  ( $2_m$ ) в разное время суток: а – 00:00; б – 12:00

Fig. 5. Dependences  $Z_{\text{доп}}(f_0)$  at different times of the day under Rician fading due to weak  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (1) and strong  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (2) diffusivity, and Nakagami fading at  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  ( $1_m$ ) and  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  ( $2_m$ ): а – 00:00; б – 12:00

$Z_{\text{доп}} \approx 14.7$  дБ. При этом значение допустимого отношения С/П при распределении Райса будет выше, чем при распределении Накагами на  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 15.9 - 14.7 = 1.2$  дБ (что соответствует данным табл. 3).

На основе приведенных на рис. 4, 2 и 1 зависимостей  $Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош. доп}})$ ,  $\gamma^2(\sigma_{\text{ф}})$  и  $\sigma_{\text{ф}}(f_0, \beta_{\text{и}})$  на рис. 5 сплошными линиями представлены графики зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0)$  при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  от выбора рабочей частоты в одноручевой КВ-радиолинии с райсовскими за-

мираниями в разное время суток (а – 00:00 и б – 12:00) при различной диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2).

На этом же рис. 5 штриховыми линиями представлены графики зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0)$  при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$ , построенные на основе зависимости (рис. 4)  $Z_{\text{доп}}(m, P_{\text{ош. доп}})$  и частотной зависимости (11), (12) параметра Накагами  $m(f_0, \beta_{\text{и}})$  для разного времени суток (а – 00:00 и б – 12:00) и при различной диффузно-

сти ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая  $I_m$ ) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая  $2_m$ ).

Анализ графиков (рис. 5) показывает, что значение  $Z_{\text{доп}}$ , полученное по распределениям Райса и Накагами при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в ночное и дневное время, будет изменяться в интервале от 12 до 35 дБ. Наибольшая разница между значениями  $Z_{\text{доп}}$ , полученными по распределениям Райса и Накагами в ночное время (рис. 5, а) при нормальной ионосфере со слабой диффузностью  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1 и кривая  $I_m$ ), наблюдается на рабочей частоте  $f_0 \approx 7$  МГц (которая близка к  $f_{\text{МПЧ}} \approx 8.6$  МГц и составляет  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}}$ ). Разница между указанными значениями составляет  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 8$  дБ и определяется следующим образом.

Согласно рис. 1, а ночью при слабой диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и выборе рабочей частоты  $f_0 \approx 7$  МГц обеспечивается СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы  $\sigma_{\text{ф}} \approx 0.6$  рад. При таком значении  $\sigma_{\text{ф}}$  согласно рис. 2 параметры замираний Райса и Накагами принимают значения  $\gamma^2 \approx 2.2$  и  $m \approx 1.9$ . При указанных параметрах замираний согласно рис. 4 допустимые превышения С/П для обеспечения допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в КВ-радиолинии составляют  $Z_{\text{доп}} \approx 30.8$  дБ при замираниях Райса и  $Z_{\text{доп}} \approx 22.8$  дБ при замираниях Накагами, а их разница составляет  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 30.8 - 22.8 = 8$  дБ.

Такая же наибольшая разница  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 8$  дБ наблюдается при возмущенной ионосфере с сильной диффузностью  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ . В соответствии с рис. 1, а ночью при увеличении уровня диффузности до  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2) для обеспечения СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы  $\sigma_{\text{ф}} \approx 0.6$  рад согласно зависимости (11)  $\sigma_{\text{ф}} \sim f_0 \beta_{\text{и}}$  необходимо выбрать более низкое значение рабочей частоты  $f_0 \approx 2.6$  МГц (т. е.

$f_0 \approx 0.3 f_{\text{м}}$  относительно  $f_{\text{МПЧ}} \approx 8.6$  МГц). При таком значении  $\sigma_{\text{ф}}$  согласно рис. 2 параметры замираний Райса и Накагами принимают значения  $\gamma^2 \approx 2.2$  и  $m \approx 1.9$ . При указанных параметрах замираний согласно рис. 4 допустимые превышения С/П для обеспечения допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в КВ-радиолинии составляют  $Z_{\text{доп}} \approx 30.8$  дБ при замираниях Райса и  $Z_{\text{доп}} \approx 22.8$  дБ при замираниях Накагами.

В дневное время рис. 5, б примерно такая же наибольшая разница  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 8$  дБ сохраняется при слабой диффузности  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  ионосферы (кривая 1 и кривая  $I_m$ ) и выборе рабочей частоты  $f_0 \approx 9.7$  МГц, а при сильной диффузности  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  ионосферы (кривая 2 и кривая  $2_m$ ) – при выборе рабочей частоты  $f_0 \approx 3.4$  МГц. Это обусловлено тем, что на указанных частотах согласно рис. 1, б обеспечивается значение  $\sigma_{\text{ф}} \approx 0.6$  рад.

Следует отметить, что при более низких (традиционных) требованиях к допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$  в КВ-радиолинии анализ аналогичных рис. 5 графиков зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0)$  показывает, что наибольшая разница  $\Delta Z_{\text{доп}}$  между допустимыми превышениями С/П ( $Z_{\text{доп}}$ ), полученными по распределениям Райса и Накагами, будет наблюдаться примерно на тех же рабочих частотах (в дневное время суток на  $f_0 \approx 9$  МГц и 3 МГц, а в ночное время на  $f_0 \approx 7$  МГц и 3.5 МГц). Однако само значение наибольшей разницы между допустимыми превышениями С/П по распределениям Райса и Накагами будет существенно меньше:  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 3.8$  дБ (что соответствует данным табл. 3), чем при повышенных требованиях к допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$ , когда  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 8$  дБ.

Таким образом, на основе полученных на первом этапе методики зависимостей  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$ ,  $m(f_0, \beta_{\text{и}})$  и известных зависи-

мостей  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  и  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  (см. рис. 3) установлены искомые (2), (3) зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  допустимого отношения С/П на входе ПРМ от рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности  $\beta_{\text{и}}$  ионосферы при замираниях Райса и Накагами в различное время суток, приведенные на рис. 5.

**Оценка зависимости надежности связи от выбора рабочей частоты и диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами.** Очевидно, что увеличение допустимого превышения С/П  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$  на величину  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 8$  дБ по сравнению с замираниями Накагами  $m(f_0, \beta_{\text{и}})$  может существенно повлиять на уменьшение разности  $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$ , определяющей надежность связи  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})/\sigma_Z]$  (1), (4), (5). Для решения этой задачи необходимо знать зависимость среднего отношения С/П от выбора рабочей частоты  $\bar{Z}(f_0)$ . На рис. 6 представлены известные [1] графики  $\bar{Z}(f_0)$  для разного времени суток (00:00; 12:00).

На основе зависимостей  $\bar{Z}(f_0)$  (рис. 6) и  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  (рис. 5) на рис. 7 представлены графики зависимости надежности связи  $D_{\text{св}}(f_0)$  в однолучевой КВ-радиолинии от выбора рабочей частоты, построенные согласно (1), (4), (5):  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F\left\{\left[\bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})\right]/\sigma_Z\right\}$  при  $\sigma_Z = 14$  дБ для разного времени суток ( $a - 00:00$ ;  $b - 12:00$ ).

На рис. 7 сплошными линиями представлены графики зависимости надежности связи  $D_{\text{св}}(f_0)$  при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в однолучевой

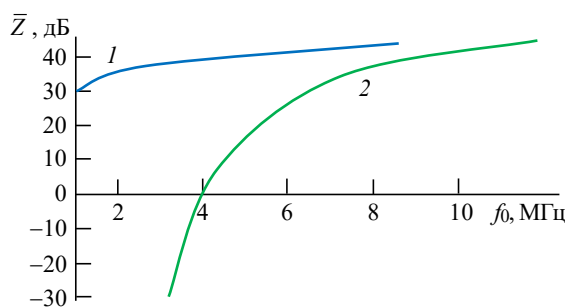


Рис. 6. Зависимость  $\bar{Z}(f_0)$  среднего отношения сигнал/помеха от выбора рабочей частоты  $\bar{Z}(f_0)$  в разное время суток: 1 – 00:00; 2 – 12:00

Fig. 6. Dependence  $\bar{Z}(f_0)$  of the average signal-to-noise ratio on the selected operating frequency  $f_0$  at different times of the day: 1 – 00:00; 2 – 12:00

КВ-радиолинии с райсовскими замираниями в разное время суток ( $a - 00:00$ ;  $b - 12:00$ ) от выбора рабочей частоты  $f_0$  при различном уровне диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая 2).

На рис. 7 штриховыми линиями представлены графики зависимости надежности связи  $D_{\text{св}}(f_0)$  при  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Накагами от выбора рабочей частоты при различном уровне диффузности ионосферы: слабой  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая  $1_m$ ) и сильной  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (кривая  $2_m$ ).

Согласно рис. 1,  $a$  ночью при слабой диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (кривая 1) и выборе рабочей частоты  $f_0 \approx 7$  МГц обеспечивается СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы  $\sigma_{\varphi} \approx 0.6$  рад. При таком значении  $\sigma_{\varphi}$  согласно рис. 2 параметры замирания Райса и Накагами принимают значения  $\gamma^2 \approx 2.2$  и  $m \approx 1.9$ . При указанных параметрах замирания согласно рис. 4 допустимые превышения С/П для обеспечения допустимой вероятности ошибки  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в КВ-радиолинии составляют  $Z_{\text{доп}} \approx 30.8$  дБ при замираниях Райса и  $Z_{\text{доп}} \approx 22.8$  дБ при замираниях Накагами, а их разница составляет  $\Delta Z_{\text{доп}} \approx 30.8 - 22.8 = 8$  дБ.

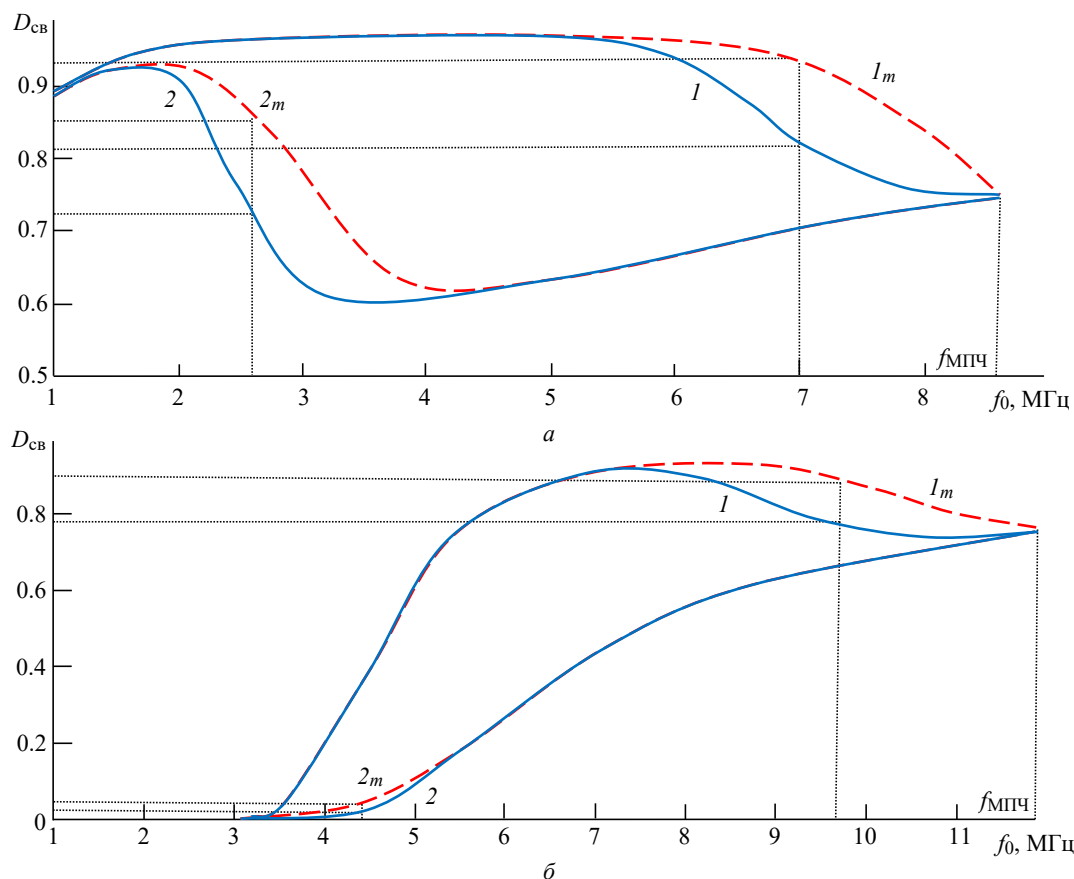


Рис. 7. Зависимости  $D_{св}(f_0)$  при замираниях Райса, обусловленных слабой  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$  (1) и сильной  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$  (2) диффузностью, и замираниях Накагами при  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$  ( $I_m$ ) и  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$  ( $2_m$ ) в разное время суток: а – 00:00; б – 12:00

Fig. 7. Dependencies  $D_{св}(f_0)$  at different times of the day under Rician fading due to weak  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$  (1) and strong  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$  (2) diffusivity, and Nakagami fading at  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$  ( $I_m$ ) and  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$  ( $2_m$ ): а – 00:00; б – 12:00

Анализ рис. 7, а показывает, что ночью при слабой диффузности ионосферы  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$  надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Накагами (кривая  $I_m$ ) может быть существенно завышена по сравнению с замираниями Райса (кривая 1). При этом разница между значениями надежности связи, полученными с помощью распределений Райса и Накагами, зависит от выбора рабочей частоты  $f_0$  и практически отсутствует на МПЧ ( $f_0 \approx f_{МПЧ} = 8.6$  МГц) и при  $f_0 < 0.6f_{МПЧ} \approx 5$  МГц. Максимальная разница между значениями надежности связи, полученными с помощью распределений Райса и Накагами в ночное время при нормальной ионосфере  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$ , достигается на рабо-

чей частоте  $f_0 \approx 0.8f_{МПЧ} = 7$  МГц, где  $D_{св} \approx 0.94$  при замираниях Накагами,  $D_{св} \approx 0.82$  при замираниях Райса, а их разность достигает  $\Delta D_{св} \approx 0.94 - 0.82 \approx 0.12$  (т. е. 12 %).

Иные закономерности наблюдаются ночью при сильной диффузности ионосферы  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$  (рис. 7, а, кривые 2 и  $2_m$ ). Надежность КВ-связи на обычной (оптимальной) рабочей частоте  $f_0 \approx 0.8f_{МПЧ} \approx 7$  МГц снижается до  $D_{св} \approx 0.7$ . Однако она может быть повышена до значений  $D_{св} > 0.7$  при выборе частоты существенно меньше МПЧ:  $f_0 < 0.3f_{МПЧ} \approx 2.7$  МГц. Разница между значениями надежности КВ-связи, полученными с помощью рас-

пределений Накагами (кривая  $2_m$ ) и Райса (кривая 2), практически отсутствует на частотах  $f_0 > 0.5f_{\text{МПЧ}} \approx 4.5$  МГц и достигает максимального значения  $\Delta D_{\text{св}} \approx 0.85 - 0.73 \approx 0.12$  (т. е. 12 %) на рабочей частоте  $f_0 \approx 0.3f_{\text{МПЧ}} = 2.6$  МГц, где  $D_{\text{св}} \approx 0.85$  при замираниях Накагами и  $D_{\text{св}} \approx 0.73$  при замираниях Райса.

Такая закономерность объясняется тем, что согласно (3) надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии определяется разностью среднего отношения  $C/\Pi$   $\bar{Z}(f_0)$  на входе приемника и его допустимого значения  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$ :  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \sim [\bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})]$ . При этом согласно рис. 6 (кривая 1) ночью среднее отношение  $C/\Pi$  в диапазоне  $f_0 = 2 \dots 8.6$  МГц слабо зависит от частоты  $\bar{Z}(f_0) \approx \bar{Z}$ . Зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  согласно (рис. 5, а) при сильной диффузности ионосферы ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ ) и замираниях Райса (кривая 2) и Накагами (кривая  $2_m$ ) имеют наибольшее различие (8 дБ) на частоте  $f_0 = 2.6$  МГц. Поэтому надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии ночью определяется частотной зависимостью допустимого отношения  $C/\Pi$ :  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \sim [\bar{Z} - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})]$  и будет иметь максимальное различие  $\Delta D_{\text{св}} \approx 0.85 - 0.73 \approx 0.12$  (т. е. 12 %) при замираниях Накагами и Райса на рабочей частоте  $f_0 \approx 0.3f_{\text{М}} = 2.6$  МГц.

Анализ рис. 7, б показывает, что днем при слабой диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Накагами (кривая  $1_m$ ) может быть существенно завышена по сравнению с замираниями Райса (кривая 1). При этом разница между значениями надежности связи, полученными с помощью распределений Райса и Накагами, зависит от выбора рабочей частоты  $f_0$  и практически отсутствует на МПЧ ( $f_0 \approx f_{\text{МПЧ}} = 11.9$  МГц) и при  $f_0 < 0.6f_{\text{МПЧ}} \approx 7$  МГц. Максимальная разница

между значениями надежности связи, полученными с помощью распределений Райса и Накагами в дневное время при нормальной ионосфере  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ , достигается на рабочей частоте  $f_0 \approx 0.8f_{\text{МПЧ}} \approx 9.7$  МГц, где  $D_{\text{св}} \approx 0.9$  при замираниях Накагами,  $D_{\text{св}} \approx 0.78$  при замираниях Райса, а их разность достигает  $\Delta D_{\text{св}} \approx 0.9 - 0.78 \approx 0.12$  (т. е. 12 %).

При сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  днем разница между значениями надежности КВ-связи, полученными с помощью распределений Накагами (кривая  $2_m$ ) и Райса (кривая 2), практически отсутствует на частотах  $f_0 > 0.46f_{\text{МПЧ}} \approx 5.5$  МГц и достигает максимального значения  $\Delta D_{\text{св}} \approx 0.04 - 0.02 \approx 0.02$  (т. е. 2 %) на рабочей частоте  $f_0 \approx 0.37f_{\text{МПЧ}} = 4.4$  МГц, где  $D_{\text{св}} \approx 0.04$  при замираниях Накагами и  $D_{\text{св}} \approx 0.02$  при замираниях Райса. Низкие значения надежности КВ-связи днем при сильной диффузности ионосферы объясняются тем, что согласно рис. 6 днем (кривая 2) среднее отношение  $C/\Pi$   $\bar{Z}(f_0)$  очень сильно зависит от частоты и в диапазоне  $f_0 = 3 \dots 5.5$  МГц возрастает с  $-40$  до  $22.5$  дБ. Зависимости  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  согласно рис. 5, б при сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  и замираниях Райса (кривая 2) и Накагами (кривая  $2_m$ ) в диапазоне частот  $f_0 = 3 \dots 5.5$  МГц возрастают с  $Z_{\text{доп}} \approx 18 \dots 23$  дБ до  $Z_{\text{доп}} \approx 35$  дБ. Поэтому разность  $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  среднего отношения  $C/\Pi$  на входе приемника и его допустимого значения на рабочих частотах  $f_0 < 0.46f_{\text{МПЧ}} \approx 5.5$  МГц будет очень мала  $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) < -12$  дБ, и надежность связи (1), (3) в однолучевой КВ-радиолинии днем при сильной диффузности (рис. 7, б) не превышает  $D_{\text{св}} = F\{[\Delta Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}})]/\sigma_Z\} < 0.2$ .

Таким образом, на основе полученных на втором этапе методики зависимостей  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  получены искомые (4), (5) зависимости надежности связи в КВ-радиолинии

$$D_{\text{св}} = F \left\{ \left[ \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}}) \right] / \sigma_Z \right\}$$

от выбора рабочей частоты ( $f_0$ ) и уровня диффузности ( $\beta_{\text{и}}$ ) ионосферы при замираниях Райса и Накагами в разное время суток (см. рис. 7).

**Заключение.** Разработана 3-этапная методика оценки надежности связи в однолучевой КВ-радиолинии с райсовскими замираниями и выполнено сравнение ее результатов с надежностью связи при замираниях Накагами.

На 1-м этапе проведен сравнительный анализ зависимости параметров замираний с распределением Райса и Накагами от рабочей частоты  $f_0$  и уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$ . Искомые зависимости параметров Райса  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$  и Накагами  $m(f_0, \beta_{\text{и}})$  от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы получены на основе (11), (12), (14) в виде графиков, представленных на рис. 1 и 2:

1. Зависимости СКО флуктуаций фазового фронта отраженной волны на выходе неоднородной ионосферы от выбора рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы  $\sigma_{\varphi}(f_0, \beta_{\text{и}})$ .

2. Зависимости параметров Райса ( $\gamma^2$ ) и Накагами ( $m$ ) от СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы ( $\sigma_{\varphi}$ ).

На 2-м этапе на основе полученных зависимостей  $\gamma^2(f_0, \beta_{\text{и}})$ ,  $m(f_0, \beta_{\text{и}})$  и известных зависимостей (см. рис. 3) вероятности ошибочного приема сигналов от отношения С/П и параметра Райса  $P_{\text{ош}}(h^2, \gamma^2)$  и Накагами  $P_{\text{ош}}(h^2, m)$  установлены зависимости допустимого отношения С/П на входе приемника от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами  $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  в разное время суток (см. рис. 5).

На 3-м этапе с учетом частотной зависимости среднего отношения С/П  $\bar{Z}(f_0)$  на входе приемника (см. рис. 6) получены зависимости надежности связи  $D_{\text{св}} =$

$$= F \left\{ \left[ \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}}) \right] / \sigma_Z \right\} \quad \text{с}$$

допустимой вероятностью ошибки  $P_{\text{ош. доп}} = 3 \cdot 10^{-4}$  в КВ-радиолинии от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами в разное время суток (см. рис. 7).

Анализ полученных зависимостей надежности связи  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}})$  в однолучевой КВ-радиолинии от выбора рабочей частоты и диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами ночью (см. рис. 7, а, кривые 1 и  $I_m$ ) показывает, что при слабой диффузности ионосферы ( $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ ) надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Накагами может быть существенно завышена по сравнению с замираниями Райса. На рабочей частоте  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}} = 7$  МГц наблюдается максимальная разница между значениями надежности связи, полученными с помощью распределений Райса ( $D_{\text{св}} \approx 0.82$ ) и Накагами ( $D_{\text{св}} \approx 0.94$ ), где она достигает  $\Delta D_{\text{св}} \approx 12\%$ .

Ночью при сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  (см. рис. 7, а, кривые 2 и  $2_m$ ) надежность КВ-связи на обычной (оптимальной) рабочей частоте  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}} \approx 7$  МГц снижается до  $D_{\text{св}} \approx 0.7$ . Однако она может быть повышена до значений  $D_{\text{св}} > 0.7$  при выборе частоты существенно меньше МПЧ:  $f_0 < 0.3 f_{\text{МПЧ}} \approx 2.7$  МГц. Разница между значениями надежности КВ-связи, полученными с помощью распределений Накагами и Райса, практически отсутствует на частотах  $f_0 > 0.5 f_{\text{МПЧ}} \approx 4.5$  МГц и достигает максимального значения  $\Delta D_{\text{св}} \approx 0.85 - 0.73 \approx 0.12$  (т. е. 12 %) на рабочей частоте  $f_0 \approx 0.3 f_{\text{МПЧ}} = 2.6$  МГц.

В дневное время при слабой диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$  (см. рис. 7, б, кривые 1 и  $I_m$ ) надежность связи в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Накагами может быть существенно завышена по сравнению с замираниями Райса. На рабочей частоте  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}} \approx 9.7$  МГц значения надежности



связи при замираниях Накагами ( $D_{\text{св}} \approx 0.9$ ) и Райса ( $D_{\text{св}} \approx 0.78$ ) будут немного ниже, чем ночью, но их разность остается неизменной  $\Delta D_{\text{св}} \approx 0.9 - 0.78 \approx 0.12$  (т. е. 12 %).

При сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  днем (см. рис. 7, б, кривые 2 и  $2_m$ ) на рабочей частоте  $f_0 \approx 0.8 f_{\text{МПЧ}} \approx 9.7$  МГц надежность связи ( $D_{\text{св}} \approx 0.66$ ) существенно ниже, чем в условиях слабой диффузности (см. рис. 7, б, кривые 1 и  $1_m$ ) при любом типе замираний. Понижение рабочей частоты сопровождается (см. рис. 6, кривая 2) значительным (на десятки децибелов) уменьшением среднего отношения С/П  $\bar{Z}(f_0)$  из-за ионосферного поглощения волны в однолучевой КВ-радиолинии, что является основной причиной уменьшения надежности связи на ча-

стотах  $f_0 < 0.46 f_{\text{МПЧ}} \approx 5.5$  МГц до значений  $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) < 0.2$ .

Практическая ценность результатов анализа приведенных на рис. 7 графиков зависимости надежности связи в однолучевой КВ-радиолинии с замираниями Райса  $D_{\text{св}}(f_0, \gamma^2, P_{\text{ош. доп}}) = D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  и Накагами  $D_{\text{св}}(f_0, m, P_{\text{ош. доп}}) = D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош. доп}})$  от рабочей частоты относительно МПЧ при различных уровнях диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  и требованиях к помехоустойчивости  $P_{\text{ош. доп}}$  позволяет осуществить выбор отношения рабочей частоты к МПЧ ( $f_0/f_{\text{МПЧ}}$ ), при котором расчет надежности КВ-связи в условиях райсовских замираний можно осуществить упрощенным (аналитическим) способом с определенной погрешностью  $\Delta D_{\text{св}}$ .

#### Авторский вклад

**Пашинцев Владимир Петрович** – общее руководство, разработка методики, анализ результатов.

**Белоконь Дмитрий Александрович** – проведение расчетов, компьютерное моделирование, сравнительный анализ зависимости параметров Райса и Накагами от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы.

**Коваль Станислав Андреевич** – определение зависимости допустимого отношения сигнал/помеха от рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами, анализ результатов.

**Скорик Александр Дмитриевич** – оценка зависимости надежности связи от выбора рабочей частоты и диффузности ионосферы при замираниях Райса и Накагами, анализ результатов.

#### Author's contribution

**Pashintsev Vladimir Petrovich**, general management, methodology development, results analysis.

**Belokon Dmitry Aleksandrovich**, calculations, computer modeling, comparative analysis of the dependence of Rice and Nakagami parameters on the operating frequency and the level of ionospheric diffusivity.

**Koval Stanislav Andreevich**, determination of the dependence of the permissible signal-to-noise ratio on the operating frequency and the level of ionospheric diffusivity during Rice and Nakagami fading, analysis of the results.

**Skorik Alexander Dmitrievich**, evaluation of the dependence of the reliability of communication on the choice of the working frequency and the diffusivity of the ionosphere during Rice and Nakagami fading, analysis of the results.

#### Список литературы

1. Зависимость надежности связи в декаметровый радиолинии 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

2. Зависимость вероятности связи в декаметровой радиолинии с диффузной многолучевостью от выбора рабочей частоты / В. П. Пашинцев, Д. П. Киселев, А. Д. Скорик, М. А. Сенокосов // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф.

Т. 2. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. С. 227–238.

3. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные помехи и надежность КВ связи. М.: Связь, 1977. 136 с.

4. Кирилов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Сов. радио, 1971. 256 с.

5. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Связь, 1969. 376 с.

6. Черенкова Л. Е., Чернышов О. В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

7. Фабрицио Джузеппе А. Высокочастотный горизонтный радар: основополагающие принципы, об-

работка сигналов и практическое применение / пер. с англ. Н. Л. Бирюкова, Е. Б. Махиянова, К. В. Юдинцева. М.: Техносфера, 2018. 936 с.

8. Чернов Ю. А. Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. М.: Техносфера, 2018. 688 с.

9. Березовский В. А., Дулькейт И. В., Савицкий О. К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / под ред. В. А. Березовского. М.: Радиотехника, 2011. 444 с.

10. Расчет параметра глубины замираний в однолучевой декаметровой радиолинии / В. П. Пашинцев, С. А. Тишкин, А. И. Иванников, И. И. Боровлев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2001. Т. 44, № 12. С. 57–65.

11. Уточненный метод определения интервала пространственной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолинии / В. П. Пашинцев, С. А. Коваль, Д. А. Потягов, А. Д. Скорик, М. А. Сенокосов // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 2. С. 1–34. doi:10.30898/1684-1719.2021.2.6

12. Pashintsev V. P., Koval S. A., Chipiga A. F., Skorik A. D. Analytical method for determining the interval of spatial correlation of fading in a single-beam

decimeter radio line // Telecommunications and Radio Engineering. 2021. Vol. 80, № 2. P. 89–104.

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

14. Ааронс Дж. Глобальная морфология ионосферных мерцаний // ТИИЭР. 1982. Т. 70, № 4. С. 45–66.

15. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems / V. P. Pashintsev, M. V. Peskov, I. A. Kalmykov, A. P. Zhuk, V. E. Toiskin // AD ALTA-J. of interdisciplinary research. 2020. Vol. 10, № 1. P. 367–375.

16. Давыдов А. Е., Давыдов Б. М., Виноградов В. М. Повышение скорости и достоверности передачи информации в распределенных автоматизированных системах, использующих каналы пониженного качества // Вопр. радиоэлектроники. 2012. Т. 3, № 3. С. 69–84.

17. Чернусь П. П., Чернусь Петр П. Численные методы и их применение в MatLab. СПб.: Изд-во БГТУ, 2018. 90 с.

### Информация об авторах

**Пашинцев Владимир Петрович** – доктор технических наук (2006), профессор (1998), профессор кафедры "Информационная безопасность автоматизированных систем" Северо-Кавказского федерального университета. Автор более 500 научных работ. Сфера научных интересов – влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем коротковолновой и спутниковой связи и навигации.

Адрес: Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, 355017, Россия  
E-mail: pasintsevp@mail.ru

**Белоконь Дмитрий Александрович** – соискатель ученой степени кандидата технических наук, аспирант кафедры "Информационная безопасность автоматизированных систем" Северо-Кавказского федерального университета. Автор 22 научных работ. Область научных интересов – повышение надежности декаметровой связи в условиях диффузной многолучевости.

Адрес: Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, 355017, Россия  
E-mail: ahoi8@yandex.ru

**Коваль Станислав Андреевич** – кандидат технических наук (2010), докторант Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 170 научных работ. Сфера научных интересов – мониторинг параметров ионосферы в интересах декаметровой связи.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия  
E-mail: \_bober\_@mail.ru

**Скорик Александр Дмитриевич** – соискатель ученой степени кандидата технических наук, зам. технического директора Российского института мощного радиостроения. Автор 26 научных работ. Сфера научных интересов – влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем декаметровой связи.

Адрес: Российский институт мощного радиостроения, 11-я линия В. О., д. 66, Санкт-Петербург, 199178, Россия  
E-mail: alexander\_skorik@mail.ru

### References

1. Pashintsev V. P., Skorik A. D., Koval S. A., Kiselev D. P., Senokosov M. A. Decimeter Radio Line Communication Reliability Dependence of the Operating Frequency Choice Taking into Account the Signal-Noise Situation and Ionosphere Diffuseness. Control Systems, Communications and Security. 2019, no. 4, pp. 300–322. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10412 (In Russ.)

2. Pashintsev V. P., Kiselev D. P., Skorik A. D., Senokosov M. A. Dependence of the Probability of Communication in a Decimeter Radio Line with Diffuse Multipath on the Choice of the Operating Frequency. Radar, navigation, communication: Proc. of the XXV Intern. Scientific and Technical Conf. Vol. 2. Voronezh, Publishing House of VSU, 2019, pp. 227–238. (In Russ.)

3. Komarov V. F., Sosunov V. N. *Sluchainye pomekhi i nadezhnost' KV svyazi* [Random Interference and Reliability of KV Communications]. Moscow, *Svyaz*, 1977, 136 p. (In Russ.)

4. Kirilov N. E. *Pomekhoustoichivaya peredacha soobshchenii po lineinym kanalom so sluchaino izmenyayushchimisya parametrami* [Noise-Resistant Transmission of Messages via Linear Channels with Randomly Changing Parameters]. Moscow, *Sovetskoye radio*, 1971, 256 p. (In Russ.)

5. Klovsky D. D. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po radiokanalom* [Transmission of Discrete Messages over Radio Channels]. Moscow, *Svyaz*, 1969, 376 p. (In Russ.)

6. Cherenkova L. E., Chernyshov O. V. *Rasprostraneniye radiovoln* [Propagation of Radio Waves]. Moscow, *Radio and Communications*, 1984, 272 p. (In Russ.)

7. Fabrizio Giuseppe A. *High Frequency Over-The-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. New York, McGraw-Hill Education, 2013, 922 p.

8. Chernov Yu. A. *Spetsial'nye voprosy rasprostraneniya radiovoln v setyakh svyazi i radioveshchaniya* [Special Issues of Radio Wave Propagation in Communication and Radio Broadcasting Networks]. Moscow, Technosphere, 2018, 688 p. (In Russ.)

9. Berezovsky V. A., Dulkeit I. V., Savitsky O. K. *Sovremennaya dekametrovaya radiosvyaz': oborudovanie, sistemy i komplekсы* [Modern Decameter Radio Communication: Equipment, Systems and Complexes]. Ed. by V. A. Berezovsky. Moscow, Radiotekhnika, 2011, 444 p. (In Russ.)

10. Pashintsev V. P., Tishkin S. A., Ivannikov A. I., Borovlev I. I. Calculation of the Depth Parameter of States in a Single-Beam Decameter Radio Line. *J. of the*

*Russian Universities. Radioelectronics*. 2001, vol. 44, no. 12, pp. 57–65. (In Russ.)

11. Pashintsev V. P., Koval S. A., Potyagov D. A., Skorik A. D., Senokosov M. A. Refined Method for Determining the Spatial Correlation Interval of the Fading in a Single-Beam Decameter Radio Link. *J. of Radio Electronics*, 2021, no. 2, pp. 1–34. doi: 10.30898/1684-1719.2021.2.6 (In Russ.)

12. Pashintsev V. P., Koval S. A., Chipiga A. F., Skorik A. D. Analytical Method for Determining the Interval of Spatial Correlation of Fading in a Single-Beam Decameter Radio Line. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2021, vol. 80, no. 2, pp. 89–104.

13. 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

14. Aarons J. *Global Morphology of Ionospheric Flickers*. *TIHER*, 1982, vol. 70, no. 4, pp. 45–66. (In Russ.)

15. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for Forecasting of Interference Immunity of Low Frequency Satellite Communication Systems. *AD ALTA-J. of Interdisciplinary Research*. 2020, vol. 10, no. 1, pp. 367–375.

16. Davydov A. E., Davydov B. M., Vinogradov V. M. E Improvement of Rate and Reliability of Data Communication in Distributed Automated Systems. *Questions of Radio Electronics*. 2012, vol. 3, no. 3, pp. 69–84. (In Russ.)

17. Chernus P. P., Chernus Peter P. *Chislennyye metody i ikh primeneniye v Matlab: prakticheskoe posobie* [Numerical Methods and Their Application in MatLab: A Practical Guide]. St Petersburg, *BSTU*, 2018, 90 p. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Vladimir P. Pashintsev**, Dr Sci. (Eng.) (2006), Professor (1998), Professor at the Department of Information Security of Automated Systems of North Caucasus Federal University. The author of more than 500 scientific publications. Area of expertise: influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems.

Address: North Caucasus Federal University, 1, Pushkina st., Stavropol 355017, Russia  
E-mail: pasintsevp@mail.ru

**Dmitry A. Belokon**, Doctoral Student, Postgraduate Student at the Department of Information Security of Automated Systems of North Caucasus Federal University. The author of 22 scientific publications. Area of expertise: improving the reliability of decameter communication in conditions of diffuse multipath.

Address: North Caucasus Federal University, 1, Pushkina st., Stavropol 355017, Russia  
E-mail: ahoi8@yandex.ru

**Stanislav A. Koval**, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Doctoral Candidate at Military Communications Academy n. a. the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. The author of 170 scientific publications. Area of expertise: monitoring of ionosphere parameters for decameter radio.

Address: Military Communications Academy n. a. the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia  
E-mail: \_bober\_@mail.ru

**Alexander D. Skorik**, Doctoral Student, Deputy Technical Director of Russian Institute of Powerful Radio Engineering. The author of 26 scientific publications. Area of expertise: influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of HF-communication systems.

Address: Russian Institute of Powerful Radio Engineering, 66, 11 Liniya V. I., St Petersburg 199178, Russia  
E-mail: alexander\_skorik@mail.ru