

Научная статья

УДК 621.396.24

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-37-47



# Оптимальная рабочая частота по критерию максимального интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровый радиолнии

- ✉ Станислав Андреевич Коваль<sup>1</sup>, [\\_bober\\_@mail.ru](mailto:_bober_@mail.ru)
- ✉ Владимир Петрович Пашинцев<sup>2</sup>, [pasintsevp@mail.ru](mailto:pasintsevp@mail.ru)
- ✉ Александр Дмитриевич Скорик<sup>3</sup>, [alexander\\_skorik@mail.ru](mailto:alexander_skorik@mail.ru)
- ✉ Денис Владимирович Сальников<sup>1</sup>, [denis\\_salnikov@mail.ru](mailto:denis_salnikov@mail.ru)
- ✉ Дмитрий Александрович Михайлов<sup>2</sup>, [mixayloff.dimaaylov@yandex.ru](mailto:mixayloff.dimaaylov@yandex.ru)

<sup>1</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Будённого, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация

<sup>3</sup>Российский институт мощного радиостроения, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

**Аннотация:** Разработана аналитическая методика определения зависимости интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровый радиолнии от отношения рабочей частоты к максимально применимой частоте степени диффузности ионосферы (интенсивности мелкомасштабных неоднородностей) и дальности связи (протяженности радиолнии). Эта зависимость получена в виде произведения традиционного интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровый радиолнии на понижающий коэффициент. Обосновано, что по мере увеличения отношения рабочей частоты к максимально применимой величина традиционно определяемого интервала частотной корреляции замираний уменьшается, а понижающего коэффициента – возрастает. Установлены оптимальные значения рабочей частоты (по отношению к максимально применимой частоте) по критерию обеспечения максимальных значений интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровый радиолнии. Показано, что увеличение дальности декаметровый связи приводит к расширению интервалов частотной корреляции замираний, а увеличение уровня диффузности ионосферы приводит к увеличению среднеквадратического отклонения флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы, что оказывает влияние на уменьшение максимального значения интервала частотной корреляции замираний, которое наблюдается при более низком оптимальном значении рабочей частоты в однолучевой декаметровый радиолнии. Полученные результаты позволят провести оценку помехоустойчивости приема сигналов при различных значениях интервалов частотной корреляции, в том числе и при возникновении частотно-селективных замираний.

**Ключевые слова:** декаметровый радиолния, выбор оптимальной рабочей частоты, максимально применимая частота, ионосфера, диффузность, мелкомасштабные неоднородности, флуктуации фазового фронта, замирания, интервал частотной корреляции

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

**Ссылка для цитирования:** Коваль С.А., Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Сальников Д.В., Михайлов Д.А. Оптимальная рабочая частота по критерию максимального интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровый радиолнии // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 37–47. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-37-47

# Optimal Operating Frequency According to the Maximum Interval of Frequency Fade Correlation in a Single-Beam Decametric Radio Link

✉ **Stanislav Koval**<sup>1</sup>, \_bober\_@mail.ru  
**Vladimir Pashintsev**<sup>2</sup>, pasintsevp@mail.ru  
**Alexander Skorik**<sup>3</sup>, alexander\_skorik@mail.ru  
**Denis Salnikov**<sup>1</sup>, denis\_salnikov@mail.ru  
**Dmitry Mikhaylov**<sup>2</sup>, mixayloff.dimaaylov@yandex.ru

<sup>1</sup>Military Academy of Communications,  
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

<sup>2</sup>North Caucasian Federal University,  
Stavropol, 355017, Russian Federation

<sup>3</sup>Russian Institute of Powerful Radio Engineering,  
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

**Abstract:** An analytical method has been developed for determining the dependence of the fading frequency correlation interval in a single-beam decameter radio link on the ratio of the operating frequency to the maximum applicable frequency, the degree of ionospheric diffuseness (the intensity of small-scale irregularities), and the communication range (radio link length). This dependence is obtained as the product of the traditional fading frequency correlation interval in a single-beam decameter radio link by a reduction factor. It is substantiated that as the ratio of the operating frequency to the maximum applicable frequency increases, the value of the traditionally determined fading frequency correlation interval decreases, and the reduction factor increases. The optimal values of the operating frequency (relative to the maximum usable frequency) are established according to the criterion for ensuring the maximum values of the fading frequency correlation interval in a single-beam decameter radio link. It is shown that an increase in the decameter communication range leads to an expansion of the fading frequency correlation intervals, and an increase in the level of ionospheric diffuseness leads to an increase in the root-mean-square deviation of fluctuations of the wave phase front at the ionospheric outlet, which affects the decrease in the maximum value of the fading frequency correlation interval, which observed at a lower optimal value of the operating frequency in a single-beam decameter radio link. The results obtained will allow us to assess the noise immunity of signal reception at different values of frequency correlation intervals, including the occurrence of frequency-selective fading.

**Keywords:** decameter radio link, selection of the optimal operating frequency, the maximum applicable frequency, ionosphere, diffuseness, small-scale inhomogeneities, phase front fluctuations, fading, frequency correlation interval

**Funding:** the work was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 22-21-00768.

**For citation:** Koval S., Pashintsev V., Skorik A., Salnikov D., Mikhaylov D. Optimal Operating Frequency According to the Maximum Interval of Frequency Fade Correlation in a Single-Beam Decametric Radio Link. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(2):37–47. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-37-47

## Введение

Радиолинии декаметрового (ДКМ) диапазона находят широкое применение благодаря их автономности, низкой стоимости передачи в пересчете на 1 Мбайт информации и большой дальности связи [1, 2]. При этом значительный процент времени существуют ДКМ-радиолинии с одним дискретным лучом (модой): 85 % при дальности связи  $R = 3000$  км и 31 % – при  $R = 1500$  км [3, 4].

В однолучевых ДКМ-радиолиниях за счет рассеяния волны на мелкомасштабных (100...1000 м) неоднородностях ионосферы возникает диффузная многолучевость с максимальным относительным временем запаздывания (интервалом многолучевости, рассеяния лучей)  $\Delta\tau_i \approx 50...200$  мкс [5], что существенно меньше относительного времени запаздывания в двухлучевых ДКМ-радиолиниях  $\Delta\tau_i \approx 1...12$  мс [6–11]. Принимаемый сигнал в одно-

лучевых ДКМ-радиолиниях всегда подвержен замираниям [5–11]. Последние будут иметь общий (гладкий, неселективный) характер, если для выбранной ширины спектра  $F_0$  сигнала выполняется условие отсутствия частотно-селективных замираний (ЧЗ)  $F_0 \ll 1/\Delta\tau_i \approx F_k$ , где  $F_k \approx 1/\Delta\tau_i$  – интервал частотной корреляции замираний в радиолинии с диффузной многолучевостью. Длительность  $T_0$  сигнала выбирается так, чтобы выполнялось условие отсутствия межсимвольной интерференции (МСИ)  $T_0 \gg \Delta\tau_i$  принимаемых сигналов.

Помехоустойчивость приема сигналов, подверженных ЧЗ и МСИ, может снижаться на несколько порядков по сравнению с приемом сигналов с общими замираниями [4, 6]. Поэтому на этапе проектирования систем радиосвязи с однолучевыми ДКМ-радиолиниями необходимо знать интервал частотной корреляции замираний, обусловленных диффузной многолучевостью  $F_k \approx 1/\Delta\tau_i$ .

Поскольку согласно [5] в однолучевой ДКМ-радиолинии относительное время запаздывания диффузных лучей составляет  $\Delta\tau_i \approx 50 \dots 200$  мкс, то величина  $F_k \approx 1/\Delta\tau_i = 20 \dots 5$  кГц. Согласно [4] интервал частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии существенно меньше и составляет  $F_k \approx 1/\Delta\tau_i \approx 2 \dots 3$  кГц. Согласно экспериментам [12] при дальности ДКМ-связи  $\approx 3000$  км данный интервал может достигать значений  $F_k \approx 40$  кГц.

Очевидно, что столь значительный разброс ( $F_k \approx 2 \dots 40$  кГц) измеренных значений интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии при ограниченных сведениях об исходных данных экспериментов обуславливает потребность теоретического изучения зависимости величины  $F_k$  от параметров передаваемых ДКМ-сигналов, степени диффузности ионосферы и геометрии радиолинии.

Известно [13], что уровень (степень) диффузности ионосферы можно оценить интенсивностью  $\beta_n$  ее мелкомасштабных неоднородностей, характеризующей относительные флуктуации электронной концентрации. Ее величина составляет  $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-2}$  в нормальной (невозмущенной) ионосфере и может возрасти до  $\beta_n = 10^{-2} \dots 10^{-1}$  и более в условиях возмущений (типа диффузности ионосферы). Согласно [14] интервал частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии связан с интенсивностью мелкомасштабных неоднородностей ионосферы обратно пропорциональной зависимостью:  $F_k \sim (\beta_n)^{-1}$ . На основе экспериментов [10] установлено, что интервал частотной корреляции замираний  $F_k$  существенно зависит от дальности связи  $R$ . Согласно [11] интервал частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии должен зависеть от отношения

$K_0 = f_0/f_m \leq 1$  рабочей частоты  $f_0$  к максимально применимой частоте (МПЧ)  $f_m$ . Однако конкретные зависимости  $F_k = \psi(f_0/f_m)$  в [11] не установлены.

Отсюда следует актуальность получения аналитической зависимости  $F_k = \psi(f_0, \beta_n, R)$  интервала частотной корреляции в однолучевой ДКМ-радиолинии от выбора рабочей частоты ( $f_0$ ), интенсивности ионосферных неоднородностей ( $\beta_n$ ) и заданной дальности связи ( $R$ ).

В [15] был разработан алгоритм определения зависимости  $F_k = \psi(f_0, \beta_n, R)$  интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от выбора рабочей частоты  $f_0$ , который учитывает влияние мелкомасштабных неоднородностей (уровня диффузности  $\beta_n$ ) отражающего слоя ионосферы при заданной дальности связи  $R$ . Недостатком полученной в [15] аналитической зависимости  $F_k = \psi(f_0, \beta_n, R)$  является узкая область ее применимости, которая ограничена условиями проявления диффузности ионосферы, когда величина  $\beta_n \geq 10^{-2}$ , и дает существенно завышенные (на порядок и более) результаты расчета  $F_k$  в условиях нормальной (невозмущенной) ионосферы при отсутствии ( $\beta_n = 10^{-3}$ ) или слабом уровне ( $\beta_n = 10^{-2}$ ) диффузности.

Для устранения этого недостатка в [16] осуществлена разработка метода определения аналитической зависимости  $F_k = \psi(f_0, \beta_n, R)$  интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровая радиолинии от выбора рабочей частоты, интенсивности ионосферных неоднородностей ( $\beta_n$ ) и заданной дальности связи, который позволяет получить достоверные результаты расчета в условиях не только диффузной ( $\beta_n \geq 10^{-2}$ ), но и нормальной ионосферы ( $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ ). Этот результат был достигнут на основе комплексного применения двух моделей распространения ДКМ-волны: 1) многолучевой модели с учетом диффузности ионосферы; 2) радиофизической модели с учетом дифракции волны на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы.

В соответствии с полученным аналитическим выражением для  $F_k = \psi(f_0, \beta_n, R)$  в [16] построены графики зависимости  $F_k = \psi(\beta_n)$  интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от степени диффузности ионосферы ( $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-1}$ ) при выборе различных рабочих частот относительно МПЧ ( $f_{01} = 0,6f_m$  и  $f_{02} = 0,8f_m$ ) и дальности связи ( $R = 600, 2000$  и  $3000$  км). Анализ этих графиков позволил установить следующие закономерности:

– зависимость интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения  $K_0 = f_0/f_m \leq 1$  рабочей частоты к МПЧ неоднозначна и определяется степенью диффузности ионосферы  $\beta_n$ ;

– при нормальной ионосфере ( $\beta_{\text{и}} = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ ) интервал частотной корреляции замираний связан с рабочей частотой прямо пропорциональной зависимостью  $F_{\text{к}} \sim f_0 = 1/K_0 f_m$ , а при сильной диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 10^{-2} \dots 10^{-1}$  – обратно пропорциональной  $F_{\text{к}} \sim 1/f_0 = 1/K_0 f_m$ .

Более детальный анализ полученной в [16] зависимости интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии с дальностью  $R = 2000$  км от отношения  $K_0 = f_0/f_m$  рабочей частоты к МПЧ (при  $f_m = 15,1$  МГц) при средней степени диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  показывает следующее. При выборе рабочей частоты  $f_0 \approx 12,1$  МГц обеспечивается  $F_{\text{к}} \approx 5,3$  МГц, при понижении частоты до  $\approx 9,1$  МГц интервал частотной корреляции расширяется до  $\approx 6,2$  МГц, а при дальнейшем понижении частоты  $\approx 6$  МГц он сужается до  $\approx 5$  МГц.

Отсюда можно сделать вывод, что при уровне диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$  в области отношения рабочей частоты к МПЧ  $K_0 \approx 0,6$  имеет место максимальное значение интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии  $F_{\text{к}} = F_{\text{кmax}} \approx 6,2$  МГц.

Целью статьи является разработка методики определения зависимости интервала частотной корреляции  $F_{\text{к}}$  замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к максимально применимой, степени диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  и дальности связи (протяженности трассы)  $R$  и определения на этой основе оптимальной рабочей частоты (относительно максимально применимой) в однолучевой ДКМ-радиолинии  $f_0 = f_{\text{опт(к)}}$  по критерию обеспечения максимальных значений интервала частотной корреляции замираний при различной степени диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  и дальности связи  $R$ .

Решение этой задачи целесообразно разделить на три этапа.

*Этап 1.* Определение зависимости интервала частотной корреляции  $F_{\text{к}}$  замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к МПЧ при заданной степени диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  и дальности связи  $R$ .

*Этап 2.* Анализ влияния уровня диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$  на изменение зависимости интервала частотной корреляции  $F_{\text{к}}$  замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к МПЧ.

*Этап 3.* Анализ влияния дальности связи  $R$  на изменение зависимости интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к МПЧ при различных уровнях диффузности ионосферы  $\beta_{\text{и}}$ .

## 1. Определение зависимости интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к МПЧ

Для достижения поставленной цели необходимо, в первую очередь, представить полученную в [16] зависимость интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровая радиолинии от выбора рабочей частоты, интенсивности ионосферных неоднородностей ( $\beta_{\text{и}}$ ) и заданной дальности связи в таком виде, который показывает наличие максимального значения  $F_{\text{кmax}}$  при некотором оптимальном значении отношения рабочей частоты к МПЧ.

Выражение для оценки интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии в [16] получено в виде:

$$F_{\text{к}} = \frac{f_0 \sqrt{1 - \ln(1 - \exp(-\sigma_{\phi}^2) + \exp(1 - \sigma_{\phi}^2))}}{\sigma_{\phi} \sqrt{2 + d_1^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\phi}$  – СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ-волны на выходе из ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями, определяемое как:

$$\sigma_{\phi} \approx \frac{f_0 \pi \beta_{\text{и}} (\sqrt{\pi} L_3 l_s)^{0,5}}{c K_s^2 \sec^2 \theta_0}, \quad (2)$$

где  $L_3$  – протяженность эквивалентного однородного пути распространения волны в неоднородной ионосфере;  $l_s$  – характерный (средний) размер неоднородностей;  $c$  – скорость света;  $K_s$  – поправочный коэффициент на сферичность Земли и ионосферы;  $\theta_0$  – угол падения волны на нижнюю границу ионосферы.

Входящий в (1) коэффициент  $d_1^2$  характеризует нарастание дифракционных эффектов во фронте волны внутри ионосферы и за ней до точки приема:

$$d_1^2 = \frac{3L^2 - 3L L_3 + L_3^2}{6(2\pi f_0/c)^2} \cdot 32l_s^{-4}, \quad (3)$$

где  $L = L_3 + L_{\text{св}}$  – сумма  $L_3$  и пути распространения волны в свободном пространстве  $L_{\text{св}}$  от точки выхода из ионосферы до точки приема.

Величина  $L_3$  определяется на основе предварительного расчета группового, реального и фазового путей по достаточно громоздким формулам [15] и зависит от геометрии радиолинии (угла падения волны на нижнюю границу ионосферы  $\theta_0$ ), заданной дальности  $R$  связи и типовых параметров слоя  $F2$  ионосферы: высоты нижней границы  $h_0$ , полутолщины  $z_m$  и критической частоты в точке отражения  $f_{\text{кр}}$ . Существенно упростить расчет  $L_3$  и  $\theta_0$  можно, если пренебречь сферичностью ионосферы (т. е. принять  $K_s \approx 1$ ).

Отметим, что рабочая частота ДКМ-волны выбирается из условий:

$$f_0 = K_0 f_m = K_0 f_{кр} K_s \sec \theta_0 = f_B(h_{от}) K_s \sec \theta_0, \quad (4)$$

где  $f_{кр} = \sqrt{80,8\bar{N}(h_m)}$  – критическая частота ионосферы, определяемая средней электронной концентрацией  $\bar{N}(h)$  на высоте ( $h$ ) с максимальной ионизацией  $h = h_m$ ;  $f_B(h_{от}) = \sqrt{80,8\bar{N}(h_{от})}$  – частота вертикальной волны с высотой отражения  $h = h_{от}$ .

Согласно (4) отношение рабочей частоты к МПЧ не зависит от угла падения  $\theta_0$  волны и коэффициента сферичности  $K_s$  ионосферы:

$$K_0 = f_0 / f_m = f_B(h_{от}) K_s \sec \theta_0 / f_{кр} K_s \sec \theta_0 = f_B(h_{от}) / f_{кр} = (\bar{N}(h_{от}) / \bar{N}(h_m))^{0,5} \leq 1.$$

Поэтому выражение (2) для определения СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ-волны на выходе из ионосферы можно записать в виде явной зависимости от отношения рабочей частоты к МПЧ:

$$\sigma_\phi \approx \frac{f_0 \pi \beta_{и} (\sqrt{\pi} L_3 l_s)^{0,5}}{c K_s^2 \sec^2 \theta_0} = \frac{K_0 f_m \pi \beta_{и} (\sqrt{\pi} L_3 l_s)^{0,5}}{c K_s^2 \sec^2 \theta_0}. \quad (2a)$$

Для решения многих практических задач достаточная точность расчетов обеспечивается, если пренебречь поправкой на сферичность ионосферы и учитывать только сферичность Земли [17]. В этом случае можно считать  $K_s \approx 1$  и формула (4) принимает вид закона секанса:

$$f_0 = K_0 f_m \approx K_0 f_{кр} \sec \theta_0 = f_B(h_{от}) \sec \theta_0, \quad (5)$$

где угол падения волны на плоскую ионосферу с учетом сферичности Земли (с радиусом  $R_3 = 6370$  км) определяется по заданной дальности  $R$  связи и результатам измерений действующей высоты  $h_d(f_B)$  отражения волны с частотой  $f_B$  согласно выражению [4, 18]:

$$\sec \theta_0 = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta_0} \approx \sqrt{1 + \left( \frac{R}{2(h_d(f_B) + R^2/8R_3)} \right)^2}. \quad (6)$$

Действующая высота отражения волны от ионосферы в (6) рассчитывается по известному [18, 19] выражению:

$$h_d(f_B) = h_0 + \frac{z_m f_B}{2 f_{кр}} \ln \frac{1 + (f_B/f_{кр})}{1 - (f_B/f_{кр})} = h_0 + \frac{z_m f_0}{2 f_m} \ln \frac{1 + (f_0/f_m)}{1 - (f_0/f_m)}, \quad (7)$$

где  $z_m = h_m - h_0$  – полутолщина ионосферы.

На основе (5–7) определяется протяженность эквивалентного пути распространения ДКМ-волны в ионосфере согласно выражению [17]:

$$L_3 = (h_d(f_B) - h_0) \left( 1 + \frac{f_{кр}^2}{f_B^2} - \frac{z_m}{h_d(f_B) - h_0} \right) \times \sqrt{\sec^2 \theta_0 - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{f_{кр}^2}{f_B^2} - \frac{z_m}{h_d(f_B) - h_0} \right)}. \quad (8)$$

Длина пути распространения волны в свободном пространстве  $L_{св}$  от точки выхода из ионосферы до точки приема определяется как [15]:

$$L_{св} = \frac{R_3}{\sin \theta_0} \sin \left( \arcsin \left( \sin \theta_0 \left( 1 + \frac{h_0}{R_3} \right) \right) - \theta_0 \right). \quad (9)$$

Заметим, что для практических расчетов рабочей частоты ( $f_0$ ) и МПЧ ( $f_m$ ) с помощью ионограммы (т. е. зависимости  $h_d(f_B)$  действующей высоты отражения волны от ионосферы от частоты вертикально направленной волны  $f_B$ ) закон секанса (5) записывается в виде:

$$f_0(h_d) = K_0 f_m(h_d) = K_0 f_B^* \sec \theta_0^* = f_B(h_d) \sec \theta_0. \quad (10)$$

Согласно методике А.Н. Казанцева [20] максимальное значение рабочей частоты (т. е. МПЧ) достигается при частоте вертикальной волны, которая на 10 % ниже критической  $f_B = f_B^* = 0,9 f_{кр}$ , и аналитически рассчитывается по формуле:

$$f_m(h_d) = (f_B(h_d) \sec \theta_0)_{\max} = f_B^* \sec \theta_0^* = 0,9 f_{кр} \sec \theta_0^*, \quad (11)$$

где угол падения волны с МПЧ на нижнюю границу ионосферы рассчитывается по формуле (6) при  $f_B = f_B^* = 0,9 f_{кр}$  как:

$$\sec \theta_0^* \approx \sqrt{1 + (R/2(h_d(f_B^*) + R^2/8R_3))^2}. \quad (12)$$

Анализ выражений (10–12) показывает, что по заданной дальности связи  $R$  и измеренному или рассчитанному значению  $f_{кр}$  можно определить  $f_B = f_B^* = 0,9 f_{кр}$  и нужный угол падения ДКМ-волны на ионосферу, что позволяет рассчитать МПЧ  $f_m = \psi(R, \theta_0^*)$ . На этой основе можно рассчитать протяженность эквивалентного пути  $L_3$  распространения ДКМ-волны в ионосфере на МПЧ по формуле (8) при  $\sec \theta_0 = \sec \theta_0^*$ . Далее по аналогичной методике для более низких значений вертикально направленной волны  $f_B < f_B^* = 0,9 f_{кр}$  рассчитываются нужные углы падения ДКМ-волны на ионосферу, что позволяет выбрать рабочую частоту  $f_0 = K_0 f_m = f_B(h_d) \sec \theta_0 < f_m$  и рассчитать протяженность эквивалентного пути распространения ДКМ-волны в ионосфере на этой рабочей частоте  $L_3 = \psi(f_0, \theta_0) = \psi(f_0, \theta_0(f_0, R)) = \psi(f_0, R)$ .

Более точная методика расчета протяженности эквивалентного пути распространения ДКМ-волны в ионосфере  $L_3 = \psi(f_0, R)$  с учетом ее сферичности  $K_s < 1$  описана в [15].

Совокупность выражений (1–12) позволяет установить зависимость интервала частотной корреляции от рабочей частоты, параметров неоднородной ионосферы и протяженности трассы.

Если пренебречь поправкой на сферичность ионосферы и учитывать только сферичность Земли, величина  $K_s \approx 1$  и зависимость (2) принимает вид:

$$\sigma_\phi \approx \frac{f_0 \pi \beta_i (\sqrt{\pi} L_s l_s)^{0,5}}{\text{csec}^2 \theta_0} = \frac{K_0 f_m \pi \beta_i (\sqrt{\pi} L_s l_s)^{0,5}}{\text{csec}^2 \theta_0}, \quad (13)$$

где рабочая частота  $f_0 = K_0 f_m$  определяется согласно (5); значение  $\text{csec} \theta_0$  – согласно (6), протяженность эквивалентного пути распространения ДКМ-волны в ионосфере  $L_s$  – согласно (8), а МПЧ  $f_m$  – согласно (11, 12).

Следует отметить, что величина СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ-волны  $\sigma_\phi$  на выходе из ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями полностью определяет параметр райсовских замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии [14]:

$$\gamma^2 = \frac{P_p}{P_{\phi l}} = (\exp(\sigma_\phi^2) - 1)^{-1}, \quad (13)$$

характеризующий отношение мощности регулярной  $P_p$  составляющей принимаемого сигнала к мощности флуктуационной  $P_{\phi l}$  составляющей (т. е. глубину общих замираний).

Кроме того, величина  $\sigma_\phi$ , зависящая, согласно (13), от отношения рабочей частоты к МПЧ, уровня диффузности ионосферы  $\beta_i$  и дальности связи  $R$  через зависимости (16) и (18), в основном определяет интервал частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии, выражение для оценки которого (1) целесообразно записать в следующем виде:

$$F_k = \frac{f_0}{\sigma_\phi \sqrt{2 + d_1^2}} \times \sqrt{1 - \ln(1 - \exp(-\sigma_\phi^2) + \exp(1 - \sigma_\phi^2))} = F_{k0} \cdot \delta F_{k0}, \quad (15)$$

где

$$F_{k0} = f_0 / \sigma_\phi \sqrt{2 + d_1^2} \quad (16)$$

является традиционным [14, 21] выражением для интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии;

и

$$\delta F_{k0} = \sqrt{1 - \ln(1 - \exp(-\sigma_\phi^2) + \exp(1 - \sigma_\phi^2))} \leq 1 \quad (17)$$

является понижающим коэффициентом, величина которого прямо пропорционально зависит от  $\sigma_\phi$

(т. е.  $\delta F_{k0} \sim \sigma_\phi$ ) и находится в интервале  $0 \leq \delta F_{k0} \leq 1$ .

Выражения (15–17) совместно с (13) позволяют установить зависимость интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к МПЧ, интенсивности ионосферных неоднородностей ( $\beta_i$ ) и дальности связи ( $R$ ).

Целесообразность представления известного выражения (1) в виде произведения (15) обусловлена противоположной зависимостью сомножителей от величины  $\sigma_\phi$  согласно (16) и (17). Поэтому по мере увеличения отношения рабочей частоты к МПЧ и пропорционального возрастания  $\sigma_\phi \sim K_0 = f_0 / f_m$  традиционное значение  $F_{k0} \sim 1 / \sigma_\phi$  уменьшается, а понижающий коэффициент  $\delta F_{k0} \sim \sigma_\phi$  – возрастает (от 0 до 1). Отсюда следует, что существует такое оптимальное значение рабочей частоты и ее отношения к МПЧ, при котором произведение (15) достигает максимума.

В качестве примера определения зависимости интервала частотной корреляции замираний от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ при слабом (т. е. нормальном) уровне диффузности ионосферы  $\beta_i = 5 \cdot 10^{-3}$  и дальности связи  $R = 2000$  км в однолучевой ДКМ-радиолинии произведем расчет  $F_k$  для диапазона отношений  $f_b / f_{кр} = 0,2 \dots 0,9$  и  $f_0 / f_m = 0,3 \dots 1$  в соответствии с выражениями для  $h_d$  (7),  $\text{csec} \theta_0$  (6),  $\text{csec} \theta_0^*$  (12),  $f_0$  (10),  $f_m$  (11),  $L_s$  (8),  $\sigma_\phi$  (13),  $\gamma^2$  (14),  $L_{св}$  (9),  $d_1^2$  (3),  $F_{k0}$  (16),  $\delta F_{k0}$  (17),  $F_k$  (15).

Расчет произведен при типовых параметрах слоя F2 ионосферы [17]: высота нижней границы  $h_0 = 250$  км, полутолщина  $z_m = 100$  км, критическая частота в точке отражения  $f_{кр} = 7$  МГц. Характерный (средний) размер мелкомасштабных неоднородностей в расчетах принят равным  $l_s = 200$  м [22, 23]. В таблице 1 приведены параметры траектории, не зависящие от диффузности ионосферы, в таблице 2 – параметры радиоканала, зависящие от нее.

ТАБЛИЦА 1. Параметры траектории при дальности 2000 км  
TABLE 1. Trajectory Parameters at a Range of 2000 km

$f_b / f_{кр}$	$f_0 / f_m$	$f_0$ , МГц	$h_d(f_b)$ , км	$\text{csec} \theta_0$	$L_s$ , км	$L_{св}$ , км	$d_1^2$
0,2	0,3	4,44	254	3,17	16,6	1032	$1,25 \cdot 10^6$
0,3	0,44	6,56	259	3,13	37,6	1005	$5,55 \cdot 10^5$
0,4	0,57	8,57	267	3,06	67,4	968	$3,11 \cdot 10^5$
0,5	0,69	10,4	278	2,98	107	923	$2 \cdot 10^5$
0,6	0,8	12,1	292	2,88	157	872	$1,41 \cdot 10^5$
0,7	0,9	13,5	311	2,76	222	814	$1,08 \cdot 10^5$
0,8	0,96	14,5	338	2,60	308	748	$8,83 \cdot 10^4$
0,9	1	15,0	383	2,39	437	665	$8,03 \cdot 10^4$

По результатам таблицы 2 построены графики (рисунок 1) зависимости понижающего коэффициента (17)  $\delta F_{к0}$  (штрихпунктирная линия) и интервалов частотной корреляции, рассчитанных в соответствии с выражениями (15)  $F_{к}$  (пунктирная линия) и (16)  $F_{к0}$  (сплошная линия) замираний в одноручевой ДКМ-радиолинии протяженностью  $R = 2000$  км от выбора рабочей частоты относительно МПЧ ( $f_0/f_m$ ) при малом уровне диффузности ионосферы ( $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$ ).

ТАБЛИЦА 2. Параметры радиоканала при дальности 2000 км при  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$

TABLE 2. Radio Channel Parameters at a Range of 2000 km at  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$

$f_b/f_{кр}$	$f_0/f_m$	$f_0$ , МГц	$\sigma_{\phi}$ , рад	$\gamma^2$	$F_{к0}$ , кГц	$\delta F_{к0}$	$F_{к}$ , кГц
0,2	0,3	4,44	0,06	281	66,5	0,047	3,15
0,3	0,44	6,56	0,136	53,2	64,6	0,108	6,9
0,4	0,57	8,57	0,249	15,7	61,8	0,197	12,2
0,5	0,69	10,4	0,402	5,7	58,1	0,315	18,3
0,6	0,8	12,1	0,606	2,3	53,2	0,465	24,7
0,7	0,9	13,5	0,878	0,9	46,9	0,644	30,2
0,8	0,96	14,4	1,251	0,51	39,2	0,833	32,6
0,9	1	15,0	1,826	0,04	29,1	0,97	28,2

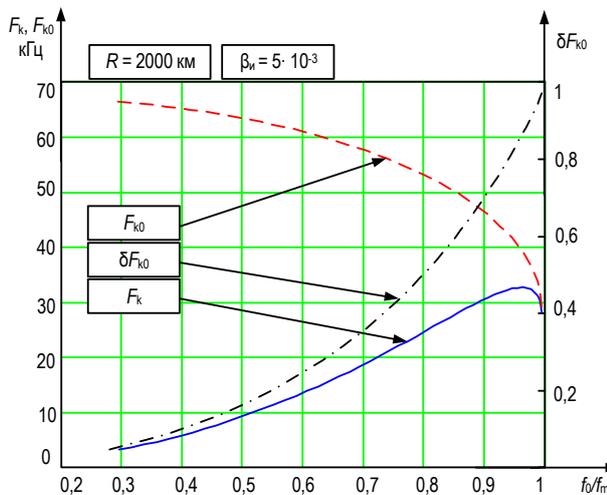


Рис. 1. Зависимость интервала частотной корреляции замираний и понижающего коэффициента от  $f_0/f_m$

Fig. 1. Dependence of the Fade Frequency Correlation Interval and a Reduction Factor from the  $f_0/f_m$

Анализ таблицы 2 и рисунка 1 показывает, что интервал частотной корреляции  $F_{к0}$  в соответствии с традиционным выражением (16) связан обратно пропорциональной зависимостью с величиной СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе из ионосферы (13), зависящей от выбора рабочей частоты  $f_0$  и ее отношения к МПЧ (равной  $f_m = 15$  МГц). Согласно рисунку 1 при увеличении отношения рабочей частоты к МПЧ с  $K_0 = 0,3$  до 1 величина  $F_{к0}$  монотонно понижается с 66,5 до 29,1 кГц, т. е. имеет место обратно пропорциональная зависимость  $F_{к0} = (f_0/f_m)^{-1}$ .

Понижающий коэффициент  $\delta F_{к0}$ , наоборот, связан с  $\sigma_{\phi}$  прямо пропорциональной зависимостью (17). Поэтому по мере увеличения отношения рабочей частоты к МПЧ с величины 0,3 до 1 понижающий коэффициент возрастает с 0,047 до 0,97, т. е. имеет место прямо пропорциональная зависимость. Поскольку истинное значение интервала частотной корреляции (25) определяется как произведение  $F_{к} = F_{к0} \cdot \delta F_{к0}$ , имеет место некоторое максимальное значение  $F_{к} = F_{кmax}$  на рабочей частоте  $f_0 = f_{опт(к)}$ , которую можно назвать оптимальной по критерию обеспечения наибольшего интервала частотной корреляции замираний. Такое максимальное значение составляет  $F_{кmax} \approx 32,6$  кГц и будет наблюдаться на частоте  $f_{опт(к)} \approx 14,4$  МГц вблизи МПЧ ( $f_0/f_m = f_{опт(к)}/f_m = 0,96$ ). При дальнейшем повышении рабочей частоты до МПЧ ( $f_0/f_m = 1$ ) происходит сужение истинного значения интервала частотной корреляции замираний до значения  $F_{к} \approx 28,2$  кГц.

## 2. Анализ влияния уровня диффузности ионосферы

Напомним, что результаты, представленные в таблице 2 и рисунке 1, соответствуют условиям невозмущенной (недиффузной) ионосферы, когда уровень диффузности мал:  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$ . Проанализируем при неизменных параметрах траектории (как в таблице 1) изменения параметров радиоканала и интервала частотной корреляции  $F_{к}$  замираний от отношения  $f_0/f_m$  в условиях возрастания уровня диффузности ионосферы на порядок (т. е. до  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$ ), представленные в таблице 3 и на рисунке 2.

ТАБЛИЦА 3. Параметры радиоканала при дальности 2000 км при  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$

TABLE 3. Radio Channel Parameters at a Range of 2000 km at  $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$

$f_b/f_{кр}$	$f_0/f_m$	$f_0$ , МГц	$\sigma_{\phi}$ , рад	$\gamma^2$	$F_{к0}$ , кГц	$\delta F_{к0}$	$F_{к}$ , кГц
0,2	0,3	4,44	0,596	1,531	6,65	0,458	3,04
0,3	0,44	6,56	1,364	0,429	6,46	0,874	5,64
0,37	0,53	7,95	2,11	0,11	6,28	0,99	6,21
0,4	0,57	8,57	2,486	0,046	6,18	0,998	6,17
0,5	0,69	10,4	4,02	$3 \cdot 10^{-4}$	5,81	1	5,81
0,6	0,8	12,1	6,06	0	5,32	1	5,32
0,7	0,9	13,5	8,776	0	4,69	1	4,69
0,8	0,97	14,5	12,513	0	3,92	1	3,92
0,9	1	15,0	18,257	0	2,91	1	2,91

Сравнительный анализ данных таблиц 3 и 2 показывает, что увеличение уровня диффузности на порядок обуславливает, согласно зависимости (13), при одинаковых рабочих частотах  $f_0$  (и отношениях  $K_0 = f_0/f_m$ ) увеличение на порядок СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ-волны на выходе из

ионосферы. Это вызывает сужение на порядок интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии, рассчитываемого по традиционной формуле (16). Его величина, согласно таблице 3 и рисунку 2, при увеличении отношения рабочей частоты к МПЧ с 0,3 до 1 монотонно понижается с 6,65 до 2,91 кГц.

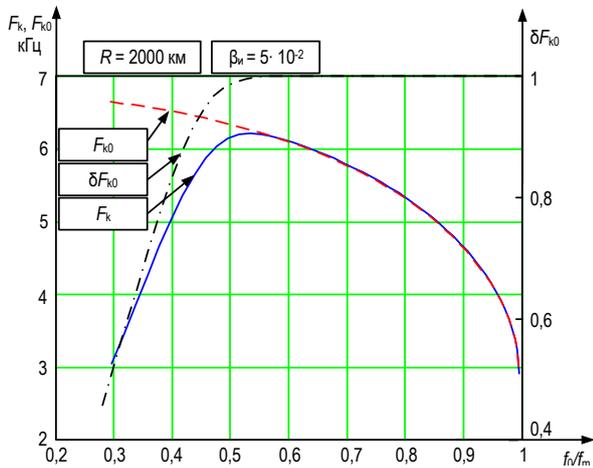


Рис. 2. Зависимость интервала частотной корреляции замираний и понижающего коэффициента от  $f_0/f_m$

Fig. 2. Dependence of the Fade Frequency Correlation Interval and a Reduction Factor from the  $f_0/f_m$

Увеличение на порядок величины  $\sigma_\phi$  за счет увеличения  $\beta_i$  приводит к тому, что понижающий коэффициент  $\delta F_{к0}$  увеличивается с 0,458 до 0,99 при возрастании отношения рабочей частоты к МПЧ с 0,3 до  $\approx 0,53$  (превышение которого обеспечивает  $\delta F_{к0} > 0,99$  и практически не вызывает понижения произведения  $F_k = F_{к0} \cdot \delta F_{к0}$ ). Поэтому истинное значение интервала частотной корреляции замираний (15) достигает максимального значения  $F_{кmax} \approx 6,21$  кГц при  $f_0/f_m \approx 0,53$ , что соответствует (при  $f_m \approx 15$  МГц) оптимальному значению рабочей частоты  $f_0 = f_{опт(к)} \approx 0,53 \cdot 15 \approx 8$  МГц.

При дальнейшем повышении рабочей частоты до МПЧ происходит сужение истинного значения интервала частотной корреляции замираний до значения  $F_k \approx 2,91$  кГц.

Таким образом, сравнительный анализ рисунков 2 и 3 позволяет установить следующую закономерность: по мере повышения уровня диффузности ионосферы ( $\beta_i$ ) будут понижаться максимальное значение интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии ( $F_k = F_{к0} \times \delta F_{к0} = F_{кmax}$ ) и значение оптимальной рабочей частоты по критерию обеспечения наибольшего интервала частотной корреляции замираний.

### 3. Анализ влияния дальности связи

Указанная выше закономерность прослеживается и для дальностей ДКМ-связи другой протяженности (1500 и 3000), отличной от  $R = 2000$  км.

Аналогичные проведенным выше расчеты выполнены для ДКМ-радиолинии с дальностью связи  $R = 1500, 2000$  и  $3000$  км при различных уровнях диффузности ионосферы ( $\beta_i = 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}, 5 \cdot 10^{-2}$ ). Графики зависимостей  $F_k = \psi(f_0/f_m)$  приведены на рисунке 3.

Анализ графиков (см. рисунок 3) показывает наличие оптимальных значений рабочих частот (по критерию обеспечения наибольшего интервала частотной корреляции замираний) для ДКМ-радиолиний с различной дальностью связи. Для этих радиолиний согласно (10–12) рассчитаны следующие значения МПЧ:  $f_{m1} \approx 12,7$  МГц;  $f_{m2} \approx 15$  МГц;  $f_{m3} \approx 18$  МГц. Согласно рисунку 3 дальность ДКМ-связи не оказывает существенного влияния на величину отношения  $f_0/f_m = f_{опт(к)}/f_m$ . Так, например, при  $\beta_i = 5 \cdot 10^{-3}$  (см. рисунок 3b) максимальные значения интервалов частотной корреляции замираний будут наблюдаться при отношении  $f_{опт(к)}/f_m \approx 0,96$ , что соответствует рабочим частотам  $f_{опт(к)} \approx 0,96 f_{m1} \approx 12,2$  МГц при  $R = 1500$  км,  $f_{опт(к)} \approx 0,96 f_{m2} \approx 14,4$  МГц при  $R = 2000$  км и  $f_{опт(к)} \approx 0,96 f_{m3} \approx 17,3$  МГц при  $R = 3000$  км.

При увеличении уровня диффузности (см. рисунки 3с и 3d) оптимальные отношения  $f_{опт(к)}/f_m$  сдвигаются в сторону меньших значений. При  $\beta_i = 5 \cdot 10^{-2}$  (см. рисунок 3d) максимальные значения интервалов частотной корреляции замираний будут иметь место при  $f_{опт(к)}/f_m \approx 0,53$ , что соответствует рабочим частотам  $f_{опт(к)} \approx 0,53 f_{m1} \approx 6,7$  МГц при  $R = 1500$  км,  $f_{опт(к)} \approx 8$  МГц при  $R = 2000$  км и  $f_{опт(к)} \approx 9,5$  МГц при  $R = 3000$  км.

Анализ рисунка 3 показывает, что увеличение дальности ДКМ-связи приводит к расширению интервалов частотной корреляции замираний, что не противоречит известным ранее и полученным экспериментально данным [10]. При этом, наибольшая разница между абсолютными значениями интервалов частотной корреляции наблюдается вблизи оптимальной рабочей частоты  $f_{опт(к)}$  по критерию обеспечения наибольшего интервала частотной корреляции замираний.

### Заключение

Разработана методика определения зависимости интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ-радиолинии от отношения рабочей частоты к максимально применимой (МПЧ), степени диффузности ионосферы и дальности связи. На этой основе установлены оптимальные значения отношения рабочей частоты к МПЧ по критерию обеспечения максимальных значений интервала частотной корреляции замираний при различной диффузности ионосферы и дальности связи.

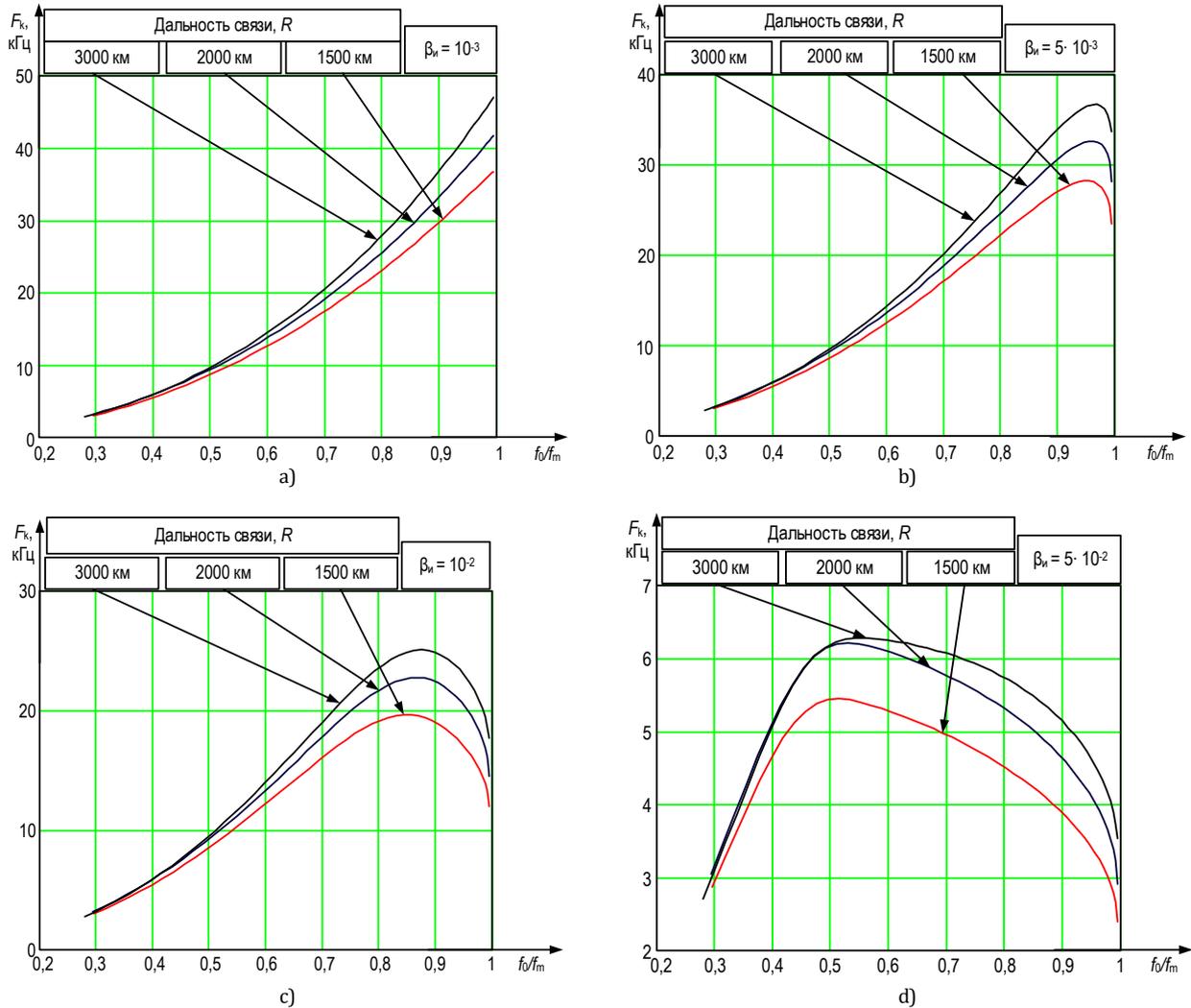


Рис. 3. Зависимость интервалов частотной корреляции замираний при различной дальности связи ( $R = 1500, 2000$  и  $3000$  км) и различных уровнях диффузности: а)  $\beta_n = 10^{-3}$ , б)  $\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$ , в)  $\beta_n = 10^{-2}$ , д)  $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$

Fig. 3. Dependence of the Fade Frequency Correlation Interval from the  $f_0/f_m$  Ratio at Different Communication Distances ( $R = 1500, 2000$  and  $3000$  km) and Different Diffuseness Levels: а)  $\beta_n = 10^{-3}$ , б)  $\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$ , в)  $\beta_n = 10^{-2}$ , д)  $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$

Искомая зависимость получена в виде произведения традиционного интервала частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ радиолинии на понижающий коэффициент, величина которого находится в интервале от 0 до 1 и прямо пропорционально зависит от СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ волны на выходе из ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями. Последняя зависит от отношения рабочей частоты к МПЧ, уровня диффузности ионосферы и дальности связи. Обосновано, что по мере увеличения отношения рабочей частоты к МПЧ значение традиционно рассчитанного интервала частотной корреляции замираний уменьшается, а по-

нижающего коэффициента – возрастает от 0 до 1. Поэтому существует оптимальное отношение рабочей частоты к МПЧ, при котором интервал частотной корреляции замираний в однолучевой ДКМ радиолинии достигает максимума. Установлено, что увеличение уровня диффузности ионосферы приводит к уменьшению максимального значения интервала частотной корреляции, а увеличение дальности ДКМ связи приводит к расширению интервалов частотной корреляции замираний.

На базе полученных результатов планируется провести оценку помехоустойчивости приема сигналов при различных значениях интервалов частотной корреляции.

**Список источников**

1. Ступницкий М.М., Лучин Д.В. Потенциал КВ-радиосвязи – для создания цифровой экосистемы России // Электросвязь. 2018. № 5. С. 49–54.
2. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 598 с.

3. Хмельницкий Е.А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. М.: Связь, 1975. 232 с.
4. Черенкова Е.Л., Чернышов О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
5. Стейн С., Джонс Дж. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. Пер. с англ. М.: Связь, 1971. 376 с.
6. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728с.
7. Фабрицио Д.А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. М: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 936 с.
8. Немировский А.С. Борьба с замираниями при передаче аналоговых сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 208 с.
9. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
10. Кириллов Н.Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Сов. радио, 1971. 256 с.
11. Чернов Ю.А. Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 688 с.
12. Пукса Д.О., Романов Ю.В. Результаты трассовых испытаний адаптивной пакетной КВ-радиолинии высокочастотной передачи данных файлового типа на базе радиомодема с полосой сигнала до 40 кГц // Техника радиосвязи. 2015. № 4(27). С. 14–20.
13. Пашинцев В.П., Омельчук А.В., Коваль С.А., Галушко Ю.И. Метод определения величины интенсивности неоднородностей по данным ионосферного зондирования // Двойные технологии. 2009. № 1(46). С. 38–42.
14. Пашинцев В.П., Колосов Л.В., Тишкин С.А., Антонов В.В. Применение теории фазового экрана для разработки модели односкачкового декаметрового канала связи // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 1. С. 21–26.
15. Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Коваль С.А., Алексеев Д.В., Сенокосов М.А. Алгоритм расчета интервала частотной корреляции коротковолновой радиолинии с учетом сферичности и мелкомасштабных неоднородностей ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 49–72. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10203
16. Коваль С.А., Пашинцев В.П., Копытов В.В., Манаенко С.С., Белоконов Д.А. Метод определения интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолинии // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 67–103. DOI:10.24412/2410-9916-2022-1-67-103
17. Пашинцев В.П., Тишкин С.А., Иванников А.И., Боровлев И.И. Расчет параметра глубины замираний в однолучевой декаметровой радиолинии // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2001. Т. 44. № 12. С. 57–65.
18. Девис К. Радиоволны в ионосфере. Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 502 с.
19. Калинин А.И., Черенкова Л.Е. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971. 439 с.
20. Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1974. 576 с.
21. Yeh K.H., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proceedings of the IEEE. 1982. Vol. 70. Iss. 4. PP. 324–360. DOI:10.1109/PROC.1982.12313
22. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.
23. Котова Д.С., Захаренкова И.Е., Клименко М.В., Оводенко В.Б., Тютин И.В., Чугунин Д.В. и др. Формирование ионосферных неоднородностей в Восточно-Сибирском регионе во время геомагнитной бури 27–28 мая 2017 года // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 80–92. DOI:10.31857/S0207401X20040093

## References

1. Stupnitskiy M.M., Luchin D.V. The potential of HF radio communication – to create a digital ecosystem in Russia. *Electrosvyaz*. 2018;5:49–54. (in Russ.)
2. Golovin O.V., Prostov S.P. *Shortwave Radio Communication Systems and Devices*. Moscow: Hotline – Telecom Publ.; 2006. 598 p. (in Russ.)
3. Khmel'nitskiy E.A. *Evaluation of the Real Noise Immunity of Signal Reception in the HF Band*. Moscow: Sviaz Publ.; 1975. 232 p. (in Russ.)
4. Cherenkova E.L., Chernyshov O.V. *Propagation of Radio Waves*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1984. 272 p. (in Russ.)
5. Stein S., Jones J. *Modern Communication Principles*. McGraw-Hill Telecommunications. 1967. 382 p.
6. Fink L. M. *Discrete Message Transmission Theory*. Moscow: Sovetskoe radio Publ.; 1970. 728 p. (in Russ.)
7. Fabrizio G. A. *High frequency over the horizon radar: Fundamental principles, signal processing, and practical application*. New York: McGraw-Hill Publ.; 2013. 944 p.
8. Nemirovskiy A.S. *Dealing with Fading in Analog Transmission*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1984. 208 p. (in Russ.)
9. Klovskiy D.D. *Transmission of Discrete Messages over Radio Channels*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1982. 304 p. (in Russ.)
10. Kirillov N.E. *Noise-Immune Message Transmission over Linear Channels with Randomly Changing Parameters*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1971. 256 p. (in Russ.)
11. Chernov Yu.A. *Special Questions of Propagation of Radio Waves in Communication and Broadcasting Networks*. Moscow: TEKHNOСFЕRA Publ.; 2018. 688 p. (in Russ.)
12. Puksa D.O., Romanov Yu.V. The Results of the Route Tests of Adaptive Hf Radio Link for Fast File Data Transmission on the Basis of a Wireless Modem with Signal Band to 40 khz. *Radio Communication Technology*. 2015;4(27):14–20. (in Russ.)
13. Pashintsev V.P., Omel'chuk A.V., Koval' S.A., Galushko Yu.I. Method of irregularity intensity value determination according to ionosphere sounding. *Dvoynye tekhnologii*. 2009;1(46):38–42. (in Russ.)
14. Pashintsev V.P., Kolosov L.V., Tishkin S.A., Antonov V.V. Application of the Phase-Screen Theory for Developing a Model of a One-Hop Decameter Communication Link. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 1996;41(1):16–21. (in Russ.)

15. Pashintsev V.P., Skorik A.D., Koval S.A., Alekseev D.V., Senokosov M.A. Algorithm of calculation of an interval of frequency correlation of the short-wave radio line taking into account sphericity and small-scale not uniformity of an ionosphere. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020;2:49–72 (in Russ.) DOI:10.24411/2410-9916-2020-10203
16. Koval S.A., Pashintsev V.P., Kopytov V.V., Manaenko S.S., Belokon D.A. Method for determining the fading frequency correlation interval in a single-beam decameter radio link. *Systems of Control, Communication and Security*. 2022;1:67–103 (in Russ.) DOI:10.24412/2410-9916-2022-1-67-103
17. Pashintsev V.P., Tishkin S.A., Ivannikov A.I., Borovlev I.I. Calculating the Fading Depth Parameter in Single-Beam Decameter Radio Link. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2001.44(12):57–65.
18. Davies K. *Ionospheric radio waves*. Blaisdell Publishing Co., 1969. 477 p.
19. Kalinin A.I., Cherenkova L.E. *Distribution of Radio Waves and Work of Radio Lines*. Moscow: Sviaz Publ.; 1971. 439 p. (in Russ.)
20. Krasnyuk N.P., Dymovich N.D. *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow: Vysshiaia shkola Publ.; 1974. 576 p. (in Russ.)
21. Yeh K.H., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proceedings of the IEEE*. 1982;70(4):324–360. DOI:10.1109/PROC.1982.12313
22. Kolosov M.A., Armand N.A., Yakovlev O.I. Propagation of Radio Waves in Space Communications. Moscow: Sviaz Publ.; 1969. 155 p. (in Russ.)
23. Kotova D.S., Zakharenkova I.E., Klimentov M.V., Ovodenko V.B., Tyutin I.V., Chugunin D.V., et al. Formation of Ionospheric Irregularities in the East Siberian Region During the Geomagnetic Storm on May 27–28, 2017. *Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*. 2020;14(2): 377–389. DOI:10.1134/S1990793120020232

Статья поступила в редакцию 18.04.2022; одобрена после рецензирования 06.06.2022; принята к публикации 22.06.2022.

The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 06.06.2022; accepted for publication 22.06.2022.

## Информация об авторах:

**КОВАЛЬ**  
Станислав Андреевич

кандидат технических наук, докторант Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Будённого  
 <https://orcid.org/0000-0003-1769-6991>

**ПАШИНЦЕВ**  
Владимир Петрович

доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Северо-Кавказского федерального университета  
 <https://orcid.org/0000-0002-6775-7740>

**СКОРИК**  
Александр Дмитриевич

заместитель генерального директора Российского института мощного радиостроения  
 <https://orcid.org/0000-0003-3654-5646>

**САЛЬНИКОВ**  
Денис Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации» Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Будённого  
 <https://orcid.org/0000-0001-7420-8873>

**МИХАЙЛОВ**  
Дмитрий Александрович

лаборант кафедры «Инфокоммуникации» Северо-Кавказского федерального университета  
 <https://orcid.org/0000-0003-1363-9703>