

УДК 621.396

Зависимость надежности связи в декаметровой радиолинии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы

Пашинцев В. П., Скорик А. Д., Коваль С. А.,
Киселев Д. П., Сенокосов М. А.

Постановка задачи: известно, что в декаметровой радиолинии рабочая частота выбирается в диапазоне между максимально применимой (по условию отражения волны от ионосферы) и наименьшей применимой (по условию поглощения волны). Расчет надежности связи декаметровой радиолинии при нормальной (невозмущенной) ионосфере производится на оптимальной рабочей частоте, выбираемой вблизи максимально применимой частоты (на 5...15% ниже ее). Однако в условиях возрастания диффузности ионосферы (т.е. интенсивности ее мелкомасштабных неоднородностей, обуславливающей рост относительного запаздывания рассеянных лучей и глубины замираний принимаемых сигналов) рекомендуют работать на частотах ближе к наименьшей применимой, а при возрастании ионосферного поглощения и уровня помех – на частотах ближе к максимально применимой. **Целью работы** является разработка методики оценки надежности связи в декаметровой радиолинии в зависимости от выбора рабочей частоты с учетом одновременного изменения сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы. **Новизна** заключается в теоретическом обобщении методов расчета надежности связи в декаметровой радиолинии с учетом зависимости: 1) среднего отношения сигнал/помеха на входе приемника от выбора рабочей частоты (при неизменности допустимого отношения сигнал/помеха); 2) допустимого отношения сигнал/помеха от выбора рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы. **Результат:** разработана трехэтапная методика оценки надежности связи в декаметровой радиолинии в зависимости от выбора рабочей частоты с учетом одновременного изменения среднего отношения сигнал/помеха на входе приемника и уровня диффузности ионосферы. **Практическая значимость:** в ночное время уменьшение рабочей частоты относительно максимально применимой является эффективным способом повышения надежности декаметровой связи в условиях диффузности ионосферы. По мере увеличения уровня диффузности ионосферы можно обеспечить максимальные значения надежности связи (0,98...0,93) при выборе рабочих частот, значения которых существенно ниже (на 40% и более) традиционной оптимальной рабочей частоты (на которой достигается более низкая надежность связи 0,89).

Ключевые слова: ионосфера, диффузность, декаметровая радиолиния, замирания, оптимальная рабочая частота, максимально применимая частота, надежность радиосвязи.

Введение

Известно [1-5], что рабочая частота (f_0) в декаметровой (ДКМ) радиолинии с учетом поглощения и отражения волны в ионосфере выбирается в диапа-

Библиографическая ссылка на статью:

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

Reference for citation:

Pashintsev V. P., Skorik A. D., Koval' S. A., Kiselev D. P., Senokosov M. A. Decameter radio line communication reliability dependence of the operating frequency choice taking into account the signal-noise situation and ionosphere diffuseness. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 300-322. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412 (in Russian).

зоне между максимально применимой (МПЧ) и наименьшей применимой (НПЧ) частотой: $f_m > f_0 > f_n$. Величина НПЧ (f_n) определяет нижнюю границу диапазона рабочих частот по условию поглощения волны [6]. Величина МПЧ (f_m) соответствует наибольшей частоте, при которой отраженная от ионосферы волна достигает заданной точки приема, и определяется углом падения волны φ_0 на ионосферу и критической частотой слоя $F2$ f_{F2} как $f_m = f_{F2} \sec \varphi_0$. Поскольку на МПЧ поглощение волны в ДКМ радиолинии будет наименьшим, можно предположить, что работа на МПЧ обеспечивает наилучшее качество ДКМ связи, т.е. наибольшую ее надежность (или вероятность с допустимой достоверностью) $D_{св}$.

Однако этот вывод некорректен, поскольку при выборе рабочей частоты вблизи МПЧ ($f_0 \approx f_m$) отражение ДКМ волны сопровождается сильным рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях (ММН) электронной концентрации ионосферы $\Delta N(h_m)$ [7, 8] и глубокими интерференционными (быстрыми) замираниями сигналов в точке приема, что приводит к снижению надежности связи [4]. Поэтому при нормальном состоянии ионосферы работа на МПЧ (f_m) или традиционной оптимальной рабочей частоте (ОРЧ) $f_{орч} = (0,85...0,95)f_m$ не обеспечивает достижение максимально возможной надежности ДКМ связи. Следовательно, существует такое значение рабочей частоты ДКМ радиолинии (отличное от f_m и $f_{орч}$), на которой обеспечивается наибольшая надежность ДКМ связи. Такая частота в [4] названа полностью оптимальной. В дальнейшем для краткости частоту, на которой обеспечивается ДКМ связь с наибольшей надежностью будем называть истинной ОРЧ ($f'_{орч}$). В статье [9] разработан графический метод определения истинной ОРЧ в ДКМ радиолинии по критерию максимальной надежности связи. Согласно результатам этой статьи, в условиях нормальной среднеширотной ионосферы с обычной интенсивностью мелкомасштабных неоднородностей ($\beta_n = \psi(\Delta N(h_m)) \approx 10^{-3}...5 \cdot 10^{-3}$) истинная ОРЧ ($f'_{орч} \approx 0,7f_m$) может быть существенно меньше традиционного значения ОРЧ ($f_{орч} = 0,85f_m$).

Основные недостатки известного метода [9] состоят в том, что полученные зависимости надежности ДКМ связи от выбора рабочей частоты:

- 1) не учитывают возможности возрастания интенсивности неоднородностей на несколько порядков (до $\beta_n = 10^{-2}...10^{-1}$) в условиях диффузности ионосферы;
- 2) учитывают возможности суточных вариаций среднего отношения сигнал/помеха (из-за ионосферного поглощения сигнала и изменения помеховой обстановки) только графическим путем.

Указанные недостатки затрудняют выбор истинной ОРЧ ($f'_{орч}$) в реальной ДКМ радиолинии по критерию максимальной надежности, поскольку в условиях возрастания диффузности ионосферы рекомендуют работать на частотах

ближе к НПЧ [5, 10], а при возрастании ионосферного поглощения сигнала и помех рекомендуют работать на частотах ближе к МПЧ [10].

Целью статьи является разработка методики оценки надежности связи в ДКМ радиолинии в зависимости от выбора рабочей частоты с учетом одновременного изменения сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы.

Известно [1, 3], что надежность ДКМ связи описывается как вероятность того, что с достоверность (или вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$) приема сигналов будет не хуже допустимого значения ($P_{\text{ош, доп}}$):

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

Здесь $F(\xi) = \left(\sqrt{2\pi}\right)^{-1} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-0,5t^2) dt$ – функция Лапласа;

$\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_Z = \Delta Z / \sigma_Z$; \bar{Z} – среднее (медианное) отношение (превышение) сигнал/помеха (С/П) на входе приемника (ПРМ), в условиях замираний, равное отношению С/П при отсутствии замираний ($Z = \bar{Z}$), выраженное в децибелах (дБ); $Z_{\text{доп}}$ – допустимое превышение С/П на входе ПРМ, определяемое по функциональной зависимости $P_{\text{ош}} = \psi(Z = \bar{Z})$ при $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош, доп}}$ в условиях интерференционных замираний принимаемых сигналов; σ_Z – среднеквадратическое отклонение (СКО) превышения С/П при медленных замираниях сигналов и помех.

Входящее в выражение (1) СКО превышения С/П при медленных замираниях сигналов и помех от выбора рабочей частоты не зависит (т.е. $\sigma_Z(f_0) = \sigma_Z$) и в среднем за месяц составляет $\sigma_Z = 14$ дБ.

Таким образом, методика оценки надежности ДКМ радиолинии должна включать в себя несколько этапов.

1. Определение зависимости среднего отношения сигнал/помеха от выбора рабочей частоты $\bar{Z} = \psi\{f_0\}$.
2. Определение допустимого отношения сигнал/помеха $Z_{\text{доп}} = \psi\{f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош, доп}}\}$ в зависимости от рабочей частоты f_0 и уровня диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$.
3. Определение надежности связи в ДКМ радиолинии $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) / \sigma_Z]$ в зависимости от выбора рабочей частоты f_0 с учетом возможного одновременного изменения сигнально-помеховой обстановки $\bar{Z}(f_0)$ и диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$.

Определение зависимости среднего отношения сигнал/помеха от выбора рабочей частоты

В известном [9] методе определения истинной ОРЧ в ДКМ радиолинии по критерию максимальной надежности связи зависимость $\bar{Z} = \psi\{f_0\}$ среднего от-

ношения С/П на входе ПРМ от выбора рабочей частоты описывалась выражением вида

$$\bar{Z}(f_0) = 10 \lg \frac{\bar{P}_c(f_0)}{\bar{P}_n(f_0)} = 20 \lg \frac{\bar{E}_c(f_0)}{\bar{E}_n(f_0)} = 20 \lg \left[\frac{E_c^{(1)}(f_0)}{E_n^{(1)}(f_0)} \sqrt{\frac{0,25 P_t G_t G_r}{B}} \right], \quad (2)$$

где \bar{P}_c и \bar{P}_n – средние мощности сигнала и помех на входе ПРМ; \bar{E}_c и \bar{E}_n – медианные напряженности поля сигнала и помех; $E_c^{(1)}$ и $E_n^{(1)}$ – единичные напряженности поля сигнала и помех; P_t – мощность передатчика; G_t и G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; B – полоса пропускания ПРМ.

Недостатком определения зависимости $\bar{Z}(f_0)$ согласно (2) является ее низкая точность, поскольку зависимости единичных напряженностей поля сигнала $E_c^{(1)}$ и помех $E_n^{(1)}$ от выбора рабочей частоты f_0 в ДКМ радиолинии определяются по графикам МККР [4].

Для более точного определения зависимости (2) $\bar{Z} = \psi\{f_0\}$ фактического отношения С/П на входе ПРМ от выбора рабочей частоты в ДКМ радиолинии можно воспользоваться методическими рекомендациями международного союза электросвязи (МСЭ) по прогнозированию медианного уровня напряженности поля сигнала \bar{E}_c [11] и медианного уровня напряженности поля помех \bar{E}_n [12]. Для наглядности определения \bar{E}_c на рис. 1 представлен процесс распространения волны (луча) в ДКМ радиолинии при нормальной ионосфере (в отсутствие диффузности).

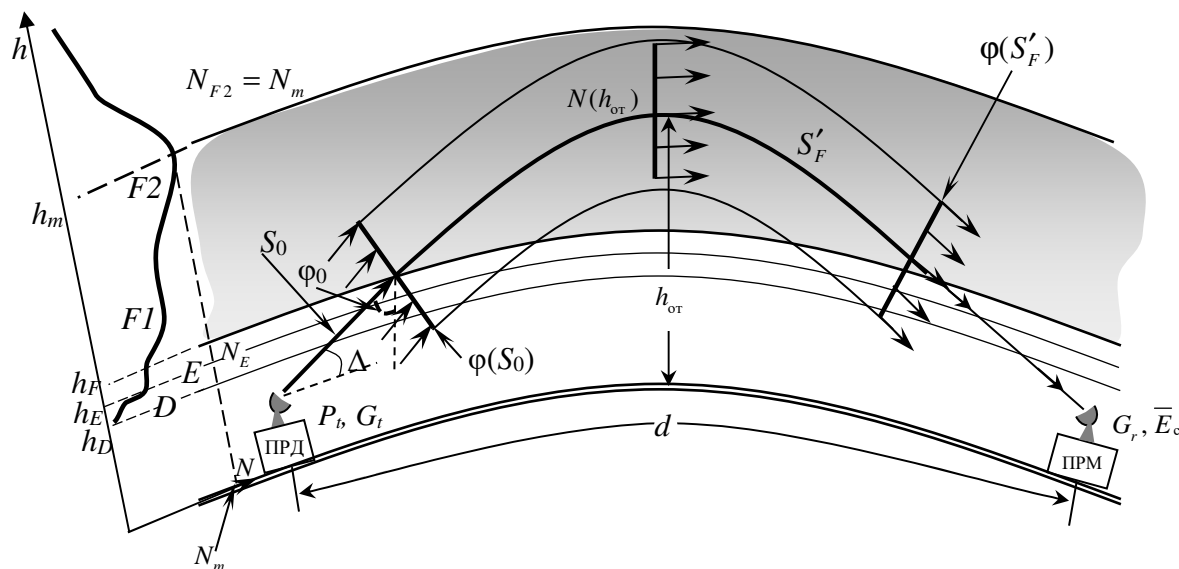


Рис. 1. Процесс распространения волны (луча) в ДКМ радиолинии при отсутствии диффузности ионосферы

В левой части рисунка представлено изменение $N(h)$ по высоте h электронной концентрации (ЭК) N в слоях ионосферы ($D, E, F1, F2$). Показаны ниж-

ние границы этих слоев (h_D , h_E , h_F) и высота h_m , соответствующая максимальной ЭК ионосферы $N(h_{F2}) = N_{F2} = N(h_m) = N_m$.

В правой части рисунка представлен процесс распространения ДКМ волны, излучаемой передатчиком (ПРД) с мощностью P_t и коэффициентом усиления антенны G_t под углом Δ . После прямолинейного распространения волны на расстояние S_0 до нижней границы слоя F (падающей на него под углом φ_0), фазовый фронт волны $\varphi(\rho, S_0) = \varphi(S_0)$ будет плоским (т.е. неискаженным по пространству $\rho = (x, y)$). При дальнейшем распространении ДКМ волны в слое F на расстояние S'_F до высоты отражения ($h_{от}$) и до выхода из слоя F ионосферы фазовый фронт волны остается плоским $\varphi(\rho, S'_F) = \varphi(S'_F)$. Поэтому обычно процесс распространения ДКМ волны изображают в виде ее однолучевой траектории с плоским амплитудно-фазовым фронтом, приходящим на вход приемной антенны с некоторым медианным уровнем напряженности поля сигнала $\overline{E_c}$ [1-4].

Частотная зависимость $\overline{E_c}(f_0)$ определяется основными потерями передачи $L_b(f_0)$ и выражается в децибелах (относительно 1 мкВ/м) в соответствии с методическими рекомендациями МСЭ [11] как

$$\overline{E_c}(f_0)_{дБ} = 136,6 + P_t + G_t + 20 \lg f_0 - L_b(f_0). \quad (3)$$

В формуле (3) основные потери передачи $L_b(f_0) = L_0(f_0)L_T(f_0)$ определяются не дальностью ДКМ связи d по поверхности Земли, а виртуальной наклонной дальностью $S'(d)$ по траектории ДКМ луча

$L_b(f_0) = (4\pi f_0 s'(d)/c)^2 L_T(f_0)$ как

$$L_b(f_0)_{дБ} = 32,45 + 20 \lg f_0 + 20 \lg s'(d) + L_T(f_0), \quad (4)$$

где

$$S'(d) = 2R_0 \left\{ \sin(d/2R_0) / \cos[\Delta + (d/2R_0)] \right\}. \quad (5)$$

Здесь $R_0 = 6371$ км – радиус Земли; Δ – угол места траектории луча.

В частном случае небольших дальностей ДКМ связи ($d < 500$ км), когда выполняется приближение плоской Земли ($d \ll R_0$), выражение (5) сводится к виду $0,5S'(d) = 0,5d / \cos \Delta$, соответствующему половине группового пути распространения ДКМ волны [4]. Поэтому виртуальная наклонная дальность $s'(d)$ по траектории ДКМ луча (5) связана с показанными на рис. 2 половинными значениями расстояний до и внутри слоя F (S_0 и S'_F) выражением $S'(d) = 2(S_0 + S'_F)$.

Методики получения используемых в (4, 5) параметров, определяющих потери основной передачи по траектории луча L_b , детально описаны в рекомендациях МСЭ [11]. Дополнительные потери на трассе распространения ДКМ волны $L_T(f_0)$ из-за поглощения в ионосфере и других факторов зависят от рабочей частоты f_0 , параметров ионосферы и целого ряда других характеристик:

$$L_T(f_0) = \Psi(f_0, f_{F2}, f_E, x_j, h_m, M(3000)F2, f_H, d), \quad (6)$$

где $f_{F2} = (80,8N_{F2})^{0,5} = (80,8N_m)^{0,5}$ – критическая частота слоя F2 ионосферы с максимальной ЭК $N_{F2} = N_m = N(h_m)$; $f_E = (80,8N_E)^{0,5}$ – критическая частота слоя E ионосферы с ЭК N_E ; x_j – зенитный угол солнца в точке отражения; $M(3000)F2$ – масштабный коэффициент; f_H – гирочастота в точке отражения.

Частотная зависимость медианного уровня напряженности поля помех $\overline{E}_n(f_0)$ определяется коэффициентом внешних помех $F_A = T_A/T_0$ и в соответствии с методическими рекомендациями МСЭ [12] выражается в децибелах (относительно 1мкВ/м) как

$$\overline{E}_n(f_0)_{дБ} = F_A(f_0) + 20\lg f_0 + 10\lg B - 98,9. \quad (7)$$

Методика получения параметров, определяющих коэффициент внешних помех (F_A) в ДКМ диапазоне, детально описана в рекомендациях МСЭ [12]. Величина этого коэффициента зависит от выбора рабочей частоты, параметров ионосферы ($f_{F2} = (80,8N_m)^{0,5}$), координат приемника и точки отражения, а также ряда других характеристик:

$$F_A = \Psi(f_0, f_{F2}, F_{инд}, \rho_{прм}, \rho_{отр}, t_{дт}, t_{отр}, B), \quad (8)$$

где $F_{инд}$ – уровень промышленных помех; $\rho_{прм}$ – координаты приемника; $\rho_{отр}$ – координаты точки отражения волны; $t_{дт}$ – дата организации радиосвязи; $t_{отр}$ – время суток.

Таблица 1 – Координаты и технические параметры для организации ДКМ радиосвязи

Координаты приемника $\rho_{прм}$	58,14 с.ш., 70,32 в.д.
Координаты точки отражения от ионосферы $\rho_{отр}$	56,84 с.ш., 53,78 в.д.
Дата организации радиосвязи $t_{дт}$	08.08.2019
Мощность передатчика P_t , кВт	1
Коэффициент усиления антенны передатчика G_t , дБ	3
Коэффициент усиления антенны приемника G_r , дБ	2
Полоса пропускания ПРМ B , Гц	300
Дальность связи d , км	2000
СКО превышения С/П σ_z , дБ	14
Уровень промышленных помех $F_{инд}$	Сельская местность

Методики получения используемых в (4-6) и (8) параметров, определяющих потери основной передачи по траектории луча L_b и коэффициент внешних помех F_A , детально описаны в рекомендациях МСЭ [11, 12]. Приведем пример использования выражений (4-6) и (8) для расчета медианных значений напряженности

поля волны $\overline{E}_c(f_0)$ и помех $\overline{E}_n(f_0)$ на входе приемной антенны согласно выражениям (3) и (7) в соответствии с исходными данными (табл. 1 и 2). Параметры ионосферы (f_{F2}, f_E, f_H, h_m) для заданной точки отражения волны могут быть получены с использованием реферативной модели IRI-2016 [13].

В соответствии с выражениями (3-8) и данными таблиц 1 и 2 на рис. 2а - 2г представлены частотные зависимости параметров сигнально-помеховой обстановки $\overline{E}_c(f_0)$ и $\overline{E}_n(f_0)$ для различного времени суток: $t_{отр} = 0; 4; 12; 16$ ч.

Полученные зависимости $\overline{E}_c(f_0)_{дБ}$ и $\overline{E}_n(f_0)_{дБ}$ позволяют определить зависимости (2) $\overline{Z} = \psi\{f_0\}$ среднего отношения С/П на входе ПРМ от выбора рабочей частоты

$$\overline{Z}(f_0)_{дБ} = \overline{E}_c(f_0)_{дБ} - \overline{E}_n(f_0)_{дБ}, \quad (9)$$

которые представлены на рис. 2а – 2г пунктирными линиями.

Таблица 2 – Параметры ионосферы, полученные с использованием модели IRI-2016

Время суток, часы (для точки отражения от ионосферы) $t_{отр}$	0:00	4:00	12:00	16:00
Частота слоя F2 f_{F2} , МГц	3,304	2,909	4,880	4,577
Частота слоя E f_E , МГц	0,372	1,065	3,031	2,687
Масштабный коэффициент $M(3000)F2$	3,100	3,003	2,993	3,137
Высота максимума ионизации h_m , км	328,6	279,6	233,8	255,3
Зенитный угол Солнца x_j , град.	106	91,9	42,4	60,4
Гирочастота в точке отражения f_H , МГц	0,8			

В ночное время (рис. 2а) частотная зависимостей $\overline{Z}(f_0)$ имеет пологий характер и в диапазоне от $f_0 = f_m \approx 8,5$ МГц до 3 МГц изменяется от 45 дБ до 38 дБ из-за низкой критической частоты слоя E ионосферы ($f_E = 0,372$ МГц).

В дневное время суток (12:00 и 16:00 ч) частотные зависимости $\overline{Z}(f_0)$ имеют крутой спад по сравнению с ночным (рис. 2в и 2г), что обусловлено повышением критической частоты слоя E до $f_E = 3,031$ МГц в 12:00 и до $f_E = 2,687$ МГц в 16:00, также квадратичной зависимостью дополнительных потерь на трассе распространения ДКМ волны из-за поглощения в ионосфере (6) при понижении рабочей частоты: $L_T \sim f_E / f_0^2$. В диапазоне от $f_m \approx 12,1$ МГц до $f_0 = 3$ МГц среднее отношение С/П $\overline{Z}(f_0)$ уменьшается с 45 дБ до -20 дБ в полдень (12:00) и с 47 дБ до -15 дБ в 16:00.

В утреннее время (04:00) частотная зависимостей $\overline{Z}(f_0)$ имеет промежуточный характер (рис. 2б) по сравнению с ночным и дневным временем и диа-

пазоне от $f_m \approx 7,2$ МГц до $f_0 = 3$ МГц среднее отношение С/П $\bar{Z}(f_0)$ уменьшается с 40 дБ до 25 дБ.

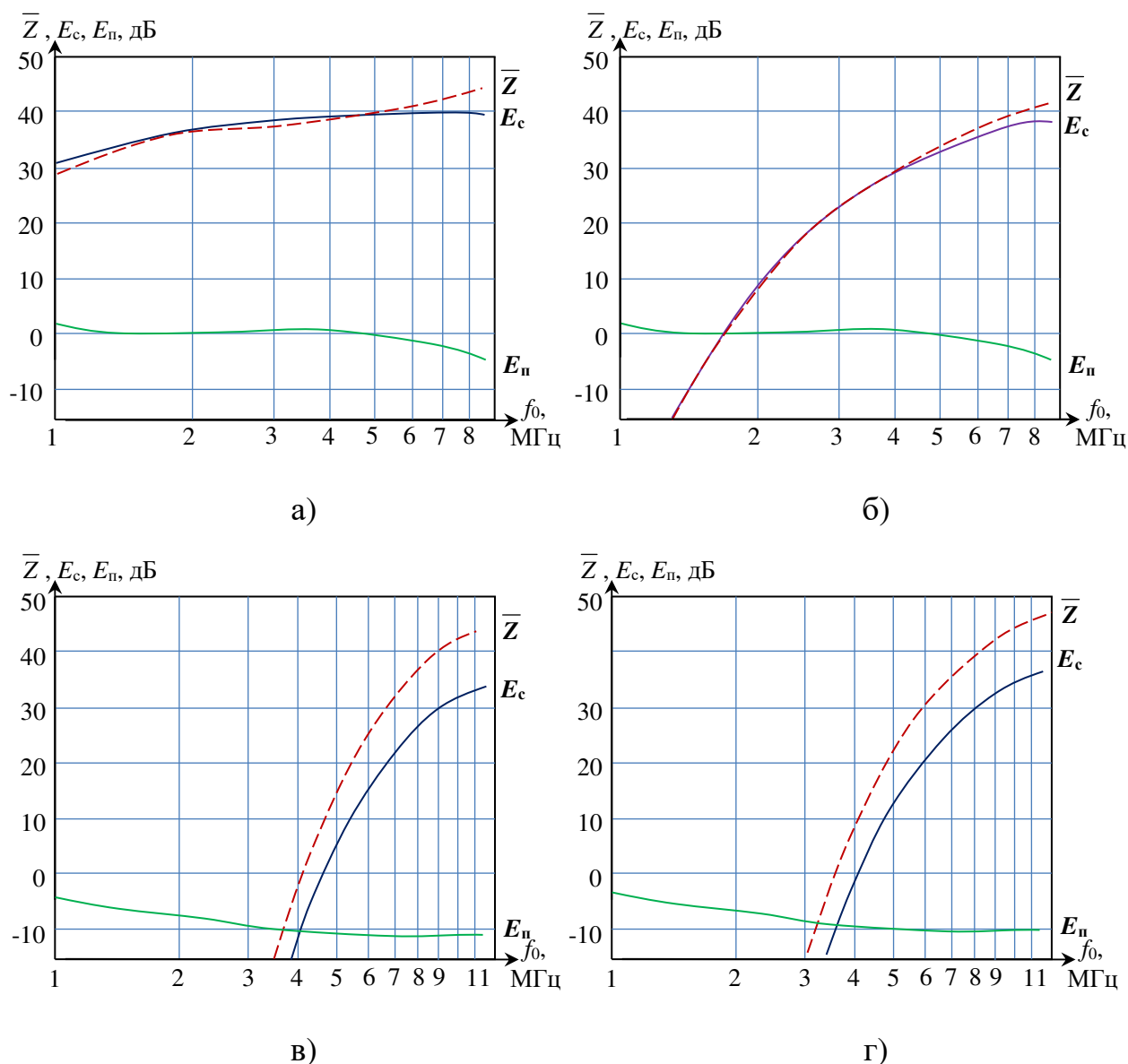


Рис. 2. Частотные зависимости параметров сигнальной $\bar{E}_c(f_0)$ и помеховой $\bar{E}_n(f_0)$ обстановки и отношения сигнал-помеха $\bar{Z}(f_0)$ в различное время суток: а) 00:00 ч; б) 04:00; в) 12:00; г) 16:00

Определение зависимости допустимого отношения сигнал/помеха от выбора рабочей частоты и уровня диффузности ионосферы

Уровень диффузности ионосферы наиболее удобно оценивать по величине интенсивности мелкомасштабных неоднородностей ЭК β_n [14]. Для повышения надежности связи $D_{cb}(f_0, \beta_n)$ в условиях диффузности ионосферы рекомендуется выбирать рабочую частоту ниже традиционных значений ОРЧ ($f_0 < f_{орч} = (0,85 \dots 0,95)f_m$) [5, 10]. Поэтому вторым этапом методики расчета надежности ДКМ радиолинии (после определения зависимости среднего отно-

шения С/П от выбора рабочей частоты $\bar{Z} = \psi\{f_0\}$) является определение допустимого отношения сигнал/помеха $Z_{\text{доп}} = \psi\{f_0, \beta_{\text{и}}, P_{\text{ош.доп}}\}$ в зависимости от выбора рабочей частоты f_0 и уровня диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$.

Известно [2], что при выборе рабочей частоты, близкой к МПЧ ($f_0/f_m > 0,9$) наблюдается релеевское распределение замираний амплитуды принимаемого сигнала в ДКМ радиолинии, а при выборе рабочей частоты $f_0/f_m < 0,9$ глубина замираний уменьшается и описывается райсовским (обобщенно-релеевским) законом.

При райсовском распределении замираний невозможно получить аналитическое выражение для определения требуемого превышения уровня сигнала над уровнем помех $Z_{\text{доп}}(f_0)$. Однако известно [1], что райсовские и релеевские замирания удовлетворительно аппроксимируются распределением Накагами в интервале значений параметра m , равном $1 \leq m < \infty$. В этом случае, допустимое превышения С/П описывается выражением [1]

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

Из выражения (10) следует, что при отсутствии замираний, когда $m \rightarrow \infty$, выражение (10) сводится к виду [1] $Z_{\text{доп}} = 10 \lg(-2 \ln 2P_{\text{ош.доп}})$. В этом случае при типовом для ДКМ связи значении $P_{\text{ош.доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$ величина $Z_{\text{доп}} = Z_{\text{н}} \approx 10$ дБ. По мере увеличения глубины замираний (т.е. приближения параметра Накагами m к значению 1, соответствующему релеевским замираниям) требуемое превышение уровня сигнала над уровнем помех $Z_{\text{доп}}$ возрастает до значения, определяемого выражением $Z_{\text{доп}} = 10 \lg \left[(1 - 2P_{\text{ош.доп}}) / P_{\text{ош.доп}} \right]$.

Обычно параметры, характеризующие глубину замираний (например, m -параметр) определяются экспериментально [15]. Однако для случая ДКМ радиолинии с одним дискретным лучем и диффузной многолучевостью (обусловленной рассеянием волны на ММН ионосферы) известна аналитическая зависимость m -параметра Накагами от выбора рабочей частоты (f_0) и уровня диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}}$) через величину дисперсии флуктуаций фазового фронта отраженной волны (σ_{ϕ}^2) на выходе неоднородной ионосферы [9]

$$m(f_0, \beta_{\text{и}}) = \left\{ 1 - \exp \left[-2\sigma_{\phi}^2(f_0, \beta_{\text{и}}) \right] \right\}^{-1}, \quad (11)$$

где

$$\sigma_{\phi}^2 = 2r_0 S'_3(d) (\pi f_0 \beta_{\text{и}} / c K_s^2 \sec^2 \phi_0)^2. \quad (12)$$

Здесь r_0 – наибольший размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (200...500 м); $S'_3(d)$ – эквивалентный однородный путь ДКМ волны в слое F ионосферы (зависящий от его критической частоты f_{F2} , высоты нижней границы h_0 и максимума ионизации h_m , дальности радиосвязи d);

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; K_s – поправочный коэффициент на сферичность Земли и ионосферы; φ_0 – угол падения волны на нижнюю границу слоя F .

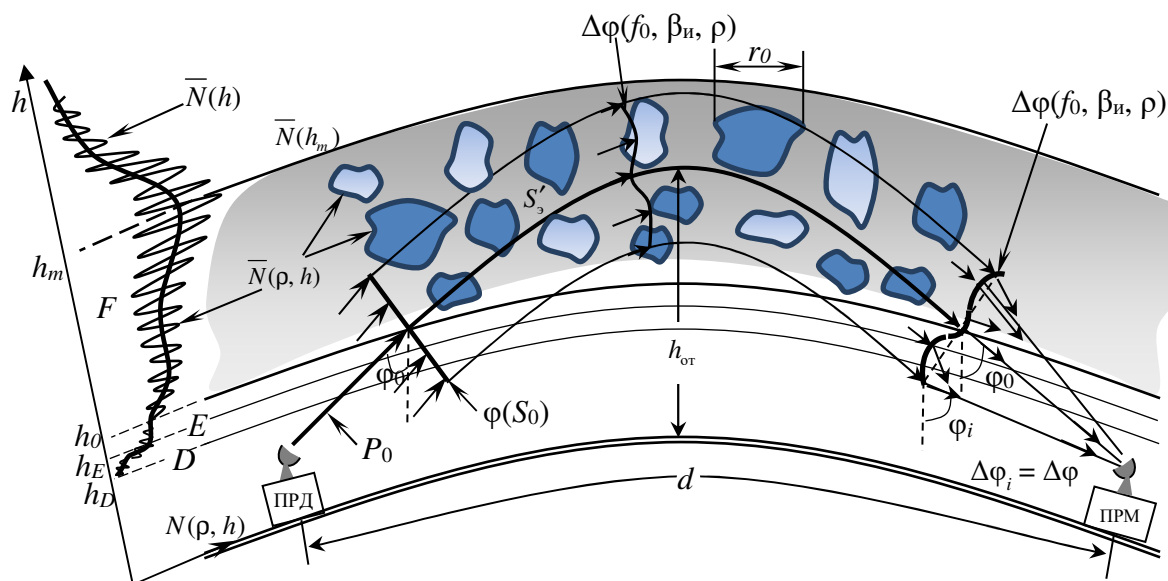


Рис. 3. Процесс распространения волны в ДКМ радиолинии при наличии диффузности ионосферы

Для наглядности определения σ_φ^2 на рис.3 представлен процесс распространения волны в ДКМ радиолинии при наличии диффузности ионосферы.

В левой части рисунка представлено изменение ЭК в диффузной ионосфере $N(h, \rho) = \bar{N}(h) + \Delta N(h, \rho)$ по высоте h и координатам $\rho = (x, y)$ с учетом мелкомасштабных неоднородностей $\Delta N(h, \rho)$ ЭК относительно среднего (фонового) значения $\bar{N}(h)$. Среднеквадратическое отклонение (СКО) относительных флуктуаций ЭК $\Delta N(h, \rho) / \bar{N}(h)$ остается практически неизменным на любой высоте h ионосферы (включая h_m) и характеризует интенсивность ММН [14]:

$$\begin{aligned} \beta_n &= \left\langle \Delta N(\rho, h)^2 \right\rangle^{0.5} / \bar{N}(h) = \sigma_{\Delta N}(h) / \bar{N}(h) = \\ &= \sigma_{\Delta N}(h_m) / \bar{N}(h_m) \approx const, \end{aligned} \quad (13)$$

по величине которой целесообразно оценивать уровень (степень) диффузности ионосферы. При диффузности ионосферы интенсивность ММН может существенно возрастать (до $\beta_n = 10^{-2} \dots 10^{-1}$) по сравнению с нормальной ионосферой (когда $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-2}$).

В правой части рис. 3 представлен процесс распространения ДКМ волны с рабочей частотой f_0 через диффузную ионосферу. По мере возрастания до высоты отражения ($h = h_{от}$) флуктуаций ЭК $\Delta N(h, \rho) \sim \beta_n$ возрастают флуктуации (искажения) фазы во фронте распространяющейся волны $\Delta\varphi(f_0, \beta_n, \rho) \sim \Delta N(h, \rho)$. Эти флуктуации сохраняются до выхода из слоя F и определяют относительные фазовые сдвиги лучей, образуемых элементарными

участками (ρ_i) на поверхности фронта выходной волны $\Delta\varphi(f_0, \beta_n, \rho_i)$ и приходящих к приемной антенне $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi(f_0, \beta_n, \rho_i)$. По мере увеличения $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi(f_0, \beta_n, \rho_i)$ возрастает глубина интерференционных замираний, характеризующая m -параметром Накагами (11). Значение $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi(f_0, \beta_n, \rho_i)$ определяет величину СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ волны (12)

$$\sigma_\varphi = \left[\langle \Delta\varphi(f_0, \beta_n, \rho_i) \rangle^2 \right]^{0.5} = (2r_0 S'_s(d))^{0.5} (\pi f_0 \beta_n / c K_s^2 \sec^2 \varphi_0). \quad (14)$$

Анализ (14) показывает, что СКО флуктуаций фазового фронта ДКМ волны на выходе ионосферы возрастает по мере увеличения рабочей частоты f_0 и приближения ее к МПЧ, возрастания уровня диффузности ионосферы β_n , уменьшения угла падения волны на ионосферу φ_0 (что обуславливает отражение ДКМ волны от большей высоты слоя F , где больше флуктуации ЭК $\Delta N(h, \rho)$). Кроме того, σ_φ возрастает с увеличением наибольшего размера ММН r_0 и эквивалентного пути распространения ДКМ волны через неоднородную ионосферу $S'_s(d)$. Последний связан с показанными на рис. 3 половинными значениями расстояний до и внутри слоя F (S_0 и S'_s) выражением $S'_s(d) = 2(S_0 + S'_s)$. В [16] приведено развернутое выражение для эквивалентного пути $S'_s(d)$ и показана его соотношение с групповым $S'(d)$, реальным $S'_p(d)$ и фазовым $S'_\phi(d)$ путями распространения ДКМ волны: $S'(d) > S'_p(d) \geq S'_s(d) > S'_\phi(d)$.

Более детальное описание функциональной зависимости

$$\sigma_\varphi^2 = \psi(f_0, \beta_n, h_0, f_{F2}, h_m, r_0, d) \quad (15)$$

приведено в [9]. Напомним, что часть необходимых для расчета (15) параметров ионосферы ($f_{F2}, h_0 = h_F, h_m$) для заданной точки отражения волны могут быть получены с использованием реферативной модели IRI-2016, а интенсивность мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации ионосферы β_n можно определить методом вертикального зондирования ионосферы [14] или измерения полного электронного содержания ионосферы с помощью спутниковой радионавигационной системы [17].

В соответствии с выражениями (10-15) и исходными данными, приведенными в таблицах 1 и 2 (f_{F2}, h_m, d), а также значениями [9] дополнительных параметров ($P_{\text{ош.доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$, $h_0 = 1,5 \cdot 10^2$ м, $r_0 = 2 \cdot 10^2$, $K_s = 1$), на рис. 4а - 4г представлены зависимости $Z_{\text{доп}} = \psi(f_0)$ допустимого отношения С/П на входе приемника от выбора рабочей частоты в ДКМ радиолинии в ночное (00:00), утреннее (04:00) и дневное (12:00, 16:00) время суток для пяти уровней диффузности ионосферы:

- 1) отсутствия диффузности $\beta_n = 10^{-3}$;
- 2) слабой – $\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$;
- 3) умеренной – $\beta_n = 10^{-2}$;

4) средней – $\beta_{и} = 2,5 \cdot 10^{-2}$;

5) сильной – $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$.

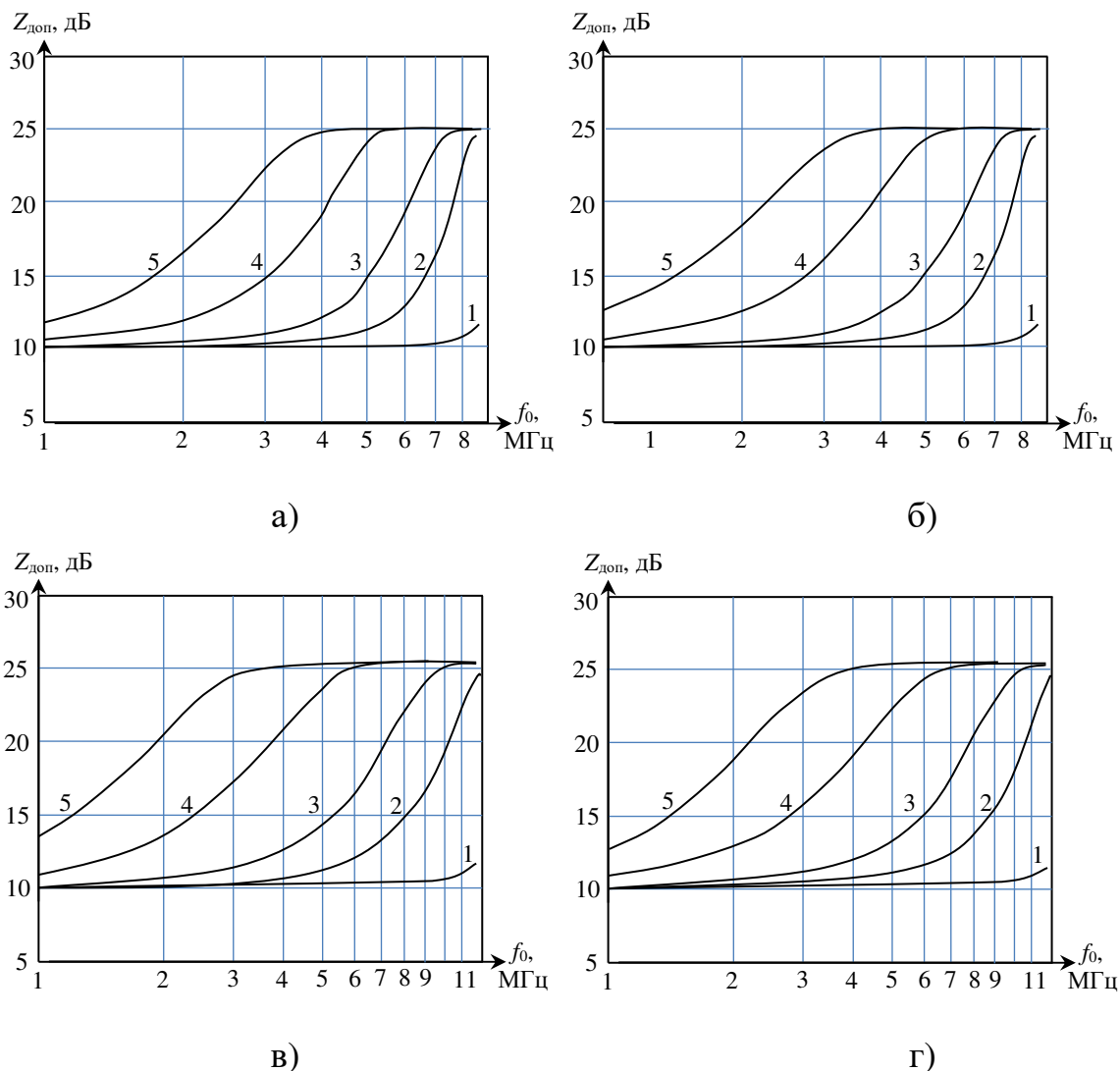


Рис. 4. Частотные зависимости допустимого отношения сигнал/помеха в различное время суток (а-00:00 ч; б-04:00 ч; в-12:00 ч; г-16:00 ч) при пяти уровнях диффузности ионосферы $\beta_{и}$: 1) 10^{-3} ; 2) $5 \cdot 10^{-3}$; 3) 10^{-2} ; 4) $2,5 \cdot 10^{-2}$; 5) $5 \cdot 10^{-2}$.

Анализ рис. 4 показывает, что характер графиков зависимости $Z_{доп} = \psi(f_0, \beta_{и})$ допустимого отношения С/П от рабочей частоты и диффузности ионосферы имеет слабую зависимость от времени суток (и, следовательно, от уровня поглощения в слое E). По мере понижения рабочей частоты в диапазоне от МПЧ ($f_0 = f_m \approx 7,2 \dots 12$ МГц) до $f_0 = 1 \dots 3$ МГц допустимое отношение С/П на входе приемника $Z_{доп}$ уменьшаться до значений, определяемых уровнем диффузности ионосферы ($\beta_{и}$). При отсутствии диффузности ионосферы ($\beta_{и} = 10^{-3}$, кривые 1), когда замирания отсутствуют, величина $Z_{доп}$ изменяется

незначительно в диапазоне $Z_{\text{доп}} \approx Z_{\text{н}} = 12...10$ дБ. При наличии диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} > 10^{-3}$, кривые 2-5), когда замирания присутствуют, величина $Z_{\text{доп}} \approx 25$ дБ вблизи МПЧ ($f_0 \approx f_{\text{м}}$) и может существенно снижаться по мере понижения рабочей частоты f_0 . Например, в ночное время (00:00, рис. 4а) при $f_0 = 3$ МГц допустимое отношение С/П снижается до значения $Z_{\text{доп}} \approx 10...12$ дБ при слабой и умеренной диффузности (кривые 2-3), до $Z_{\text{доп}} \approx 15$ дБ – при средней (кривая 4), и до $Z_{\text{доп}} \approx 22$ дБ – при сильной диффузности (кривая 5).

В утреннее (04:00) и дневное время суток (12:00 и 16:00 ч) зависимости $Z_{\text{доп}} = \psi(f_0, \beta_{\text{и}})$ имеют вид, аналогичный приведенным на рис. 4а.

Определение надежности связи ДКМ радиолинии

Приведенные на рис. 2 и 4 зависимости $\bar{Z}(f_0)$ и $Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}})$ позволяют рассчитать превышения фактического отношения С/П на входе приемника над допустимым значением $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}})$ и произвести оценку надежности связи в ДКМ радиолинии согласно выражению (1) $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})/\sigma_Z]$ в зависимости от выбора рабочей частоты f_0 с учетом одновременного изменения сигнально-помеховой обстановки $\bar{Z}(f_0)$ и диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$.

На рис. 5 приведены зависимости превышения С/П $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})$ от выбора рабочей частоты f_0 в различное время суток (00:00; 04:00; 12:00; 16:00) при различных уровнях диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$; $5 \cdot 10^{-3}$; 10^{-2} ; $2,5 \cdot 10^{-2}$; $5 \cdot 10^{-2}$), построенные в соответствии с рис. 2 и 4.

На рис. 6 приведены зависимости надежности связи в ДКМ радиолинии $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}})$ от выбора рабочей частоты f_0 в различное время суток (00:00; 04:00; 12:00; 16:00) при различных уровнях диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$; $5 \cdot 10^{-3}$; 10^{-2} ; $2,5 \cdot 10^{-2}$; $5 \cdot 10^{-2}$), построенные в соответствии с выражением (1) $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})/\sigma_Z]$ при стандартном СКО превышения С/П $\sigma_Z = 14$ дБ и приведенными на рис. 5 зависимостями $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})$.

Анализ рис. 6а показывает, что ночью (00:00) в отсутствие диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 10^{-3}$, кривая 1), когда на МПЧ ($f_0 = f_{\text{м}} \approx 8,5$ МГц) обеспечивается (см. рис. 2а-4а) максимальное превышение фактического отношения С/П на входе ПРМ над допустимым значением $\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \approx 44 - 11 = 33$ дБ, при стандартном СКО превышения С/П $\sigma_Z = 14$ дБ возможно достижение надежности связи в ДКМ радиолинии $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})/\sigma_Z] \approx 0,99$.

Согласно рис. 5а, 6а при слабой диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$, кривая 2) разность между фактическим и допустимым отношением С/П на вхо-

де ПРМ на МПЧ ($f_m \approx 8,5$ МГц) составляет всего $\Delta Z(f_0 = f_m, \beta_{и}) \approx 44-24=20$ дБ, а на частоте $f_0 \approx 5$ МГц она достигает максимального значения $\Delta Z(f_0, \beta_{и}) \approx 40-12=28$ дБ. Здесь (см. рис. 6а) достигается наибольшая надежность ДКМ связи $D_{св}(f_0, \beta_{и}) \approx 0,98$. Эта частота является истинной оптимальной рабочей частотой ($f'_{орч}$) по критерию обеспечения максимального превышения С/П и наибольшей надежности ДКМ связи при слабой диффузности ионосферы ($f'_{орч2} \approx 5$ МГц). Заметим, что это значение меньше традиционно выбираемой ОРЧ ($f_{орч} = 0,85 \cdot f_m = 0,85 \cdot 8,5$ МГц $\approx 7,2$ МГц) и составляет $f'_{орч2} \approx 0,6 f_m$.

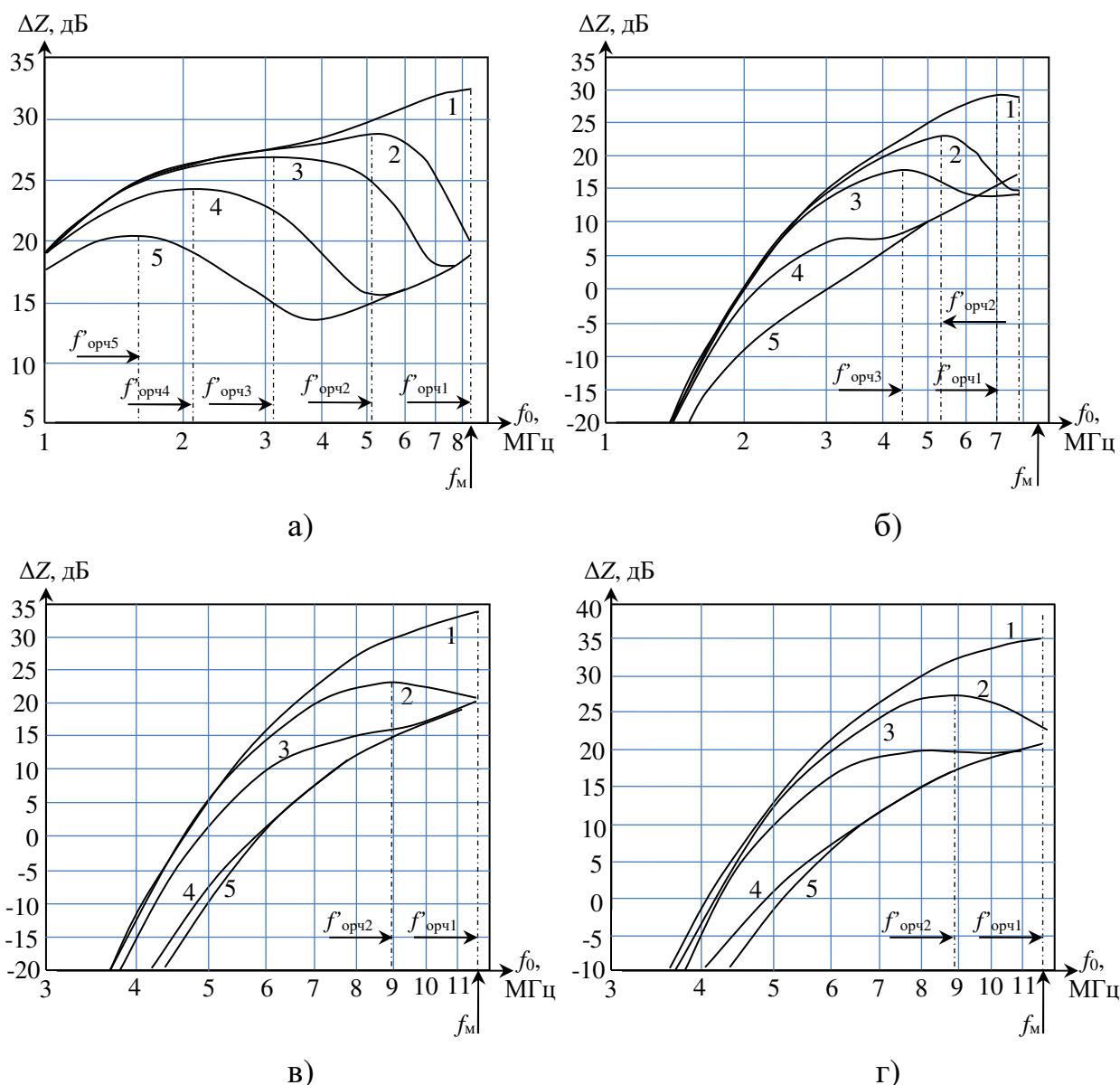


Рис. 5. Частотные зависимости превышения отношения С/П $\Delta Z(f_0, \beta_{и})$ в разное время суток (а – 00:00 ч; б – 04:00 ч; в – 12:00 ч; г – 16:00 ч) при различных уровнях диффузности ионосферы $\beta_{и}$:
1) 10^{-3} ; 2) $5 \cdot 10^{-3}$; 3) 10^{-2} ; 4) $2,5 \cdot 10^{-2}$; 5) $5 \cdot 10^{-2}$.

По мере увеличения уровня диффузности ионосферы ($\beta_{и} = 10^{-2}$, кривая 3; $\beta_{и} = 2,5 \cdot 10^{-2}$, кривая 4; $\beta_{и} = 5 \cdot 10^{-2}$, кривая 5) разность между фактическим и допустимым отношением С/П на входе ПРМ $\Delta Z(f_0, \beta_{и}) = \bar{Z}(f_0) - Z_{доп}(f_0, \beta_{и})$ будет достигать (рис. 5а) максимальных значений на все более низких частотах: $f'_{орч3} \approx 3,2 \text{ МГц} \approx 0,4 f_m$, $f'_{орч4} \approx 2,1 \text{ МГц} \approx 0,25 f_m$, $f'_{орч5} \approx 1,6 \text{ МГц} \approx 0,2 f_m$. При этом сами максимальные значения разности (превышений С/П) будут уменьшаться: $\Delta Z(f_0, \beta_{и})_3 \approx 27 \text{ дБ}$; $\Delta Z(f_0, \beta_{и})_4 \approx 24 \text{ дБ}$; $\Delta Z(f_0, \beta_{и})_5 \approx 21 \text{ дБ}$. Поэтому на этих ОРЧ ($f'_{орч3,4,5}$) согласно рис. 6а достигаются максимальные значения надежности ДКМ связи, равные $D_{св}(f_0, \beta_{и})_3 \approx 0,97$; $D_{св}(f_0, \beta_{и})_4 \approx 0,96$; $D_{св}(f_0, \beta_{и})_5 \approx 0,93$.

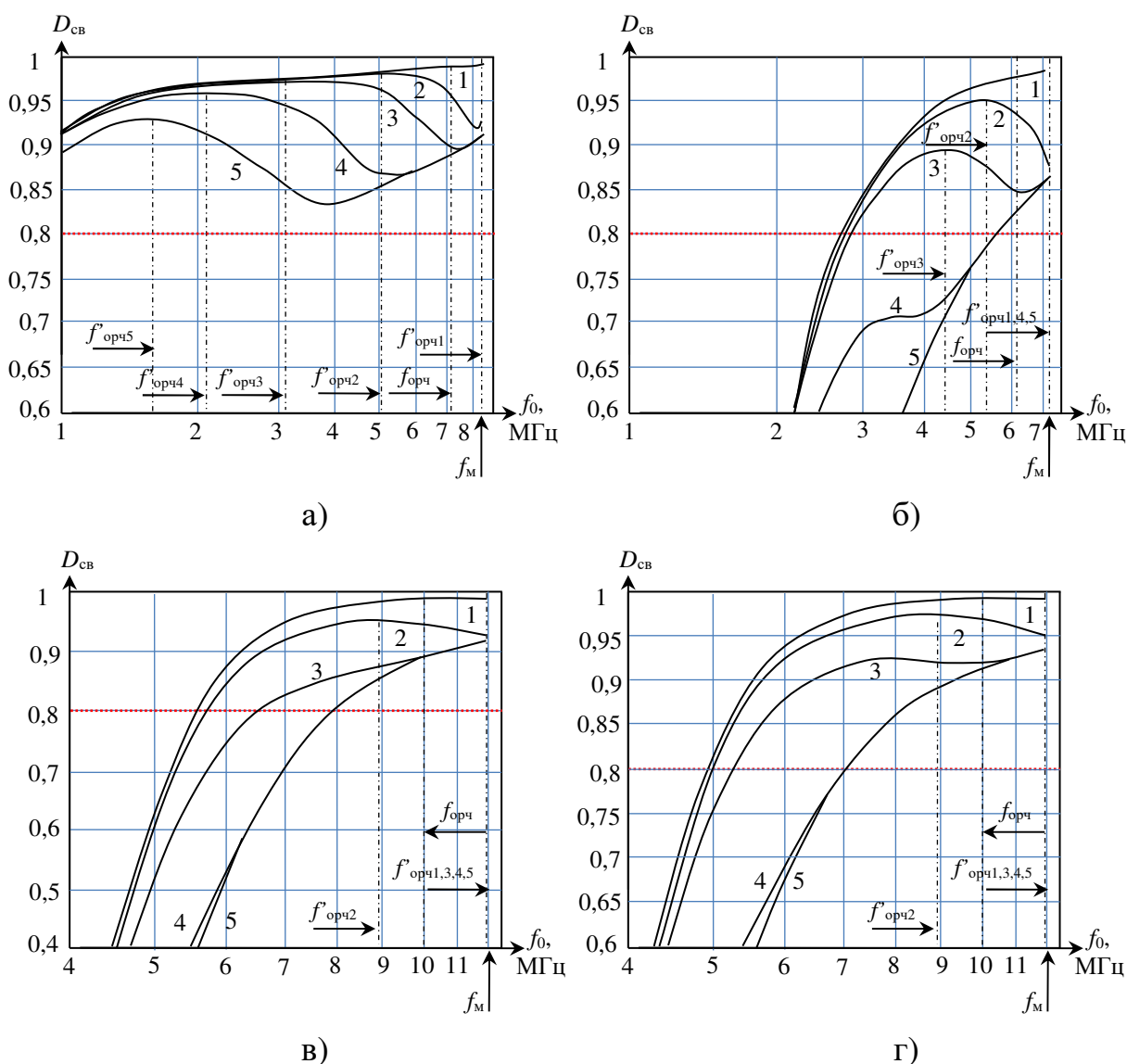


Рис. 6. Частотные зависимости надежности ДКМ связи в различное время суток (а – 00:00 ч; б – 04:00 ч; в – 12:00 ч; г – 16:00 ч) при пяти уровнях диффузности ионосферы $\beta_{и}$: 1) 10^{-3} ; 2) $5 \cdot 10^{-3}$; 3) 10^{-2} ; 4) $2,5 \cdot 10^{-2}$; 5) $5 \cdot 10^{-2}$.

Заметим, что на традиционно выбираемой ОРЧ ($f_{\text{орч}} = 0,85f_m \approx 7,2$ МГц) при умеренной, средней и сильной диффузности ионосферы (кривые 3-5 на рис. 6а) достигается более низкая надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n) \approx 0,89$. Это подтверждает известный [5] качественный вывод о том, что повышение надежности ДКМ связи в условиях диффузности ионосферы можно обеспечить путем понижения рабочей частоты относительно МПЧ.

Анализ рис. 5б, 6б показывает, что в утренние часы (04:00) при слабой диффузности ионосферы ($\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$, кривая 2) при выборе истинной ОРЧ $f_0 = f'_{\text{орч}2} \approx 5,5$ МГц обеспечивается максимальное превышение С/П $\Delta Z(f_0, \beta_n) \approx 23$ дБ и надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n)_2 \approx 0,95$. При умеренной диффузности ионосферы ($\beta_n = 10^{-2}$, кривая 3) при выборе ОРЧ $f_0 = f'_{\text{орч}3} \approx 4,5$ МГц обеспечивается максимальное превышение С/П на входе ПРМ $\Delta Z(f_0, \beta_n) \approx 17$ дБ и надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n)_3 \approx 0,9$. Заметим, что значение $f'_{\text{орч}3} \approx 4,5$ МГц $\approx 0,6f_m$ меньше традиционной ОРЧ ($f_{\text{орч}} = 0,85f_m \approx 6,1$ МГц), на которой достигается более низкая надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n) \approx 0,85$.

При средней и сильной диффузности ионосферы ($\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-2}$, кривая 4; $\beta_n = 5 \cdot 10^{-2}$, кривая 5 на рис. 5б, 6б) понижение рабочей частоты относительно МПЧ не позволит обеспечить повышение надежности ДКМ связи. Это обусловлено тем, что при $\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ разность между фактическим и допустимым отношением С/П на входе ПРМ не имеет максимума на частотах ниже МПЧ ($f_m \approx 7,2$ МГц). Поэтому в утренние часы (04:00) условиях средней и сильной диффузности ионосферы (кривые 4 и 5 на рис. 5б и 6б) необходимо работать ближе к МПЧ ($f_m \approx 7,2$ МГц), где достигаются наибольшие значения превышения С/П $\Delta Z(f_0, \beta_n)_{4,5} \approx 15$ дБ и надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n)_{4,5} \approx 0,86$.

Эти результаты подтверждают известный [10] вывод о возможности повышения надежности ДКМ связи за счет понижения рабочей частоты только при невысоком уровне диффузности ионосферы.

В дневное время суток (12:00 и 16:00) в соответствии с рис. 5в, 5г разность $\Delta Z(f_0, \beta_n) = \bar{Z}(f_0) - Z_{\text{доп}}(f_0, \beta_n)$ между фактическим и допустимым отношением С/П на входе ПРМ имеет лишь один максимум на частотах ниже МПЧ ($f_m \approx 12$ МГц). Он наблюдается при слабой диффузности ($\beta_n = 5 \cdot 10^{-3}$, кривая 2 на рис. 5в, 5г) на истинной ОРЧ $f'_{\text{орч}2} \approx 9$ МГц $\approx 0,75f_m$, где обеспечивается максимальное превышение С/П на входе ПРМ $\Delta Z(f_0, \beta_n) \approx 25$ дБ и согласно рис. 6в, 6г достигается надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n)_2 \approx 0,98$. Заметим, что практически такая же надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_n)_2 \approx 0,98$ обеспечивается и на традиционной ОРЧ $f_0 = f_{\text{орч}} = 0,85f_m \approx 10$ МГц.

В условиях умеренной, средней и сильной диффузности ($\beta_n = 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$, кривые 3-5 на рис. 5в, 5г и 6в, 6г) превышение С/П на входе ПРМ $\Delta Z(f_0, \beta_n)$ и надежность ДКМ связи $D_{св}(f_0, \beta_n)$ не имеют максимума на частотах ниже МПЧ ($f_m \approx 12$ МГц). Поэтому в дневные часы (12:00, 16:00) в условиях умеренной, средней и сильной диффузности ионосферы (кривые 3-5 на рис. 5в, г и 6в, г) необходимо работать ближе к МПЧ ($f_m \approx 12$ МГц), где достигаются наибольшие значения превышения С/П $\Delta Z(f_0, \beta_n)_{3-5} \approx 20$ дБ и надежности ДКМ связи $D_{св}(f_0, \beta_n)_{3-5} \approx 0,92$. Заметим, что почти такая же надежность ДКМ связи $D_{св}(f_0, \beta_n) \approx 0,9$ обеспечивается и на традиционной ОРЧ $f_0 = f_{орч} = 0,85 f_m \approx 10$ МГц.

Отсюда следует, что в дневные часы (12:00, 16:00), когда наблюдается существенный рост критической частоты и поглощения в слое E ионосферы ($L_T \sim f_E / f_0^2$), уменьшение надежности ДКМ связи при возрастании уровня диффузности ионосферы нельзя устранить за счет понижения рабочей частоты относительно МПЧ, поскольку этот путь приводит к уменьшению среднего отношения сигнал/помеха на входе приемника ($\bar{Z}(f_0)$) и снижению надежности ДКМ связи. Поэтому в этих условиях целесообразно работать на традиционной ОРЧ ($f_0 = f_{орч} = 0,85 f_m$).

Заключение

Разработана методика оценки надежности связи в ДКМ радиолинии в зависимости от выбора рабочей частоты с учетом одновременного изменения сигнално-помеховой обстановки и диффузности ионосферы. Она включает 3 этапа определения зависимостей:

- 1) среднего отношения сигнал/помеха $\bar{Z} = \psi\{f_0\}$ от выбора рабочей частоты f_0 ;
- 2) допустимого отношения сигнал/помеха $Z_{доп} = \psi\{f_0, \beta_n, P_{ош.доп}\}$ от рабочей частоты f_0 и диффузности ионосферы β_n ;
- 3) надежности связи в ДКМ радиолинии $D_{св}(f_0, \beta_n) = F[\Delta Z(f_0, \beta_n) / \sigma_Z]$ от выбора рабочей частоты f_0 с учетом возможного изменения сигнално-помеховой обстановки $\bar{Z}(f_0)$ и диффузности ионосферы β_n .

Разработанная методика отличается от ранее известной [9] следующим:

- 1) определением зависимости среднего отношения сигнал/помеха $\bar{Z} = \psi\{f_0\}$ от выбора рабочей частоты f_0 не по графикам МККР, а аналитическим путем в соответствии с методическими рекомендациями МСЭ по прогнозированию медианного уровня напряженности поля сигнала \bar{E}_c и \bar{E}_n для различного времени суток;
- 2) определением зависимости допустимого отношения сигнал/помеха $Z_{доп} = \psi\{f_0, \beta_n, P_{ош.доп}\}$ от рабочей частоты f_0 и интенсивности ионо-

сферных неоднородностей $\beta_{\text{и}}$ в широком диапазоне изменения уровня диффузности ионосферы: $\beta_{\text{и}} = 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$;

- 3) определением зависимости надежности связи в ДКМ радиолинии $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) = F[\Delta Z(f_0, \beta_{\text{и}})/\sigma_Z]$ от выбора рабочей частоты f_0 с учетом одновременного изменения в широких пределах сигнально-помеховой обстановки $\bar{Z}(f_0)$ и уровня диффузности ионосферы $\beta_{\text{и}}$.

Анализ результатов разработки методики позволил сделать следующие выводы:

1. В ночное время (рис. 6а, кривые 2-5) уменьшение рабочей частоты относительно МПЧ является эффективным способом повышения надежности ДКМ связи в условиях диффузности ионосферы. По мере увеличения уровня диффузности ионосферы ($\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$) можно обеспечить максимальные значения надежности ДКМ связи ($D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \approx 0,98 \dots 0,93$) при выборе истинных ОРЧ ($f'_{\text{орч 2-5}} \approx 5 \dots 1,6 \text{ МГц} \approx 0,6 f_{\text{м}} \dots 0,2 f_{\text{м}}$), значения которых существенно ниже традиционной ОРЧ ($f_{\text{орч}} = 0,85 f_{\text{м}} \approx 7,2 \text{ МГц}$), на которой достигается более низкая надежность ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \approx 0,89$.
2. В утреннее время (рис. 6б) уменьшение рабочей частоты может обеспечить повышение надежности ДКМ связи только при небольшом уровне диффузности ионосферы. При слабом ($\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$, кривая 2) и умеренном ($\beta_{\text{и}} = 10^{-2}$, кривая 3) уровне диффузности ионосферы возможно достижение наибольших значений надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}})_2 \approx 0,95$ и $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}})_3 \approx 0,9$ при выборе истинных ОРЧ $f'_{\text{орч 2}} \approx 5,5 \text{ МГц} \approx 0,76 f_{\text{м}}$ и $f'_{\text{орч 3}} \approx 4,5 \text{ МГц} \approx 0,6 f_{\text{м}}$, значения которых меньше традиционной ОРЧ ($f_{\text{орч}} = 0,85 f_{\text{м}} \approx 6,1 \text{ МГц}$), на которой достигаются более низкие надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \approx 0,94 \dots 0,85$. При средней (кривая 4) и сильной (кривая 5) диффузности ионосферы понижение рабочей частоты относительно МПЧ не обеспечивает повышение надежности ДКМ связи. Поэтому целесообразно работать на частотах ближе к МПЧ ($f_{\text{м}} \approx 7,2 \text{ МГц}$), где достигаются наибольшее значение надежности ДКМ связи $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}})_{4,5} \approx 0,86$.
3. В дневное время (рис. 6в, 6г) уменьшение рабочей частоты относительно МПЧ при умеренной, средней и сильной диффузности ионосферы (кривые 3-5) не обеспечивает повышение надежности ДКМ связи из-за возрастания поглощения волны в слое *E* ионосферы. В этих условиях целесообразно работать на частоте ближе к МПЧ ($f_{\text{м}} \approx 12 \text{ МГц}$), где достигается наибольшая надежность ДКМ связи

$D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}})_{3-5} \approx 0,92$, или на традиционной ОРЧ $f_0 = f_{\text{орч}} = 0,85 f_{\text{м}} \approx \approx 10$ МГц, где обеспечивается $D_{\text{св}}(f_0, \beta_{\text{и}}) \approx 0,9$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках выполнения проекта № 18-07-01020.

Литература

1. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные помехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
2. Черенкова Л. Е., Чернышов О. В. Распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
3. Мешалкин В. А., Сосунов Б. В., Филиппов В. В. Поля и волны в задачах разведзащищенности и радиоэлектронной защиты систем связи. – СПб.: ВАС, 1993. – 332 с.
4. Серков В. П., Слюсарев П. В. Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн. Часть 2. Распространение радиоволн. – Л.: ВАС, 1973. – 255 с.
5. Слюсарев П. В. Электромагнитная доступность радиоизлучений и антенные устройства. – Л.: ВАС, 1978. – 108 с.
6. Zawdie K. A., Drob D. P., Siskind D. E., Coker C. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere // Radio Science. 2017. Vol. 52. P. 767-783. doi: 10.1002/2017RS006256.
7. Bakhmetieva N. V., Grigoryev G. I., Tolmacheva A. V., Zhemyakov I. N. Investigations of Atmospheric Waves in the Earth Lower Ionosphere by Means of the Method of the Creation of the Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma // Atmosphere. 2019. Vol. 10. № 450. doi:10.3390/atmos10080450.
8. Zakharenkova I., Astafyeva E. Topside ionospheric irregularities as seen from multisatellite observations // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2015. Vol. 120. P. 807-824. doi: 10.1002/2014JA020330.
9. Пашинцев В. П., Тишкин С. А., Иванников А. И., Солчатов М. Э. Определение оптимальной рабочей и наименьшей применимой частоты декаметровый радиолнии с учетом глубины быстрых замираний // Электросвязь. 2001. № 12. С. 16-19.
10. Руководство по организации ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы на узлах связи Вооруженных сил СССР. – М.: Военное издательство, 1990. – 96 с.
11. Рекомендации МСЭ-R P.533-13. Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий // Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс]. 2015. – URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.533-13-201507-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 01.01.2019).
12. Рекомендации МСЭ-R P.372-12. Радиошум // Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс]

07.2015 – URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-12-201507-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 01.01.2019).

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. P. 418-429. doi: 10.1002/2016SW001593.

14. 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. 38-41.

15. Долуханов М. П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн – М.: Связь, 1971. – 184 с.

16. Пашинцев В. П., Тишкин С. А., Иванников А. И., Боровлев И. И. Расчет параметра глубины замираний в однолучевой ДКМ радиолинии // *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 2001. № 12. С. 57-65.

17. Пашинцев В. П., Грибанов Е. В., Сенокосова А. В., Бибарсов М. Р., Потягов Д. А., Коваль С. А., Белов А. Д., Цимбал В. А., Порсев А. В., Шиманов С. Н. Устройство измерения интенсивности неоднородностей ионосферы // Патент РФ на полезную модель №110841 от 27.11.2011. Бюл. №33.

References

1. Komarov V. F., Sosunov V. N. *Sluchainye pomexhi i nadezhnost' KV svyazi* [Random hindrances and reliability of HF communication]. Moscow, Svyaz' Publ., 1977. 136 p. (in Russian).

2. Cherenkova L. E., Chernyshov O. V. *Rasprostranenie radiovoln* [Propagation of radio waves]. Moscow, Radio and communication Publ., 1984. 272 p. (in Russian).

3. Meshalkin V.A., Sosunov B. V., Filippov V. V. *Polya i volny v zadachah razvedzashchishchennosti i radioelektronnoi zashchity system svyazi* [Fields and waves in the problems of radioprospecting protection and radioelectronic protection of communication systems]. Saint Petersburg, Military academy of communication Publ., 1993. 332 p. (in Russian).

4. Serkov V. P., Slyusarev P. V. *Teoriya elektromagnitnogo polya i rasprostranenie radiovoln. Chast' 2. Rasprostranenie radiovoln* [Theory of electromagnetic field and propagation of radio waves. Part II. Propagation of radio waves]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1973. 255 p. (in Russian).

5. Slyusarev P. V. *Elektromagnitnaya dostupnost' radioizlucheniya i antennoye ustroystvo* [Electromagnetic accessibility of radio emissions and antenna devices]. Leningrad, Military academy of communication Publ., 1978. 108 p. (in Russian).

6. Zawdie K.A., Drob D. P., Siskind D. E., Coker C. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere. *Radio Science*, 2017, vol. 52, pp. 767-783. doi: 10.1002/2017RS006256.

7. Bakhmetieva N. V., Grigoryev G. I., Tolmacheva A. V., Zhemyakov I. N. Investigations of Atmospheric Waves in the Earth Lower Ionosphere by Means of the

Method of the Creation of the Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma. *Atmosphere*, 2019, vol. 10, no. 450. doi: 10.3390/atmos10080450.

8. Zakharenkova I., Astafyeva E. Topside ionospheric irregularities as seen from multisatellite observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, vol. 120, pp. 807-824. doi: 10.1002/2014JA020330.

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

10. *Rukovodstvo po organizatsii ionosferno-volnovoy i chastotno-dispetcherskoy sluzhby na uzlakh svyazi Vooruzhennykh sil SSSR* [Guidelines for the organization of the ionospheric-wave and frequency-dispatch services at communication centers of the Armed Forces of the USSR]. Moscow, Voennoe izdatel'stvo Publ., 1990. 96 p. (in Russian).

11. Recommendation ITU-R P.533-13 (07/2015). Method for the prediction of the performance of HF circuits. P Series. Radiowave propagation. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.533-13-201507-S!!PDF-E.pdf (accessed 01 December 2019).

12. Recommendation ITU-R P.372-12 (07/2015). Radio noise. P Series. Radiowave propagation. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-12-201507-S!!PDF-E.pdf (accessed 01 December 2019).

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. Pashintsev V. P., Omel'chuk A. V., Koval' S. A., Galushko Y. I. Method of irregularity intensity value determination according to ionosphere sounding. *Dual technology*, 2009, no. 1 (46), pp. 38-41 (in Russian).

15. Dolukhanov M. P. *Fluktuacionnie process pri rasprostraneni radiovoln* [Fluctuation processes in the propagation of radio waves]. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 184 p. (in Russian).

16. Pashintsev V. P., Tishkin S. A., Ivannikov A. I., Borovlev I. I. Calculation of the parameter of the depth of fading in a single-beam HF circuit. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2001, no. 12, pp. 57-65 (in Russian).

17. Pashintsev V. P., Griбанov E. V., Senokosova A. V., Bibarsov M. R., Potiagov D. A., Koval' S. A., Belov A. D., Tsimbal V. A., Porsev A. V., Shimanov S. N. *Ustroistvo izmereniya intensivnosti neodnorodnostey ionosfery* [A device for measuring the intensity of ionospheric inhomogeneities]. Patent Russia no. 110841. 2011. (in Russian).

Информация об авторах

Паши́нцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интере-

сов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: pasintsevp@mail.ru

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

Коваль Станислав Андреевич – кандидат технических наук. Начальник кафедры. Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации. Область научных интересов: мониторинг параметров ионосферы. E-mail: _bober_@mail.ru

Киселев Данил Павлович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение надежности декаметрового диапазона связи в условиях диффузной многолучевости. E-mail: dkiselev@ncfu.ru

Сенокосов Михаил Алексеевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение устойчивости декаметрового диапазона связи в условиях диффузной многолучевости. E-mail: m.senokosov@infocom-s.ru

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

Decameter radio line communication reliability dependence of the operating frequency choice taking into account the signal-noise situation and ionosphere diffuseness

V. P. Pashintsev, A. D. Skorik, S. A. Koval',
D. P. Kiselev, M. A. Senokosov

Problem statement: it is known that in a decameter radio line the operating frequency is selected in the range between the highest applicable (by the condition of wave reflection from the ionosphere) and the lowest applicable (by the condition of wave absorption). Reliability calculation of decameter radio link at normal (unperturbed) ionosphere is performed at the optimum operating frequency, selected near the maximum applicable frequency (5 ... 15% lower than it). However, under diffusivity of the ionosphere increasing conditions (i.e., the intensity of ionosphere's small-scale inhomogeneities, which causes an increase in the relative delay of scattered rays and a depth of fading of the received signals), it is recommended to work at frequencies closer to the lowest applicable. At the same time, if ionospheric absorption and noise level increases it is recommended to work at the highest applicable frequencies. **The aim of the work** is to develop a methodology for assessing the reliability of communication in a decameter radio line, depending on the choice of the operating frequency, taking into account the simultaneous change in the signal-noise situation and the diffusivity of the ionosphere. **Novelty.** Theoretical generalization of methods of calculating the reliability of communication in a decameter radio link taking into account some dependences is the novelty of the work. The first dependence is between the average signal-to-noise ratio at the receiver input and the operating frequency (if the permissible signal-to-noise ratio is unchanged) choice. The second dependence is be-

tween the allowable signal-to-noise ratio and the operating frequency and diffusivity level of the ionosphere choice. **Result:** a three-stage technique of assessing the reliability of communication in a decameter radio line depending on the choice of the operating frequency, taking into account the simultaneous change in the average signal-to-noise ratio at the receiver input and the ionosphere diffuseness level is developed. **Practical significance:** at night, an operating frequency decrease in comparison with the highest applicable is an effective way to increase the reliability of decameter communication in the ionosphere diffusion conditions. As the ionosphere diffusion level increases, the maximum values of communication reliability (0.98 ... 0.93) can be ensured when operating frequencies which values are significantly lower (by 40% or more) than the traditional optimal operating frequency (at which lower communication reliability is achieved 0.89) are selected.

Key words: ionosphere, diffusivity, HF-radio link, fading, optimal operating frequency, the highest applicable frequency, reliability of radio.

Information about Authors

Vladimir Petrovich Pashintsev – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: pasintsevp@mail.ru

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

Stanislav Andreevich Koval' – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of Department. Federal State-Treasury Military Educational Institution of Higher Education “Krasnodar Higher Military School named after Army General S.M. Shtemenko”. Field of research: monitoring of ionosphere parameters. E-mail: _bober_@mail.ru

Danil Pavlovich Kiselev – Doctoral student. Postgraduate student of the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: increasing the reliability of decameter communication in the conditions of diffuse multipath. E-mail: dkiselev@ncfu.ru

Mikhail Alekseevich Senokosov – Doctoral student. Postgraduate student of the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: increasing decameter coupling stability under diffuse multipath conditions. E-mail: m.senokosov@infocom-s.ru

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