УДК 621.371.3

Алгоритм расчета интервала частотной корреляции коротковолновой радиолинии с учетом сферичности и мелкомасштабных неоднородностей ионосферы

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

Постановка задачи: известно, что в коротковолновых (КВ) радиолиниях с одним дискретным лучем возникает диффузная многолучевость с относительным временем запаздывания лучей 50...200 мкс. Она определяет интервал частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии 5...20 кГц, что обуславливает возможность повышения скорости передачи до нескольких кбит/с. Есть основания предполагать, что интервал частотной корреляции замираний зависит от выбора рабочей частоты и будет расширяться по мере ее понижения. Поэтому для достижения наибольшей скорости передачи в однолучевой КВ радиолинии необходимо знать зависимость интервала частотной корреляции замираний от выбора рабочей частоты. Известные методики и модели для оценки интервала частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии ограничены рассмотрением плоского отражающего слоя ионосферы с учетом ее диффузности (мелкомасштабных неоднородностей), или учитывают влияния сферичности ионосферы, но без учета ее диффузности. Целью работы является разработка алгоритма расчета интервала частотной корреляции замираний в зависимости от выбора рабочей частоты коротковолновой радиолинии при наличии одного дискретного луча с диффузной многолучевостью, который учитывает влияние сферичности и мелкомасштабных неоднородностей отражающего слоя F ионосферы. Новизна заключается в качественном обосновании причин расширения интервала частотной корреляции замираний при понижении рабочей частоты относительно максимально применимой, которые заключаются в уменьшении относительного времени запаздывания приходящих лучей, сокращении эквивалентного пути распространения волны в слое F и увеличении угла падения волны на нижнюю границу ионосферы. Кроме того, получена совокупность аналитических выражений для определения угла падения волны на нижнюю границу ионосферы, характеристик ее сферичности, путей распространения волны и дифракционного параметра на заданной рабочей частоте, которая позволяет рассчитать интервал частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности ионосферы и диффузной многолучевости. Результат: разработан алгоритм расчета интервала частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии в зависимости от выбора рабочей частоты, который влияние сферичности и мелкомасштабных неоднородностей учитывает (диффузности) отражающего слоя ионосферы. Практическая значимость: применение разработанного алгоритма позволяет при приходе (выделении) одного дискретного луча КВ радиолинии осуществить по данным зондирования параметров слоя F ионосферы выбор рабочей частоты, обеспечивающей существенное (в два раза) увеличение интервала частотной корреляции замираний и, следовательно, скорости передачи.

Ключевые слова: коротковолновая связь, ионосфера, сферичность, мелкомасштабные неоднородности, диффузность, многолучевость, замирания, интервал частотной корреляции.

Библиографическая ссылка на статью:

Reference for citation:

URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2020-02/03-Pashintsev.pdf

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.

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, no. 2, pp. 49-72 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10203.

Введение

Известно [1], коротковолновой (КВ) радиолинии может ЧТО В наблюдаться одна траектория (дискретный луч) распространения волны в точку приема. При этом сигнал на входе приемника практически всегда подвержен интерференционным замираниям (флуктуациям амплитуды и фазы) по причине диффузного рассеяния луча (единичной волны) на мелкомасштабных неоднородностях отражающего слоя F ионосферы и возникновения диффузной многолучевости с максимальным относительным временем запаздывания ∆т_{і тах} ≈ 50…200 мкс [1]. Поэтому интервал частотной корреляции замираний неискаженной передачи) однолучевой КВ радиолинии (или полоса ограничивается значениями $F_{\kappa} \approx 1/\Delta \tau_{i} = 20...5$ кГц. При наличии нескольких (2-3) траекторий (дискретных лучей) распространения волны в точку приема их относительное время запаздывания на дальностях КВ связи R=1500...4000 км составляет $\Delta t_i \approx 1...3$ мс [1-3]. Поэтому интервал частотной корреляции КВ радиолинии с дискретной многолучевостью сужается до $F_{\kappa} \approx 1/\Delta t_i = 1...0,3$ кГц. Поскольку обычно предполагается [1-3], что в КВ радиолинии интервал частотной корреляции составляет $F_{\kappa} \approx 0, 3...1$ кГц, то скорость передачи $c_{\rm T} = T_{\rm c}^{-1}$ простых двоичных сигналов (т. е. с базой $B_{\rm c} = T_{\rm c}F_0 = 1$, где $T_{\rm c}$ и $F_0 = 1/T_c$ – длительность и ширина спектра сигнала) обычно выбирается не выше десятков-сотен бит/с, из-за необходимости выполнения условий одновременного устранения частотно-селективных замираний (ЧСЗ) $F_{\kappa}/F_0 >> 1$ и межсимвольной интерференции (МСИ) $F_{\kappa}/c_{\tau} = T_{c}F_{\kappa} = F_{\kappa}/F_{0} >> 1$ [4, 5].

Применение известного [2] способа выделения (излучения) одного дискретного луча за счет использования узконаправленных приемных (передающих) антенн позволяет обеспечить в КВ радиолинии интервал частотной корреляции $F_{\kappa} \approx 5...20$ кГц. Кроме того, согласно [2, 3] процент времени существования дискретно-однолучевых моделей распространения в КВ радиолинии достаточно велик на дальних радиотрассах (85 % при дальности связи R = 3000 км, 64 % при R = 4000 км и 31 % при R = 1500 км). Поэтому в однолучевых КВ радиолиниях возможно существенное (на порядок и более) увеличение скорости передачи сигналов при выполнении условий отсутствия ЧСЗ и МСИ ($F_{\kappa}/F_0 = F_{\kappa}/c_{\tau} >>1$). Для количественной оценки максимально достижимых значений c_{τ} в однолучевой КВ радиолинии необходимо определение величины интервала частотной корреляции F_{κ} замираний.

Очевидно, что расширение интервала частотной корреляции F_{κ} замираний в однолучевой КВ радиолинии позволит пропорционально увеличить скорость передачи c_{τ} сигналов. При этом есть основания полагать, что расширение F_{κ} можно обеспечить за счет понижения рабочей частоты f_0 относительно максимально применимой (МПЧ) $f_{\rm M}$, поскольку по мере уменьшения отношения $f_0/f_{\rm M}$ снижается глубина замираний в однолучевой КВ

радиолинии [3, 6]. Однако аналитическая зависимость $F_{\kappa} = \psi(f_0)$ для однолучевой КВ радиолинии изучена недостаточно полно.

Обычно интервал частотной корреляции F_{κ} замираний в КВ радиолиниях с многолучевостью (как дискретной, так и диффузной) определяется экспериментально [1, 4]. Известна [5] методика, которая позволяет аналитическими методами оценить величину интервала частотной корреляции $F_{\kappa} = \psi(f_0)$ в зависимости от выбора рабочей частоты в однолучевой КВ радиолинии в предположении плоского отражающего слоя ионосферы (с диффузным рассеянием), но с учетом сферичности Земли. В моделях [7, 8] произведен учет влияния сферичности ионосферы на различные пути распространения волны, что особенно существенно для дальних КВ радиотрасс. Однако, предложенные в [7, 8] методика и алгоритм не позволяют количественно оценить всю совокупность параметров траектории волны в однолучевой КВ радиолинии, необходимую для определения $F_{\kappa} = \psi(f_0)$. Следовательно, известные [5-8] методики и алгоритмы требуют обобщения и уточнения.

Целью статьи является разработка алгоритма расчета интервала частотной корреляции замираний в зависимости от выбора рабочей частоты коротковолновой радиолинии при наличии одного дискретного луча с диффузной многолучевостью, который учитывает влияние сферичности и мелкомасштабных неоднородностей отражающего слоя F ионосферы.

Анализ зависимости интервала частотной корреляции в однолучевой КВ радиолинии от рабочей частоты и параметров и ионосферы

Согласно [6] интервал частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью описывается выражением

$$F_{\kappa} = f_0 / \left(\sigma_{\varphi} \sqrt{2 + d_1^2} \right), \tag{1}$$

где f_0 – несущая (рабочая) частота КВ радиолинии [Гц]; σ_{ϕ} – среднеквадратическое отклонение флуктуаций (искажений) фазового фронта волны на выходе отражающего слоя F ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями [рад]; $d_1^2 \ge 1$ – дифракционный параметр, характеризующий нарастание дифракционных эффектов при удалении фронта волны от отражающего слоя неоднородной ионосферы к точке приема.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуаций фазового фронта волны на выходе слоя F ионосферы в КВ диапазоне описывается выражением общего вида, характерным для трансионосферных радиолиний с мелкомасштабными неоднородностями любых диапазонов частот [6, 9-11]:

$$\sigma_{\varphi} = (80, 8 \pi/c f_0) \beta \bar{N}(h_{or}) \sqrt{2 l_0 L_{g}}, \qquad (2)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ [м/c]}$ – скорость света в вакууме; коэффициент 80,8 имеет в системе СИ размерность [м³/c²]; $\beta \approx 10^{-3} \dots 10^{-2}$ – интенсивность мелкомасштабных неоднородностей ионосферы; l_0 – наибольший размер

ионосферных неоднородностей [м]; L_{3} – эквивалентный однородный путь распространения волны в отражающем слое F ионосферы [м], который соответствует длине воображаемой криволинейной траектории распространения волны в «трубке» от входа до выхода отражающего слоя F ионосферы с неизменной (однородной) по высоте (*h*) средней электронной концентрацией $\overline{N}(h) = \text{const}$, соответствующей ее наибольшему значению на высоте $h = h_{\text{от}}$ отражения волны $\overline{N}(h_{\text{от}})$ [м⁻³].

Для иллюстрации физического смысла термина «эквивалентный однородный путь L_3 распространения КВ в отражающем слое ионосферы» (впервые введенного в статье [6]) на рис. 1 приведены траектории распространения волны КВ диапазона от передатчика (ПРД) к приемнику (ПРМ) по реальному пути в слое F ионосферы L_F и по эквивалентному однородному пути $L_3 < L_F$. Реальный путь L_F определяется как полусумма $L_F = 0.5(L_T + L_{\phi})$ группового (L_T) и фазового (L_{ϕ}) пути [7].



Рис. 1 – Траектории распространения волны КВ диапазона по реальному ($L_{\rm F}$) и эквивалентному однородному ($L_{\rm s}$) пути в слое F ионосферы

Эквивалентный однородный путь L_3 определяется из выражения для полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы (N_T) в трубке сечением 1 м² вдоль реального пути L_F в ионосферном слое F с неоднородной по высоте (*h*) средней электронной концентрацией $\overline{N}(h)$:

$$N_T = \int_{L_F} \overline{N}(h) dl = L_F \overline{N}(L_F) = L_9 \overline{N}(h_{or}),$$

где dl – элементарный участок $L_{\rm F}$; $\bar{N}(L_{\rm F})$ – усредненное вдоль пути $L_{\rm F}$ (т. е. однородное) значение средней электронной концентрации в «трубке»; $L_{\rm s}$ – эквивалентная протяженность «трубки» ($L_{\rm s} < L_{\rm F}$) с однородной средней электронной концентрацией, соответствующей высоте отражения $\bar{N}(h_{\rm orr}) > \bar{N}(L_{\rm F})$.

Входящий в (1) дифракционный параметр определяется согласно выражению [6, 9,10]

$$d_{1}^{2} = \frac{3L^{2} - 3LL_{9} + L_{9}^{2}}{6(2\pi f_{0}/c)^{2}} \left(8l_{0}^{2}l_{i}^{2}\right)^{-1}.$$
(3)

Здесь $L = L_3 + 0.5L_{CB}$ – сумма эквивалентного однородного пути распространения в отражающем F слое и пути распространения волны в свободном пространстве $0.5L_{CB}$ [M] за ионосферой, т. е. от точки выхода из отражающего слоя до точки приема; l_i – наименьший размер ионосферных неоднородностей [M].

Рабочая частота волны, падающей под углом ϕ_0 на нижнюю границу $h = h_0$ сферического отражающего слоя F ионосферы (рис.1), связана с частотой эквивалентной вертикально направленной волны $f_{\rm B} = \left[80, 8 \bar{N} (h_{\rm or}) \right]^{0.5}$ известным [3, 6] соотношением

$$f_{0} = f_{\rm B} K_{\rm s} \sec \varphi_{0} = \left[80, 8 \bar{N} \left(h_{\rm or} \right) \right]^{0.5} K_{\rm s} \sec \varphi_{0}, \qquad (4)$$

где $K_{s} \leq 1 -$ коэффициент сферичности Земли и ионосферы.

Подстановка (4) в выражение (2) позволяет записать выражение для СКО флуктуаций фазы во фронте волны на выходе сферического отражающего слоя F ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями в наиболее наглядном виде [6, 12-16]:

$$\sigma_{\varphi} = \pi \beta f_0 \sqrt{2 l_0 L_{\varphi}} / c K_s^2 \sec^2 \varphi_0 .$$
(5)

Согласно (5) СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы в однолучевой КВ радиолинии возрастает по мере увеличения рабочей частоты волны (и приближения ее к максимально применимой частоте), интенсивности мелкомасштабных неоднородностей ионосферы β (которая характеризует степень диффузности ионосферы [17] и может возрастать до значений $\beta \approx 10^{-1}$), эквивалентного однородного пути распространения волны в отражающем слое ионосферы L_3 , а также уменьшения коэффициента сферичности Земли и ионосферы K_s и угла ϕ_0 падения волны на нижнюю границу сферического отражающего слоя ионосферы.

Поскольку СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы связано прямо пропорциональной зависимостью $\sigma_{\phi} = \omega_0 \sigma_{\tau} = 2\pi f_0 \sigma_{\tau}$ с СКО флуктуаций времени запаздывания различных участков фронта выходной волны

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\varphi} / 2\pi f_0 = \beta \sqrt{2 l_0 L_y} / 2c K_s^2 \sec^2 \varphi_0 , \qquad (6)$$

то выражение (1) для интервала частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью принимает вид:

$$F_{\kappa} = \left(\sigma_{\tau} \sqrt{2 + d_{1}^{2}}\right)^{-1} = \left(\beta \sqrt{2l_{0}L_{9}(2 + d_{1}^{2})} / 2cK_{s}^{2}\sec^{2}\varphi_{0}\right)^{-1}.$$
 (7)

Анализ выражений (6) и (7) показывает, что СКО флуктуаций времени запаздывания σ_{τ} различных участков фронта выходной волны и интервал частотной корреляции F_{κ} замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью не зависит в явном виде от выбора рабочей частоты f_0 волны.

Заметим, что интервал частотной корреляции замираний связан известной [17-19] зависимостью $F_{\kappa} = (2\pi\sigma_{\tau(r)})^{-1} \approx (\Delta\tau_{i\max})^{-1}$ с СКО разброса времени запаздывания принимаемого сигнала $\sigma_{\tau(r)}$ в трансионосферном многолучевом канале (аналог $\Delta\tau_{i\max}$). Поэтому в соответствии с выражениями (6, 7) флуктуации времени запаздывания принимаемого сигнала $\sigma_{\tau(r)} \sim \Delta\tau_{i\max} \sim F_{\kappa}^{-1}$ в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью также не зависят в явном виде от выбора рабочей частоты (f_0) волны:

$$\sigma_{\tau(r)} = \left(2\pi F_{\kappa}\right)^{-1} = \sigma_{\tau} \sqrt{2 + d_1^2} / 2\pi = \beta \sqrt{2 l_0 L_3 (2 + d_1^2)} / 4\pi c K_s^2 \sec^2 \varphi_0 .$$
(8)

Однако, при заданной дальности КВ связи пути распространения волны в ионосфере (в том числе и эквивалентный путь L_3), угол φ_0 падения волны на нижнюю границу сферического отражающего слоя ионосферы и другие параметры (K_s) должны зависеть от выбора f_0 . Поэтому и интервал частотной корреляции F_{κ} замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью должен зависеть от выбора рабочей частоты f_0 волны.

Модель распространения волны в однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности и диффузности ионосферы

Для наглядности определения зависимости σ_{ϕ} и $F_{\kappa} \sim (\sigma_{\tau(r)})^{-1} \sim (\Delta \tau_{i\max})^{-1}$ от выбора от выбора рабочей частоты f_0 волны на рис. 2 приведены модель диффузной ионосферы и процесс распространения волны в КВ радиолинии с учетом сферичности и диффузности ионосферы.

Заметим, что согласно определению [20], диффузность – это явление, связанное с возникновением неоднородностей различных масштабов в области F ионосферы и приводящее к рассеянию радиоволн и искажению формы зондирующих сигналов. Отсюда следует, диффузность ионосферы должна оцениваться по характеристикам мелкомасштабных (т. е. с размерами $l \sim 10...10^3$ м) неоднородностей электронной концентрации (ЭК).

На рис. 2 представлено изменение ЭК по высоте N(h) в слоях (D, E, F) нормальной (рис. 2 a, б) и диффузной (рис. 2 в, г) ионосферы. В нормальной ионосфере, когда неоднородностями ЭК можно пренебречь, типовая зависимость N(h) будет иметь вид, представленный на рис. 2а. С ростом высоты N(h) возрастает до величины $N(h_m)$ на высоте максимума ионизации h_m , а при $h > h_m$ происходит спад ЭК, т. е. $N(h) < N(h_m)$. Это также можно представить в виде градиента изменения фона на рис. 26 и 2г.





Рис. 2 – Изменение электронной концентрации в нормальной (а, б) и диффузной (в, г) ионосфере

В диффузной ионосфере (рис. 2в, 2г) изменение ЭК описывается суммой $N(h,\rho) = N(h) + \Delta N(h,\rho)$ среднего (фонового) значения N(h) = N(h)И мелкомасштабных флуктуаций ЭК $\Delta N(h,\rho)$ по высоте и горизонтальным неоднородностях ионосферы. Величина координатам $\rho = (x, y)$ В СКО $\Delta N(h,\rho)/\overline{N}(h)$ ЭК флуктуаций остается относительных практически неизменной на любой высоте h ионосферы (включая высоту максимальной ионизации h_m) и характеризует интенсивность мелкомасштабных неоднородностей [3]:

$$\beta = \left(\overline{\Delta N(\rho, h)^{2}}\right)^{0.5} / \overline{N}(h) = \sigma_{\Delta N}(h) / \overline{N}(h) =$$

= $\sigma_{\Delta N}(h_{m}) / \overline{N}(h_{m}) \approx const.$ (9)

что В статье [21] обосновано, ПО величине интенсивности мелкомасштабных неоднородностей целесообразно оценивать уровень β диффузности ионосферы. При диффузности ионосферы (степень) мелкомасштабных неоднородностей интенсивность может существенно возрастать (до $\beta = 10^{-2}...10^{-1}$) по сравнению с нормальной ионосферой (когда $\beta = 10^{-3} \dots 10^{-2}$).

На рис. З представлен процесс распространения волны с рабочей частотой f_0 через диффузную ионосферу в однолучевой КВ радиолинии, который объясняет зависимости σ_{ϕ} и $F_{\kappa} \sim f_0 / \sigma_{\phi}$ от выбора рабочей частоты f_0 .

По мере возрастания рабочей частоты f_0 и приближения ее к максимально применимой частоте $f_{\rm M} = \left[80, 8 \bar{N}(h_m) \right]^{0.5} K_{\rm s} \sec \phi_0$ высота отражения $(h_{\rm or})$ волны приближается к максимальному значению $h_{\rm or} = h_m$, где флуктуации ЭК в мелкомасштабных неоднородностях $\Delta N(h_m, \rho) > \Delta N(h_{\rm or}, \rho)$ будут больше, чем на более низкой частоте $f_0 = \left[80, 8 \bar{N}(h_{\rm or}) \right]^{0.5} K_{\rm s} \sec f_0 \phi_0 < f_{\rm M}$ и высоте отражения $h_{\rm or} < h_m$.



Рис. 3. Процесс распространения волны в однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности и диффузности ионосферы

Поэтому приходящая к нижней границе слоя F ионосферы (h_0) под углом ϕ_0 волна с рабочей f_0 будет иметь плоский фазовый фронт $\phi(f_0, h_0)$, а ее дальнейшее распространение сопровождается возрастанием пространственных

флуктуаций фазового фронта $\Delta \varphi(f_0, h, \rho) \sim \Delta N(h, \rho)$ до наибольшего значения на высоте отражения $\Delta \varphi(f_0, h_{or}, \rho) \sim \Delta N(h_{or}, \rho)$. Эти флуктуации сохраняются до выхода из слоя F и описываются СКО согласно выражению (5) $\sigma_{\varphi} = \left(\overline{\Delta \varphi(f_0, h_{or}, \rho)^2}\right)^{0.5} = \pi \beta f_0 \sqrt{2 l_0 L_3} / c K_s^2 \sec^2 \varphi_0$.

Пространственные флуктуации фазового фронта на высоте отражения и выходе слоя F ионосферы $\Delta \varphi(f_0, h_{or}, \rho) = \omega_0 \Delta \tau(f_0, h_{or}, \rho)$ определяют относительные фазовые сдвиги различных элементарных участков (ρ_i) на поверхности фронта выходной волны $\Delta \varphi(f_0, h_{or}, \rho_i)$ и относительные временные сдвиги этих участков волны $\Delta \tau(f_0, h_{or}, \rho_i) = \Delta \varphi(f_0, h_{or}, \rho_i)/\omega_0$.

Дальнейшее распространение этой волны за ионосферой в свободном пространстве на расстояние $0,5L_{c_B}$ можно описать в виде множества (i = 1...M) лучей (на рис. 3 показаны три из них), образованных элементарными участками (ρ_i) фронта выходной волны с временными сдвигами $\Delta \tau (f_0, h_{or}, \rho_i)$ и приходящих в точку размещения приемника (ПРМ) с относительными временными сдвигами $\Delta \tau_i \sim \Delta \tau (f_0, h_{or}, \rho_i)$.

Напомним, что СКО флуктуаций временных запаздываний во фронте волны на выходе ионосферы $\Delta \tau (f_0, h_{or}, \rho_i)$ и приходящих в точку приема лучей $\Delta \tau_i$ описываются выражениями (6) и (8), в которых отсутствует зависимость от выбора рабочей частоты f_0 :

$$\sigma_{\tau} = \left(\overline{\Delta\tau(f_0, h_{o\tau}, \rho_i)^2}\right)^{0.5} = \beta \sqrt{2 l_0 L_3} / 2c K_s^2 \sec^2 \varphi_0;$$

$$\sigma_{\tau(r)} = \left(\overline{\Delta\tau_i^2}\right)^{0.5} = \left(2\pi F_\kappa\right)^{-1} = \sigma_\tau \sqrt{2 + d_1^2} / 2\pi = \beta \sqrt{2 l_0 L_3 (2 + d_1^2)} / 4\pi c K_s^2 \sec^2 \varphi_0.$$

В этой связи покажем, что при заданной дальности КВ связи пути распространения волны в ионосфере (в т. ч. и эквивалентный путь L_3) и угол φ_0 падения волны на нижнюю границу сферического отражающего слоя ионосферы, а следовательно, и интервал частотной корреляции F_{κ} замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью, существенно зависят от выбора f_0 .

Обоснование зависимости интервала частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии от выбора рабочей частоты

Согласно рис. 4 при работе на МПЧ ($f_{_{\rm M}}$) отражение волны происходит на высоте h_m с максимальными флуктуациями ЭК $\Delta N(h_m, \rho) > \Delta N(h, \rho)$ и временные флуктуации фронта выходной волны $\Delta \tau(f_{_{\rm M}}, h_m, \rho_i) > \Delta \tau(f_0, h_{_{\rm oT}}, \rho_i)$ будут больше, чем при отражении волны с рабочей частотой $f_0 < f_{_{\rm M}}$ на высотах $h_{_{\rm oT}} < h_m$ ниже максимальной. Поэтому на МПЧ относительное время запаздывания приходящих в точку приема лучей $\Delta \tau_i(f_{_{\rm M}}) > \Delta \tau_i(f_0)$ будет больше времени запаздывания приходящих в точку приема лучей с частотой $f_0 < f_{\rm M}$ ниже МПЧ. Основной причиной увеличения относительных запаздываний приходящих лучей при работе на МПЧ ($f_{\rm M}$) является увеличение реального пути $L_F(f_{\rm M})$ распространения волны в слое F ионосферы с максимальными флуктуациями ЭК $\Delta N(h_m, \rho) > \Delta N(h_{\rm or}, \rho)$ по сравнению с реальным путем распространения волны ионосферы на более низкой частоте $L_F(f_0 < f_{\rm M})$. Поэтому эквивалентный путь распространения волны на МПЧ тоже будет больше, чем на более низкой частоте $L_g(f_M) > L_g(f_0)$. Кроме того, при неизменной дальности КВ связи (R) и работе на МПЧ уменьшается угол падения (ϕ_0) волны на ионосферу ($\phi_{0,\rm MRY} < \phi_0$).

Таким образом, согласно рис. 4 при заданной дальности КВ связи (R) по мере понижения рабочей частоты (f_0) относительно МПЧ ($f_{\rm M}$) реальный L_F и эквивалентный L_3 пути распространения волны в слое F должны уменьшаться, а угол φ_0 падения волны на нижнюю границу сферического отражающего слоя F ионосферы – возрастать.

Поэтому относительное время запаздывания приходящих в точку приема лучей $\Delta \tau_i(f_0) < \Delta \tau_i(f_M)$ будет меньше, чем на МПЧ и интервал частотной корреляции $F_{\kappa} \sim 1/\sigma_{\tau(r)} \sim 1/\Delta \tau_{i\max}$ замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью (7, 8) $F_{\kappa} \sim \sec^2 \varphi_0 / \sqrt{L_3(2+d_1^2)}$ при понижении рабочей частоты f_0 должен расширяться.



Рис. 4. Анализ относительного запаздывания приходящих лучей ($\Delta \tau_i$) в КВ радиолинии при работе на МПЧ ($f_{\rm M}$) и пониженной рабочей частоте ($f_0 < f_{\rm M}$)

В отличие от L_3 , при понижении f_0 входящий в (7) дифракционный параметр (3) $d_1^2 \sim L/f_0^2 \sim (L_3 + 0.5L_{cB})/f_0^2$ возрастает, что обуславливает сужение F_{κ} .Следовательно, для расчета интервала F_{κ} частотной корреляции КВ

радиолинии с одним дискретным лучом с учетом сферичности отражающего слоя F и диффузного рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы согласно выражениям (2-7) необходимо, прежде всего, определить аналитические зависимости от выбора рабочей частоты f_0 значений L_3 и ϕ_0 , а также K_s и L_{c_B} .

Расчет интервала частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности и диффузности ионосферы

Выражения для расчета коэффициента сферичности и эквивалентного однородного пути распространения волны с рабочей частотой f_0 в сферическом отражающем слое F ионосферы однолучевой KB радиолинии приведены в [7]:

$$K_{\rm s} = \left\{ 1 + \frac{2 f_{\rm kp}^2 C_1 (1 - C_1)}{f_0^2 \cos^2 \varphi_0} \left[1 - \left(1 - \frac{f_0^2 \cos^2 \varphi_0}{f_{\rm kp}^2 C_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}};$$
(10)

$$L_{s} = \frac{L_{\rm F}}{2} \left[1 + \frac{f_{\rm kp}^2 C_1 (4-3C_1)}{f_0^2 \cos^2 \varphi_0} - \frac{2Z_{\rm m} (4-3C_1)}{L_{\rm F} \cos \varphi_0} \right] K_{\rm s}^2.$$
(11)

Здесь $f_{\kappa p} = \left[80, 8 \overline{N(h_m)} \right]^{0.5}$ – критическая частота отражающего слоя ионосферы [Гц] на высоте $h_m = h_0 + z_m$ с максимальным средним значением электронной концентрации $\overline{N(h_m)}$, где Z_m – полутолщина отражающего слоя F ионосферы [м];

$$C_{1} = 1 - \frac{f_{0}^{2}}{f_{\kappa p}^{2}} \frac{Z_{m} \sin^{2} \varphi_{0}}{R_{3} + h_{0}} \le 1$$
(12)

– коэффициент, характеризующий степень понижения $f_{\kappa p}$ в сферическом отражающем слое F ионосферы по сравнению с плоским; $R_3 \approx 6370 \cdot 10^3$ [м] – радиус Земли;

$$L_{\rm F} \approx L_{\rm r} - \frac{L_{\rm r}}{4\sec^2\varphi_0} - \frac{L_{\rm r}}{4} \frac{f_{\rm kp}^2}{f_0^2} C_1(4-3C_1) + \frac{Z_{\rm m}(4-3C_1)}{2\sec\varphi_0};$$
(13)

$$L_{\rm r} = Z_{\rm m} \frac{f_0}{f_{\rm \kappa p}} \ln \frac{1 + f_0 \cos \varphi_0 / f_{\rm \kappa p} C_1}{1 - f_0 \cos \varphi_0 / f_{\rm \kappa p} C_1}$$
(14)

– реальный $(L_{\rm F})$ и групповой $(L_{\rm r})$ пути распространения волны в сферическом отражающем слое F ионосферы [м].

Исходя из геометрии распространения волны в свободном пространстве за ионосферой, можно определить ее путь L_{cB} от точки выхода из отражающего слоя F до точки приема как:

$$L_{_{\rm CB}} = \frac{R_3}{\sin\varphi_0} \sin\gamma = \frac{R_3}{\sin\varphi_0} \sin\left\{\arcsin\left[\sin\varphi_0\left(1 + \frac{h_0}{R_3}\right)\right] - \varphi_0\right\},\tag{15}$$

URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2020-02/03-Pashintsev.pdf

где γ – геоцентрический угол [рад], соответствующий прямолинейному пути волны от точки выхода из отражающего слоя до точки приема длиной $L_{_{CB}}$.

Для расчета значений $C_1(12)$, $K_s(10)$, L_r (14), L_F (13), L_s (11), L_{cB} (15), $d_1^2(3)$ и $\sigma_{\phi}(5)$, определяющих интервал F_{κ} (1) частотной корреляции КВ радиолинии с одним дискретным лучом с учетом сферичности и диффузного рассеяния отражающего слоя F, необходимо определить угол падения ϕ_0 волны на нижнюю границу (h_0) отражающего слоя F ионосферы. Получение аналитического выражения для ϕ_0 в случае учета сферичности Земли и ионосферы является достаточно сложной задачей. Однако согласно [22] угол ϕ_0 можно определить, если предварительно найти функциональную зависимость $R = \Psi(\phi_0)$ дальности KB связи R (по поверхности Земли) от угла ϕ_0 при известных значениях рабочей частоты f_0 и параметров отражающего слоя ионосферы (h_0 , Z_m , $f_{\kappa p}$) и заданной дальности связи $R = R_{3ag}$.

Согласно [20] дальность КВ связи по Земле R складывается из участков R_1 и R_2 , соответствующих ионосферной и внеионосферной частям ее траектории, и определяется как

$$R = R_{1} + R_{2} \approx \frac{R_{3}}{R_{3} + h_{0}} \sin \varphi_{0} \frac{f_{0}}{f_{\kappa p}} Z_{m} \cdot \ln \left[\frac{\left(1 - \frac{f_{0}^{2}}{f_{\kappa p}^{2}} \frac{Z_{m} \sin^{2} \varphi_{0}}{R_{3} + h_{0}} + \frac{f_{0}}{f_{\kappa p}} \cos \varphi_{0}\right)}{\left(1 - \frac{f_{0}^{2}}{f_{\kappa p}^{2}} \frac{Z_{m} \sin^{2} \varphi_{0}}{R_{3} + h_{0}} - \frac{f_{0}}{f_{\kappa p}} \cos \varphi_{0}\right)} \right] + 2R_{3} \left[\operatorname{ctg} \varphi_{0} - \left(\operatorname{ctg}^{2} \varphi_{0} - 2h_{0}/R_{3}\right)^{\frac{1}{2}} \right].$$
(16)

В соответствии с функциональной зависимостью (16) $R = \Psi(\varphi_0)$ при заданной рабочей частоте f_0 и известных параметрах ионосферы $(h_0, Z_m, f_{\kappa p})$ можно графическим путем или численными методами определить угол φ_0 падения волны на сферическую ионосферу, который соответствует заданной дальности КВ связи $R = R_{3an}$.

Приведем пример расчета интервала частотной корреляции F_{κ} (7) однолучевой КВ радиолинии для различных значений рабочей частоты f_0 на основе определения угла ϕ_0 падения волны на нижнюю границу отражающего слоя F ионосферы согласно зависимости (16) для $R = \Psi(\phi_0)$ при заданной дальности связи $R = R_{3ad}$ и в соответствии с выражениями C_1 (12), L_r (14), L_F (13), K_s (10), L_s (11), L_{cB} (15), d_1^2 (3), σ_{ϕ} (5) и $\sigma_{\tau(r)}$ (8).

Для дальности связи $R_{_{3ад}} = 3000$ км и типовых [2, 3, 9-14, 16, 20] параметров неоднородного слоя F2 ионосферы ($h_0 = 300$ км, $Z_m = 200$ км, $f_{_{\rm KP}} = 5,7$ МГц, $l_0 = 390$ м, $l_i = 10$ м, $\beta = 10^{-2}$) изменения указанных характеристик волны в однолучевой КВ радиолинии при различных значениях f_0 приведены в таблице 1.

Анализ результатов, представленных в таблице 1, показывает следующее. По мере понижения в однолучевой КВ радиолинии рабочей частоты относительно значения максимально применимой частоты, равной $f_{\rm M}$ =12,37 МГц, в диапазоне от f_0 =12,3...6,18 МГц происходит незначительное увеличение значения угла ϕ_0 , при котором обеспечивается заданная дальность связи $R_{3a\pi} = 3000$ км. При этом значения коэффициентов C_1 (12) и K_s (10) будут возрастать, приближаясь к 1 (что объясняется уменьшением высоты отражения волны h_{or} и снижением степени влияния сферичности отражающего слоя ионосферы) Протяженности группового и реального путей распространения волны в отражающем слое F ионосферы $L_{\rm F}$ (14) и $L_{\rm F}$ (13) будут уменьшаться, вследствие чего и эквивалентный однородный путь (11) существенно уменьшится (с L_3 =799 км до 102 км). Уменьшение значений f_0 и $\sqrt{L_3}$ в числителе и увеличение K_s^2 и sec² ϕ_0 в знаменателе выражения (5) обуславливают значительное снижение СКО флуктуаций фазы во фронте волны на выходе сферического неоднородного отражающего слоя ионосферы. Уменьшение σ_{o} с понижением рабочей частоты f_0 обеспечивает согласно (8) уменьшение $\sigma_{\tau(r)}$ и расширение интервала частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии (7, 8) $F_{\kappa} = (2\pi\sigma_{\tau(r)})^{-1}$, несмотря на некоторое возрастание дифракционных эффектов во фронте принимаемой волны (т. е. увеличение d_1^2 (3) из-за роста $L_{c_{\rm R}}$ (15)).

f_0 ,	φ ₀ ,	C	$L_{ m r}$,	$L_{\rm F}$,	K	$L_{_{\!\mathfrak{I}}}$,	$L_{\rm cb}$,	d^2	$\sigma_{_{\phi}}$,	$\sigma_{\tau(r)},$	γ^2	F_{κ} ,
ΜГц	град	\sim_1	КМ	КМ	× s	КМ	КМ	a_1	рад	мкс	Ŷ	кГц
12,3	69,15	0,878	1168	1104	0,918	799	1061	$1,4.10^{5}$	4,84	23,4	$7 \cdot 10^{-11}$	6,91
11,13	70,86	0,898	698	668	0,939	465	1254	$1,7.10^{5}$	2,71	15,9	6.10-4	10,03
9,89	71,41	0,919	483	465	0,954	319	1346	$2,2.10^{5}$	1,82	13,7	0,04	11,63
8,66	71,71	0,938	341	329	0,966	223	1408	$2,9.10^{5}$	1,26	12,4	0,26	12,76
7,42	71,91	0,954	236	228	0,976	154	1454	$4 \cdot 10^{5}$	0,86	11,5	0,92	13,62
6,18	72,03	0,968	156	151	0,983	102	1490	$5,8.10^{5}$	0,57	11,1	2,6	14,28

Таблица 1 – Расчет параметров однолучевой КВ радиолинии

Графики зависимостей СКО флуктуаций фазы во фронте волны на выходе ионосферы $\sigma_{\phi} = \psi(f_0)$ (сплошная линия) и интервала частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии $F_{\kappa} = \psi(f_0)$ (пунктирная линия) от выбора рабочей частоты f_0 представлены на рис. 5.

Анализ рис. 5 показывает, что по мере приближения рабочей частоты однолучевой КВ радиолинии к МПЧ ($f_{\rm M}$ =12,37 МГц) флуктуации фазы во

фронте выходной волны возрастают с $\sigma_{\phi} \approx 0.57$ до 4,8 рад. Это приведет к возрастанию параметра райсовского распределения общих замираний принимаемых сигналов, определяемого как [6, 12, 14-16]

$$\gamma^2 = \left[\exp(\sigma_{\varphi}^2) - 1 \right]^{-1} \ge 0, \qquad (17)$$

с величины $\gamma^2 \approx 2,6$ до $\gamma^2 \approx 7 \cdot 10^{-11}$, что практически соответствует случаю возникновения общих замираний релеевского типа (когда $\gamma^2 = 0$). Кроме того, интервал частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии сузится в 2 раза: с $F_{\kappa} \approx 14,3$ кГц до 6,9 кГц.



Рис. 5. Зависимости флуктуаций фазы во фронте волны на выходе неоднородной ионосферы (сплошная линия) и интервала частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии (пунктирная линия) от выбора рабочей частоты

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что корреляции однолучевой расчетные значения интервала частотной КΒ радиолинии ($F_{\kappa} \approx 6,91...14,28$ кГц), ограниченного вследствие диффузной многолучевости, типовых параметров сферического неоднородного для слоя ионосферы И различных значений отражающего f_{0} примерно соответствуют известным [1] экспериментальным данным ($F_{\kappa} \approx 5...20$ кГц).

Алгоритм расчета интервала частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии

Таким образом, в статье разработан алгоритм расчета интервала F_{κ} частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности неоднородного отражающего слоя ионосферы в условиях диффузной многолучевости на основе определения угла φ_0 (согласно выражению (16)) и совокупности аналитических выражений (12, 14, 13, 10, 11, 15, 3, 5-8).

Этот алгоритм (рис. 6.) включает в себя следующие этапы:

1. На базе измерения станцией вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) высотно-частотных характеристик (ВЧХ) слоя F ионосферы ($f_{\kappa p}, h_0, Z_m$) для выбранных значений рабочих частот f_0 однолучевой КВ радиолинии можно установить ряд функциональных зависимостей $R = \Psi(\varphi_0, f_0)$.

2. Для выбранных рабочих частот f_0 графическим путем или численными методами возможно определить угол φ_0 падения волны на нижнюю границу отражающего слоя F ионосферы, соответствующий заданной дальности KB связи $R = R_{_{3ад}}$.

3. Для найденного значения угла ϕ_0 падения волны с частотой f_0 на нижнюю границу отражающего слоя F ионосферы с известными параметрами $(f_{\kappa p}, h_0, Z_m)$, обеспечивающего заданную дальность KB связи $R = R_{_{3ад}}$, определяется коэффициент, характеризующий степень понижения $f_{\kappa p}$ в сферическом отражающем слое F ионосферы по сравнению с плоским (12) $C_1 = \psi(f_0, \phi_0, f_{\kappa p}, h_0, Z_m)$.

4. С учетом $C_1 = \psi(f_0, \phi_0, f_{\kappa p}, h_0, Z_m)$ определяются групповой (14) $L_{\Gamma} = \psi(f_0, \phi_0, f_{\kappa p}, h_0, Z_m, C_1)$ и реальный (13) $L_{\Gamma} = \psi(L_{\Gamma}, f_0, \phi_0, f_{\kappa p}, h_0, Z_m)$ пути распространения волны в сферическом отражающем слое F ионосферы, а также коэффициент сферичности Земли и ионосферы (10) $K_s = \psi(f_0, \phi_0, f_{\kappa p}, h_0, Z_m, C_1)$.

5. С учетом этих зависимостей определяется длина эквивалентного однородного пути распространения волны в сферическом отражающем слое F ионосферы однолучевой KB радиолинии (11) $L_{_{3}} = \psi(L_{_{F}}, L_{_{r}}, f_0, \phi_0, f_{_{kp}}, h_0, Z_{_{m}}, C_1, K_s)$.

6. По найденному углу ϕ_0 падения волны на нижнюю границу слоя F ионосферы и высоте этой границы h_0 определяется путь волны в свободном пространстве за ионосферой от точки выхода из слоя до точки приема (15) $L_{c_B} = \psi(\phi_0, h_0)$.



Рис. 6. Алгоритм расчета интервала частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии

значениям 7. По найденным эквивалентного однородного ПУТИ распространения волны с частотой f_0 в сферическом отражающем слое F однолучевой ионосферы КΒ радиолинии (11) $L_{3} = \psi(L_{F}, L_{F}, f_{0}, \phi_{0}, f_{\kappa p}, h_{0}, Z_{m}, C_{1}, K_{s})$ и суммы $L = L_{3} + L_{cb}$ ЭТОГО пути с протяженностью распространения волны в свободном пространстве за ионосферой (15) $L_{c_{B}} = \psi(\phi_{0}, h_{0})$ с учетом известных размеров (наименьших l_{i} и наибольших l_0) ионосферных неоднородностей определяется дифракционный параметр (3) $d_1^2 = \psi(f_0, L_2, L_3, l_1, l_0)$.

8. Для выбранной рабочей частоты f_0 и найденным значениям угла ϕ_0 падения волны на нижнюю границу отражающего слоя F ионосферы, коэффициента сферичности Земли и ионосферы (10) $K_s = \psi(f_0, \phi_0, f_{\kappa p}, h_0, Z_m, C_1)$ и эквивалентного однородного пути распространения волны с частотой f_0 в отражающем сферическом слое F ионосферы (11) $L_{2} = \psi(L_{F}, L_{F}, f_{0}, \phi_{0}, f_{KD}, h_{0}, Z_{m}, C_{1}, K_{s})$ определить СКО флуктуаций фазы во фронте волны на выходе сферического отражающего слоя F ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями (c известными значениями ИХ наибольших размеров интенсивности β) (5) l_0 И согласно $\sigma_{0} = \psi(f_{0}, \phi_{0}, K_{s}, L_{s}, l_{0}, \beta).$

9. На основе определения СКО флуктуаций времени запаздывания различных участков фронта волны на выходе ионосферы (6) $\sigma_{\tau} = \sigma_{\phi}/2\pi f_0$ определяется СКО времени запаздывания приходящих в точку приема лучей (8) $\sigma_{\tau(r)} = \sigma_{\tau} \sqrt{2 + d_1^2}/2\pi = \psi(f_0, \phi_0, K_s, L_s, l_0, \beta)$.

10. Для выбранной рабочей частоты f_0 и найденным значениям СКО флуктуаций времени запаздывания приходящих в точку приема лучей (8) $\sigma_{\tau(r)}$ определяется интервал частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности ионосферы и диффузной многолучевости (7, 8) $F_{\kappa} = (2\pi\sigma_{\tau(r)})^{-1} = \psi(f_0, \sigma_{\tau}, d_1^2)$.

Заключение

Анализ полученных выше результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Анализ полученных выражений (7, 8) показывает, что интервал частотной корреляции $F_{\kappa} = \psi(L_3, \phi_0)$ замираний в однолучевой КВ радиолинии с диффузной многолучевостью не зависит в явном виде от выбора рабочей частоты f_0 волны и определяется протяженностью эквивалентного однородного пути L_3 распространения волны в слое F ионосферы и углом падения ϕ_0 на него волны. Однако согласно рис. 4 при понижении рабочей частоты (f_0) относительно МПЧ (f_m) уменьшается относительное время запаздывания

приходящих в точку приема лучей $\Delta \tau_i(f_0) < \Delta \tau_i(f_M)$,сокращаются реальный L_F и эквивалентный L_5 пути распространения волны в слое F и возрастает угол φ_0 падения волны на нижнюю границу слоя F ионосферы, что обуславливает расширение интервала частотной корреляции F_{κ} замираний в однолучевой KB радиолинии.

2. На основе определения угла φ_0 падения волны на нижнюю границу отражающего слоя F ионосферы согласно зависимости (16) для $R = \Psi(\varphi_0)$ при заданной дальности связи $R = R_{_{3ад}}$ и в соответствии с аналитическими выражениями для характеристик сферичности слоя F ионосферы (K_s (10), C_1 (12)), путей распространиеия волны (L_r (14), L_F (13), L_s (11), $L_{_{CB}}$ (15)) и дифракционного параметра d_1^2 (3) на заданной рабочей частоте f_0 можно рассчитать интервал частотной корреляции $F_{_{K}}$ замираний в однолучевой KB радиолинии с учетом сферичности ионосферы и диффузной многолучевости согласно (7, 8) и данных табл. 1.

3. Анализ результатов таблицы 1, показывает, что по мере понижения в однолучевой КВ радиолинии рабочей частоты относительно значения максимально применимой частоты $f_{\rm M} = 12,37~{\rm M}$ Гц до $f_0 = 6,18~{\rm M}$ Гц происходит увеличение угла ϕ_0 , при котором обеспечивается заданная дальность связи $R_{_{3ад}} = 3000$ км. При этом значения коэффициентов сферичности $K_{_{s}}$ и $C_{_{1}}$ будут возрастать, протяженности группового $L_{\rm r}$, реального $L_{\rm F}$ и эквивалентного $L_{\rm s}$ путей распространения волны в отражающем слое F ионосферы будут уменьшаться. Это обуславливает значительное снижение СКО флуктуаций фазы во фронте волны на выходе сферического неоднородного σ отражающего слоя F ионосферы и СКО разброса времени запаздывания принимаемого $\sigma_{\tau(r)}$ (аналога $\Delta \tau_{i \max}$) трансионосферном сигнала В многолучевом канале (несмотря на некоторое возрастание дифракционного параметра d_1^2 из-за увеличения пути в свободном пространстве $L_{c_{\rm R}}$) и существенное (в два раза) расширение интервала частотной корреляции однолучевой КВ радиолинии (7, 8): с $F_{\kappa} \approx 7 \kappa \Gamma$ ц до $F_{\kappa} \approx 14 \kappa \Gamma$ ц.

4. Разработан 10-этапный алгоритм расчета интервала частотной корреляции F_{κ} однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности неоднородного отражающего слоя ионосферы в условиях диффузной многолучевости на основе определения угла ϕ_0 (согласно выражению (16)) и совокупности аналитических выражений (12, 14, 13, 10, 11, 15, 3, 5-8), приведенный на рис. 6.

5. Применение разработанного алгоритма позволяет при приходе (выделении) одного дискретного луча по данным зондирования параметров слоя F ионосферы ($f_{\rm kp}$, h_0 , $Z_{\rm m}$, $l_{\rm i}$, l_0 , β) осуществить выбор (понижение) рабочей частоты f_0 , обеспечивающей значительное уменьшение флуктуаций фазы во

фронте волны на выходе сферического отражающего слоя F ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями (5) $\sigma_{\phi} = f_0 \beta \sqrt{L_3} / K_s^2 \sec^2 \phi_0$, что обуславливает снижение глубины интерференционных замираний (т. е. увеличение параметра Райса (13) $\gamma^2 \sim 1/\sigma_{\phi}^2$) и расширение интервала частотной корреляции замираний (7, 8) $F_{\kappa} \sim f_0 / \sigma_{\phi} \sim 1 / \sigma_{\tau(r)}$ в однолучевой КВ радиолинии.

В работе впервые качественно обоснованы причины расширения интервала частотной корреляции замираний при понижении рабочей частоты относительно максимально применимой, которые заключаются в уменьшении относительного времени запаздывания приходящих лучей, сокращении эквивалентного пути распространения волны в слое F и увеличении угла падения волны на нижнюю границу ионосферы. Кроме того, получена совокупность аналитических выражений, позволяющая рассчитать интервал частотной корреляции замираний в однолучевой КВ радиолинии с учетом сферичности ионосферы и диффузной многолучевости.

Направлением дальнейшего развития полученных результатов определения величины интервала частотной корреляции F_{κ} замираний является получение потенциально достижимых значений скорости передачи информации по однолучевым КВ радиолиниям при отсутствии и наличии диффузной многолучевости различного уровня.

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

Литература

1. Стейн С., Джонс Дж. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. Пер с англ. – М.: Связь, 1971. – 376 с.

2. Хмельницкий Е. А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. – М.: Связь, 1975. – 232 с.

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

4. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

5. Пашинцев В. П., Боровлев И. И. Повышение своевременности передачи сообщений в однолучевой декаметровой радиолинии за счет выбора оптимальной скорости передачи сигналов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2003. № 11. С. 26-33.

6. 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.

7. Пашинцев В. П., Тишкин С. А., Смирнов А. А., Боровлев И. И. Эквивалентный путь распространения декаметровой волны в сферическислоистой ионосфере // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 8. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/aug01/1/text.html (дата обращения 05.05.2020).

8. Pashintsev V. P., Solchatov M. E., Kondrashin A. Ye, Senokosova A. V. Maximal frequency of reflection of a decameter wave from the spherically stratified ionosphere // Radioelectronics and Communications Systems. 2005. № 48 (5). P. 8-14.

9. Knepp D. L. Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1983. Vol. 71. № 6. P. 722-737.

10. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». Выпуск 4. – Самара: ПГАТИ, 2006. – 357 с.

11. Pashintsev V. P., Kolosov L. V., Tishkin S. A., Smirnov A. A. Influence of the Ionosphere on Signal Detection in Space Communications Systems // Journal of Communications Technology and Electronics. 1999. № 44 (2). P. 132-139.

12. 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. № 12. С. 57-65.

13. Pashintsev V. P., Koval S. A., Potyagov D. A., Spirin A. M. Estimation of noice error when measuring virtual height during diffusivity of ionospheric F layer // Radioelectronics and Communications Systems. 2010. Vol. 53. № 7. P. 348-355.

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

15. Пашинцев В. П, Чипига А. Ф., Шевченко В. А., Киселев Д. П. Влияние диффузности ионосферы на оптимальную рабочую частоту декаметровой радиолинии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2 (3). С. 946-951.

16. 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.

17. Богуш Р., Джульяно Ф., Непп Д. Частотно-селективные замирания и их коррекция методом решающей обратной связи в высокоскоростных цифровых спутниковых каналах связи // Труды института инженеров по электронике и радиотехнике. 1983. Т. 71. № 6. С. 78-94.

18. Blaunstein N., Plohotniuc Eu. Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 600 p.

19. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-earth environment. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 568 p.

20. Толковый словарь по радиофизике. Основные термины. – М.: Русский язык, 1993. – 357 с.

21. 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. С. 38-42.

22. Девис К. Радиоволны в ионосфере. Пер с англ. – М.: Мир, 1973. – 502 с.

References

1. Stein S., Jones J. *Modern Communication Principles*. McGraw-Hill Telecommunications, 1967. 382 p.

2. Khmel'nitskiy E. A. *Otsenka real'noy pomekhozatshitshennosti prima signalov v KV diapazone*. [Assessment of real noise immunity of reception of signals in HF range]. Moscow, Svyaz Publ., 1975. 232 p. (in Russian).

3. Cherenkova E. L., Chernyshov O. V. *Rasprostranenie radiovoln*. [Distribution of radio waves]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984. 272 p. (in Russian).

4. Volkov L. N., Nemirovskiy M. S., Shinakov Yu. S. *Sistemy tsifrovoi radiosvyazi: bazovye metody i kharakteristiki.* [Systems of a digital radio communication: basic methods and characteristics]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2005. 392 p. (in Russian).

5. Pashintsev V. P., Borovlev I. I. Messages transmission opportunity rise in one-path decameter radio link because of choice of optimal signals transmission rate. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2003, no. 11, pp. 26-33.

6. 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, vol. 41, no. 1, pp. 16-21.

7. Pashintsev V. P., Tishkin S. A., Smirnov A. A., Borovlev I. I. Ekvivalentniy put' rasprostraneniya dekametrovoyi volny v sfericheskisloistoy ionosphere [Equivalent way of distribution of a decameter wave in a spherically layered ionosphere]. *Journal of radio electronics*, 2001, no. 8. Avaible at: http://jre.cplire.ru/jre/aug01/1/text.html (accessed 05 May 2020) (in Russian).

8. Pashintsev V. P., Solchatov M. E., Kondrashin A. Ye, Senokosova A. V. Maximal frequency of reflection of a decameter wave from the spherically stratified ionosphere. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2005, no. 48 (5), pp. 8-14.

9. Knepp D. L. Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1983, vol. 71, no. 6, pp. 722-737.

10. Maslov O. N., Pashintsev V. P. *Modeli transionosfernyh radiokanalov i pomekhoustojchivost' sistem kosmicheskoj svyazi* [Models of transionospheric radio channels and noise stability of systems of space communication]. Samara, Volga region state academy of telecommunications and informatics Publ., 2006. 357 p. (in Russian).

11. Pashintsev V. P., Kolosov L. V., Tishkin S. A., Smirnov A. A. Influence of the ionosphere on signal detection in space communications systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1999, no. 44 (2), pp. 132-139.

12. 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, no. 12, pp. 57-65.

13. Pashintsev V. P., Koval S. A., Potyagov D. A., Spirin A. M. Estimation of noice error when measuring virtual height during diffusivity of ionospheric F layer. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2010, vol. 53, no. 7, pp. 348-355.

14. Pashintsev V. P., Tishkin S. A., Ivannikov A. I., Solchatov M. E. Opredelenie optimal'noi rabochei i naimen'shei primenimoi chastoty dekametrovoi radiolinii s uchetom glubiny bystrykh zamiranii [Definition of the optimum worker and the smallest applicable frequency of the decameter radio line taking into account depth of fast dying down]. *Electrosvyaz*, 2001, no. 12, pp. 16-19 (in Russian).

15. Pashintsev V. P., Chipiga A. F., Shevchenko V. A., Kiselev D. P. Influence of ionosphere diffusion on optimum working frequency of the decameter radiofrequency line. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 2 (3), pp. 946-951 (in Russian).

16. 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-noice situation and ionosphere diffuseness. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 300-322 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412.

17. Bogush R., Guigliano F., Knepp D. Frequency-selective scintilation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1983, vol. 71, no. 6, pp. 754-767.

18. Blaunstein N., Plohotniuc Eu. *Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar*. CRC Press Publishing, 2018. 600 p.

19. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-earth environment. CRC Press Publishing, 2013. 568 p.

20. *Tolkovyi slovar' po radiophizike. Osnovnye terminy*. [The explanatory dictionary on radiophysics. Main terms]. Moscow, Russkii yazik Publ., 1993. 357 p. (in Russian).

21. Pashintsev V. P., Omelchuk A. V., Koval S. A., Galushko Yu. I. Metod opredeleniya velichiny intensivnosti neodnorodnostei po dannym ionosphernogo zondirovaniya [Method of irregularity intensity value determination according to ionosphere sounding]. *Dual technology*, 2009, no. 1, pp. 38-42 (in Russian).

22. Davies K. Ionospheric radio wawes. Blaisdell Publishing Co., 1969. 477 p.

Статья поступила 13 мая 2020 г.

Информация об авторах

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

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

Скорик Александр Дмитриевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Заместитель технического директора. АО «Российский

институт мощного радиостроения». Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем декаметровой связи. E-mail: alexander_skorik@mail.ru

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

Коваль Станислав Андреевич - кандидат технических наук. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг параметров ионосферы в интересах декаметровой связи. E-mail: _bober_@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Алексеев Дмитрий Викторович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение устойчивости декаметровой связи в условиях диффузной многолучевости. E-mail: dalekseev@ncsp.com

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

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

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

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

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

Problem statement: it is known that in short-wave radio lines with one discrete beam there is a diffusion multi-beam with relative time of delay of beams 50 ... 200 microsec. It defines an interval of frequency correlation of dying down in one-beam short-wave radio line about 5 ... 20 kHz that causes a possibility of increase in speed of transfer to several kbps. There are bases to assume that the interval of frequency correlation of dying down depends on the choice of operating frequency and will extend in process of its decrease. Therefore for achievement of the largest speed of transfer in one-beam short-wave radio line it is necessary to know dependence of an interval of frequency correlation of dying down on the choice of operating frequency. The known techniques and models for assessment of an interval of frequency correlation of dying down in one-beam short-wave radio line are limited to consideration of the flat reflecting ionosphere layer taking into account its diffusion (small-scale not uniformity), or consider influences of sphericity of an ionosphere, but without its diffusion. The purpose of work is development of an algorithm of calculation of an interval of frequency correlation of dying down depending on the choice of operating frequency of the short-wave radio line in the presence of one discrete beam with a diffusion multipath which considers influence of sphericity and small-scale not uniformity of the reflecting layer F ionospheres. The novelty consists in high-quality justification of the reasons of expansion of an interval of frequency correlation of dying down in one-beam short-wave radio line at decrease in operating frequency of the relatively most applicable which consist in reduction of relative time of delay of the coming beams, reduction of an equivalent way of distribution of a wave in a layer of F and increase in a hade of a wave at the lower bound of an ionosphere. Besides, the set of analytical expressions for definition of a hade of a

wave on the lower bound of an ionosphere, characteristics of its sphericity, ways of distribution of a wave and diffraction parameter at the set operating frequency which allows to calculate an interval of frequency correlation of dying down in one-beam short-wave radio line taking into account sphericity of an ionosphere and a diffusion multipath is received. **Result:** the algorithm of calculation of an interval of frequency correlation of dying down in one-beam short-wave radio line depending on the choice of operating frequency which considers influence of sphericity and small-scale not uniformity (diffusion) of the reflecting ionosphere layer is developed. **Practical importance:** application of the developed algorithm allows to carry out at arrival (allocation) of one discrete beam of the short-wave radio line according to sounding of parameters of a layer F ionospheres the choice of the operating frequency providing increase in an interval of frequency correlation of dying down significant (twice) and, therefore, transfer speed.

Keywords: short-wave communication, ionosphere, sphericity, small-scale heterogeneity, diffusion, mnogoluchevost, dying down, interval of frequency correlation.

Information about Authors

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

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

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 of decameter radio. E–mail: alexander_skorik@mail.ru

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

Stanislav Andreevich Koval – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: monitoring of ionosphere parameters for decameter radio. E-mail: _bober_@mail.ru

Address: Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3.

Dmitry Viktorovich Alekseev – 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: dalekseev@ncsp.com

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

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.