

УДК 519.8

Е.Т. Агеева, Н.Т. Афанасьев, Д. Ким, Н.И. Михайлов

Математическое моделирование статистических характеристик доплеровского смещения частоты радиосигнала в нестационарном ионосферном канале

На основе приближения геометрической оптики, метода малых возмущений и численно-аналитического алгоритма расчета проведено моделирование статистических доплеровских характеристик декаметрового радиосигнала при односкачковом распространении в нестационарном ионосферном канале. Выполнен анализ динамики среднего и среднеквадратического значений доплеровского смещения частоты радиосигнала, когда с течением времени размер зоны молчания становится равным длине скачка между корреспондентами. Показано, что временные зависимости доплеровских статистических характеристик нижних и Педерсеновских лучей имеют качественно разное поведение при уменьшении критической частоты ионосферы и существенно зависят от длины пути лучей и параметров случайных неоднородностей.

Ключевые слова: доплеровское смещение частоты, случайные неоднородности ионосферы, критическая частота, электронная концентрация, ионосферный радиоканал.

В настоящее время известно множество каналов, посредством которых осуществляется передача информации между корреспондентами (ионосферный, оптоволоконный, акустический и другие каналы). Проходя через информационный канал, параметры которого подвержены детерминированным и случайным воздействиям, сигнал может прийти в пункт приёма с большими искажениями [1–5]. В частности, при прохождении сигнала через движущуюся неоднородную среду при фиксированных координатах источника и приемника наблюдается изменение рабочей частоты сигнала, связанное с эффектом Доплера [6–8]. Поэтому актуальным является выявление функциональных связей между доплеровскими характеристиками сигнала и параметрами канала для прогнозирования оптимальных условий прохождения сигнала и улучшения его качества. С другой стороны, изменение доплеровских характеристик сигнала, вызванное неоднородностями канала, может быть использовано для диагностики параметров канала и восстановления его структуры [9].

Целью данной работы является исследование с помощью математического моделирования статистических характеристик доплеровского смещения частоты декаметрового радиосигнала при односкачковом распространении в нестационарном ионосферном канале.

Ионосферный радиоканал представляет собой сложную многосвязную систему. Вследствие существенной анизотропии ионосферы, многообразия типов ионосферных неоднородностей и особенностей механизмов распространения радиоволн прогнозирование характеристик этой системы представляет большую проблему. В частности, при оценке девиаций частоты декаметрового радиосигнала встает вопрос о форме спектра случайных неоднородностей канала. В определенных условиях требуется обоснование предположения о равномерном распределении неоднородностей по всей толще ионосферы. В ряде случаев, напротив, необходимы сведения о масштабах и местоположении локальных областей ионосферы, занятых неоднородностями. Дополнительные трудности возникают при описании процесса передачи сигнала в канале с учетом анизотропии ионосферы. Вследствие влияния магнитного поля Земли при ионосферном распространении радиоволн возникает явление двойного лучепреломления, и необходим расчет характеристик сигнала для обеих магнитоионных компонент.

Несмотря на указанные трудности, решение задачи оценки девиаций частоты сигнала в радиоканале возможно на основе моделей среды с обобщенными (интегральными) свойствами. В настоящее время геофизические параметры тонкой структуры ионосферного канала известны с большой степенью неопределенности, поэтому для прогнозирования характеристик сигнала, распространяющегося в канале, также используют радиофизические (эффективные) параметры неоднородностей, предварительно полученные путем приближенного решения обратной задачи по данным измерений некоторых характеристик пробных сигналов на реперной трассе [10]. Радиофизические

параметры неоднородностей, полученные таким образом, представляют и самостоятельный интерес, поскольку они содержат интегральную информацию о статистической изменчивости ионосферы. В данном направлении были получены важные результаты благодаря введению представлений о гауссовом корреляционном эллипсоиде, эффективно описывающем случайные неоднородности среды [11] и позволяющем существенно упростить аналитические расчеты статистических моментов сигнала. Следует заметить, что на самом деле ионосфера представляет собой многомасштабную среду и характеризуется степенным спектром неоднородностей. Тем не менее в определенных случаях при расчетах низших моментов фазовых флуктуаций сигнала можно использовать гауссов спектр неоднородностей с эффективными параметрами. В частности, исследования [12–14] показали, что при расчетах дисперсии фазы декаметрового радиосигнала в многомасштабной случайно-неоднородной ионосфере можно использовать гауссову модель корреляционного эллипсоида, если в качестве пространственного масштаба неоднородностей считать внешний масштаб ионосферной турбулентности, заданной степенным спектром. Связано это с тем, что высокочастотная часть спектра неоднородностей в большей степени оказывает влияние на амплитуду сигнала и в меньшей степени на его фазу [1].

Ниже рассмотрен случай распространения декаметрового радиосигнала в изотропном ионосферном канале. Однако предложенную методику моделирования можно использовать и для оценки девиаций частоты отдельных магнитоионных компонент радиосигнала в ионосферном канале с анизотропными свойствами, если учесть разные показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей. Методика расчета также допускает введение модели анизотропного корреляционного эллипсоида неоднородностей, ориентированного относительно радиотрассы [11]. Параметры этого эллипсоида можно определить по характеристикам пробных сигналов на реперной трассе с учетом априорной информации о типичных свойствах неоднородностей (например, их вытянутости вдоль силовых линий геомагнитного поля).

Метод математического моделирования. Для совместного расчёта среднего $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратического $\sigma_f = \sqrt{\langle \delta f^2 \rangle}$ значений доплеровского смещения частоты f радиосигнала, распространяющегося в двумерно-неоднородной изотропной ионосфере, использовались приближение геометрической оптики и метод малых возмущений [1].

В результате была получена следующая приближенная система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon_0} \sin\beta_0, & \frac{dz_0}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon_0} \cos\beta_0, & \frac{d\beta_0}{dt} &= -c \cdot \sin\beta_0 \cdot \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z_0}, \\ \frac{d\langle \Delta f \rangle}{dt} &= -\frac{f}{2} \cdot \left\langle \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \tau} \right\rangle, & \frac{d\langle \delta f^2 \rangle}{dt} &= \frac{\sqrt{\pi} f^2 v^2 \cdot N \sin^2 \beta_0}{2a c\sqrt{\varepsilon_0}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где τ – текущее время; x_0 , z_0 , β_0 – координаты и угол рефракции луча в регулярной нестационарной ионосфере с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_0(z, \tau)$; c – скорость света; v, a – соответственно скорость вертикального движения и пространственный масштаб гауссова корреляционного эллипсоида случайных неоднородностей; dt – элемент времени группового запаздывания; $\langle \rangle$ – знак усреднения по ансамблю неоднородностей.

При выводе системы (1) в качестве модели пространственно-временных флуктуаций диэлектрической проницаемости ионосферы рассматривалось квазиоднородное поле случайных неоднородностей с функцией корреляции, однородная часть которой задавалась гауссовой зависимостью. Хаотическое движение случайных неоднородностей учитывалось в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности [1]. Неоднородная часть функции корреляции представлялась в виде

$$N = \langle \gamma^2 \rangle (1 - \varepsilon_0)^2, \quad (2)$$

где $\langle \gamma^2 \rangle = \langle (\Delta n_e / n_e)^2 \rangle$ – интенсивность флуктуаций электронной концентрации ионосферы.

В нестационарной ионосфере с течением времени ее параметры могут существенно измениться. В частности, уменьшение критической частоты ионосферного слоя $F2$ приводит к тому, что размер зоны молчания при односкачковом распространении декаметрового радиосигнала будет воз-

растать и может стать равным длине скачка между корреспондентами. В этих условиях важно рассмотреть временные зависимости доплеровских характеристик нижних и верхних (Педерсеновских) лучей.

В качестве модели регулярной нестационарной ионосферы была выбрана функция

$$\epsilon_0(z, \tau) = 1 - \left(\frac{f_{кр}(\tau)}{f} \right)^2 \exp \left(- \left(\frac{z - z_m}{h_m} \right)^2 \right). \quad (3)$$

Временная зависимость критической частоты ионосферы представлялась в виде:

$$f_{кр}(\tau) = f_{кр0} - b\tau^2, \quad (4)$$

где $f_{кр0}$ – критическая частота в начальный момент времени $\tau=0$; b – коэффициент пропорциональности, определяемый из значений $f_{кр0}$ и $f_{крк}$.

В конечный момент времени, когда граница зоны молчания совпадала с координатой приемника, критическая частота принимала значение $f_{крк}$. Размер зоны молчания вычислялся на основе анализа дистанционно-угловых характеристик, определяемых из системы уравнений (1).

Результаты расчетов и обсуждение численного эксперимента. При моделировании траекторных и доплеровских характеристик радиосигнала с помощью системы (1) были использованы разработанные нами численно-аналитический алгоритм расчета [15] и комплекс программ [16]. На основании численных расчетов были построены траектории распространения радиосигнала с различными углами выхода β_H (угол β_H отсчитывается от вертикали) (рис. 1, а, б).

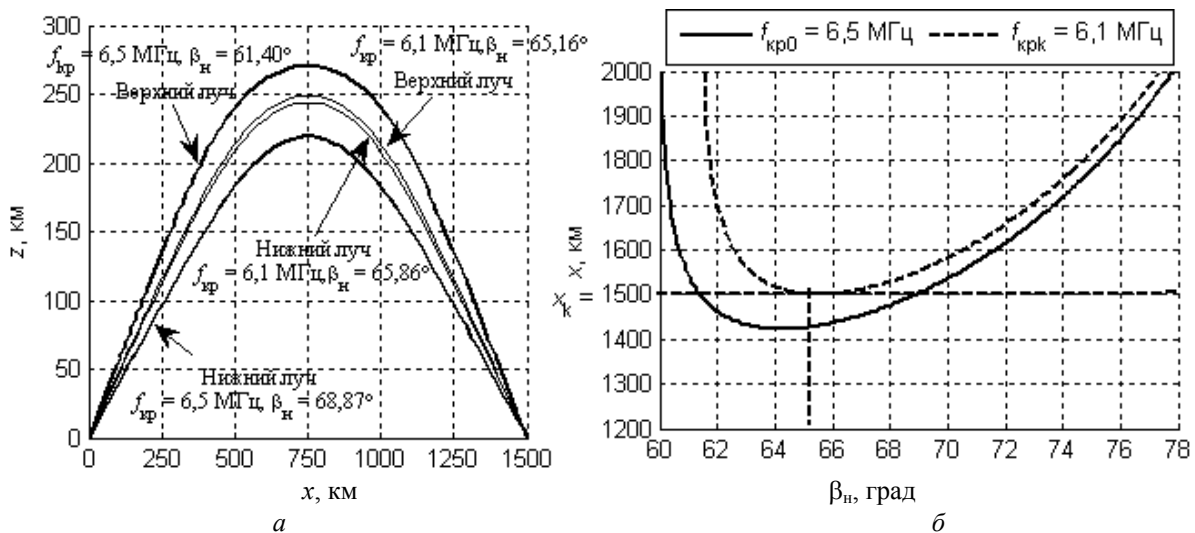


Рис. 1. Траектории и дистанционно-угловые характеристики радиосигнала при рабочей частоте $f=13 \text{ МГц}$

Из рис. 1, а следует, что при заданном вдоль поверхности Земли расстоянии между корреспондентами радиосигнал в ионосферном канале распространяется по двум траекториям с различными углами выхода, один из которых пологий (нижний), а другой более крутой (верхний) – луч Педерсена.

На рис. 1, б показано, что для рабочей частоты $f = 13 \text{ МГц}$ при заданном расстоянии между источником и приёмником (длина радиотрассы $x_k = 1500 \text{ км}$) и выбранной в начальный момент времени критической частоте ($f_{кр0} = 6,5 \text{ МГц}$ при $\tau = 0$) с уменьшением критической частоты минимум кривой $x(\tau)$ поднимается. Касательная ($x_k = 1500 \text{ км}$) к минимуму кривой $x(\tau)$ соответствует критической частоте ионосферы в конечный момент времени. При этой частоте верхние (Педерсеновские) и нижние лучи сливаются, а $x_k = 1500 \text{ км}$ является размером зоны молчания. На рис. 1, б показана зависимость дальности распространения верхних лучей от угла выхода в интервале $\beta_H = 60 - 65^\circ$, а нижних – $\beta_H = 65 - 78^\circ$. Характерный интервал времени регулярных изменений ионосферы был положен порядка 3 ч. Другие параметры детерминированной ионосферы при этом составляли: $z_m = 300 \text{ км}$, $h_m = 100 \text{ км}$.

Примеры результатов расчёта среднего $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратического отклонения σ_f доплеровского смещения частоты в зависимости от изменения критической частоты и интенсивности флуктуаций электронной концентрации ионосферы для заданной радиотрассы ($x_k = 1500$ км) приведены на рис. 2, 3. Размер и скорость движения случайных неоднородностей при этом составляли $a = 10$ км, $v = 0,1$ км/с соответственно.

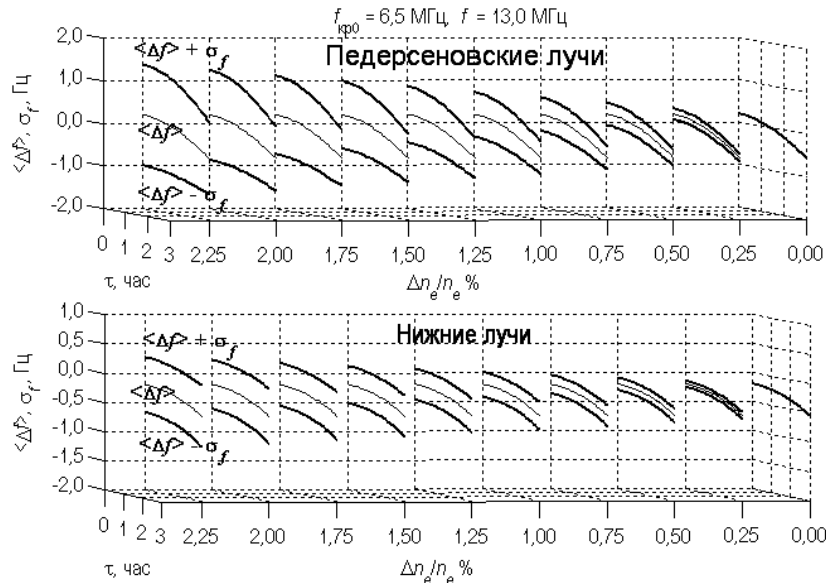


Рис. 2. Зависимость статистических характеристик доплеровского смещения частоты радиосигнала от времени τ и возмущения электронной концентрации

Из рис. 2, 3 следует, что с течением времени (с уменьшением критической частоты ионосферы) изменения средних значений $\langle \Delta f \rangle$ доплеровского смещения частоты нижнего и верхнего лучей сильно зависят от начальных условий. Между тем главное влияние на поведение $\langle \Delta f \rangle$ оказывает изменение длины траекторий нижних и верхних лучей при вариациях ионосферных параметров. В частности, уменьшение критической частоты ионосферы приводит к уменьшению длины траектории верхнего луча и увеличению траектории нижнего луча. В итоге в пункте приема $\langle \Delta f \rangle$ обоих лучей могут принимать также значения, противоположные по знаку, что является важным свойством при их идентификации. Что касается среднеквадратического отклонения доплеровского смещения частоты, то из рис. 2, 3 видно, что с увеличением $\Delta n_e/n_e$ величина σ_f возрастает как для верхних, так и для нижних лучей. С течением времени (уменьшением $f_{кр}$) σ_f падает для верхних лучей и возрастает для нижних. Такие изменения σ_f связаны с ростом флуктуаций частоты сигнала при увеличении пути лучей в случайно-неоднородной ионосфере. Что касается влияния размеров случайных неоднородностей на дисперсию доплеровского смещения частоты, то из системы (1) следует, что σ_f^2 обратно пропорционально масштабу корреляционного эллипсоида a . Поэтому при уменьшении внешнего масштаба ионосферной турбулентности, заданной степенным спектром, следует ожидать увеличение σ_f^2 .

Заключение. На основе полученной приближенной системы дифференциальных уравнений (1) и модели нелинейного изменения от времени критической частоты слоя $F2$ выполнено моделирование среднего $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратического отклонения σ_f доплеровского смещения частоты декаметрового сигнала в нестационарном изотропном ионосферном канале со случайными неоднородностями. Расчеты показали, что:

1. Средние значения $\langle \Delta f \rangle$ доплеровского смещения частоты нижнего и верхнего лучей радиосигнала сильно зависят от начальных условий и от изменения длины траектории лучей.

2. С увеличением интенсивности флуктуаций электронной концентрации ионосферы среднеквадратическое отклонение σ_f доплеровского смещения частоты для верхних и нижних лучей растёт, а с уменьшением критической частоты падает для верхних и растёт для нижних лучей.

3. Зная характерные параметры регулярной ионосферы, среднее значение $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратическое отклонение σ_f доплеровского смещения частоты радиосигнала на заданной радиотрассе, можно прогнозировать параметры корреляционного эллипсоида, эффективно описывающего случайные неоднородности ионосферного канала.

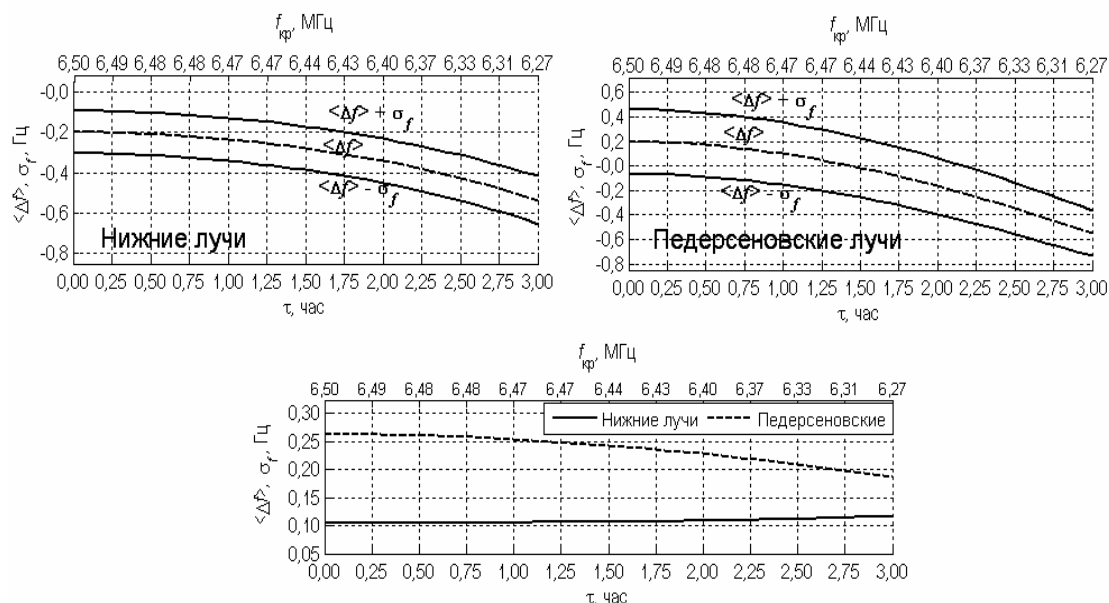


Рис. 3. Зависимость среднего значения $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратического отклонения σ_f доплеровского смещения частоты радиосигнала от времени при возмущении электронной концентрации $\Delta n_e/n_e = 0,5\%$

Литература

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах: в 2 ч. Ч. 2. – М.: Мир, 1981. – 320 с.
2. Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородной среде / Ю.Н. Барабененков, Ю.А. Кравцов, С.М. Рытов, В.И. Татарский // УФН (Москва). – 1970. – Т. 102, № 1. – С. 3–42.
3. Макаров А.И. Передача информации в гидроакустическом канале / А.И. Макаров, В.Д. Дворников, В.К. Конопелько // Доклады БГУИР (Минск). – 2004. – № 2. – С. 103–118.
4. Кебкол К.Г. Количественные и качественные различия характеристик радио- и гидроакустических каналов связи / К.Г. Кебкол // Системы управління, навігації та зв'язку (Київ). – 2004. – № 12. – С. 198–205.
5. Сухарьков О.В. Передача дискретной информации в гидроакустический канал связи с использованием жидкоструйных преобразователей / О.В. Сухарьков // ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІІ (Київ). – 2011. – № 9. – С. 100–110.
6. Измерение доплеровского смещения частоты отдельных лучей с помощью ЛЧМ-ионозонда / В.И. Батухтин, В.А. Иванов, А.А. Колчев, С.В. Розанов // Изв. вузов. Радиофизика (Нижегород). – 2000. – Т. 43, № 12. – С. 1044–1054.
7. Колчев А.А. Измерение частотных зависимостей доплеровского смещения частоты и времени распространения каждой ионосферной моды с помощью непрерывного ЛМЧ-сигнала / А.А. Колчев, В.В. Шумаев // Изв. вузов. Радиоэлектроника (Санкт-Петербург). – 2009. – Т. 52, № 2. – С. 54–62.
8. Колчев А.А. Погрешности измерения доплеровского смещения частоты с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ-сигнала / А.А. Колчев, А.Е. Недопёкин, В.В. Шумаев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Санкт-Петербург). – 2010. – № 4. – С. 42–48.
9. О диагностике ионосферных возмущений фазовым методом с доплеровской фильтрацией / В.А. Зюзин, В. Ким, Г.А. Комраков и др. // Геомагн. и аэрономия (Москва). – 1989. – Т. 29, № 1. – С. 154–156.

10. Diagnosing the effective parameters of the ionospheric fine structure from statistical characteristics of radio waves in the vicinity of a regular caustic / N.T. Afanasiev, A.A. Zheonykh, M.K. Ivelskaya et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2001. – Vol. 63, is. 18. – P. 1967–1972.
11. Гусев В.Д. Модельное определение объемных характеристик неоднородностей ионосферы / В.Д. Гусев, Н.П. Овчинникова // *Геомagn. и аэрономия (Москва)*. – 1980. – Т. 20. № 4. – С. 626–631.
12. Алимов В.А. Модель взаимодействия ДКМВ-ДМВ радиоволн с сильно неоднородной среднеширотной ионосферой / В.А. Алимов, А.В. Рахлин, Ф.И. Выборнов // *Изв. вузов/ Радиофизика (Нижний Новгород)*. – 1997. – Т. 40, № 11. – С. 1323–1341.
13. Афанасьев Н.Т. Флуктуации фазы радиоволны при полном внутреннем отражении от случайно-неоднородной ионосферы / Н.Т. Афанасьев, О.А. Ларюнин, В.П. Марков // *Изв. вузов. Радиофизика (Нижний Новгород)*. – 2009. – Т. 52, № 10. – С. 779–784.
14. Phase fluctuations of radio waves experiencing total reflection from a randomly inhomogeneous plasma layer / N.T. Afanasiev, A.N. Afanasiev, O.A. Larunin, V.P. Markov // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2010. – Vol. 72, is. 7–8. – P. 583–587.
15. Численно-аналитический алгоритм моделирования флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи / Е.Т. Агеева, Н.Т. Афанасьев, А.В. Багинов и др. // *Системы, методы, технологии (Братск)*. – 2012. – № 3 (15). – С. 61–66.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660637 «Программа для расчёта характеристик сигнала в информационном канале с возмущёнными параметрами (KANAL 1.13)» / Е.Т. Агеева, А.В. Багинов, Н.И. Михайлов, Д.Ч. Ким. – Заявка № 2013617002. Дата поступления 1 августа 2013 г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 13 ноября 2013 г.

Агеева Елена Тимофеевна

Ст. преподаватель каф. физики Братского государственного университета (БрГУ)
Тел.: 8-964-809-49-37
Эл. почта: Sphalerite@yandex.ru

Афанасьев Николай Тихонович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиофизики Иркутского государственного университета
Тел.: 8 (964-3) 50-22-56
Эл. почта: nta@api.isu.ru

Ким Де Чан (Дмитрий Борисович)

Канд. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики БрГУ
Тел.: 8-914-929-07-76
Эл. почта: fizika-brgu@yandex.ru

Михайлов Никита Игоревич

Аспирант каф. физики БрГУ
Тел.: 8-950-059-27-06
Эл. почта: nikita-oxford@mail.ru

Ageeva E.T., Afanasiev N.T., Kim D., Mikhaylov N.I.

Mathematic modeling of statistical characteristics of Doppler frequency shift radio signal in nonstationary ionospheric channel

On the basis of the geometric-optics approximation, the method of small perturbations and numerically-analytical algorithm of calculation, the modeling of statistical Doppler characteristics of a decameter radio signal at single-hop propagation in the non-stationary ionospheric channel is carried out. The analysis of average dynamics and root-mean-square deviation of Doppler frequency shift radio signal have carried out when with time the size of quiet zone becomes equal to the length of jump between correspondents. It is shown, that the time dependences of statistical characteristics of the Doppler lower rays and Pedersen rays have qualitatively different behavior with a decrease in the critical frequency of the ionosphere and significantly depend on the length of the beam path and parameters of random inhomogeneities.

Keywords: Doppler frequency shift, random ionospheric inhomogeneities, critical frequency, electron density, ionospheric radio channel.