

References

1. Barabashov B. G., Vertogradov G. G. Dynamic adaptive structural and physical model of ionospheric radio-channel // *Matematicheskoe modelirovanie*. 1996. № 8. S.3–18.
2. Makarov A.I., Dvornikov V.D., Konopel'ko V.K. Information transfer through hydroacoustic channel // *Doklady BGUIR*, 2004. № 2. S.103-118.
3. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. Radio-wave propagation. M.: LENAND, 2009. 496 s.
4. Davydenko Yu.I. Tropospheric telecommunication. M.: Voenizdat, 1968. 212 s.
5. Yakovlev O.I. Space radiophysics. M.: Nauchnaya kniga, 1998. 432 s.
6. Samarsky A.A., Mikhailov A.P. Mathematical modeling. M.: Nauka. Fizmatlit. 1997. 320 s.
7. Samarsky A. A., Gulin A.V. Numerical procedures. M.: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit., 1989 432 s.
8. Isimaru A. Wave propagation and scattering in randomly inhomogeneous media. Ch.2. M.: Mir, 1981. 320 s.
9. Barabanenkov Yu.N., Kravtsov Yu.A., Rytov S.M., Tatarsky V.I. Condition of the wave propagation theory in random medium // *UFN*. 1970. T. 102. № 1. S. 3-42.
10. Kravtsov Yu. A., Orlov Yu. I. Geometrical optics of inhomogeneous media. M.: Nauka, 1979. 304 s.
11. Pontryagin L.S. Ordinary differential equations. M.: Nauka, 1970. 332 s.
12. Ramification theory and characteristic constant nonlinear problems / *Sbornik statey pod red. Kellera Dzh.B. i Antman S. M.*: Mir, 1974. 256 s.
13. Ageeva E. T., Baginov A.V., Kim D.B. Program: Calculation of signal data in inhomogeneous ionospheric channel «Ionosphera K.1.11» gos. reg. № 2011612474..

УДК 519.8

Компьютерное моделирование траекторных характеристик декаметрового радиосигнала в ионосферном канале связи

Е.Т. Агеева¹, Н.Т. Афанасьев², А.В. Багинов¹, Д.Б. Ким¹, Н.И. Михайлов¹

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Иркутский государственный университет, ул. Ленина 3, Иркутск, Россия. E-mail: Sphalerite@yandex.ru

Статья поступила 27.04.2012, принята 10.09.2012

С использованием численно-аналитического алгоритма расчета проведено компьютерное моделирование флуктуационных и средних характеристик декаметрового радиосигнала в ионосферном канале связи, подверженном естественным возмущениям детерминированного и случайного типа. Сделана оценка состояния канала в зависимости от параметров случайных неоднородностей и формы профиля регулярной диэлектрической проницаемости ионосферы в широком диапазоне рабочих частот. Проведен детальный анализ дистанционно-угловых характеристик декаметрового радиосигнала для различных параметров крупномасштабной регулярной неоднородности. Рассчитана динамика зоны молчания в зависимости от интенсивности неоднородности и соотношения рабочей и критической частоты слоя F2. Рассчитана дисперсия вертикального угла прихода радиосигнала как функция от угла выхода, рабочей частоты и параметров регулярной и случайных неоднородностей. Показано увеличение дисперсии вертикального угла прихода вблизи границы зоны молчания.

Ключевые слова: случайные неоднородности, декаметровый радиосигнал, зона молчания, статистические моменты, корреляционная функция, диэлектрическая проницаемость, дистанционно-угловая характеристика.

Computer modeling of trajectory characteristics of decameter's radio signal in ionosphere's communication channel

E.T.Ageeva¹, N.T.Afanasyev², A.V.Baginov¹, D.B.Kim¹, N.I.Mikhaylov¹

¹Bratsk state university, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia

²Irkutsk state university, 3, Lenin str., Irkutsk, Russia. E-mail: Sphalerite@yandex.ru

The article received 27.04.2012, accepted 10.09.2012

Computer modeling of the fluctuation and average characteristics of decameter's radio signal in the ionosphere's communication channel subject to natural indignations of determined and casual type was carried out with the help of numerical and analytical algorithm. Channel condition depending on casual heterogeneity and forms of the profile of casual dielectric permeability of ionosphere was appreciated in a wide range of the working frequencies. The detailed analysis of remote and angular characteristics of decameter's radio signal for different parameters of large-scale regular heterogeneity was carried out. Dynamic of the silence zone depending on intensity of heterogeneity and ratio of working or critical frequency of the level F2 was calculated. Dispersion of the entrance vertical angle of the radio signal as the function from the exit angle, working frequency and parameter regular and casual heterogeneity was calculated. The dispersion increasing of the entrance vertical angle near the border of the silence zone was shown.

Keywords: regular casual heterogeneity of ionosphere, decameter's radio signal, Dispersion of the entrance vertical angle of the radio signal, the silence zone, correlation function, dielectric permeability, remote and angular characteristic.

В работе предложен оперативный численно-аналитический алгоритм моделирования статистических траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи. Алгоритм достаточно универсален, и его можно использовать для решения ряда прикладных задач. В частности, большой интерес представляет оценка состояния ионосферного декаметрового радиоканала с регулярными и случайными неоднородностями диэлектрической проницаемости. Естественные неоднородности ионосферы во многом определяют условия распространения радиоволн. Вследствие большой сложности задачи распространения и рассеяния радиоволн в многомасштабной ионосфере, расчет влияния регулярных и случайных неоднородностей на структуру радиосигнала обычно рассматривают независимо [1]. Вместе с тем, на практике для эффективной эксплуатации радиотехнических систем, использующих декаметровый диапазон, необходим детальный анализ совместного влияния различных типов неоднородностей на характеристики сигнала.

В качестве исходной (фоновой) модели диэлектрической проницаемости ионосферного радиоканала была рассмотрена зависимость:

$$\epsilon_{is} = 1 - \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{h_m}\right)^2\right), \quad (1)$$

где z_m , h_m – высота максимума ионизации и толщина слоя $F2$, соответственно, $f_{кр}$, f – критическая и рабочая частоты.

Регулярное возмущение среды канала задавалось в виде вытянутой вдоль поверхности Земли крупномасштабной естественной неоднородности (спорадического ионосферного слоя):

$$\epsilon_r = -\chi \frac{f_{крr}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_r}{h_r}\right)^2\right), \quad (2)$$

где z_r , h_r – высота локализации и толщина неоднородности, параметры $f_{крr}$ и χ – характеризуют максимум ионизации неоднородности на уровне $z = z_r$.

Чтобы применить численно-аналитический алгоритм для оценки статистических траекторных характеристик радиосигнала в возмущенном ионосферном канале, в качестве невозмущенной модели диэлектрической проницаемости канала удобно выбрать регулярную модель $\epsilon_0 = \epsilon_{is} + \epsilon_r$, а в качестве возмущения ϵ_1 рассматривать случайные неоднородности диэлектрической проницаемости. При моделировании флуктуационная составляющая ϵ_1 задавалась квазиоднородным случайным полем неоднородностей с корреляционной функцией вида [2]:

$$N = N_1 \cdot N_0, \quad (3)$$

где N_0 – гауссов пространственный коэффициент корреляции неоднородностей с масштабом a .

Модель неоднородной части функции корреляции N_1 задавалась зависимостью:

$$N_1 = \epsilon_1^2 (1 - \epsilon_0)^2, \quad (4)$$

где ϵ_1^2 – интенсивность случайных неоднородностей электронной концентрации:

$$\epsilon_1 = \left(\frac{\Delta N_e}{N_e}\right) \cdot \left(\frac{f_{кр}^2}{f^2}\right).$$

Здесь $\frac{\Delta N_e}{N_e} = 9\%$ – возмущение электронной концентрации.

Для расчета лучевых траекторий и дистанционно-угловых характеристик декаметрового радиосигнала в присутствии регулярной крупномасштабной неоднородности использовалась система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_o}{dt} &= c \sqrt{\epsilon_o} \sin \beta_o, \\ \frac{dz_o}{dt} &= c \sqrt{\epsilon_o} \cos \beta_o, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{d\beta_o}{dt} = -c \cdot \sin \beta_o \cdot \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_o(z_o)}} \cdot \frac{\partial \epsilon_o(z_o)}{\partial z_o},$$

где x_o, z_o, β_o – соответственно, текущие координаты и угол рефракции регулярного луча.

В качестве входных параметров при численных расчетах задавались следующие типичные ионосферные данные [1]: $z_m = 300$ км, $h_m = 100$ км, $f_{кр} = 6$ МГц. В качестве примера, для регулярной неоднородности были заданы параметры $z_r = 125$ км, $h_r = 25$ км, $f_{кр} = 3$ МГц. Рассматривался диапазон рабочих частот $f = 10 - 25$ МГц, параметр χ изменялся от 0 до 1 с шагом 0.1.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов (с помощью программы [3]) лучевых траекторий для углов выхода в интервале $\beta_n = 50^\circ - 88^\circ$ через один градус, рабочей частоты f в интервале от 10-25 МГц через 5 МГц, а также зависимость диэлектрической проницаемости возмущенной ионосферы $\epsilon(z)$ от высоты z и рабочей частоты f , при интенсивности регулярной неоднородности $\chi = 0$ и $\chi = 1$.

На рис 3 и 4 представлены соответствующие дистанционно-угловые характеристики радиосигнала.

Из рис. 1 и 2 следует, что в присутствии крупномасштабной неоднородности существует предельный угол выхода β_n , при котором радиоволны проходят

через ионосферу. Этот угол зависит от рабочей частоты f и с ее ростом увеличивается. Также из рис. 1 и 2 следует, что при фиксированном угле выхода β_H увеличение рабочей частоты приводит к росту дальности распространения, глубины проникновения в возмущенную ионосферу и высоты отражения радиоволны. Для заданной рабочей частоты f имеется некоторый угол β_H выхода, при котором дальность распространения радиоволн вдоль поверхности Земли x_k является минимальной (зона молчания), в пределах которой отсутствует радиосигнал. Крупномасштабная неоднородность приводит к изменению протяженности зоны молчания по сравнению с фоновыми условиями.

На рис. 3 зона молчания обозначена точками А и В для фоновой ($\chi=0$) и возмущенной ($\chi=1$) ионосферы, соответственно. Из рис. 1 – 3 видно, что протяженность зоны молчания существенно зависит от рабочей частоты и параметра неоднородности χ , причем с увеличением рабочей частоты размер зоны молчания x_k увеличивается (при $\chi=0$ для $f=10$ МГц, $x_k=1250$ км при $\beta_H=58^\circ$, для $f=25$ МГц, $x_k=3211$ км при $\beta_H=78.8^\circ$), а при увеличении

интенсивности неоднородности χ размер x_k уменьшается (на рис. 3 для точки А $\chi=0$, $x_k=3211$ км и для точки В $\chi=1$, $x_k=2471$ км). Последнее обусловлено влиянием крупномасштабной неоднородности, максимум ионизации которой находится на высоте $z_r=125$ км от поверхности Земли.

Из рис. 3 следует, что в возмущенных условиях, при заданном вдоль поверхности Земли расстоянии между корреспондентами, сигнал распространяется по двум траекториям с разными углами выхода β_H , один из которых пологий (нижний), а другой более крутой (луч Педерсена [4]). На рис. 4 показана различная степень деформации этих траекторий под влиянием неоднородности.

Для расчета флуктуаций направления распространения радиосигнала под воздействием случайных неоднородностей совместно с системой уравнений (5) использовалась система:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_H} \right) = c \cdot \cos \beta_0 \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial z_0} \cdot \frac{\partial z_0}{\partial \beta_H} - c\sqrt{\epsilon_0} \cdot \sin \beta_0 \cdot \frac{\partial \beta_0}{\partial \beta_H},$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_0}{\partial \beta_H} \right) = -\frac{c}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} \frac{\partial^2 \epsilon_0}{\partial z_0^2} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0^3}} \frac{\partial \epsilon_0(z_0)}{\partial z_0} \right) \cdot \frac{dz_0}{d\beta_H} \cdot \sin \beta_0 +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} \frac{\partial \epsilon_0(z_0)}{\partial z_0} \cdot \cos \beta_0 \cdot \frac{d\beta_0}{d\beta_H},$$

(6)

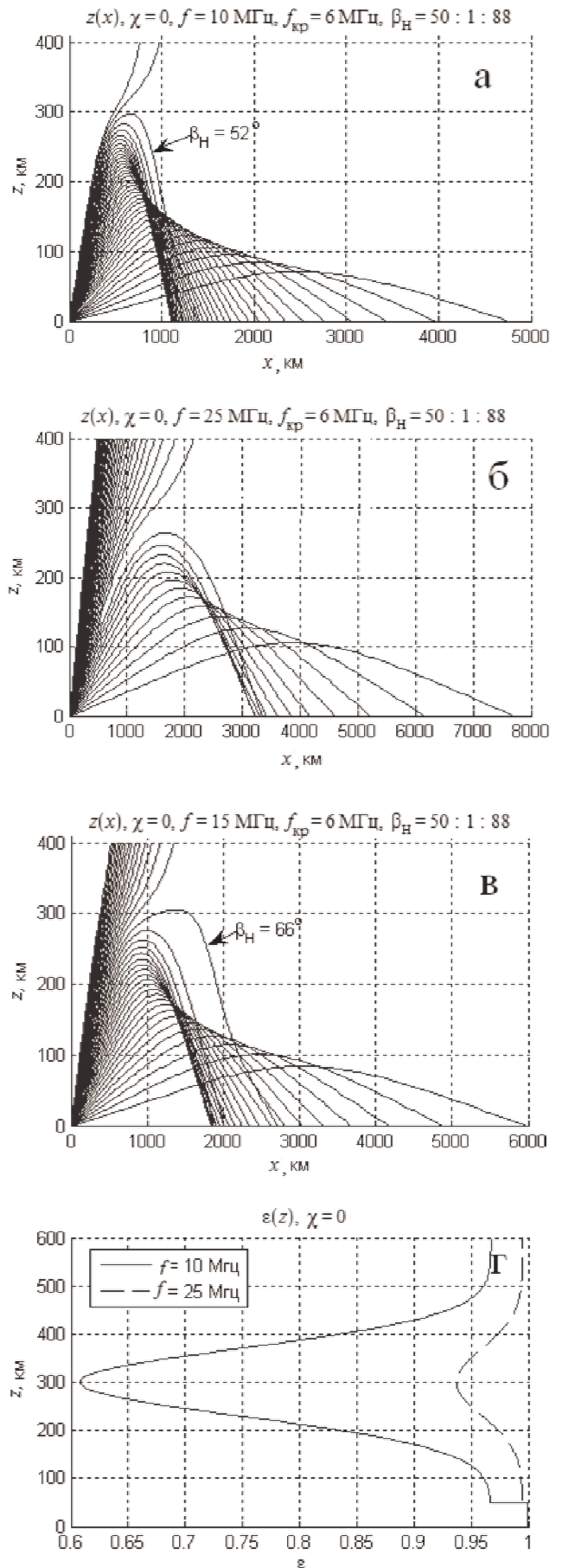


Рис. 1. Лучевые траектории в фоновой ионосфере.

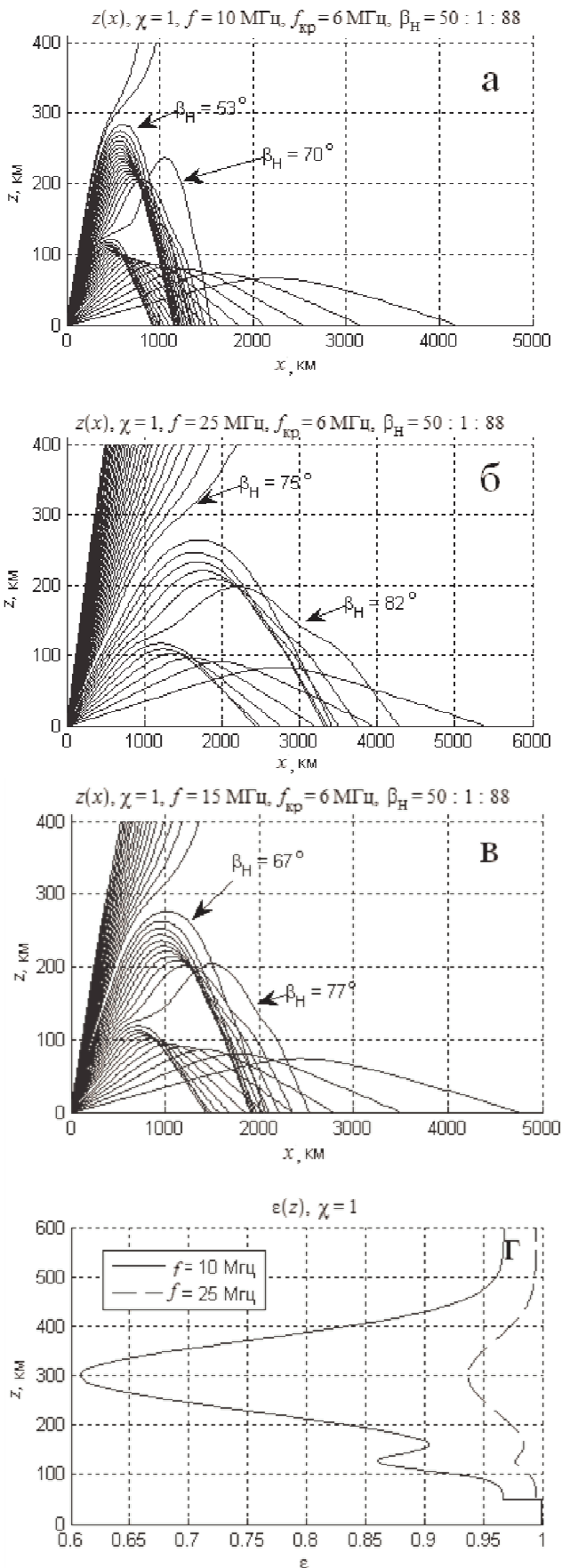


Рис. 2. Результат воздействия вытянутой крупномасштабной неоднородности электронной концентрации на состояние дециметрового радиоканала.

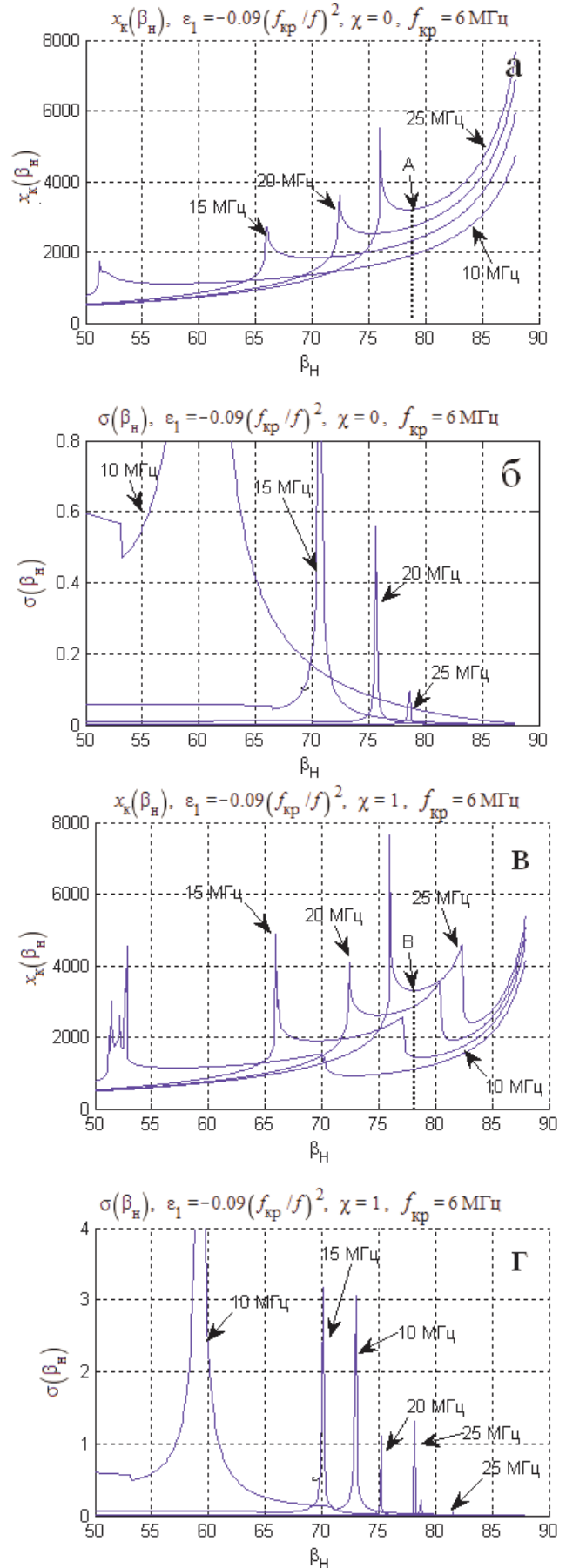


Рис. 3. Ширина пучка дециметровых радиоволн в ионосферном канале с вытянутой крупномасштабной неоднородностью.

$$\frac{dD_{\beta}}{dt} = \frac{N_1}{a \cdot \sqrt{\epsilon_0^3}} \cdot \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t) \right),$$

$$\text{где } D_{\beta} = \frac{2 \cdot \sigma_{\beta}^2 \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t_k) \right)^2}{\sqrt{\pi} \cdot c}.$$

При моделировании задавались следующие параметры неоднородностей: $a = 10$ км, $\frac{\Delta N_e}{N_e} = 0.09$. Были рассчитаны зависимости среднеквадратичного отклонения угла прихода $\sigma(\beta_H)$ радиоволн от угла выхода β_H для различных рабочих частот для случая без регулярной неоднородности ($\chi = 0$, рис. 3б) и при совместном влиянии обоих типов неоднородностей ($\chi = 1$, рис. 3г).

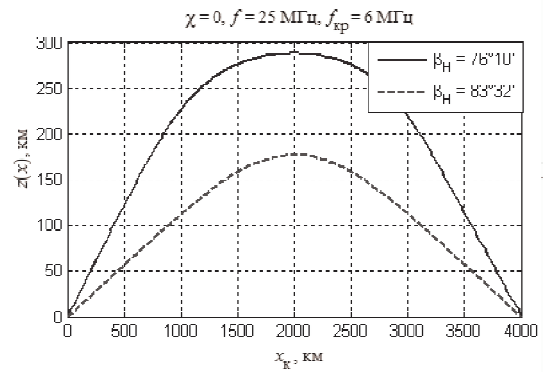
Из графиков, во-первых, следует рост $\sigma(\beta_H)$ при увеличении угла выхода β_H . Непосредственно на границе зоны молчания $\sigma(\beta_H)$ обращается в бесконечность, что связано с неприменимостью расчетных формул в этой точке.

Во-вторых, с ростом β_H заметно уменьшается $\sigma(\beta_H)$, что связано с появлением лучей, отраженных от крупномасштабной неоднородности. В данном случае интенсивная регулярная неоднородность экранирует верхнюю часть ионосферы, где лучи могли бы испытать наибольшие флуктуации.

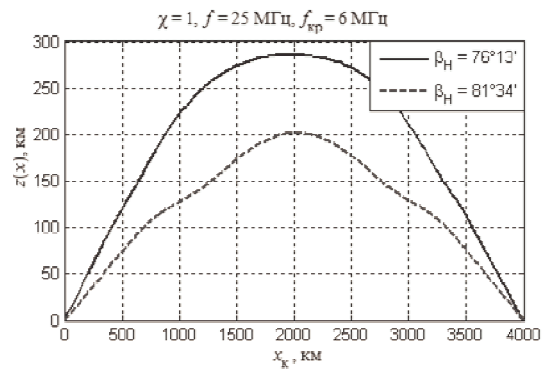
Наконец, в-третьих, величина $\sigma(\beta_H)$ существенно зависит от рабочей частоты и интенсивности регулярной неоднородности. С увеличением рабочей частоты максимальные значения $\sigma(\beta_H)$ отмечаются при больших β_H . Причем с увеличением параметра χ неоднородности появляются дополнительные максимумы для каждой из частот (рис. 3г).

Разработанный численно-аналитический алгоритм моделирования средних и флуктуационных характеристик информационного сигнала в канале связи показал высокую эффективность при оценке состояния ионосферного канала декаметрового радиосвязи. Из результатов выполненного компьютерного моделирования следует, что в естественных геофизических условиях в декаметровом радиоканале, подверженном воздействию вытянутой неоднородности повышенной электронной концентрации и неоднородностей турбулентного типа, нарушается частотно-угловой режим рефракции и рассеяния информационного сигнала.

При фиксированной диаграмме излучения передающего устройства с увеличением рабочей частоты растут дальность распространения, глубина проникновения и высота отражения ионосферных радиоволн. В широком диапазоне рабочих частот наибольшие значения дисперсии направления распространения декаметрового радиосигнала в ионосферном канале возникают вблизи границ зон молчания.



а



б

Рис. 4. Влияние регулярной неоднородности на траектории нижнего и верхнего лучей.

Крупномасштабная регулярная неоднородность приводит не только к деформации естественных зон молчания, но и может сформировать дополнительные области вдоль поверхности Земли, где отсутствует информационный сигнал. С ростом интенсивности крупномасштабной неоднородности в частотной зависимости дисперсии угла прихода появляется немонотонный ход.

Литература

1. Яковлев О. И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.
2. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Ч.2. 320 с.
3. Ageeva E.T., Baginov A.B., Kim D.B. Программа: Расчёт параметров сигнала в неоднородном ионосферном канале «Ionosphaera K.1.11» гос. рег. № 2011612474.
4. Budden K.G. Radio wave in the ionosphere. Cambridge: Cambridge University Press, 1961. 532 p.

References

1. Yakovlev O. I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. Radio wave propagation. M.: LENAND, 2009. 496 s.
2. Isimaru A. Wave propagation and scattering in randomly inhomogeneous media. Ch.2. M.: Mir, 1981. 320 s.
3. Ageeva E.T., Baginov A.B., Kim D.B. Program: Calculation of signal data in inhomogeneous ionospheric channel «Ionosphaera K.1.11» gos. reg. № 2011612474.
4. Budden K.G. Radio wave in the ionosphere. Cambridge: Cambridge University Press, 1961. 532 p.