

УДК 519.8

Численный эксперимент для оценки влияния облака искусственной ионосферной ионизации на состояние декаметрового радиоканала

Е.Т. Агеева¹, Н.Т. Афанасьев², А.В. Багинов¹, Д.Б. Ким¹, Н.И. Михайлов¹¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: Sphalerite@yandex.ru² Иркутский государственный университет, ул. Ленина 3, Иркутск, Россия

Статья поступила 4.06.2012, принята 13.11.2012

Оперативный численно-аналитический алгоритм моделирования статистических траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи использован для постановки и проведения численного эксперимента. Выполнено исследование влияния случайно-неоднородного облака искусственной ионосферной ионизации на частотно-угловой режим распространения и рассеяния декаметрового радиосигнала в канале «Земля – ионосфера» в широком диапазоне рабочих частот. Рассмотрены различные модели регулярных и статистических свойств искусственного образования. На основе компьютерных программ, представленных в пакете MATLAB и реализующих численно-аналитический алгоритм, рассчитаны лучевая картина, дистанционно-угловые характеристики и ширина пучка декаметровых радиоволн в искусственно-возмущенном ионосферном канале. Проведенный численный эксперимент показал, что дополнительная регулярная рефракция радиоволн в искусственном облаке не только приводит к фокусировке излучения, но и воздействует на процесс рассеяния, способствуя образованию широких пучков при распространении радиоволн в канале. Размеры искусственных зон молчания, дисперсия направления распространения и предельный угол выхода сигнала из канала «Земля – ионосфера» для выбранной модели облака ионосферной ионизации существенно зависят от рабочей частоты и интенсивности искусственной неоднородности.

Ключевые слова: ширина пучка радиоволн, корреляционная функция, дистанционно-угловая характеристика, зона молчания.

Numerical experiment for assessing the influence of a cloud of artificial ionospheric ionization on the state of a decameter radio channel

Е.Т.Агеева¹, Н.Т.Афанасьев², А.В.Багинов¹, Д.В.Ким¹, Н.И.Михайлов¹¹Bratsk state university, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: Sphalerite@yandex.ru²Irkutsk state university, 3, Lenin str., Irkutsk, Russia

The article received 04.06.2012, accepted 13.11.2012

The operative numerical and analytical algorithm of modeling of statistical tractor characteristics of information signal in a communication link is used for setting and carrying out numerical experiment. The research of influence of randomly-inhomogeneous clouds of artificial ionospheric ionization on a frequency and angular mode of distribution and dispersion of a decameter's radio signal in the channel Earth – the Ionosphere in a wide range of working frequencies is executed. Various models of regular and statistical properties of artificial education are considered. On the basis of the computer programs made in a MATLAB package, implementing numerical-analytical algorithm, calculated radiation pattern, remote and angular characteristics and bunchwidth of decameter radio signal in the artificial and indignant ionospheric channel is calculated. The numerical experiment showed that the additional regular refraction of radio-waves in an artificial cloud not only leads to radiation focusing, but also influences dispersion process, promoting formation of wide bunches at distribution of radio-waves in the channel. For the chosen model of a cloud of ionospheric ionization, the sizes of artificial zones of silence, dispersion direction of the distribution and a limiting angle of output signal from the channel Earth – the Ionosphere considerably depend on working frequency and intensity of artificial heterogeneity.

Keywords: bunchwidth of radio signal, correlation function, remote and angular characteristic, the silence zone.

Хорошо известно [1], что искусственные воздействия на приземную плазму приводят к вариациям ее параметров, которые, в свою очередь, изменяют рефракционные и рассеивающие свойства ионосферы. В настоящее время существует реальная возможность управления состоянием ионосферного радиоканала с помощью контролируемых искусственных возмущений [2]. В результате искусственного воздействия в ионосфере могут сформироваться новые плазменные облака

ионизации (рис. 1), которые при соответствующих условиях приводят не только к количественным, но и к качественным изменениям характеристик информационного сигнала в канале связи. В частности, при определенных пространственных положениях искусственного ионосферного облака в пункте приема могут возникать эффекты практически полного ослабления сигнала, многолучевости, фокусировки и дефокусировки [3]. Эти явления, ярко выраженные на фоне процессов,

протекающих в естественно регулярных условиях, вместе с тем, требуют дополнительного исследования. Учет тонкой турбулентной структуры облака может в значительной мере изменить характеристики информационного сигнала. Учитывая данное обстоятельство, для более адекватной оценки эффектов воздействия облака необходимо рассматривать процесс распространения радиоволн в случайно-неоднородном канале.

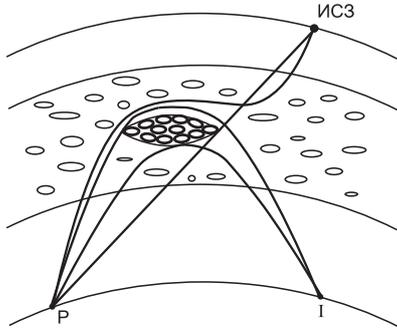


Рис. 1. Искусственное плазменное образование в ионосфере.

Для расчета статистических характеристик сигнала в канале связи широко используют лучевое приближение [4]. Однако ионосферное распространение декаметрового радиосигнала сопровождается рядом особенностей. В этих случаях вопросы применимости лучевого описания явлений требуют дополнительного изучения. Наиболее существенным эффектом процесса распространения декаметрового радиосигнала в ионосферном канале является формирование зоны молчания [5]. Для расчета энергетических характеристик сигнала на границе зоны молчания лучевое приближение не применимо. Тем не менее, оно правильно учитывает тенденции поведения характеристик информационного сигнала в окрестности этой границы.

В работе [6] предложен оперативный численно-аналитический алгоритм моделирования статистических траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи. С использованием этого алгоритма был поставлен численный эксперимент для оценки влияния облака искусственной ионосферной ионизации на характеристики декаметрового радиосигнала в канале «Земля – ионосфера – Земля» в широком диапазоне несущих рабочих частот.

В качестве исходной модели диэлектрической проницаемости ионосферного радиоканала была выбрана зависимость:

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

где z_m и z_{mE} – высоты максимумов ионизации слоев F^2 и E , соответственно; параметры h_m и h_{mE} – характеризуют толщину слоев; величины $f_{кр}$ и $f_{крE}$ – соответствующие критические частоты; f – несущая рабочая частота сигнала.

Модель регулярной структуры облака искусственной ионосферной ионизации представлялась в виде:

$$\epsilon_{rv} = -\kappa \frac{f_{кр}^2}{f^2} e^{-\left(\frac{z-z_m}{h_m}\right)^2 - \left(\frac{x-x_L}{L}\right)^2}, \quad (2)$$

где L и x_L – размер и горизонтальная координата центра облака относительно источника излучения; κ – интенсивность неоднородности.

Чтобы непосредственно применить численно-аналитический алгоритм [6] для оценки статистических траекторных характеристик радиосигнала в искусственно-возмущенном канале, в качестве невозмущенной модели среды канала, как и в [7], удобно выбрать регулярную модель диэлектрической проницаемости: $\epsilon_{0V} = \epsilon_{is} + \epsilon_{rv}$, а в качестве возмущения ϵ_1 рассматривать случайные искусственные неоднородности.

Для описания флуктуационной структуры облака использовались представления о квазиоднородном случайном поле искусственных неоднородностей с корреляционной функцией вида [8]:

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

где N_0 – гауссов пространственный коэффициент корреляции неоднородностей с масштабом a . Модель неоднородной части функции корреляции N_1 , характеризующая статистическую неоднородность облака, задавалась зависимостью:

$$N_1 = \epsilon_1^2 (1 - \epsilon_{is})^2, \quad (4)$$

$$\epsilon_1 = -\kappa \frac{f_{кр}^2}{f^2} e^{-\left(\frac{z-z_m}{h_m}\right)^2 - \left(\frac{x-x_L}{L}\right)^2}. \quad (5)$$

Для расчета траекторных характеристик радиосигнала с помощью численно-аналитического алгоритма [6] использовались компьютерные программы, составленные в пакете MATLAB «Ionosphaera k.1.11» [9]. При выполнении численного эксперимента были заданы следующие значения параметров: масштаб случайных неоднородностей $a = 10$ км, $\frac{\Delta N_{rv}}{N_{rv}} = 0.09$, $z_m = 300$ км, $z_{mE} = 125$ км, $h_m = 100$ км, $h_{mE} = 25$ км, $L = 500$ км, $f_{крE} = 3$ МГц, $f_{кр} = 6$ МГц. Динамика траекторных характеристик радиосигнала отслеживалась при изменении ряда параметров в соответствующих интервалах: $f = 10 - 25$ МГц с шагом 5 МГц, $\kappa = 0.01 - 1$ с шагом 0.02, $x_L = 250 - 750$ км с шагом 250 км.

На рис. 2 и 3 представлены результаты численных расчетов зависимости координаты z и дальности распространения лучей от угла выхода β_n (отсчитывается от вертикали) в интервале $45^\circ - 88^\circ$ с шагом 1 градус, рабочей частоты f в интервале от 10 до 25 МГц с шагом 5 МГц, длины L и координаты центра x_L неоднородности, а также интенсивности неоднородности в интервале $\kappa = 0 - 0.1$ с шагом 0.02.

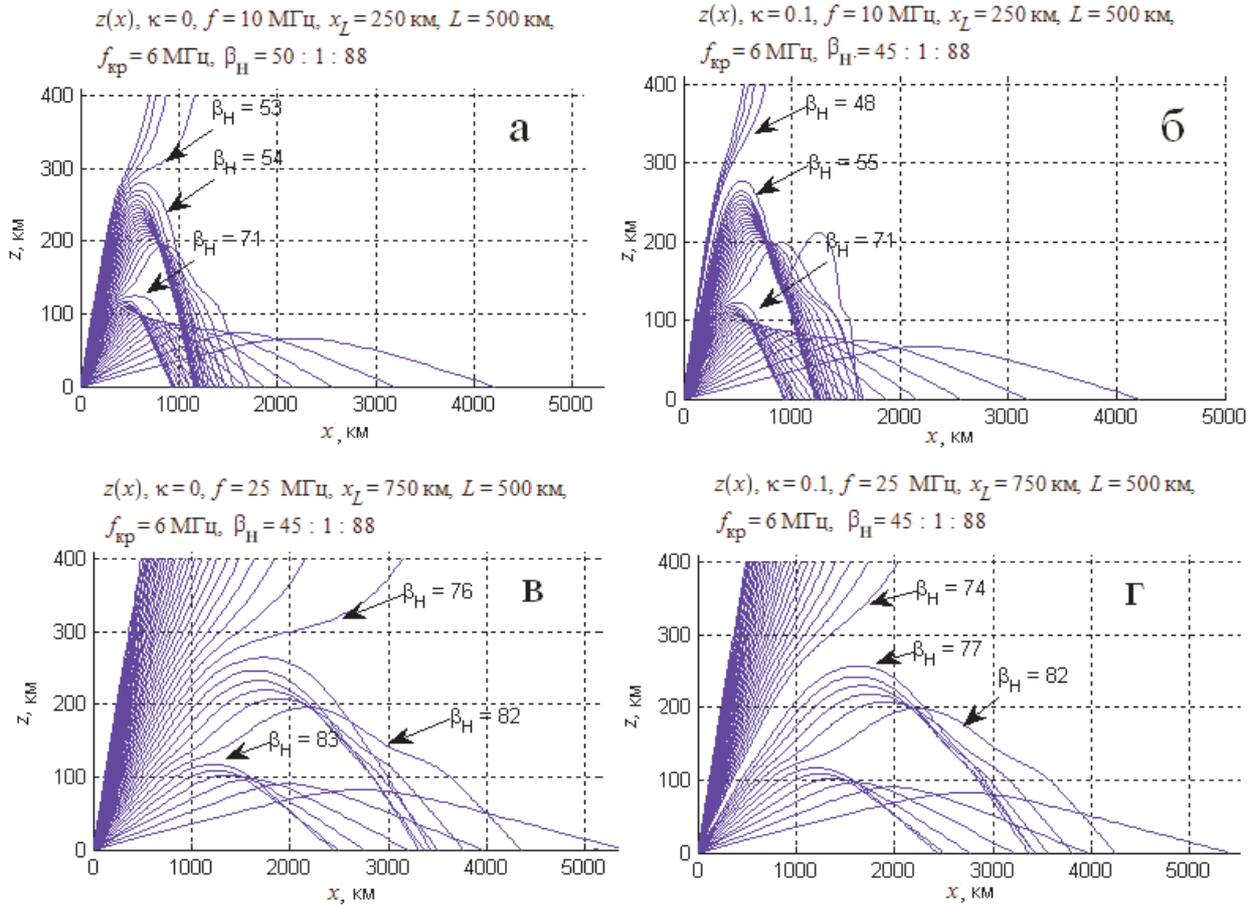


Рис. 2. Лучевая картина в искусственно-возмущенном канале декаметровая радиосвязи.

Из рис. 2 и 3 следует, что при выбранных значениях ионосферных параметров предельный угол выхода β_H , при котором радиоволны проходят через искусственно-возмущенную ионосферу, существенно зависит от рабочей частоты f , интенсивности κ и слабо зависит от координаты центра облака x_L . С увеличением интенсивности κ предельный угол выхода β_H уменьшается (на рис. 2 а $\beta_H=53^\circ$ при $\kappa=0$ и рис. 2 б $\beta_H=48^\circ$ при $\kappa=0.1$). С увеличением рабочей частоты f предельный угол β_H увеличивается (на рис. 2 в $\beta_H=76^\circ$ при $\kappa=0$ и рис. 2 г $\beta_H=74^\circ$ при $\kappa=0.1$). Уменьшение угла выхода β_H при увеличении параметра κ и увеличение β_H при росте рабочей частоты f связаны с дисперсионными свойствами диэлектрической проницаемости возмущенной ионосферы. Облако искусственной ионизации становится более прозрачным для радиосигналов с большей несущей частотой. Расчеты показали, что минимальная дальность распространения радиосигнала (дальность зоны молчания) существенно зависит от рабочей частоты и интенсивности облака κ . Вследствие влияния облака на лучевой картине наблюдаются дополнительные изменения пространственной плотности лучей. Тем самым, в присутствии облака происходит деформация каустики, сформированной в естественном ионосферном канале.

Численный эксперимент показал сложную зависимость дальности распространения радиосигнала от угла выхода. В естественных условиях ($\kappa=0$) на дистанционно-угловых характеристиках наблюдаются два пика

в широком интервале рабочих частот. С увеличением рабочей частоты f эти пики сдвигаются в сторону больших углов β_H и увеличивается дальность распространения радиоволн x_k (рис. 3 а). При воздействии на канал искусственной ионизации $\kappa=0.1$ (рис. 3 б и рис. 3 г) появляются дополнительные пики, обусловленные отражением радиосигнала от спорадического облака. Также искусственное облако ионизации оказывает значительное влияние на форму траектории радиоволн. Демонстрация этого эффекта приведена на рис. 4, где сплошная линия – Педерсоновский луч [10], отраженный от слоя $F2$, пунктирная линия – нижний луч, отраженный от слоя E .

Также были рассчитаны и построены графики зависимости ширины пучка радиоволн в пункте приема от рабочей частоты f , угла выхода луча β_H , координаты центра x_L и интенсивности неоднородности κ (рис. 4 а и рис. 4 б). Из результатов численных расчетов следует, что в естественных условиях ($\kappa=0$) ширина пучка радиоволн для выбранной модели равна нулю. В случае $\kappa \neq 0$ ширина пучка сильно зависит от рабочей частоты f , координаты центра неоднородности x_L и угла выхода β_H луча (рис. 4 а и рис. 4 б), причем с ростом x_L максимумы σ_B сдвигаются в сторону больших углов β_H . Например, из рис. 4 а и рис. 4 б видно, что при частоте $f=25$ МГц и $x_L=250$ км максимум σ_B наблюдается при угле $\beta_H=75^\circ$ (рис. 3 а), в то время как при $x_L=750$ км этот максимум возникает при угле $\beta_H=78^\circ$. Данный эффект связан с дисперсионными свойствами облака искусственной ионизации.

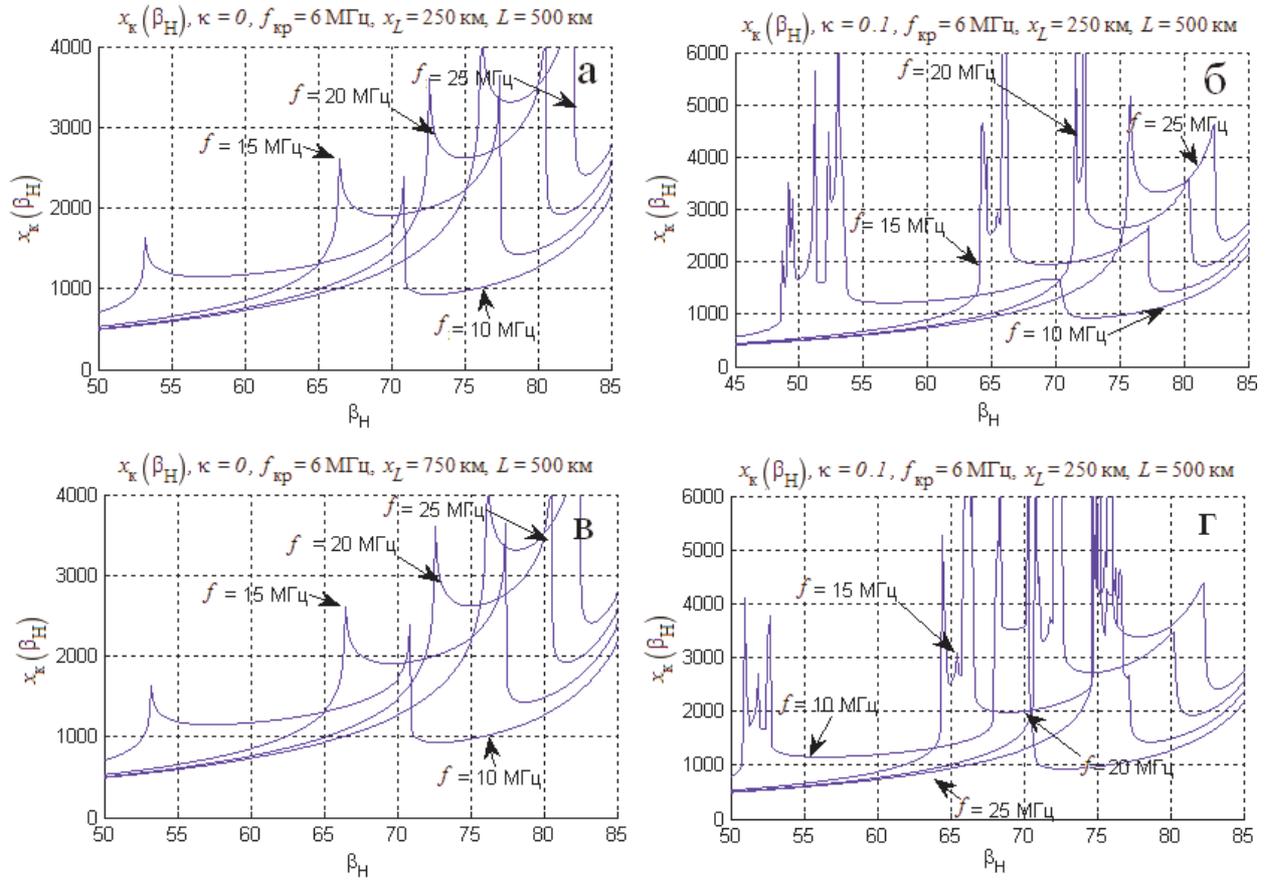


Рис. 3. Частотно-угловые режимы сильного воздействия облака искусственной ионизации на декаметровый радиоканал.

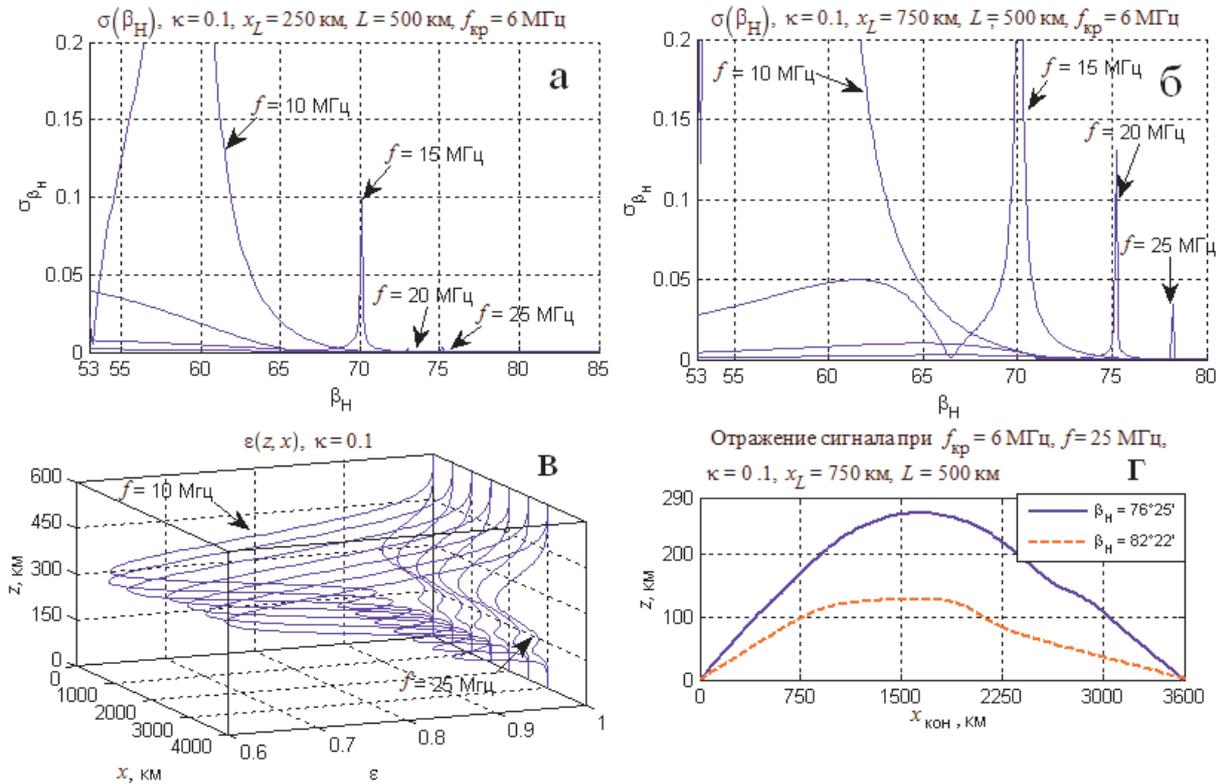


Рис. 4. Зависимость ширины пучка радиоволн в пункте приема от угла выхода в искусственно-возмущенных условиях.

Заключение

1. Проведенный численный эксперимент показал, что для выбранной модели облака искусственной ионосферной ионизации предельный угол выхода радиосигнала из связного канала «Земля – ионосфера – Земля» существенно зависит от рабочей частоты и интенсивности искусственной неоднородности. С ростом искусственного возмущения угол выхода уменьшается, но возрастает с увеличением рабочей частоты.

2. Протяженность зоны молчания в искусственно-возмущенных условиях непосредственно зависит от рабочей частоты и интенсивности искусственной неоднородности. В присутствии искусственного образования появляются дополнительные следы на дистанционно-угловой характеристике, обусловленные отражением радиоволн от спорадической неоднородности.

3. Увеличение интенсивности турбулентных неоднородностей, входящих в состав искусственного облака ионизации, приводит к росту ширины пучка радиоволн в пункте приема. Ширина пучка существенно зависит от рабочей частоты, координаты центра и интенсивности регулярной структуры облака ионизации. Рост интенсивности регулярной составляющей искусственного образования приводит к максимальной ширине пучка радиоволн на больших предельных углах выхода сигнала из канала связи.

Литература

1. Филипп Н.Д., Ораевский В.Н., Блаунштейн Н.Ш., Ружин Ю.Я. Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере Земли. Кишинев: Штиинца, 1986. 246 с.
2. Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 273 с.
3. Блюх В.В., Брюховецкий А.С. Фокусировка радиоволн искусственно-созданной ионосферной линзой // Геомагнетизм и аэронавигация. 1969. Т.9, №3. С. 545-549.
4. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1979. 304 с.
5. Яковлев О. И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.

6. Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Багинов А.Б., Ким Д.Б., Михайлов Н.И. Численно-аналитический алгоритм моделирования флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3 (15). С. 61-66.

7. Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Багинов А.Б., Ким Д.Б., Михайлов Н.И. Компьютерное моделирование траекторных характеристик декаметрового радиосигнала в ионосферном канале связи // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3 (15). С. 66-70.

8. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Ч. 2. 320 с.

9. Расчёт параметров сигнала в неоднородном ионосферном канале «Ionosphaera K.1.11»: программа для ЭВМ / Агеева Е.Т., Багинов А.Б., Ким Д.Б. Св. ГР. № 2011612474; зарег. в реестре программ 25.03.11. (Федер. служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам).

9. Budden K.G. Radio wave in the ionosphere. Cambridge: Cambridge. University Press, 1961. 532 p.

References

1. Filipp N.D., Oraevskij V.N., Blaunshstein N.Sh., Ruzhin Ju.Ja. Jevoljucija iskusstvennyh plazmennyh neodnorodnostej v ionosfere Zemli. Kishinev: Shtiinca, 1986. 246 s.
2. Blagovewenskaja N.F. Geofizicheskie jeffekty aktivnyh vozdejstvij v okolozemnom kosmicheskom prostranstve. SPb.: Gidrometeoizdat, 2001. 273 s.
3. Blioh V.V., Brjuhovetskij A.S. Fokusirovka radiovoln iskusstvenno-sozdannoj ionosfernoj linzoy // Geomagnetizm i ajeronomija. 1969. T.9. №3. S. 545-549.
4. Kravcov Ju.A., Orlov Ju.I. Geometricheskaja optika neodnorodnyh sred. M.: Nauka, 1979. 304 s.
5. Jakovlev O. I., Jakubov V.P., Urjadov V.P., Pavel'ev A.G. Rasprostranenie radiovoln.- M.: LENAND, 2009. 496 s.
6. Ageeva E.T., Afanas'ev N.T., Baginov A.B., Kim D.B, Mihajlov N.I. Chislenno-analiticheskij algoritm modelirovanija fluktuacij traektornyh harakteristik informacionnogo signala v kanale svjazi. Sistemy. Metody. Tehnologii 3 (15) 2012 (v pechati).
7. Ageeva E.T., Afanas'ev N.T., Baginov A.B., Kim D.B, Mihajlov N.I. Komp'juternoe modelirovanie traektornyh harakteristik dekametrovogo radiosignala v ionosfernom kanale svjazi. Sistemy. Metody. Tehnologii 3 (15) 2012 (v pechati).
8. Isimaru A. Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno neodnorodnyh sredah. Ch.2. M.: Mir, 1981. 320 s.
9. Ageeva E.T., Afanas'ev N.T., Baginov A.B., Kim D.B. Programma: Raschjot parametrov signala v neodnorodnom ionosfernom kanale «Ionosphaera K.1.11» gos. reg. № 2011612474.
10. Budden K.G. Radio wave in the ionosphere. Cambridge: Cambridge. University Press, 1961. 532 p.