

К. К. Азука¹
А.А. Столяров²

K.K. Azuka
A.A. Stolyarov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ИОНОСФЕРЫ, ДЛЯ РЛС ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДИАПАЗОНА УКВ

THE MODELING NATURAL PASSIVE CLUTTERS DUE TO INFLUENCE OF IONOSPHERE FOR LONG-RANGE RADAR VHF

Представлена модель естественных пассивных помех, обусловленных влиянием ионосферы, для РЛС ДО диапазона УКВ, учитывающая специфику их возникновения. Рассмотрен порядок моделирования обнаружения отражений от ионосферных неоднородностей РЛС ДО. В качестве примера показаны результаты имитационного моделирования отражений от магнитоориентированных неоднородностей электронной концентрации среднеширотной ионосферы для РЛС ДО диапазона УКВ с фазированной антенной решеткой. Предложенная модель может быть использована при разработке программного обеспечения, предназначенного для проведения испытаний РЛС ДО.

The model of natural clutters due to influence of the ionosphere, for long-range radar VHF specific they arise is presented. The procedure for modeling the detection of reflections from the ionospheric inhomogeneities is considered. As an example, the results of simulation of reflections from magnetically oriented inhomogeneities of the electron concentration of the midlatitude ionosphere for long-range radar VHF with a phased antenna array are pointed. The proposed model can be used to develop software intended for testing of long-range radar.

Keywords: modeling, passive jamming, auroral interference, magnetically oriented inhomogeneities, mirror scattering of ultra short waves, radar.

Ключевые слова: моделирование, пассивные помехи, авроральные помехи, магнитоориентированные неоднородности, ракурсная чувствительность, РЛС.

Помехи, обусловленные рассеянием излученной энергии на неоднородностях электронной концентрации области E ионосферы (авроральных неоднородностях (АН) северных широт и магнитоориентированных неоднородностях (МОН) среднеширотной ионосферы), оказывают существенное влияние на качество функционирования РЛС дальнего обнаружения (РЛС ДО) диапазона УКВ. Наличие помех приводит к перегрузке системы первичной обработки сигналов, формированию ложных траекторий и снижению удельной доли энергии, идущей на обслуживание реальных объектов.

В статье представлена модель помех, обусловленных влиянием ионосферы, позволяющая оценить пространственные и отражательные характеристики областей помех.

АН, а также МОН среднеширотной ионосферы сосредоточены в достаточно тонком слое по высоте (0,5–20 км), простирающемся над поверхностью Земли на расстояние до нескольких сотен километров [1; 2].

Результаты экспериментальных исследований авроральных помех и радиоотражений от МОН среднеширотной ионосферы показали, что даже в сравнительно небольших рассеивающих объемах (не более одного кубического километра) содержится ансамбль «псевдонезависимых» отражателей, движущихся относительно друг друга [3]. Соответственно амплитуда ре-

¹ Кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

² Адыюнкт, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

зультулирующего отраженного сигнала является суперпозицией большого набора составляющих, соответствующих элементарным волнам со своими рассеивающими центрами (случайными амплитудами и фазами).

Все неоднородности ионосферы, расположенные в пределах общего объема и облучаемые передающей антенной, становятся источниками рассеянного излучения, которое воздействует на приемную антенну. Мощность сигнала на входе приемной антенны, создаваемая объемом рассеяния, определяется формулой [3]:

$$P_{np} = \frac{P_{II} D_1 D_2 \lambda^2 \eta}{64\pi^3} \int_V \frac{\sigma' dV}{r_1^2 r_2^2}, \quad (1)$$

где P_{II} – излучаемая мощность, Вт; D_1 и D_2 – коэффициенты направленности передающей и приемной антенн; λ – длина волны, м; η – коэффициент потерь из-за среды распространения, неидеальности трактов обработки сигналов и др., $0 \leq \eta \leq 1$; r_1 и r_2 – расстояния от передатчика и приемника до центра элемента dV рассеивающей области, км; σ' – удельная ЭПР, представляет собой отношение полной наблюдаемой ЭПР к величине импульсного объема, освещаемого РЛС (размерность $\text{м}^2/\text{м}^3 = 1/\text{м}$).

При расчетах обычно пользуются не мощностью принятого сигнала, а ее отношением к мощности шумов $P_{ш}$ на входе РЛС – отношением сигнал/шум (ОСШ) $q = P_{np} / P_{ш}$.

Объединяя все параметры, относящиеся к РЛС, в один множитель, который называют потенциалом РЛС $\Pi = \frac{P_{II} D_1 D_2 \lambda^2 \eta}{64\pi^3 P_{ш}}$, учитывая, что для РЛС ДО $r_1 \approx r_2$, получим:

$$q = \Pi \int_V \frac{\sigma'}{R^4} dV.$$

На практике потенциал РЛС определяется по результатам натуральных экспериментов путем измерения q при известных характеристиках РЛС и цели. При наличии оценки потенциала для расчета ОСШ от целей, находящихся на произвольной дальности, удобно использовать следующую формулу:

$$q = \Pi_0 R_0^4 \int_V \frac{\sigma'}{R^4} dV, \quad (2)$$

где Π_0 – оценка потенциала РЛС (величина, численно равная ОСШ от цели с $\sigma_{эфф} = 1 \text{ м}^2$, находящейся на нормали к антенному полотну, на дальности R_0);

R – дальность, для которой рассчитывается ОСШ, км.

Выражение (2) с учетом отклонения луча фазированной антенной решетки в азимутальной и угломестной плоскостях от нормали антенны, а также с учетом положения рассеивающего объема относительно максимумов диаграмм направленности антенн принимает вид:

$$q = \Pi_0 R_0^4 \int_V \frac{\sigma' F_p(\alpha, \beta) F_R(\alpha, \beta) F_T(\alpha, \beta)}{R^4} dV, \quad (3)$$

где $F_p(\alpha, \beta) = \cos^2(\alpha - \alpha_0) \cos^2(\beta - \beta_0)$ – функция, учитывающая изменение потенциала в зависимости от отклонения диаграммы направленности от нормали [4]; α_0, β_0 – значения азимута и угла места, соответствующие максимуму потенциала; α, β – текущие значения азимута и угла места источника сигнала.

$$F_{R(T)}(\alpha, \beta) = \left(\frac{\sin(N_H \pi(s/\lambda)(\sin(\alpha_n) - \sin(\alpha_x)))}{N_H \sin(\pi(s/\lambda)(\sin(\alpha_n) - \sin(\alpha_x)))} \right) \cdot$$

$$\left(\frac{\sin(N_V \pi(s/\lambda)(\sin(\beta_n) - \sin(\beta_x)))^2}{N_V \sin(\pi(s/\lambda)(\sin(\beta_n) - \sin(\beta_x)))} \right) -$$

функции, учитывающие изменение величины сигнала в зависимости от положения центра рассеивающего объема относительно максимума диаграммы направленности передающей (приемной) антенн для РЛС с ФАР [5]; N_H, N_V – число излучателей в пределах антенны по горизонтали и вертикали; s – шаг решетки, м; λ – длина волны РЛС, м; α_n, β_n – углы отклонения центра элементарного объема от нормали; α_x, β_x – углы отклонения максимума ДН по азимуту и углу места от нормали.

$$\sigma' = (2\pi)^{\frac{3}{2}} \frac{\pi^2 \sin^2 \chi}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 T^2 L \cdot e^{\left(-2k^2 \left(T^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} (L^2 - T^2) \sin^2 \psi \right) \right)}$$

удельная ЭПР области ионизации [6]; $k = 2\pi/\lambda$ (λ – длина волны РЛС); χ – угол между электрическим вектором падающей волны и волновым вектором рассеянной волны; T – поперечный радиус корреляции (относительно осей x и y), м; L – продольный (относительно оси z) радиус корреляции, м; $\left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2$ – средний квадрат флуктуаций электронной концентрации в рассеивающей области; λ_N – плазменная длина волны, м; θ – угол между волновым вектором падающей и рассеянной волн; ψ – угол между волновым вектором падающей волны и плоскостью, нормальной к оси z (ракурсный угол).

Ракурсный угол ψ определяется по соотношению:

$$\psi = \arcsin \frac{H_x r_x + H_y r_y + H_z r_z}{|\vec{H}| |\vec{r}|},$$

где H_x, H_y, H_z – составляющие геомагнитного поля в точке отражения, соответственно, по осям x, y, z , направленным на север, восток и к центру Земли. Значения H_x, H_y, H_z вычисляются в соответствии с выбранной моделью геомагнитного поля Земли, например IGRF (международное геомагнитное аналитическое поле);

$$|\vec{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2};$$

r_x, r_y, r_z – соответствующие составляющие волнового вектора (рассчитываются исходя из координат дислокации РЛС);

$$|\vec{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}.$$

Учитывая, что РЛС ДО регистрируют обратное рассеяние, т.е. $\chi = 90^\circ$ и $\theta = 180^\circ$, имеем:

$$\sigma' = (2\pi)^2 \frac{\pi^2}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 T^2 e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2} e^{-\frac{8\pi^2(L^2 - T^2)}{\lambda^2} \sin^2 \psi} L. \quad (4)$$

Как видно из (3) и (4), первообразная подынтегральной функции в (3) не выражается через аналитические функции, и значения ОСШ могут быть получены численным интегрированием.

Полагая, что величины $L, T, \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2, \lambda_N$ в пределах объема рассеяния в течение времени облучения имеют постоянное значение, получим:

$$q = (2\pi)^2 \frac{\pi_0 R_0^4 L \pi^2}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 T^2 e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2} \rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{F_{Pi}(\alpha, \beta) F_{Ri}(\alpha, \beta) F_{Ti}(\alpha, \beta)}{R_i^4} e^{-\frac{8\pi^2(L^2 - T^2)}{\lambda^2} \sin^2 \psi_i} \Delta V_i, \quad (5)$$

где n – количество элементарных объемов ΔV_i , на которые разбивается общий объем рассеяния области ионизации V .

Для оценки сверху величины рассеивающего объема МОН ионосферы можно использовать выражение для разрешенного объема РЛС:

$$V = R^2 \Delta\alpha \Delta\beta \Delta R, \quad (6)$$

где R – дальность до центра рассеивающего объема; $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta R$ – разрешающая способность РЛС по азимуту, углу места, дальности.

Анализ множителя $T^2 e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2}$ в (5) показывает, что наибольший вклад он вносит при

$$T^2 = \frac{\lambda^2}{78,957}, \text{ при этом } e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2} = 0,368.$$

С учетом сделанного допущения:

$$q = \frac{0,724 \pi_0 R_0^4 L \lambda^2}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 \rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{F_{Pi}(\alpha, \beta) F_{Ri}(\alpha, \beta) F_{Ti}(\alpha, \beta)}{R_i^4} e^{-\frac{8\pi^2(L^2 - T^2)}{\lambda^2} \sin^2 \psi_i} \Delta V_i. \quad (7)$$

Рассмотрим порядок моделирования обнаружения отражений от ионосферных неоднородностей РЛС ДО.

Положение и размеры области рассеяния (АН, МОН среднеширотной ионосферы) в зоне обзора РЛС СПРН задаются: географическими координатами центра; продольным и поперечным размерами; высотой и толщиной слоя.

По каждому обнаруженному сигналу в РЛС ДО формируется отметка. Под отметкой понимается набор числовых дискретных характеристик, получаемых обработкой принятых эхо-сигналов. Конкретный набор характеристик, составляющих отметку, зависит от типа РЛС. Как правило, отметка включает оценки дальности, азимута, угла места, амплитуды (мощности) сигнала, а также радиальной скорости для РЛС, производящих измерение доплеровского сдвига частоты принятого сигнала.

При просмотре одного углового направления для каждого измерительного луча по формуле (7) осуществляется расчет ОСШ. Расчеты проводятся с учетом следующих рассуждений.

Размеры элементарных объемов должны выбираться так, чтобы в их пределах ракурсный угол практически не изменялся. Для получения удовлетворительной точности ОСШ угловые размеры ΔV_i (по азимуту $\Delta\epsilon_i$ и углу места $\Delta\beta_i$) не должны превышать $0,1^\circ$. Исходя из этого, в каждом разрешенном элементе по дальности производится разбиение луча на элементарные объемы. Для каждого центра ΔV_i осуществляется расчет географических координат и высоты (φ, λ, h). Суммирование в формуле (7) осуществляется по элементарным объемам, у которых центр (φ, λ, h) принадлежит области рассеяния. Величина ΔV_i рассчитывается аналогично (6).

Значения $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2, \lambda_N$ и L , входящие в формулу (7), могут быть получены в результате обобщения экспериментальных исследований, опубликованных в [1; 2; 8–10].

Плотность распределения вероятностей амплитуды отраженного от АН и МОН среднеширотной ионосферы сигнала описывается законом Рэлея, а мощность – экспоненциальным законом [7]. Доплеровское смещение частоты отраженного сигнала (для РЛС ДО, производящих соответствующее измерение), моделируется случайной величиной, имеющей нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и СКО, равным 1 кГц.

Получение оценок азимута и угла места осуществляется в соответствии с алгоритмами работы конкретной РЛС ДО.

На рисунке представлены результаты моделирования для следующих исходных данных. РЛС ДО с фазированной антенной решеткой располагается в точке с координатами: 47° с.ш., 47° в.д., азимут биссектрисы зоны действия 110° , ширина зоны действия по азимуту 120° , по углу места 16° , ширина диаграммы направленности по азимуту $1,5^\circ$, по углу места $1,5^\circ$, $\Delta R = 300$ м, потенциал РЛС 40 дБ, порог обнаружения 15 дБ, рабочая длина волны РЛС 0,8 м. Центр ионосферной неоднородности находится в точке с координатами $50,4^\circ$ с.ш., $58,7^\circ$ в.д., высота 110 км, толщина неоднородности по высоте 3 км, продольный размер 5 км, поперечный размер 5 км, $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 = 0,00003$, $L = 10$ м, $\lambda_N = 75$ м. РЛС ДО осуществляет просмотр нижней барьерной зоны обзора (минимальный угол места -2° , ширина по углу места $1,5^\circ$). Моделировалось 15 циклов просмотра. Всего было сформировано 143 отметки.

Анализ полученных результатов показал, что, варьируя параметрами ионосферных неоднородностей, удастся получить параметры отметок, схожие с параметрами, полученными экспериментально в ходе эксплуатации РЛС ДО в условиях воздействия ионосферных помех.

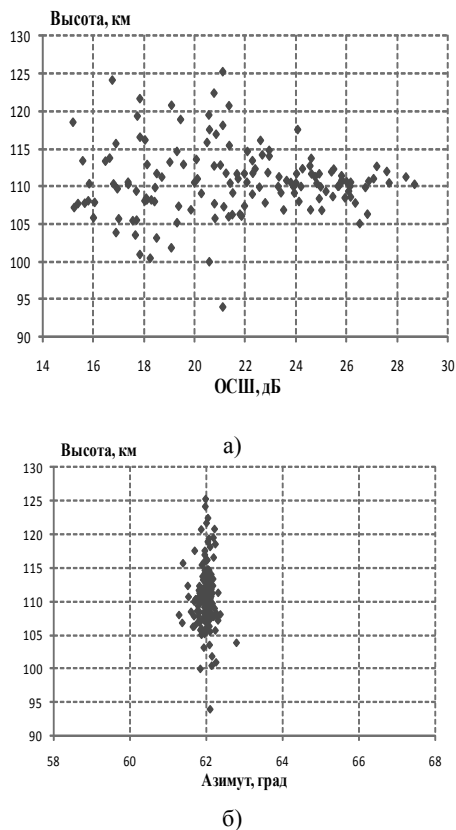


Рис.: а – распределение ОСШ отметок по высоте, б – распределение отметок в плоскости азимут – высота

Выводы

Предложенная модель помех, обусловленных отражениями от ионосферы, учитывает особенности физических процессов, определяющих специфику их возникновения.

Модель позволяет проводить оценивание алгоритмов работы РЛС ДО в условиях воздействия пассивных помех, обусловленных влиянием ионосферы, и может быть использована при разработке программного обеспечения, предназначенного для проведения испытаний РЛС ДО.

Литература

1. Свердлов Ю.Л. Морфология радиоавро-ры – Л. : Наука, 1982. – 160 с.
2. Филлип Н.Д. Ракурсное рассеяние УКВ среднеширотной ионосферой. – Кишинев : Штиинца, 1980. – 244 с.
3. Долуханов М.П. Распространение радиоволн : учебник для вузов. – М. : Связь, 1972. – 336 с., с ил., табл., библи.
4. Моделирование в радиолокации / А.И. Леонов, В.Н. Васенев, Ю.И. Гайдуков и др.; под ред. А.И. Леонова. – М. : Сов. радио, 1979. – 264 с., с ил.
5. Справочник по радиолокации / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы : в 2 кн. – М. : Техносфера, 2014. – Книга 1. – 672 с.
6. Багряцкий Б.А. Радиолокационные отражения от полярных сияний // Успехи физических наук. – 1961. – Выпуск 2. – Т. 73.
7. Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е. Дулевича. – М. : Сов. радио, 1964. – 732 с.
8. Мизун Ю.Г. Распространение радиоволн в высоких широтах. – М. : Радио и связь, 1986. – 144 с. ил.
9. Свердлов Ю.Л. Радарные исследования анизотропных мелкомасштабных неоднородностей полярной ионосферы : дис. ... д-ра тех. наук. – Мурманск, 1990. – 410 с.
10. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. – М. : Наука, 1988. – 528 с.
11. Котиков П.Е. Репликация данных между серверами баз данных в среде геоинформационных систем / П.Е. Котиков, А.А. Нечай // Вестник Российского нового университета. Сер. «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2015. – Выпуск 1. – С. 90–93.