

УДК 621.396.967

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЛС ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДИАПАЗОНА УКВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ИОНОСФЕРЫ

Азука К.К., Столяров А.А.

*ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, e-mail: stolyarov-a77@yandex.ru*

В настоящей статье представлена модель функционирования радиолокационной станции дальнего обнаружения диапазона УКВ при воздействии естественных пассивных помех, обусловленных рассеянием излученной энергии на неоднородностях электронной концентрации E-слоя ионосферы (авроральных неоднородностях северных широт и магнитно-ориентированных неоднородностях E-слоя среднеширотной ионосферы). Особенностью представленной модели является учёт специфики возникновения данных пассивных помех. Рассмотрен порядок моделирования обнаружения отражений от магнитно-ориентированных неоднородностей E-слоя ионосферы. В качестве примера показаны результаты имитационного моделирования воздействия на радиолокационную станцию дальнего обнаружения диапазона УКВ с фазированной антенной решеткой отражений от магнитно-ориентированных неоднородностей E-слоя среднеширотной ионосферы, отличающихся размерами и величиной электронной концентрации. Предложенная модель может быть использована при разработке программного обеспечения, предназначенного для проведения испытаний радиолокационных станций дальнего обнаружения.

Ключевые слова: модели функционирования РЛС, модели естественных пассивных помех, авроральные помехи, магнитно-ориентированные неоднородности, ракурсная чувствительность, РЛС

MODELING OF FUNCTIONING OF LONG-RANGE RADAR VHF UNDER INFLUENCE OF NATURAL CLUTTER CAUSED BY THE INFLUENCE OF THE IONOSPHERE

Azuka K.K., Stolyarov A.A.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: stolyarov-a77@yandex.ru

In this article presents the model of functioning of the radar stations of the far detection range VHF when exposed to natural passive noise caused by scattering of radiated energy by inhomogeneities of the electron density E-layer of ionosphere (auroral inhomogeneities in Northern latitudes and magnetically oriented inhomogeneities in the E-layer mid-latitude ionosphere). This model takes into account peculiarities of occurrence of ionospheric interference. As an example, shows the simulation results of the effect on radar detection of long-range VHF phased array radar reflections from magnetically oriented inhomogeneities in the E-layer mid-latitude ionosphere, characterized by the size and magnitude of the electron concentration. The proposed model can be used to develop software intended for testing of radar stations of distant detection.

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

Помехи, обусловленные рассеянием излученной энергии на неоднородностях электронной концентрации области E ионосферы (авроральных неоднородностях (АН) северных широт и магнитно-ориентированных неоднородностях (МОН) E-слоя 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 представлен подход к моделированию функционирования РЛС ДО при воздействии естественных пассивных помех, обусловленных влиянием ионосферы.

Наблюдаемые РЛС ДО АН северных широт и МОН E-слоя среднеширотной ионосферы, как правило, находятся в диапазоне высот 95–125 км, при этом толщина слоя неоднородностей составляет 0,5–20 км, а их продольный и поперечный размеры могут иметь величину до нескольких сотен километров [8, 10].

Результаты экспериментальных исследований авроральных помех и радиотражений от МОН E-слоя среднеширотной ионосферы показали, что даже в сравнительно небольших рассеивающих объемах (не более одного кубического километра) содержится ансамбль «псевдонезависимых» отражателей, движущихся относительно друг друга [2]. Соответственно, амплитуда результирующего 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 [2]:

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

где $P_{\text{и}}$ – 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 $P_{\text{ш}}$ на входе РЛС – отношением сигнал/шум (ОСШ) $q = P_{\text{пр}}/P_{\text{ш}}$.

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

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

$$F_{R(T)}(\alpha, \beta) = \left(\frac{\sin(N_H \pi(s/\lambda)(\sin(\alpha_H) - \sin(\alpha_x)))}{N_H \sin(\pi(s/\lambda)(\sin(\alpha_H) - \sin(\alpha_x)))} \cdot \frac{\sin(N_V \pi(s/\lambda)(\sin(\beta_H) - \sin(\beta_x)))}{N_V \sin(\pi(s/\lambda)(\sin(\beta_H) - \sin(\beta_x)))} \right)^2,$$

где N_H , N_V – число излучателей в пределах антенны по горизонтали и вертикали; s – шаг решетки, м; λ – длина волны РЛС, м; α_H , β_H – углы отклонения центра элементарного объема от нормали; α_x , β_x – углы отклонения максимума ДН по азимуту и углу места от нормали.

Удельная ЭПР области ионизации [1]

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

где $k = 2\pi/\lambda$ (λ – длина волны РЛС); χ – угол между электрическим вектором падающей волны и волновым вектором рассеянной волны; T – поперечный радиус корреляции

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 объектов наблюдения, находящихся на произвольной дальности, удобно использовать следующую формулу:

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

где Π_0 – оценка потенциала РЛС (величина, численно равная ОСШ от цели с $\sigma_{\text{эфф}} = 1 \text{ м}^2$, 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 углометной 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 – значение азимута и угла места, соответствующие максимуму потенциала; α , β – текущие значения азимута и угла места источника сигнала.

Функции, учитывающие изменение величины сигнала в зависимости от положения центра рассеивающего объема относительно максимума диаграммы направленности передающей (приемной) антенн для РЛС с ФАР [6]

(относительно осей x и y), м; L – продольный (относительно оси z) радиус корреляции, м;

$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2$ – средний квадрат флуктуаций элек-

тронной 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);

$$q = (2\pi)^{\frac{3}{2}} \frac{\Pi_0 R_0^4 L \pi^2}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 T^2 e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2} \sum_{i=1}^n \frac{F_{Pi}(\alpha, \beta) F_{Ri}(\alpha, \beta) F_{Ti}(\alpha, \beta)}{R_i^4} e^{-\frac{8\pi^2(L^2 - T^2)}{\lambda^2} \sin^2 \psi_i} \Delta V_i, \quad (5)$$

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

Для оценки сверху величины рассеивающего объема МОН Е-слоя 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 он вносит существенный вклад лишь

для тех значений T^2 , которые близки к $T^2 = \frac{\lambda^2}{78,957}$, при этом $e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2} = 0,368$.

С учетом сделанного допущения

$$q = \frac{0,724 \Pi_0 R_0^4 L \lambda^2}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 \sum_{i=1}^n \frac{F_{Pi}(\alpha, \beta) F_{Ri}(\alpha, \beta) F_{Ti}(\alpha, \beta)}{R_i^4} e^{\left(1 - \frac{8\pi^2 L^2}{\lambda^2}\right) \sin^2 \psi_i} \Delta V_i. \quad (7)$$

Рассмотрим порядок моделирования функционирования РЛС ДО при воздействии ЕПП, обусловленных МОН Е-слоя ионосферы.

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

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

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

$$\sigma' = (2\pi)^{\frac{3}{2}} \frac{\pi^2}{\lambda_N^4} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 T^2 e^{-8\pi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right)^2} e^{-\frac{8\pi^2(L^2 - T^2)}{\lambda^2} \sin^2 \psi} L. \quad (4)$$

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

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 $\Delta \varepsilon$ и углу места $\Delta \beta_3$) 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 $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2$, λ_N и L , входящие

в формулу (7), могут быть получены в результате обобщения экспериментальных исследований, опубликованных в [3, 5, 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 рис. 1 и 2 показаны результаты моделирования отметок в различных плоскостях, при нахождении в зоне действия РЛС ДО двух различных МОН Е-слоя.

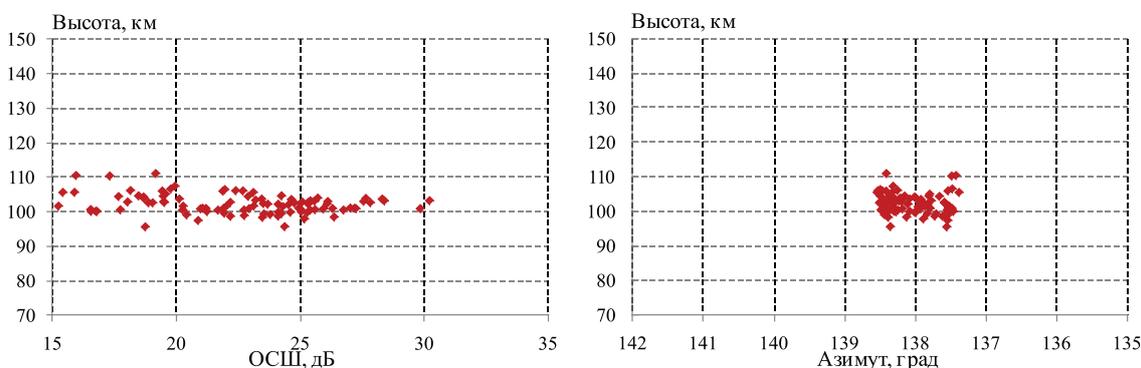


Рис. 1. Результаты моделирования (неоднородность № 1)

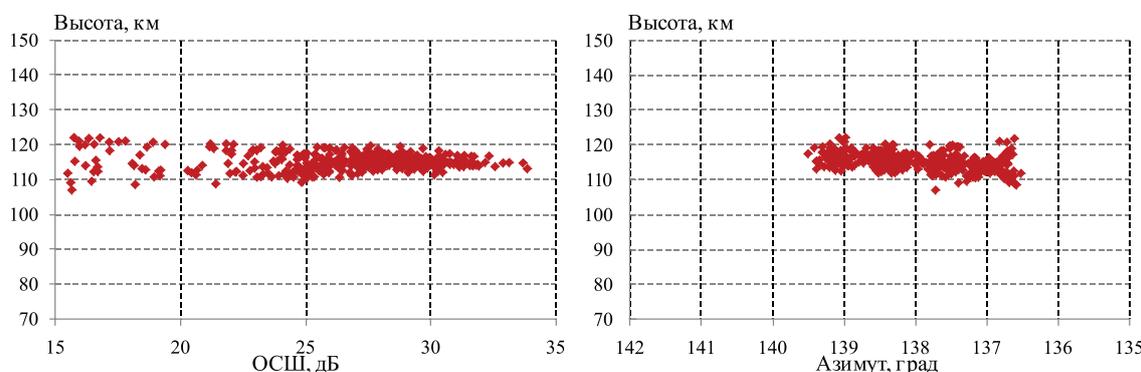


Рис. 2. Результаты моделирования (неоднородность № 2)

Исходные данные по РЛС: координаты точки стояния: 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°, по углу места 1,5°; $\Delta R = 300$ м; потенциал РЛС 40 дБ; порог обнаружения 15 дБ; рабочая длина волны РЛС 0,8 м. Для оценки угловых координат в каждой координатной плоскости формируются две перекрещивающиеся диаграммы направленности, разнесенные на одинаковую величину от равносигнального направления – точки пересечения диаграмм (лучей). Величина разнесения лучей равна половине ширины ДН по уровню половинной мощности. Моделировалось 15 циклов просмотра зоны действия.

Параметры ионосферной неоднородности № 1: центр находится в точке с координатами 50,4° с.ш., 58,7° в.д.; высота 105 км; толщина по высоте 3 км; продольный размер 5 км; поперечный размер 5 км;

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 = 0,00003; L = 10 \text{ м}; \lambda_N = 75 \text{ м}.$$

Параметры ионосферной неоднородности № 2: центр находится в точке с координатами 50,4° с.ш., 58,7° в.д.; высота 117 км; толщина по высоте 3 км; продольный размер 5 км; поперечный размер 25 км;

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 = 0,00004; L = 10 \text{ м}; \lambda_N = 75 \text{ м}.$$

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

Выводы

Предложенная модель функционирования РЛС ДО в условиях воздействия естественных пассивных помех, обусловленных отражениями от ионосферы, учитывает особенности физических процессов, определяющих специфику их возникновения.

Модель позволяет проводить оценивающие алгоритмы 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.

Список литературы

1. Багряцкий Б.А. Радиолокационные отражения от полярных сияний // Успехи физических наук. – Вып. 2, т. 73. – 1961.
2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн: учебник для вузов. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
3. Мизун Ю.Г. Распространение радиоволн в высоких широтах. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с. ил.
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. Свердлов Ю.Л. Радарные исследования анизотропных мелкомасштабных неоднородностей полярной ионосферы: дис. ... д-ра тех. наук. – Мурманск, 1990. – 410 с.
6. Справочник по радиолокации: пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы / под ред. М.И. Скольника. В 2 книгах. Книга 1. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
7. Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1964. – 732 с.
8. Физика авроральных явлений. – Л.: Наука, 1988. – 264 с.
9. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
10. Филлип Н.Д. Ракурсное рассеяние УКВ среднеширотной ионосферой. – Кишинев: Штиинца, 1980 – 244 с.

References

1. Bagrjackij B.A. Radiolokacionnye otrazhenija ot poljarnyh sijanij // Uspehi fizicheskikh nauk. Vyp. 2, t. 73. 1961.
2. Doluhanov M.P. Rasprostranenie radiovoln: uchebnyj dlja vuzov. M.: Svjaz, 1972. 336 p.
3. Mizun Ju.G. Rasprostranenie radiovoln v vysokih shirotah. M.: Radio i svjaz, 1986. 144 pp. il.
4. Modelirovanie v radiolokacii / A.I. Leonov, V.N. Vase-nev, Ju.I. Gajdukov i dr.; pod red. A.I. Leonova. M.: Sov. radio, 1979. 264 p. s il.
5. Sverdlov Ju.L. Radarnye issledovanija anizotropnyh melkomasshtabnyh neodnorodnostej poljarnoj ionosfery: dis. ... d-ra teh. nauk. Murmansk, 1990. 410 p.
6. Spravochnik po radiolokacii: per. s angl. pod obshhej red. V.S. Verby / pod red. M.I. Skolnika. V 2 knigah. Kniga 1. M.: Tehnosfera, 2014. 672 p.
7. Teoreticheskie osnovy radiolokacii / pod red. V.E. Dulevicha. M.: Sov. radio, 1964. 732 p.
8. Fizika avroralnyh javlenij. L.: Nauka, 1988. 264 p.
9. Fizika ionosfery / B.E. Brjunelli, A.A. Namgaladze. M.: Nauka, 1988. 528 p.
10. Fillip N.D. Rakursnoe rassejanie UKV sredneshirotnoj ionosferoj. Kishinev: Shtiinca, 1980 244 p.