

МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТРАЖЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА ОТ НИЗКОЛЕТАЮЩЕГО ОБЪЕКТА

С.В. Ковалев, С.М. Нестеров, И.А. Скородумов

2 ЦНИИ МО РФ

Основным фактором, усложняющим процесс обнаружения низколетящих объектов в условиях близости земли, является переотражение или рассеивание земной поверхностью отраженной ими энергии, в результате чего поле в области приемной антенны приобретает интерференционную структуру.

Известны результаты летных экспериментов по измерению поля при углах скольжения до 5° на длине волны 10 см [1], когда для трасс над полупустынной местностью с примерно одинаковым средним наклоном наблюдалась лепестковая структура поля (в частности, интерференционные замирения сигнала на 30дБ и более), которая была объяснена зеркальным отражением от чрезвычайно ровной на много километров местности, почти не покрытой растительностью.

Целью данной работы является обеспечение возможности имитационного моделирования радиолокационного обнаружения низколетящих объектов наземными средствами. Для достижения поставленной цели решалась задача математического моделирования отраженного от объекта сигнала с учетом рельефа и электродинамических свойств подстилающей земной поверхности.

Пусть объект, расположенный в точке Ц на высоте h (рисунок 1), находится в зоне прямой видимости на расстоянии R от антенны РЛС, расположенной в точке А на высоте h_a от плоской подстилающей поверхности (ПП).

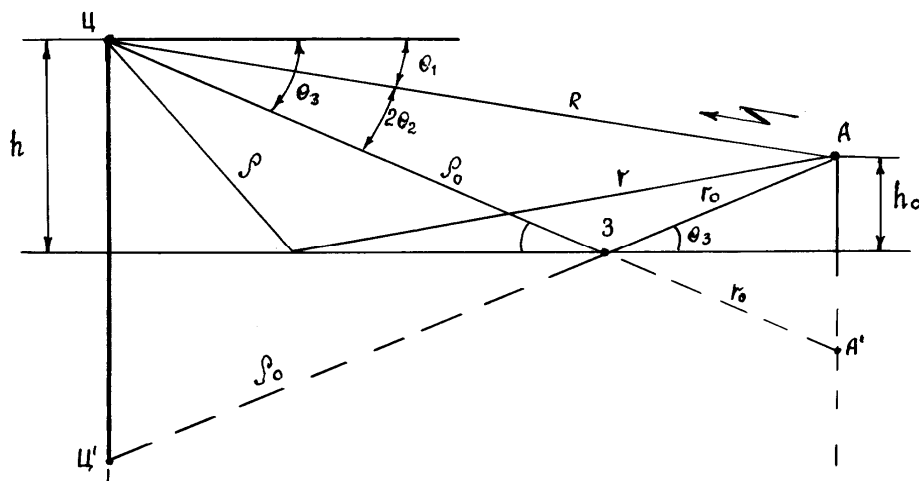


Рисунок 1

Эффективную площадь рассеяния (ЭПР) объекта в свободном пространстве полагаем известной.

На основании метода зеркальных изображений [2] найдем зеркальное изображение объекта Ц', точку переотражения (точку стационарной фазы) на земле З и запишем рассеянное поле Е в виде

$$E = E_0 + 2E_1 \cdot \Gamma_{uu} \cdot D + E_2 \cdot \Gamma_{uu}^2 \cdot D^2,$$

где

E_0 – поле, рассеянное в обратном направлении по пути АЦА, в направлении угла θ_1 относительно продольной оси объекта;

E_1 – поле, рассеянное в направлении угла разноса $2\theta_2$ через ПП по путям АЦЗА и АЗЦА;

E_2 – поле, рассеянное в зеркальном направлении θ_3 через ПП по пути АЗЦЗА;

Γ_{uu} – коэффициент зеркального отражения Френеля с учетом шероховатости ПП,

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2r_0\rho_0}{aR_0 \sin \theta_3}}} - \text{коэффициент расходимости,}$$

a – радиус Земли,

r_0, ρ_0 – расстояния от точки переотражения на плоской ПП до антенны и цели, соответственно,

$R_0 = r_0 + \rho_0$ - путь через точку переотражения.

Для учета шероховатости ПП в формулу поля необходимо добавить компоненту поля, обусловленную фоновыми отражениями разрешаемого участка ПП.

Поле, рассеянное в обратном направлении, равно [1]

$$E_0 = j [(60PG)^{1/2}/R] f(\theta) e^{j(\omega t - kR)},$$

где P, G и $f(\theta)$ – мощность передатчика, коэффициент усиления и характеристика направленности антенны.

Компоненты поля E_1 и E_2 пропорциональны вертикальной составляющей вектора Герца P , которая, с точностью до константы, равна [3]

$$P = (j/\lambda) \int_{S_0} (e^{-j\varphi}/(\rho r)) \cos(n, r) dS,$$

где S_0 – площадь разрешаемого участка переотражений на ПП,

φ - фаза волны, переотраженной вторичным источником,

$\varphi = k(\rho + r + R)$ – при вычислении компоненты поля E_1 ,

$\varphi = 2k(\rho + r)$ – при вычислении компоненты поля E_2 ,

ρ, r – расстояния от вторичного источника до объекта и антенны соответственно,

(n, r) – угол между нормалью к плоскости земли и направлением от вторичного источника до антенны.

Полагая, что фоновая компонента складывается со случайной фазой, двухпозиционная ЭПР объекта примерно равна однопозиционной ЭПР для ракурса, равного половине угла разноса, пренебрегая фоновой компонентой, для дальней зоны ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$) получим

$$\sigma = \sigma_o(\theta) \left| 1 + 2\Gamma_{uu}(\theta) D e^{-i\varphi} + \Gamma_{uu}^2(\theta) D^2 e^{-i2\varphi} \right|^2, \text{ где } \varphi = k(R_0 - R).$$

Перепишем последнюю формулу в обозначениях ЭПР в виде

$$\sqrt{\sigma(\theta)} = \sqrt{\sigma_0(\theta)} \cdot (1+A)^2, .$$

Множитель $(1+A)^2$ называется интерференционным множителем земли и позволяет, на основе известной ЭПР объекта в свободном пространстве, определить сигнал, отраженный от объекта, с учетом рельефа и электродинамических свойств ПП. Значение интерференционного множителя определяется функцией A , которая равна произведению постоянных $\Gamma_{ш}$, D и расстояния R_0 на значение вектора Герца для плоской ПП.

Полученный результат является геометрическим приближением отраженного от объекта сигнала, совпадающим с точным решением для ровной плоской ПП при условии приема сигнала под углом скольжения $\theta_3 > (\lambda/(\pi a))^{1/3}$.

Однако при представлении ПП в виде разновысотного рельефа вычисление значения функции A по геометрической формуле не представляется возможным в силу неизвестного положения точки стационарной фазы вектора Герца и необходимости учета отражений в пределах разрешаемого участка от нескольких типов покровов с разными электрическими свойствами. Кроме того, для малых высот не выполняется условие применимости этой формулы на большой дальности. Так, при высоте объекта 5 м, длине волны 3 см и эффективном радиусе Земли (при нормальной рефракции) 8550 км применимость геометрического приближения для ровной ПП ограничена дальностью 4819 м.

Для расчета сигнала, отраженного от объекта на малой высоте над ПП в виде разновысотного рельефа с разными по электрическим свойствам покровами предлагается следующее решение.

Пусть рельеф в пределах существенного разрешаемого участка ПП аппроксимирован разновысотными плоскопараллельными площадками, размеры которых Δx и Δy определяются путем численных исследований сходимости вектора Герца на плоском рельефе к известному значению. Областью интегрирования выбираем незранируемую часть полосы ПП между целью и антенной длиной, равной дальности, и шириной в несколько зон Френеля, число которых определяем путем численных исследований сходимости значений вектора Герца.

С учетом отражающих свойств типовых покровов ПП и коэффициента расходимости лучей от участков разновысотного плоскопараллельного рельефа численное выражение для вычисления значения вектора Герца приобретает вид

$$\vec{i} = \frac{j}{\lambda} \Delta x \Delta y D \sum_{\Delta y} \sum_{\Delta x} \hat{E}_{xy} \tilde{A}_{xy}(\theta) \frac{e^{-jk(\rho+r-R)}}{\rho r} \cos(n, r),$$

$$\hat{E}_{xy} = \begin{cases} 1 - \text{незранируемый} & \text{участок} \\ 0 - \text{эранируемый} & \text{участок} \end{cases}$$

где $\tilde{A}_{xy}(\theta)$ – зеркальный коэффициент отражения участка интегрирования с центром в точке с координатами (x, y) ,

D – значение коэффициента расходимости лучей в точке стационарной фазы.

При математическом моделировании вектора Герца использовано решение по методу стационарной фазы [2] с удобным в численном отношении критерием поиска

стационарной точки и увеличением пропорционально $R^{1/2}$ размера элемента интегрирования с увеличением расстояния R до цели.

Разработанный метод использован при имитационном моделировании процесса радиолокационного обнаружения низколетящих объектов наземными (надводными) средствами.

Полученные результаты вероятности обнаружения низколетящего объекта в зависимости от дальности над ровной степью и штилевым морем показывают, что интерференция отраженного от низколетящего объекта сигнала с ровной поверхностью может приводить к существенному уменьшению дальности обнаружения объекта. Кроме того, возможные в этом случае интерференционные замирания сигнала на дальностях, меньших первичного обнаружения, могут привести к срыву сопровождения обнаруженного объекта.

В то же время расчетные оценки дальности обнаружения низколетящего объекта над произвольной разновысотной ПП без протяженных ровных или равно уклоняющихся по высоте участков практически не отличаются от дальности его обнаружения в свободном пространстве.

Схожие результаты были получены и при математическом моделировании обнаружения низколетящих объектов над морской поверхностью при хаотичном и регулярном волнении. Интерференция отраженного от низколетящего объекта сигнала с хаотически взволнованной морской поверхностью практически не влияла на дальность его обнаружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распространение ультракоротких радиоволн. Пер. с англ. под ред. Шиллерова Б.А. - М.: "Сов. радио", 1954.
2. Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. Распространение радиоволн. - М.: «Государственное изд-во технико-теоретической литературы», 1953.
3. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. - М: "Сов. радио", 1972.
4. С.В. Ковалев и др. «Сравнительная оценка кривых обнаружения, построенных по данным эксперимента и с использованием различных статистических моделей отраженного сигнала», «Радиотехника» (журнал в журнале), №9, 2003.