

# **Применение геоинформационных систем для оперативного прогнозирования радиолокационной наблюдаемости объектов**

## **Geoinformation systems for the operational prediction of radar observability for marine objects**

### **Светличный / Svetlichny V.**

Василий Александрович  
(svetlichny@oogis.ru)  
доктор технических наук, профессор.  
ЗАО «СПИИРАН-НТБВТ»,  
старший научный сотрудник  
научно-проектного отдела.  
г. Санкт-Петербург

### **Смирнова / Smirnova O.**

Оксана Вячеславовна  
(sov@oogis.ru)  
кандидат технических наук.  
Санкт-Петербургский институт информатики  
и автоматизации РАН,  
старший научный сотрудник.  
г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** геоинформационное моделирование – geoinformation modeling; радиолокационная наблюдаемость – radar observability.

В статье рассматривается новый метод расчета характеристик распространения радиолокационного сигнала в УКВ-СВЧ диапазоне на основе интегрального уравнения для функции ослабления на случай любых заданных параметров антенны РЛС. Приводится методика построения зон видимости РЛС с использованием интеллектуальной геоинформационной системы.

The article presents new method for calculating the radar propagation characteristic for ultra-short or micro waves ranges on the basis of the integral equation of attenuation function in the context of any specified radar parameters. Procedure of radar visibility zone creation in intelligent geoinformation systems is described.

блях или берегу, построение круговой диаграммы дальности обнаружения, построение зон обнаружения на картографической подложке и другие задачи.

Несомненно, что наиболее удобной платформой для решения задач оперативного прогнозирования радиолокационной наблюдаемости и визуализации результатов являются геоинформационные системы (ГИС). Они обеспечивают эффективную обработку больших массивов исходных данных, имеющих геопространственную привязку, а также оперативное наглядное представление полученных результатов на картографической подложке.

Таким образом, необходимо развитие новых математических методов оперативного прогнозирования радиолокационной наблюдаемости морских объектов с учетом гидрометеорологической обстановки в районе локации, среды распространения радиолокационных сигналов, помеховой обстановки, а также надводной и воздушной обстановки.

Наличие этих методов и реализация их в комплексе радиолокационных расчетов позволит значительно повысить эффективность решения задач обнаружения объектов локации, определение координат их местоположения и параметров движения, задач противовоздушной обороны (ПВО) корабля, использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), вертолетов и самолетов палубного базирования.

### **Метод оценки радиолокационной наблюдаемости**

Согласно принципу поляризационной двойственности [1, 4], в обобщенной конической системе координат поле любых заданных токов в произвольной слоистой среде можно описать с помощью двух однокомпонентных векторных потенциалов Герца электрического (ТМ) и магнитного (ТЕ) типа:

$$\Delta\pi'_e(\bar{r}, z) + k_0^2 \varepsilon'(z) \pi'_e(\bar{r}, z) = -\frac{i}{\omega \varepsilon_0} \left( j_z - \frac{\partial Q'}{\partial z} \right);$$

$$\Delta\pi'_m(\bar{r}, z) + k_0^2 \varepsilon'(z) \pi'_m(\bar{r}, z) = -M'(\bar{r}, z), \quad (1)$$

где  $\varepsilon'(z) = 1 + 2N(z) + 2\frac{z}{a}$  и  $N(z)$  – относительная диэлектрическая проницаемость и вертикальный профиль индекса преломления тропосферы ( $a$  – радиус Земли);  $Q'(\bar{r}, z)$  и  $M'(\bar{r}, z)$  – потенциальные функции источников, которые определяются как решения уравнений

$$\frac{\partial^2 Q'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q'}{\partial y^2} = \frac{\partial j'_x}{\partial x} + \frac{\partial j'_y}{\partial y}; \quad \frac{\partial^2 M'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M'}{\partial y^2} = \frac{\partial j'_x}{\partial y} - \frac{\partial j'_y}{\partial x} \quad (2)$$

Векторы напряженности электрического и магнитного поля ТМ- и ТЕ-типа выражаются через потенциалы Герца обычным образом [1, 4].

Применяя к уравнениям (1–2) преобразование Фурье по горизонтальным координатам  $x, y$ , исключая функции источников и перенося слагаемое с  $N(z)$  в правые части полученных уравнений, сведем их к интегральным уравнениям для образов Фурье потенциалов. После этого, выполняя обратное преобразование Фурье, приходим к однотипным интегральным уравнениям для функций ослабления:

$$V_{e,m}(\tilde{x}; \tilde{y}, \tilde{y}_0) = M_0 \int_0^{\tilde{x}} d\tilde{x}' \sqrt{\frac{\tilde{x}}{\tilde{x}'(\tilde{x}-\tilde{x}')}} \int_0^{\tilde{y}_H} d\tilde{y}' V_{e,m}^{(0)}(\tilde{x} - \tilde{x}'; \tilde{y}, \tilde{y}') F_N(\tilde{y}') V_{e,m}(\tilde{x}; \tilde{y}', \tilde{y}_0) + \\ + \frac{m}{4\pi k_0} \int_{\tilde{y}_{la}}^{\tilde{y}_{2a}} d\tilde{y}' V_{e,m}^{(0)}(\tilde{x}; \tilde{y}, \tilde{y}') \int_{\mathbb{R}^2} d^2 \tilde{r}' \exp[-ik_0(\tilde{r}, \tilde{r}')/r] F_{e,m}(\tilde{r}', \tilde{y}' - \tilde{y}_0). \quad (3)$$

Здесь  $M_0 = \sqrt{\frac{i}{\pi}} \left( \frac{k_0 r_3}{2} \right)^{2/3} N_0 \cdot 10^{-6}$  – амплитудный множи-

тель,  $N_0 = N(0)$ ;  $\tilde{y} = k_0 z / m$  – приведенная высота точки наблюдения и точки расположения антенны над уровнем моря;  $\tilde{x} = \frac{r}{m}$  – приведенное горизонтальное рассто-

яние до точки наблюдения;  $F_N(\tilde{y})$  – функция  $N(z)/N_0$ , выраженная в терминах переменной  $\tilde{y}$ ;  $\tilde{F}_{e,m}'(\tilde{\kappa}, \tilde{y})$  – функции в правых частях уравнений (1), выраженные через токи в антенне;  $V_{e,m}^{(0)}(\tilde{x}; \tilde{y}, \tilde{y}_0)$  – функция ослабления поля в отсутствие неоднородностей тропосферы.

Решение интегрального уравнения (3) можно представить в виде ряда Неймана:

$$V_{e,m}(x; z, z_0) = \sum_{n=0}^{\infty} V_{e,m}^{(n)}(x; z, z_0).$$

По переменной  $x$  интегральное уравнение для функции ослабления относится к классу уравнений Вольтерра, поэтому для нахождения его решения был использован численный пошаговый метод на основе квадратурных формул для интегралов по этой переменной, учитывающих наличие корневых особенностей на обоих концах промежутка интегрирования. Таким образом, алгоритм численного пошагового решения интегрального уравнения (3) описывается формулой:

$$V_{e,m}(\tilde{x}; \tilde{y}_k, \tilde{y}_0) = \frac{\pi M_0 \sqrt{\tilde{x}}}{N_1} \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{l=1}^{N_2} w_l V_{e,m}^{(0)}(\tilde{x} - \tilde{x}'_n; \tilde{y}_k, \tilde{y}'_l) F_N(\tilde{y}'_l) V(\tilde{x}'_n; \tilde{y}'_l, \tilde{y}_0) + V_{e,m}^{(0)}(\tilde{x}; \tilde{y}_k, \tilde{y}_0) \quad (4)$$

где  $\{\tilde{x}_n\}$ ,  $\pi/N_1$  – узлы и веса квадратурной формулы для вычисления внешнего интеграла в (3),  $\{\tilde{y}'_l\}$ ,  $\{w_l\}$  – то же для внутреннего интеграла,  $N_1, N_2$  – порядки квадратурных формул.

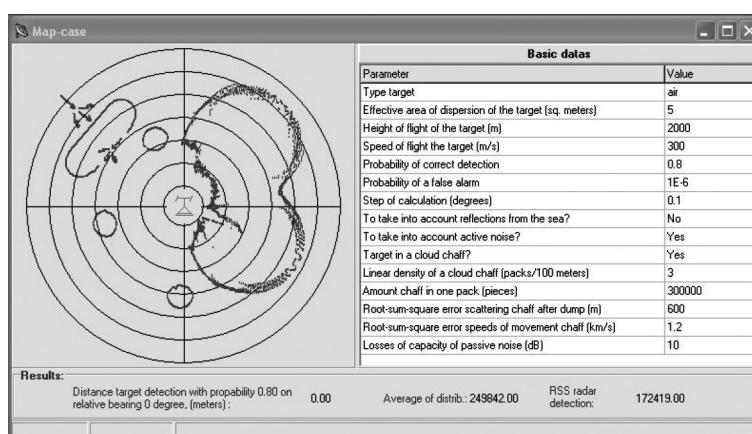


Рис. 1. Оценка дальности обнаружения с учетом активных и пассивных помех.

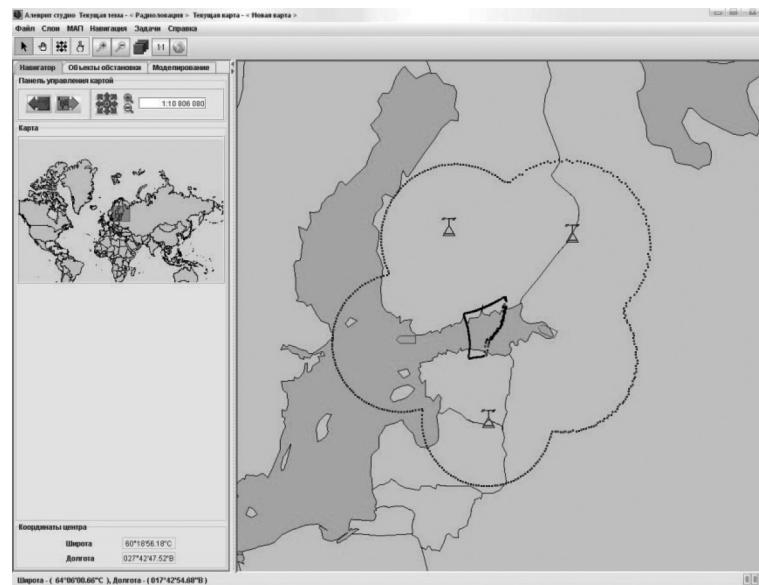


Рис. 2. Построение зоны обнаружения

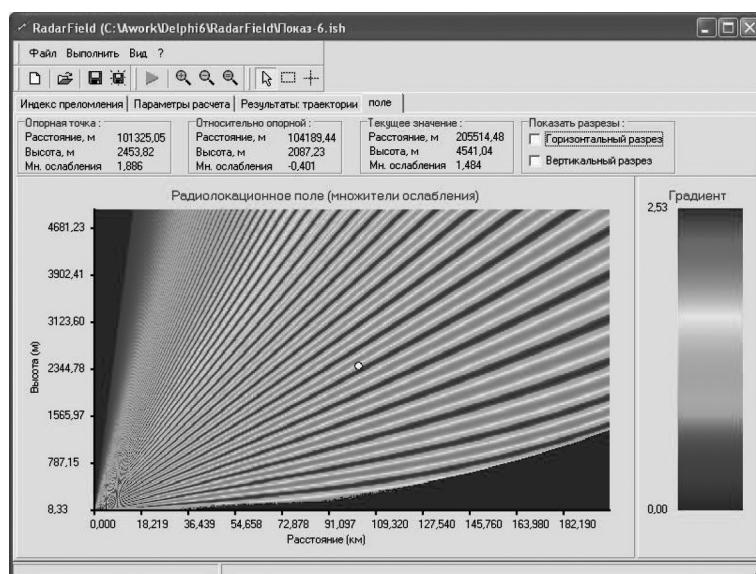


Рис. 3. Расчет множителя ослабления радиолокационного сигнала

## Реализация метода на основе ГИС

На основе предложенного математического аппарата был разработан комплекс радиолокационных расчетов с использованием геоинформационных технологий.

В состав комплекса радиолокационных расчетов входят:

- модуль расчета дальности обнаружения воздушных и надводных объектов отдельной РЛС (рис. 1). Дальность обнаружения цели вычисляется с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, также определяются среднее значение и среднеквадратичное отклонение дальности обнаружения воздушных и надводных целей;

- модуль расчета зоны обнаружения радиолокационными станциями, объединенными в единую систему, с обменом информации на целевом уровне (рис. 2). Зона обнаружения может быть построена как для отдельной РЛС, так и для группы разнесенных РЛС. Границами зоны обнаружения является дальность обнаружения воздушных и надводных целей, рассчитанная с заданной вероятностью правильного обнаружения, с учетом активных и пассивных помех;

- модуль расчета распределения плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучающей РЛС, с учетом ослабления радиоволн при их прохождении в тропосфере [3] (рис. 3). При решении данного класса задач учитывается заданное распределение коэффициента преломления радиоволн по вертикали. Также учитываются близость и сферичность земной поверхности, приводящие к интерференционному и дифракционному распространению радиоволн.

## Заключение

Рассмотренный в статье метод расчета характеристик распространения радиолокационных сигналов на основе интегрального уравнения для функции ослабления для любых заданных параметров антенны РЛС позволяет решать задачи оперативного прогнозирования радиолокационной наблюдаемости. Полученные математические результаты используются в комплексе радиолокационных расчетов и отображаются с помощью ГИС-интерфейса.

Комплекс радиолокационных расчетов может быть внедрен в системы управления тактическими ситуациями для стационарных систем и для подвижных носителей, имеющих в своем составе РЛС.

В дальнейшем предлагается уделить повышенное внимание развитию методов расчета характеристик распространения радиолокационных сигналов с учетом влияния гидрометеоров на основе интеллектуальных геоинформационных технологий.

## Литература

1. Макаров, Г.И. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью / Г.И. Макаров, В.В. Новиков, С.Т. Рыбачек. – М.: Наука, 1991. – 196 с.

2. Применение комплекса методик радиолокационных расчетов в радиолокационных системах / Попович В.В. [и др.] // Материалы НТК «Радиооптические технологии в приборостроении», 1–7 сентября, 2013, п. Небуг, Краснодарский край, Россия. – С. 64–81.

3. Смирнова, О.В. Геоинформационное моделирование зон видимости радиолокационных систем с учетом гидрометеорологических условий / О.В. Смирнова // Материалы 7-ой российской мультиконференции по проблемам управления (ИТУ-2014). – С. 302–306.

4. Фок, В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В.А. Фок. – М.: Советское радио, 1970. – 517 с.