

УДК 621.396

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОЙ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА РАДИОЛИНИЙ

И. А. Зикратов,

канд. техн. наук, доцент

К. В. Степаненко,

адъюнкт

Военный университет противовоздушной обороны (филиал, г. Санкт-Петербург)

Предложен способ определения числовых характеристик результатов расчета поля рассеяния на неровных поверхностях при использовании геоинформационных технологий. Приведены требования к точности представления картографической информации, необходимой для решения прикладных задач электродинамики.

The way of definition of numerical characteristics of results of calculation of a field of dispersion on rough surfaces is offered at use of geoinformation technologies. Requirements are resulted in accuracy of representation of the cartographical information necessary for the decision applied tasks of electrodynamics.

Задача априорной оценки дальности действия радиолокационных средств, размещенных на местности с неровным рельефом, возникает как при планировании радиолокационных систем, так и в процессе их эксплуатации. К основным способам решения этой задачи наряду с облетами позиций РЛС, позволяющими определить зоны обнаружения радиолокационных средств, относятся теоретические расчеты, которые базируются на строгом или приближенном расчете физических величин поля дифракции.

Необходимость существенных временных и материальных ресурсов, затрачиваемых при проведении облета позиций РЛС, с одной стороны, и активное развитие в последние годы геоинформационных технологий, с другой стороны, обусловили интерес к применению информационно-расчетных задач, позволяющих получить априорную оценку пространственных возможностей радиоэлектронной техники в объектно-ориентированных геоинформационных системах (ГИС). Это способствует повышению эффективности управления радиолокационными и телекоммуникационными системами. В качестве исходного картографического материала, несущего информацию о рельефе участка местности, в ГИС используются цифровые карты мест-

ности (ЦКМ). В составе цифровой картографической информации (ЦКИ) содержатся координаты точек, описывающих площадные, линейные и точечные объекты. Анализ размещения, структуры взаимосвязей объектов и связанных с ними явлений с использованием методов пространственного анализа и гео моделирования составляют основу геоинформационного анализа [1].

Широкое применение геоинформационного анализа радиолокационных систем и телекоммуникационных сетей позволяет существенно сократить затраты времени и материально-технических средств, необходимых для осуществления процессов принятия решений при планировании применения радиолокационных средств и систем связи [2].

Однако, несмотря на многообразие способов проектирования ЦКМ и форматов представления данных, точность ЦКИ в ряде случаев ограничивает возможности ГИС для анализа явлений в некоторых предметных областях, в частности при учете влияния подстилающей поверхности на дальность обнаружения РЛС.

В настоящей статье кратко описан подход, позволяющий оценить степень достоверности расчета в ГИС дальности обнаружения РЛС, обусловленную погрешностью представления

исходных данных в ЦКМ. Предлагаемый вероятностный подход основан на определении числовых характеристик результатов расчета поля в точке наблюдения.

Моделирование объектов и явлений в ГИС осуществляется с привлечением методов анализа соответствующей предметной области. Так, применительно к оценке дальности обнаружения РЛС используют различные методы, позволяющие осуществить расчет пространственных возможностей РЛС с различной степенью достоверности, зависящей прежде всего от полноты учета влияния подстилающей земной поверхности [3, 4]. Одним из наиболее широко применяемых является метод зеркального отображения [5], основанный на принципе Гюйгенса–Френеля. Он состоит в определении комплексной амплитуды напряженности электромагнитного поля в точке наблюдения \dot{E}_Σ , представленного в виде суперпозиции прямой волны $\dot{E}_{пр}$ и волн, отраженных от земной поверхности $\dot{E}_{отр}$:

$$\dot{E}_\Sigma = \dot{E}_{пр} + \dot{E}_{отр}, \quad (1)$$

где

$$\dot{E}_{пр} = F_1 E_{пр} e^{-ikR}, \quad (2)$$

$$E_{отр} = F_2 E_{пр} \hat{R}_{в,г} e^{-ikr}. \quad (3)$$

Здесь $E_{пр}$ – амплитуда электромагнитного колебания;

F_1, F_2 – значения нормированной диаграммы направленности антенны РЛС в направлении точки наблюдения и точки отражения от поверхности соответственно; $\hat{R}_{в,г}$ – коэффициент отражения Френеля; R, r – расстояния от РЛС до точки наблюдения, пройденные прямой и отраженной волнами соответственно; k – волновое число.

Полагая для упрощения дальнейшего анализа излучатель изотропным, когда $F_1 = F_2 = 1$, а $\hat{R}_{в,г} = -1$, что справедливо при малых углах скольжения для всех видов поляризации, и подставляя равенства (2) и (3) в уравнение (1), по-

лучаем выражение, удобное для дальнейшего анализа:

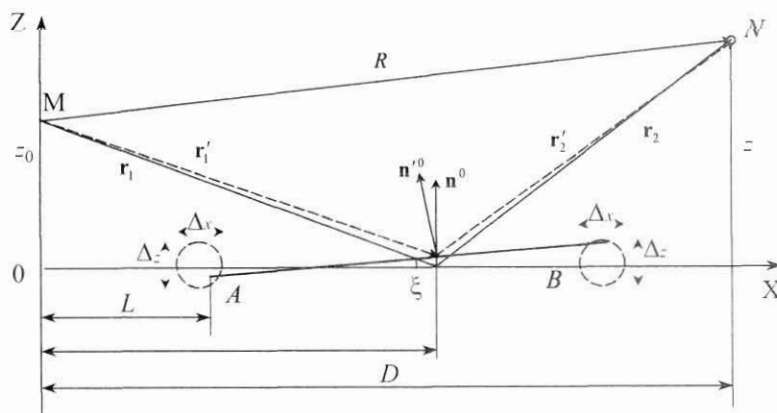
$$\dot{E}_\Sigma = \dot{E}_{пр}(1 - e^{jk\Delta r'}), \quad (4)$$

где $\Delta r'$ – разность хода прямой и отраженной волн, разность хода $\Delta r'$ определяет интерференционную картину при сложении волн в пространстве и зависит от местоположения участка поверхности, эффективно отражающую, в соответствии с принципом Гюйгенса–Кирхгофа, первичную волну в направлении точки наблюдения; выражение в скобках называют интерференционным множителем.

Так как координаты точек поверхности представлены в ЦКМ с определенной погрешностью Δ_x и Δ_z , то отражающую плоскость при расчете напряженности поля по формуле (4) можно полагать «флуктуирующей», т. е. занимающей случайное положение в пространстве в пределах возможных значений координатных точек A и B (рис. 1).

Совокупность возможных положений координатных точек ЦКМ образует ансамбль реализаций модели случайной отражающей поверхности. На рис. 1 показаны вектор нормали R к фазовому фронту прямой волны и векторы нормалей к фазовым фронтам падающей r_1' и отраженной r_2' от «флуктуирующей» плоскости волн. В этом случае искомое значение амплитуды напряженности суммарного поля в точке наблюдения N можно рассматривать как случайную величину с детерминированной $\dot{E}_{пр}$ и стохастической $\dot{E}_{отр}$ составляющими, которая определяется флуктуацией интерференционного множителя.

При такой постановке задачи целью работы является исследование зависимости числовых характеристик результатов расчета амплитуды напряженности рассеянного поля от погрешности представления метрической ЦКИ о рельефе местности при наличии интерференционных явлений. В основу исследований положена теория рассеяния волн на статистически неровной поверхности, изложенная в трудах [6, 7].



■ Рис. 1. Геометрия задачи

Среднее значение интерференционного множителя.

Из рис. 1 видно, что разность хода прямой и отраженных волн можно найти по формуле

$$\Delta r' = R - (r'_1 + r'_2). \quad (5)$$

С учетом этого равенства выражение для комплексной амплитуды суммарного поля принимает вид

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_{\text{пр}} \left(1 - e^{jkR} e^{-jk(r'_1 + r'_2)} \right). \quad (6)$$

Как следует из постановки задачи, первый сомножитель в скобках выражения (6) является детерминированной величиной. Для выделения в явном виде зависимости второго сомножителя от случайной величины, которой является угол наклона ξ отражающей плоскости, расстояния r'_1 и r'_2 в показателе экспоненты представлены в виде:

$$r'_1 = \sqrt{\eta^2 + [z_0 - (\eta - L) \sin \xi]^2}; \quad (7)$$

$$r'_2 = \sqrt{(D - \eta)^2 + [z - (\eta - L) \sin \xi]^2}. \quad (8)$$

Величины в равенствах (7) и (8), находящиеся под знаком корня, обозначены на рис. 1. Применимость метода зеркальных отображений обусловлена размерами отражающей поверхности, которая должна быть соизмерима с размером первой зоны Френеля, определяемой по известной формуле

$$R_3 = \frac{1}{\sin \varphi} \sqrt{\frac{\bar{R}}{k}}, \quad (9)$$

где φ – угол скольжения волны; \bar{R} – приведенное расстояние до точки наблюдения; $k = 2\pi / \lambda$.

При радиолокационном наблюдении маловысотных объектов характерно выполнение неравенства

$$\frac{1}{\sin \varphi} \sqrt{\frac{\bar{R}}{k}} \gg \Delta_{x,z}, \quad (10)$$

что дает возможность разложения равенств (7) и (8) в ряд Тейлора с ограничением результата разложения двумя членами ряда ввиду малости угла ξ :

$$r'_1 \approx \sqrt{\eta^2 + z_0^2} - \frac{z_0}{\sqrt{\eta^2 + z_0^2}} \xi (\eta - L) = r_1 - \alpha_z \xi (\eta - L); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} r'_2 &\approx \sqrt{(D - \eta)^2 + z^2} + \frac{z}{\sqrt{(D - \eta)^2 + z^2}} \xi (\eta - L) = \\ &= r_2 + \beta_z \xi (\eta - L), \end{aligned} \quad (12)$$

где $r_1 = \sqrt{\eta^2 + z_0^2}$; $r_2 = \sqrt{(D - \eta)^2 + z^2}$; $\alpha_z = \frac{z_0}{r_1}$,

$\beta_z = -\frac{z}{r_2}$. Здесь α_z и β_z являются z -компонентами векторов падающей α и отраженной β волн. Тогда выражение для интерференционного множителя примет вид

$$\Phi = \left(1 - e^{jkR} e^{-jk(r_1 + r_2) - jq_z \xi (\eta - L)} \right). \quad (13)$$

Здесь q_z – z -компонента вектора излучения, определяемого выражением

$$\mathbf{q} = k(\beta - \alpha). \quad (14)$$

Следовательно, среднее интерференционного множителя будет равно

$$\begin{aligned} \bar{\Phi} &= \overline{\left(1 - e^{jkR} e^{-jk(r_1 + r_2) - jq_z \xi (\eta - L)} \right)} = \\ &= \overline{\left(1 - e^{jk(R - (r_1 + r_2))} e^{-jq_z \xi (\eta - L)} \right)} = \overline{\left(1 - e^{jk\Delta r} e^{-jq_z \xi (\eta - L)} \right)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta r = R - (r_1 + r_2)$, т. е. разность хода прямой и отраженных волн, приведенная к средней плоскости с $\xi = 0$.

Дисперсия интерференционного множителя.

Дисперсия интерференционного множителя определена по формуле $D_\Phi = |\Phi|^2 - |\bar{\Phi}|^2$. Выражения для слагаемых в этой формуле имеют вид

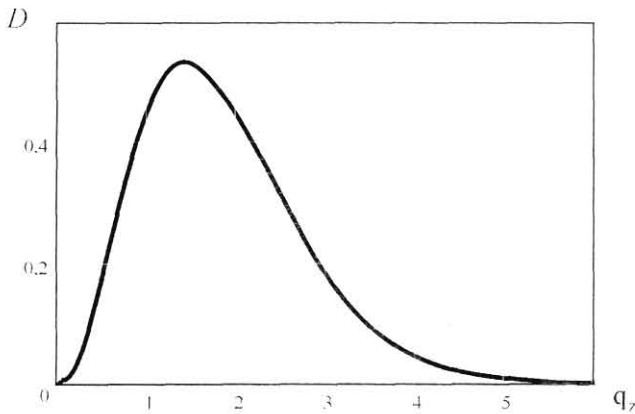
$$\begin{aligned} |\Phi|^2 &= \overline{1 - e^{-jk\Delta r + jq_z \xi (\eta - L)} - e^{jk\Delta r - jq_z \xi (\eta - L)} +} \\ &\quad \overline{e^{jk\Delta r - jq_z \xi (\eta - L)} e^{-jk\Delta r + jq_z \xi (\eta - L)}} = \\ &= \overline{1 - e^{jk(\Delta r - \Delta \bar{r})} e^{-jq_z \xi (\eta - L) + jq_z \xi (\eta - \bar{L})} -} \\ &\quad \overline{e^{-jk\Delta r + jq_z \xi (\eta - L)} - e^{jk\Delta r - jq_z \xi (\eta - L)}}; \end{aligned}$$

и

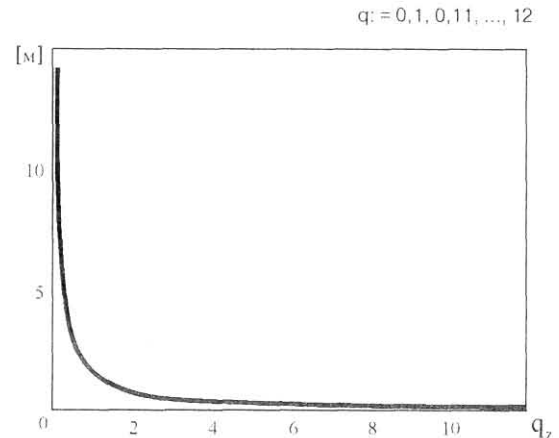
$$\begin{aligned} |\bar{\Phi}|^2 &= \overline{1 - e^{-jk\Delta r + jq_z \xi (\eta - \bar{L})} - e^{jk\Delta r - jq_z \xi (\eta - \bar{L})} +} \\ &\quad \overline{e^{jk\Delta r - jq_z \xi (\eta - \bar{L})} e^{-jk\Delta r + jq_z \xi (\eta - \bar{L})}} = \\ &= \overline{1 - e^{jk(\Delta r - \Delta \bar{r})} e^{-jq_z \xi (\eta - \bar{L})} e^{jq_z \xi (\eta - \bar{L})} -} \\ &\quad \overline{e^{-jk\Delta r + jq_z \xi (\eta - \bar{L})} - e^{jk\Delta r - jq_z \xi (\eta - \bar{L})}}. \end{aligned}$$

Величины под волнистой чертой и без черты относятся к отражающим точкам разных реализаций случайной плоскости. Введя обозначения $\xi(\eta - L) = \zeta$ и $\xi(\eta - \bar{L}) = \bar{\zeta}$, что справедливо при $\sin \xi \approx \xi$ и $\sin \bar{\xi} \approx \bar{\xi}$, выражение для дисперсии интерференционного множителя можно записать в виде

$$D_\Phi = e^{jk(\Delta r - \Delta \bar{r})} \left[\overline{e^{-jq_z \zeta + jq_z \bar{\zeta}} - e^{-jq_z \zeta} e^{jq_z \bar{\zeta}}} \right]. \quad (16)$$



■ Рис. 2. Зависимость дисперсии интерференционного множителя от разброса параметров ЦКИ и условий наблюдения



■ Рис. 3. Возможные значения СКО ЦКИ в зависимости от условий наблюдения

Полученный результат совпадает с выводом, представленным Ф. Г. Бассом и И. М. Фуксом при исследовании интенсивности флуктуаций поля на неограниченной шероховатой поверхности, но имеет иной физический смысл, ясный из постановки задачи. Положив для примера ζ гауссовой случайной величиной и проводя несложные преобразования над выражением (16), следуя аналогичным действиям в работе [6], проведем анализ дисперсии интерференционного множителя от быстроменяющегося выражения в фигурных скобках:

$$D_{\Phi} \approx \left[e^{-q_z^2 \sigma^2 (1-W)} - e^{\left(\frac{-q_z^2 \sigma^2}{2} \right)^2} \right]. \quad (17)$$

В этом выражении W и σ^2 – коэффициент корреляции и дисперсия углов наклона случайной плоскости соответственно. Зависимость D_{Φ} от $q_z^2 \sigma^2$ при различных значениях коэффициента корреляции представлена на рис. 2.

На рисунке виден рост D_{Φ} с увеличением $q_z^2 \sigma^2$ примерно до 1,29 с последующим спадом до нуля.

Рост дисперсии, естественно, будет происходить и при больших значениях $q_z^2 \sigma^2$, однако в этом случае распределение энергии отраженного поля осуществляется в направления, отличные от пространственного положения точки N . Из этого следует вывод, что использование для расчета дальности действия РЛС цифрового картографического материала с погрешностью представления метрической информации, не обеспечивающей для заданных условий радиолокационного наблюдения приближенного равенства

$$q_z^2 \sigma^2 \leq 1,29, \quad (18)$$

нецелесообразно.

Кривая, приведенная на рис. 2, рассчитана для пространственного масштаба отражающей плоскости (радиуса корреляции), совпадающего с размером участка, существенного для отражения радиоволн, размер которого определяется формулой (9). Это условие, в свою очередь, ограничено применимостью метода зеркального отображения.

Зависимость значения СКО представления метрической информации в ЦКМ от условий радиолокационного наблюдения представлена на рис. 3.

Очевидно, что с увеличением угломестного положения точки наблюдения, когда q_z растет, требования к точности представления ЦКИ, необходимой для расчета интерференционного множителя Земли, возрастают. При скользящем распространении волн требования к значению σ^2 уменьшаются.

Следует отметить, что на значение интерференционного множителя может оказать существенное влияние наличие «шероховатостей» на отражающей поверхности, что приводит к явлению диффузного рассеяния. Стохастическая изменчивость радиофизических свойств реальной подстилающей поверхности приводит к флуктуации комплексного коэффициента отражения Френеля $\tilde{R}_{в,г}$. В данной статье влияние диффузного рассеяния и флуктуации $\tilde{R}_{в,г}$ на параметры поля в точке наблюдения не рассматривалось. Ограничения в постановке задачи обусловлены отсутствием в существующих ГИС достоверной информации о характере неровностей, образующих статистический ансамбль, а именно их средних размеров и пологости, а также данных о значении комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости моделируемой земной поверхности.

Однако, учет возмущенного поля, обусловленного «шероховатостью» отражающей поверхности, при практических расчетах в ГИС можно осуществить введением соответствующих множителей [8].

Литература

1. **Геоинформатика.** Толковый словарь основных терминов // Под ред. А. М. Берлянта и А. В. Кошкарева. – М.: ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
2. **Безлюдников О. Л., Дервянко С. А., Севостьянов С. В. и др.** Автоматизация анализа рельефа местности при расчете напряженности поля радиосигналов // Радиотехника. – 2001. – № 9. – С. 86–88.
3. **Красюк Н. П., Красюк В. Н., Коблов В. А.** Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – М.: Радио и связь, 1988. – 213 с.
4. **Зикратов И. А., Самотонин Д. Н.** Геоинформационный анализ радиолокационных отражений. – СПб.: Политехника, 2004. – 144 с.
5. **Лукин А. Н.** Оценка напряженности поля электромагнитных волн метрового диапазона над пересеченной местностью // Радиотехника. – 1998. – № 4. – С. 25–28.
6. **Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И.** Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
7. **Басс Ф. Г., Фукс И. М.** Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
8. **Ушаков И. Е., Шишкин И. Ф.** Радиолокационное зондирование морской поверхности. – М.: РИЦ «Татьянин день», 1997. – 264 с.

ИНФОРМАЦИОННО – УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Научно-практический журнал

Подписной индекс по каталогу «Роспичать»:
«Газеты и журналы» – № 15385, «Издания органов НТИ» – № 69291

Периодичность – каждые два месяца. **Тираж** – 1000 экз. **Распространяется** только по подписке в России и странах СНГ. Возможна подписка через редакцию по заявке (по почте, телефону, факсу или e-mail), по которой высылаем счет. **Высылаем** по Вашей просьбе (бесплатно) образец журнала для подписки. **Стоимость** годовой подписки (6 номеров) – 1800 руб. (включая НДС 10 %), с добавлением стоимости доставки – 90 рублей по России и 300 рублей в страны СНГ. Подписчики информируются о новых книгах издательства «Политехника» и получают скидки на публикацию рекламы. При повторной подписке скидка 10 %.

Приглашаем к сотрудничеству специалистов по построению информационно-управляющих систем, системного анализа и обработки информации, моделирования систем и процессов, совершенствования информационных каналов и сред. Научные статьи, одобренные редколлегией, печатаются бесплатно. Рекламные – согласно расценкам (в рублях, включая НДС 20 %):

Цветные полосы		Черно-белые полосы		Скидки при единовременной оплате	
1-я стор. обложки	15000	1 полоса А4	4000	2-х публикаций	10 %
2-я стор. обложки и каждая стр. вкладки	12000	1/2 полосы	2500	3-х публикаций	15 %
3-я стор. обложки	10000	1/2 полосы	1125	4-х и более	20 %
4-я стор. обложки	12000	1/8 полосы	800		

Примечание: при размещении цветного рекламного модуля не менее 1/2 страницы сопутствующая статья (1–2 страницы) печатается бесплатно.

Требования к рекламным модулям. Принимаются оригиналы фотографий высокого качества и контрастности. Рекламные модули в файловом виде на компакт-дисках или присланные по e-mail в заархивированном виде (RAR, ZIP) с разбивкой на дискеты предоставляются только в форматах TIFF, JPEG, BMP (с разрешением не меньше 300 dpi), выполненные в программах Adobe Photoshop 5.0, Corel Draw 9.0, 10.0.