ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 56, № 8/2 ФИЗИКА 2013

УДК 621.371

Д.Я. СУХАНОВ, Е.Г. ПЕРМЯКОВ

ОЦЕНКА ОДНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО БИСТАТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ ОТРАЖЁННОГО ПОЛЯ

Предлагается метод оценки распределения диэлектрической проницаемости на плоской поверхности на основе бистатических измерений отраженного поля по угловым зависимостям коэффициента отражения. Приёмная и передающая антенны независимо перемещаются над поверхностью на фиксированной высоте, что позволяет измерить поле при различных углах отражения от плоской поверхности. Для получения пространственного разрешения используется технология радара с синтезированной апертурой.

Ключевые слова: *диэлектрическая проницаемость, синтез апертуры, бистатический радиолокатор*

Введение

Подповерхностная радиолокация находит широкое применение в задачах обнаружения и визуализации объектов, скрытых под поверхностью земли или других сред. Для большинства методов обработки сигналов подповерхностного радиозондирования требуется априорная информация о диэлектрической проницаемости среды, поскольку её значение существенно влияет на время распространения сигналов в среде. Существуют различные методы оценки диэлектрической проницаемости среды бесконтактными радиоволновыми методами. Одним из таких методов является метод, основанный на анализе угловой зависимости коэффициента отражения среды. Данный метод основан на бистатических измерениях отражённой волны, когда источник неподвижен, а приёмная антенна движется над поверхностью, что позволяет измерить отражённую волну при различных углах падения на плоскую поверхность. Однако данный метод не позволяет определять распределение диэлектрической проницаемости, если поверхность электрически неоднородна.

Целью данной работы является разработка метода оценки распределения диэлектрической проницаемости поверхности на основе определения коэффициента отражения от поверхности при различных углах по результатам бистатических многопозиционных измерений. Предлагается использовать подвижную излучающую антенну и подвижную приёмную антенну, которые, перемещаясь независимо над поверхностью среды на фиксированной высоте, позволяют измерить поле при различных углах падения для различных областей, существенных для отражения.

Аналитическое рассмотрение задачи

Предлагается рассмотреть схему измерений излучателем и приёмником, независимо передвигающимися по прямой, параллельной поверхности среды (рис. 1), на высоте h. Предполагается, что диэлектрическая проницаемость поверхности неоднородна. Решим прямую задачу распространения радиоволн в представленной схеме измерений, то есть определим поле приёмника по заданному распределению диэлектрической проницаемости и по заданному положению источника.

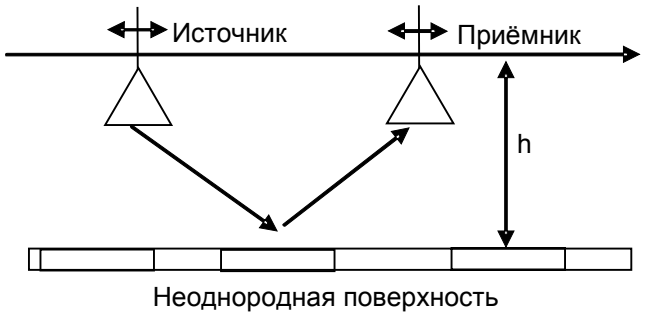


Рис. 1. Схема измерений

Примем приближение, что сферическая волна от источника при падении на поверхность имеет в окрестности области, существенной для распространения волновой фронт, близкий к плоскому. Также будем считать, что области одинаковых значений коэффициента отражения достаточно велики, чтобы можно было вычислять коэффициент отражения от этих областей по формулам Френеля [1] для плоских волн, падающих на плоскую однородную поверхность.

Будем описывать отражение от плоской поверхности через эквивалентный зеркальный источник (рис. 2). Не будем учитывать прямую волну от источника в приёмник, поэтому рассмотрим только поле зеркального источника.

В представленной эквивалентной схеме измерений поверхность с неоднородным распределением диэлектрической проницаемости будем описывать как тонкий экран с переменным коэффициентом пропускания, зависящим от угла падения в приближении Кирхгофа. Для вычисления поля в приёмнике сначала вычислим поле зеркального источника в плоскости экрана, затем умножим его на коэффициент пропускания экрана и далее, согласно принципу Гюйгенса – Френеля, вычислим поле в приёмнике. Будем считать, что коэффициент пропускания экрана равен коэффициенту отражения от плоской поверхности, вычисляемому по формулам Френеля.

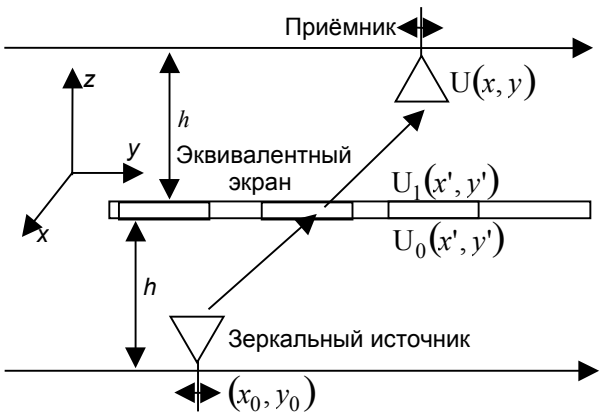


Рис. 2. Эквивалентная схема измерений с зеркальным источником

Поле зеркального источника в плоскости экрана перед прохождением экрана запишем через функцию Грина свободного пространства в скалярном приближении с учётом диаграммы направленности излучающей анетнны:

$$\mathrm{U}_0\left(x',y'\right)=\frac{e^{ik\sqrt{(x'-x_0)^2+(y'-y_0)^2+h^2}}}{4\pi\sqrt{(x'-x_0)^2+(y'-y_0)^2+h^2}}\mathrm{F}_0\left(\varphi\right), \tag{1}$$

где $\left(x_0,y_0\right)$ – координата источника на плоскости; $\varphi=\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{h}\sqrt{(x'-x_0)^2+(y'-y_0)^2}\right)$ – угол падения, $k=\omega/c$ – волновое число; $\mathrm{F}_0\left(\varphi\right)$ – диаграмма направленности излучающей антенны. В данном случае рассматривается либо вертикальная, либо горизонтальная поляризация волн.

Прохождение поля через экран опишем через умножение поля $\mathrm{U}_0\left(x',y'\right)$ на коэффициент пропускания экрана:

$$\mathrm{U}_1\left(x',y'\right)=\mathrm{U}_0\left(x',y'\right)\mathrm{R}\left(\varphi,\varepsilon\right), \tag{2}$$

где $\mathrm{R}\left(\varphi,\varepsilon\right)$ – коэффициент отражения для выбранной поляризации зависящий от угла падения и диэлектрической проницаемости. В данном случае ε зависит от точки на поверхности среды, поскольку рассматривается неоднородная поверхность, то есть ε является функцией координат вида $\varepsilon\left(x',y'\right)$.

Поле в приёмнике вычисляется согласно принципу Гюйгенса – Френеля следующим образом [1]:

$$\mathrm{U}\left(x,y,x_0,y_0\right)=-\iint\limits_{S'}\mathrm{U}_1\left(x',y'\right)\mathrm{F}\left(\varphi'\right)\frac{\partial\mathrm{G}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}'\right)}{\partial n'}dx'dy', \tag{3}$$

где S' – поверхность экрана; $\mathrm{G}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}'\right)=\frac{\exp\left(ik\left|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'\right|\right)}{4\pi\left|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'\right|}$ – функция Грина свободного пространства; $\boldsymbol{r}=\left(x,y,h\right)$ – радиус-вектор приёмника; $\boldsymbol{r}'=\left(x',y',0\right)$ – радиус-вектор точки на поверхности экрана; $\mathrm{F}\left(\varphi'\right)$ – диаграмма направленности приёмной антенны; $\varphi'=\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{h}\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2}\right)$ – угол рассеяния; $\frac{\partial}{\partial n'}$ – производная по нормали к поверхности, по сути $\frac{\partial}{\partial n'}=\frac{\partial}{\partial z'}$.

Выражение (3) является решением прямой задачи. Согласно поставленной цели, необходимо вычислить двумерное распределение диэлектрической проницаемости $\varepsilon\left(x',y'\right)$ из четырехмерной функции $\mathrm{U}\left(x,y,x_0,y_0\right)$. Поскольку ε имеет однозначную связь с угловой зависимостью коэффициента отражения, то, вычислив коэффициент отражения в зависимости от угла падения, можно найти ε поверхности. Но поскольку ε неоднороден и различается для различных точек поверхно-

сти, то необходимо найти угловые зависимости коэффициента отражения для каждой точки. Здесь подразумевается, что ε меняется таким образом, что существуют протяжённые области однородного ε, для которых можно рассматривать отражение волн как отражение плоских волн от бесконечной однородной плоской поверхности.

Найдём коэффициент отражения $\mathrm{R}(\varphi)$, зависящий от угла падения и, как следствие, от точек (x_0, y_0) и (x', y') из функции $\mathrm{U}(x, y, x_0, y_0)$. Сначала вычислим функцию $\mathrm{U}(x', y')$. Поскольку выражение (3), по сути, является свёрткой функции $\mathrm{U}_1(x', y')$ и функции $\mathrm{F}(\varphi')\dfrac{\partial \mathrm{G}(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{r}')}{\partial n'}$, следовательно, $\mathrm{U}_1(x', y')$ можно вычислить как обратную свертку с помощью преобразований Фурье:

$$\mathrm{U}_1(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\mathrm{U}}_1(k_x, k_y) e^{ik_x x' + ik_y y'} dk_x dk_y , \tag{4}$$

где

$$\tilde{\mathrm{U}}_1(k_x, k_y) = \frac{\tilde{\mathrm{U}}(k_x, k_y, x_0, y_0)}{\tilde{\mathrm{H}}(k_x, k_y)},$$

$$\tilde{\mathrm{U}}(k_x, k_y, x_0, y_0) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{U}(x, y, x_0, y_0) e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy \tag{5}$$

$$\tilde{\mathrm{H}}(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{F}(\varphi)\left.\frac{\partial \mathrm{G}(\Delta \boldsymbol{r})}{\partial z}\right|_{z=h} e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy ,$$

$$\mathrm{G}(\Delta \boldsymbol{r}) = \frac{\exp\left(ik\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{4\pi\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{h}\sqrt{x^2 + y^2}\right).$$

В общем случае, для вычисления обратной свертки требуется регуляризация, однако не будем подробно останавливаться на этом вопросе.

Используя решение (4) и выражение (2), не составляет труда вычислить $\mathrm{R}(\varphi)$:

$$\mathrm{R}(\varphi) = \frac{\mathrm{U}_1(x', y')}{\mathrm{U}_0(x', y')}, \tag{6}$$

где $\mathrm{R}(\varphi)$, по сути, является функцией от точки положения источника (x_0, y_0) и текущей точки на поверхности (x', y'). Также известно, что $\mathrm{R}(\varphi)$ зависит от ε согласно формулам Френеля, например для вертикальной поляризации можно записать

$$\mathrm{R}_0(\varphi) = \frac{\varepsilon(x', y')\cos\varphi - \sqrt{\varepsilon(x', y') - \sin^2\varphi}}{\varepsilon(x', y')\cos\varphi + \sqrt{\varepsilon(x', y') - \sin^2\varphi}}, \tag{7}$$

где предполагается, что излучатель и приёмник перемещаются в вакууме.

Из выражения (7) необходимо найти распределение $\varepsilon(x', y')$. Данное уравнение решается численно для различных (x_0, y_0) и, по сути, должно совпадать для одних и тех же значений (x', y'). То есть имеется избыточность данных по отношению к искомой величине. В таком случае целесообразно использовать метод наименьших квадратов для определения $\varepsilon(x', y')$, то есть, варьируя значениями $\varepsilon(x', y')$ необходимо минимизировать интеграл (сумму) вида

$$\Phi(\varepsilon) = \iint \left|\mathrm{R}(\varphi) - \mathrm{R}_0(\varphi)\right|^2 dx_0 dy_0 , \tag{8}$$

где интегрирование производится по области перемещения излучающей антенны.

Численное моделирование

Численное моделирование поводилось для случая одномерного сканирования вдоль оси x на высоте $h = 20$ см для распределения ε, изображённого на рис. 3. Численное моделирование проводилось на частоте 18 ГГц. Предполагается, что антенны имеют круговую диаграмму направленности.

Согласно формулам (1), (2), было вычислено поле $U_1(x', y')$, которое представлено на рис. 4, *а*. По оси x отложена координата излучающей антенны, а по оси x' – координата точки на поверхности среды. На рис. 4, *б* представлен коэффициент отражения от поверхности для вертикальной поляризации, можно видеть, что для различных ε наблюдаются различные углы Брюстера.

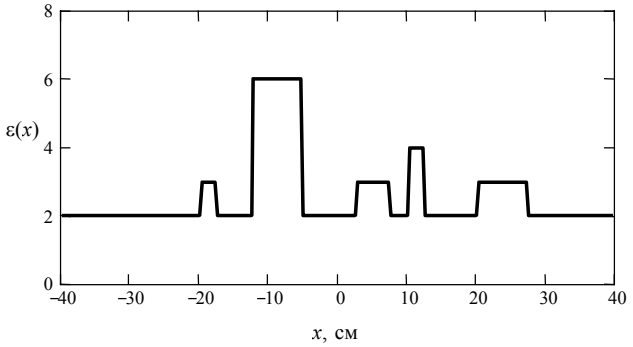
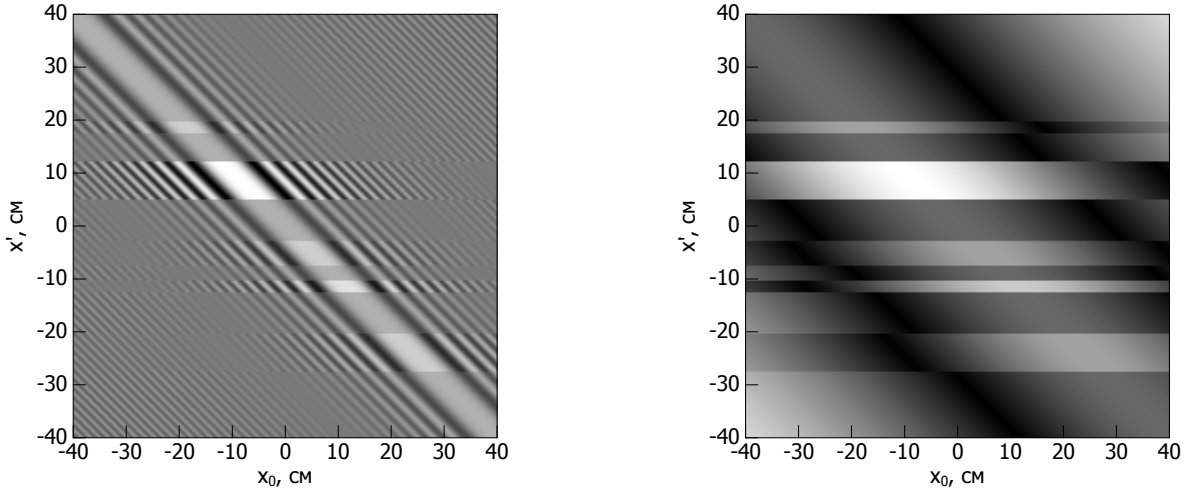


Рис. 3. Моделируемое распределение диэлектрической проницаемости



а *б*

Рис. 4. Поле в плоскости экрана (*а*) и коэффициент отражения поверхности (*б*)

Далее с помощью формулы (3) было вычислено поле в точке приёма (рис. 5). Полученное поле выглядит симметрично, то есть можно менять местами источник и приёмник, при этом проходящий сигнал не изменится, данный результат соответствует теореме взаимности.

Применяя формулы (4) – (6) был восстановлен коэффициент отражения поверхности среды (рис. 6). Можно видеть, что восстановление не точно совпадает с рис. 4, *б*, поскольку при распространении волн (3) пространственный спектр сужается, поскольку, по сути, происходит линейная фильтрация поля.

Согласно формуле (8), была вычислена функция $\Phi(\varepsilon)$ для различных участков поверхности (рис. 7). Приведены графики для $\varepsilon = 6$ ($\Phi_6(\varepsilon)$), $\varepsilon = 2$ ($\Phi_2(\varepsilon)$), $\varepsilon = 3$ ($\Phi_3(\varepsilon)$). Можно видеть, что при возрастании ε точность определения минимума снижается, то есть шумы в измерениях будут более существенно увеличивать ошибку определения ε при больших его значениях. Результат определения ε методом наименьших квадратов представлен на рис. 8.

Заметим, что даже в численном моделировании, где не предполагалось внесение шумов, существует погрешность определения ε, это связано с искажённым восстановлением коэффициента отражения поверхности (рис. 6).

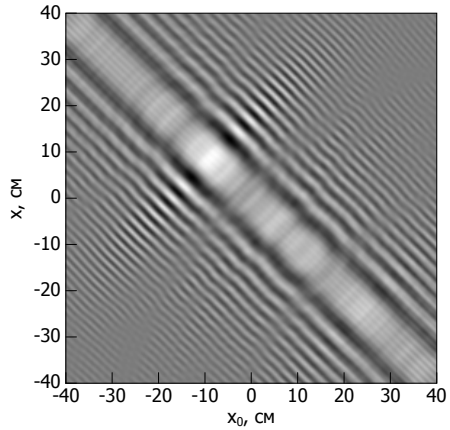


Рис. 5. Поле в точке приёма в зависимости от координат источника и координат приёмника

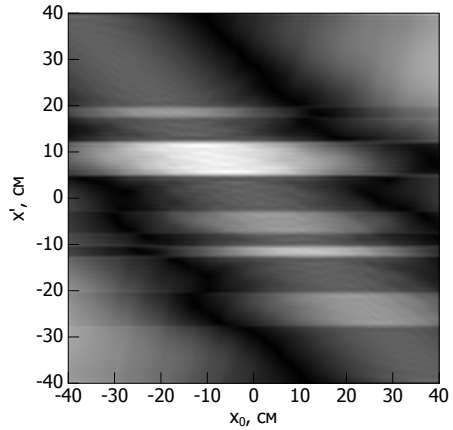


Рис. 6. Восстановленый коэффициент отражения

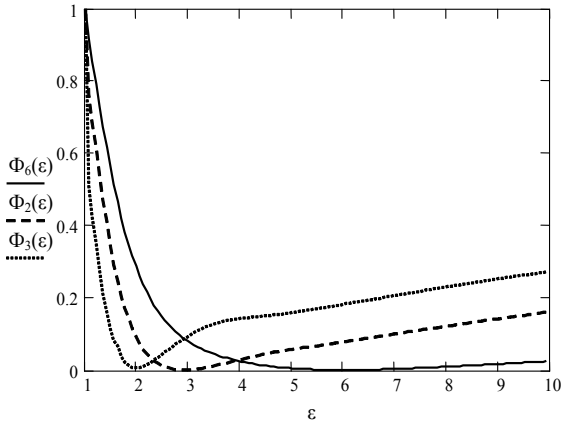


Рис. 7. Минимизируемая функция $\Phi(\varepsilon)$

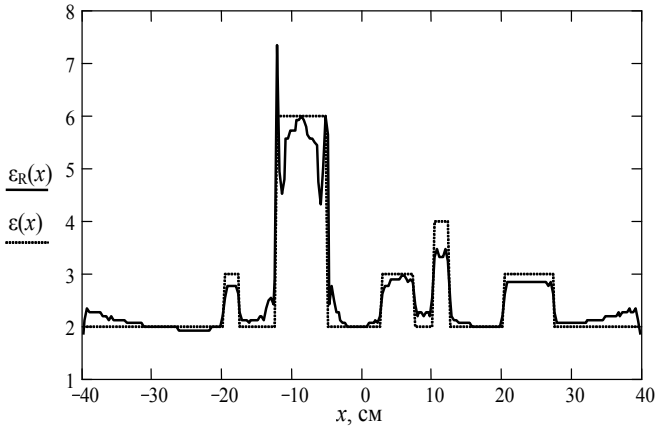


Рис. 8. Результат оценки распределения ε

Заключение

В работе предложен метод оценки распределения диэлектрической проницаемости на плоской поверхности по многопозиционным бистатических радиолокационным измерениям, основанный на определении угловой зависимости коэффициента отражения. В ходе численного моделирования выяснено, что чувствительность метода к шумам будет возрастать при увеличении ε поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1990.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Суханов Дмитрий Яковлевич, к.ф.-м.н., доцент;
Пермяков Егор Геннадиевич, студент.

D.Y. SUKHANOV, E.G. PERMYAKOV

ESTIMATION OF ONE DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF DIELECTRIC PERMITTIVITY ON A FLAT SURFACE USING BISTATIC MEASUREMENTS OF REFLECTED FIELD

It is proposed a method of estimation of the of the dielectric permittivity distribution on a flat surface from bistatic measurements of the reflected field using the angular dependence of the reflection coefficient. Receiving and transmitting antennas independently moved over the surface at a fixed height, which allows to measure the field at different angles of reflection from a flat surface. To obtain the spatial resolution it is used the synthetic aperture radar technology.

Keywords: *dielectric permittivity, synthetic aperture, bistatic radiolocator.*