

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЛОКАТОРА СО СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

А. С. Куценко, О. В. Казанский, Н. Н. Колчигин

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, 61077, пл. Свободы, 4, Харьков, Украина
E-mail: uu5jkb@qrz.ru

Поступила в редакцию 4 декабря 2008 г.

Работа посвящена разработке метода обработки сигнала радара, который позволяет строить профиль земной поверхности, обнаруживать и идентифицировать искусственные объекты, расположенные на подстилающей поверхности. Метод обработки сигнала и построения изображений основан на измерении диаграммы направленности участка исследуемой сцены.

Произведено моделирование работы радара, получены радиолокационные изображения (РЛИ) некоторых элементарных рассеивателей, показана возможность использования радара для восстановления профиля поверхности сцены и обнаружения искусственных объектов, расположенных на ней.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импульсный радиолокатор, антенная решетка, радиолокационное изображение.

Сканирующие антенные решетки довольно часто применяются для целей радиолокации. Они позволяют получить больше данных о характеристиках объекта (форма, размер и др.) по сравнению с обычной антенной, улучшить направленные свойства антенной системы, дают возможность облучать объект под разными ракурсами. Это преимущество возникает благодаря возможности вращать диаграмму направленности (ДН) антенны [1]. В [2] описывается радиолокационная установка, позволяющая с помощью неподвижной антенной решетки и соответствующей обработки получать радиолокационные изображения (РЛИ) исследуемого объекта подобно радару с синтезированной апертурой (РСА). В [3] также сканирующая антенная система используется для построения РЛИ небольшого участка земной поверхности в режиме реального времени. Целью данной работы является разработка метода для определения формы объекта с использованием сканирующей антенной решетки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу обработки сигнала бортового радиолокатора. Разрабатываемый метод должен позволять не только определять яркости элементарных участков земной поверхности, но и их ориентацию. Пусть летательный аппарат, на котором расположен РСА, находится на высоте H и движется вдоль оси Ox с постоянной скоростью v (рис.1).

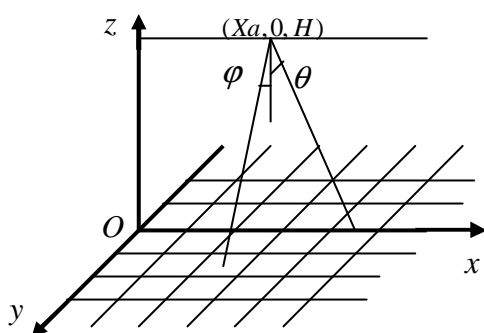


Рис. 1. Геометрия задачи.

Антенная система радара представляет собой антенную решетку, способную изменять направление максимума диаграммы направленности (сканирующая решетка). Исследуемый участок поверхности разбит на прямоугольные facets. Во время движения проводится сканирование всей поверхности в двух плоскостях (вдоль осей Ox и Oy). Угол между нормалью к оси антенной решетки и направлением излучения изменяется так, что в одном положении передающей антенны радар получает отклик от каждого facets. Поворот диаграммы направленности возможен, если соседние элементы антенной решетки возбуждаются с некоторой фазовой задержкой [4]. Считается, что сканирование в обеих плоскостях происходит

настолько быстро, что радар меняет свое положение незначительно. Через определенный интервал времени t_n , когда положение радара изменится на $v \cdot t_n$, сканирование каждого facets сцены повторяется. Таким образом, пролетая над поверхностью, измеряются интенсивности отраженных полей от каждого facets при всех положениях летательного аппарата. В приближении физической оптики, когда размер facets намного больше длины волны, в моностатическом случае максимальное отражение

будет наблюдаться в зеркальном направлении, т.е. по нормали к плоскости facets. Определив из измеренных амплитуд полей, в каком направлении facet имеет максимальное отражение, становится возможным определить его ориентацию.

Следует заметить, что, поскольку от facets распространяется сферическая волна, при нахождении максимума необходимо учитывать расстояние до facets. Расстояние можно легко определить, измерив время задержки между излученным и отраженным импульсами.

Если пронормировать амплитуды сигналов от разных facets на расстояние, появляется возможность сравнить коэффициенты отражения от этих facets.

При строгом решении задачи, если радар работает в импульсном режиме, для применения приближения физической оптики необходимо разложить зондирующий импульс с помощью прямого преобразования Фурье на гармоники, решить задачу для каждой из гармоник, а затем с помощью обратного преобразования Фурье получить конечный результат. Поскольку при решении задачи необходимо определять не форму, а только максимум ДН facets, а при изменении длины волны качественно форма ДН не меняется для $\lambda > 3a$ (функция $\sin(\Delta\theta)/\theta$ по каждой из координат), расчеты можно проводить для одной из гармоник.

Рассмотрим бесконечно тонкую идеально проводящую прямоугольную пластину со сторонами $2a$ и $2b$ при условии (приближение физической оптики)

$$a, b \gg \lambda \quad (1)$$

Пусть на пластину, вектор нормали к которой совпадает с осью OZ , в направлении, определяемым углами φ и θ , падает плоская линейно-поляризованная волна с амплитудой E_i . При нормальном падении моноэлектрическая эффективная площадь рассеяния пластины [5]

$$\sigma_m = 64\pi a^2 b^2 / \lambda^2 \quad (2)$$

Пространственная моноэлектрическая индикатриса рассеяния в приближении физической оптики [5]

$$F(\varphi, \theta) = \left(\cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot \frac{\sin(2ka \sin \varphi \cos \theta)}{2ka \sin \varphi \cos \theta} \cdot \frac{\sin(2kb \sin \theta)}{2kb \sin \theta} \right)^2, \quad (3)$$

которая пригодна при $a, b > 3\lambda$ и $|\varphi|, |\theta| < \pi/4$.

Для моделирования работы радара прежде всего необходимо смоделировать поверхность. Пусть поверхность описывается функцией $z(x)$, которая может быть задана как численно, так и аналитически. Разобьем выделенный участок поверхности вдоль оси Ox прямоугольной координатной сеткой. Шаг разбиения Δx удовлетворяет условиям применимости формул физической оптики (1). Обозначим $z(x_i) \equiv z_i$.

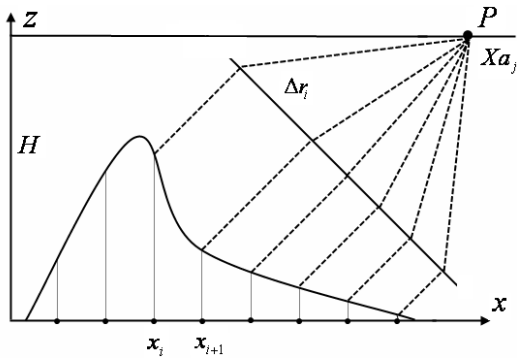


Рис. 2. Профильная задача.

Пусть антенна радара находится на высоте H над поверхностью. Радар движется вдоль оси Ox . В определенные моменты времени антенна сканирует поверхность. Положения антенны, в которых происходит сканирование, обозначим Xa_j (рис. 2). Угол между нормалью к оси антенной решетки и направлением излучения определяется задержкой между временем возбуждения элементов антенны Δt . Этот угол может быть найден из соотношения

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c\Delta t}{d}\right), \quad (4)$$

где d - расстояние между элементами антенны, c - скорость света. Угол θ необходимо выбирать так, чтобы луч ДН антенны попадал в центр облучаемого facets. При моделировании его можно находить из выражения:

$$\theta = \arctan\left(\frac{(x_i + x_{i+1})/2 - Xa_j}{H - (z_i + z_{i+1})/2}\right). \quad (5)$$

Пусть нормали всех facets лежат в плоскости xOz . Угол β между нормалью к facets и осью Oz :

$$\beta = \arctan\left(\frac{z(x_{i+1}) - z(x_i)}{x_{i+1} - x_i}\right) = \arctan\left(\frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta x}\right). \quad (6)$$

Из геометрии задачи угол падения электромагнитной волны на плоскость facets:

$$\delta = \theta - \beta. \quad (7)$$

Поскольку размер facets не изменяется вдоль оси Ox , а профиль поверхности может быть любой, необходимо вычислять эффективный отражающий размер facets, т.е. проекцию facets на плоскость фронта падающей волны. Этот размер можно найти из выражения:

$$\Delta r = \Delta x \cdot \cos(\delta). \quad (8)$$

При работе реального радара расстояние от центра антенны до центра отражающего facets может быть найдено из формулы:

$$R = c\tau / 2, \quad (9)$$

где τ - задержка между излученным и пришедшим импульсами. При моделировании расстояние до центра facets

$$R = \left(\left(H - \frac{z_i + z_{i+1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} - Xa_j \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Вычисление интенсивности отраженного поля для случая двумерной задачи (волновой вектор лежит в плоскости xOz) дает следующий результат

$$I^S = E_s \cdot E_s^* = \left(\frac{E_0 F k}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sin(k \sin \delta \Delta r)}{k \sin \delta} \right), \quad (11)$$

где F - коэффициент Френеля.

Обработка сводится к определению ориентации facets в плоскости xOz по максимуму отраженного поля и восстановлению профиля поверхности. Пусть получен ряд I_{ij}^S для i -го facets, где расположение антенны определяется индексом j (соответствует точке наблюдения Xa_j). Положение facets x_i по оси Ox определяется индексом i . Все значения I_{ij}^S нормированы на расстояние до соответствующей точки поверхности. Для каждого facets из ряда выбирается наибольшее значение интенсивности, что отвечает максимуму ДН, т.е. ориентации нормали к плоскости facets в данном направлении. Зная расстояние до центра facets, несложно восстановить его координату z_{i+1} :

$$z_{i+1} = z_i + \Delta x \cdot \tan \theta. \quad (12)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки работы алгоритма обработки сигнала была смоделирована поверхность длиной 60 м и шириной 50 м, которая представляет собой модель возвышения и впадины (рис. 7). Поверхность разбита на квадратные facets с длиной стороны 1 м. Каждый facet имеет коэффициент отражения 0.5.

Радар перемещается на высоте 1000 м над поверхностью вдоль оси Ox . Поскольку поверхность симметрична относительно плоскости xOz , можно решать профильную задачу, полагая, что все facets ориентированы одинаково относительно оси Oy (угловая зависимость только от одного угла). Летательный аппарат в начальный момент сканирования находится на расстоянии 1500 м от центра поверхности и заканчивает сканирование на таком же расстоянии по другую сторону оси Ox . Это соответствует углам падения луча на горизонтально расположенный facet δ от -56° до 56° .

Для возможности обнаружения объектов на поверхности были построены их изображения. На рис. 4 показано РЛИ квадратной металлической пластины, расположенной горизонтально. На РЛИ координата i означает номер facets на поверхности, т.е. его координату по оси Ox , а координата j - номер точки, из которой производится наблюдение, т.е. угол, под которым facet виден наблюдателю. РСА находится над нулевым facetом при $j = 1500$, поэтому максимум отражения от facets в точке $j = 1500$ соответствует горизонтальной ориентации facets. Из последнего рисунка видно, металлические (искусственные) объекты можно находить по всплеску интенсивности рассеянной волны.

Угол между нормалью к facetу и осью Oz при $z \ll H$ приближенно можно вычислить по формуле:

$$\beta \approx \arctan \left(\frac{(j-1500) \cdot \Delta Xa}{H} \right). \quad (13)$$

На рис. 4 показаны профиль поверхности и изображение прямоугольной металлической пластины, нормаль к которой на 26° отклонена от оси Oz .

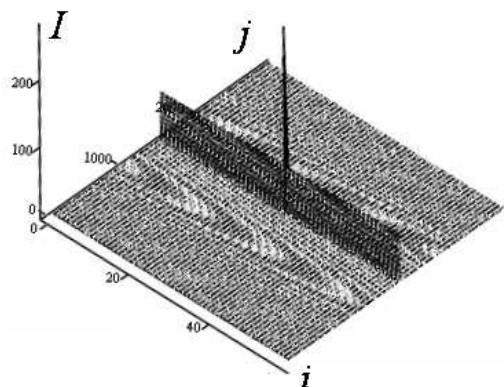


Рис. 3. РЛИ квадратной металлической пластины, расположенной горизонтально.

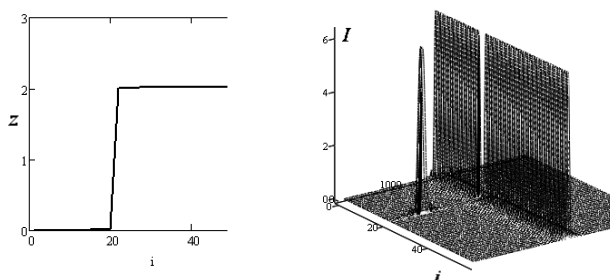


Рис. 4. Профиль поверхности (а) и РЛИ (б) наклонной пластины.

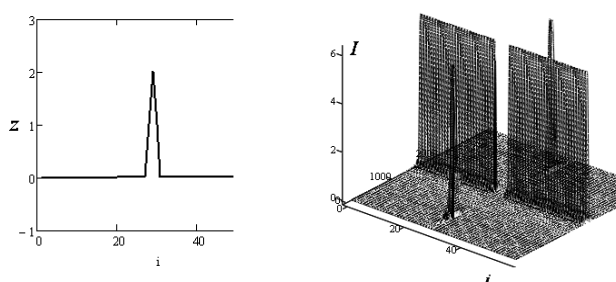


Рис. 5. Профиль поверхности и РЛИ конуса.

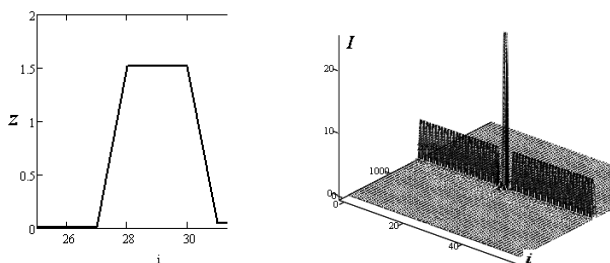


Рис. 6. Профиль поверхности и РЛИ металлического бруска.

области 1, 3, 4, 7, 8 представляют собой подстилающую поверхность.

На рис. 5 представлен восстановленный профиль поверхности, на которой расположен конус, и РЛИ этой поверхности. Интенсивность имеет всплеск по разные стороны от центра РЛИ, причем расстояния от центра до этих точек одинаково. Это соответствует отражению от двух «граней» конуса, нормали к которым сдвинуты на один и тот же угол относительно Oz .

На рис. 6 показан восстановленный профиль поверхности металлического бруска. Крупный масштаб выбран специально для того, чтобы показать, что вертикальный профиль не может быть восстановлен. Это связано с тем, что максимум отражения от боковой стенки бруска расположен под углом $\pi/2$ к оси Oz , т.е. для его обнаружения радару необходимо находится бесконечно далеко от объекта. Таким образом, крутизна профиля определяется максимальным расстоянием, на котором может располагаться радар от объекта. С этим же связано и то, что не может быть корректно восстановлена высота объекта со «стенками», наклоненными более чем на максимальный угол обзора. Все это подтверждает РЛИ металлического бруска, где «отсутствуют» максимумы отраженных полей от боковых граней. О том, что брусок металлический, можно судить по всплеску интенсивности относительно подстилающей поверхности.

На рис. 7 показан профиль сложной сцены. Сцена представляет собой поверхность, на которой расположены конус ($i = 42$) и металлический прямоугольник ($i = 10$). Коэффициент отражения от конуса выбран 0.8. Имея РЛИ эталонных объектов, таких как прямоугольник, конус, брусок, полусфера и др., можно идентифицировать, определить местоположение и ориентацию практически всех объектов, находящихся на сложной сцене. Покажем это.

Участок всплесков интенсивности 1 на рис. 7 соответствует отражению от подстилающей поверхности. Он расположен в центре, что говорит о горизонтальной ориентации его facets. Область 3 соответствует впадине на участке, по отклонению координаты j этих пиков от центра ($j = 1500$) можно говорить о радиусе кривизны поверхности, рассчитав угол между нормалью к facets и вертикалью Oz . Пик 2 – отражение от прямоугольного металлического facets. Видно, что интенсивность отраженного поля в этой точке намного превосходит интенсивность рассеянных полей участков 1 и 3. Это говорит о том, что

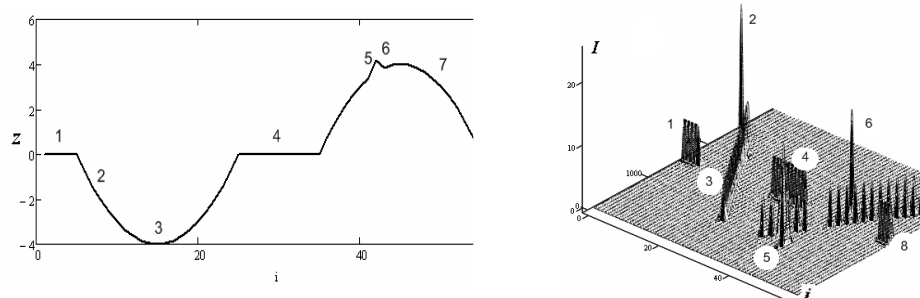


Рис. 7. Восстановленный профиль сложной сцены и РЛИ сложной сцены.

Область 4 и 8 – горизонтально ориентированные участки подстилающей поверхности, аналогично 1. Участок 7 – возвышение. Также как и для 3, возможно определить радиус кривизны поверхности. Из сравнения рис. 5 с участками 5 и 6 можно говорить о том, что всплески 5 и 6 – отражение от конуса. Видно, что эти всплески расположены симметрично точки, входящей в изображение возвышения 7, следовательно конус расположен на возвышении. Меньшая интенсивность отраженного поля по сравнению с 2, но большая по сравнению с интенсивностью подстилающей поверхности говорит об искусственном происхождении конуса 5-6, и о том, что его поверхность не является только металлической.

ВЫВОДЫ

В работе предложен метод восстановления профиля земной поверхности при обработке сигнала импульсного радара с использованием в качестве антенны сканирующей решетки. Для проверки результатов было проведено моделирование. Получены изображения для простых объектов, таких как наклонная плоскость, конус, брусок. Также моделировалась работа радара с последующим построением РЛИ для сложной поверхности с произвольным размещением на ней детектируемых объектов. Полученный алгоритм интересен тем, что позволяет определять не только яркость исследуемой поверхности, но и ориентацию ее декомпозиционных участков, даже затененных при некоторых ракурсах. Дано физическое объяснение виду полученных изображений. Показана возможность определения коэффициента отражения рассеивающих объектов в полосе частот, определяемой шириной спектра импульсного сигнала, а также показана универсальность метода независимо от формы подстилающей поверхности и от произвольной формы идентифицируемых объектов. Обоснована возможность идентификации и обнаружения искусственных рассеивателей на сложной поверхности. Дана интерпретация РЛИ, полученному для сложной сцены.

Полученные результаты могут быть использованы для практического применения в задачах топографии, геологии, радиолокации и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольникова. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. П.И. Дудника. М., «Советское радио», 1977, 408 с.
2. К.А. Лукин, А.А. Могила, П.Л. Выплавин. Получение изображений с помощью неподвижной антенной решетки, шумовых сигналов и метода синтезированной апертуры. Радиофизика и электроника, том 12, № 3, 2007. с. 526-531.
3. M. Rangwala, F. Wang, K. Sarabandi. Study of Millimeter-Wave Radar for Helicopter Assisted-Landing System. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.50, No. 2, April 2008, p. 13-25.
4. Шубарин Ю. В. Антенны СВЧ. Издательство харьковского Ордена Трудового красного знамени государственного университета им. А. М. Горького, Харьков, 1960 г., 284 с.
5. Кобак. В. О. Радиолокационные отражатели. Москва: Советское радио, 1975 г., 248 с.