

УДК 621.37

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО НЕМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОВИДЕНИЯ

В. Н. Васильев

Для исследования процессов радиовидения предлагается использовать метод оптического моделирования. Возникающую при этом трудность в сохранении отношения размеров объекта к длине волны можно преодолеть, увеличив соответствующее отношение в 10—100 раз. На основании анализа формул, описывающих измеряемые сигналы и восстановленные изображения, определены условия, при которых оптическое немасштабное моделирование позволяет получать сигналы и изображения, адекватные радиолокационным. Найдены ограничения на форму объектов.

Физическое моделирование процессов радиовидения позволяет исследовать ряд важных вопросов и задач, теоретическое решение которых затруднительно или вообще невозможно. На основании экспериментальных данных можно:

— получить сигналы, отраженные от поверхности объектов, несущие информацию об их форме, и по ним проверить и уточнить математические модели отраженных сигналов;

— исследовать характеристики и алгоритмы восстановления изображений, распознавания объектов и измерения параметров, связанных с размерами и движением объектов;

— провести сравнительный анализ методов радиовидения по качеству получаемой информации, влиянию помех, ошибок измерений и воздействию среды.

Моделирование в оптическом диапазоне волн имеет ряд преимуществ по сравнению с другими диапазонами:

— размеры оптического стенда сравнительно невелики и позволяют проводить исследование больших радиолокационных систем в лабораторных условиях;

— возможность визуального наблюдения рассеянного света упрощает работу со стендом;

— в оптике можно использовать хорошо разработанные голографические методы регистрации и обработки;

— оптические свойства различных материалов хорошо изучены и подробно описаны, что упрощает моделирование распространения волн в среде.

В данной статье показана возможность оптического моделирования радиовидения и теоретически доказана адекватность сигналов и изображений, получаемых на модели в оптическом диапазоне волн, радиолокационным. Определены условия адекватности и ограничения метода немасштабного моделирования.

1. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ И ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАДИОВИДЕНИЯ

Рассмотрим рассеяние плоской монохроматической волны на поверхности объекта и восстановление изображения объекта по результатам

измерения рассеянного поля в дальней зоне. Найдем сначала амплитуду электромагнитной волны в точке расположения излучателя, пренебрегая эффектами изменения поляризации при рассеянии. Если размеры объекта много больше длины волны ($d \gg \lambda$), поверхность обладает хорошей проводимостью и ее радиусы кривизны составляют по крайней мере несколько длин волн, то в соответствии с принципом Гюйгенса—Кирхгофа отраженное поле в дальней зоне определяется уравнением

$$E = \frac{E_0}{2\sqrt{\pi}R} e^{i(2kR - \omega t - 2t)} H(\mathbf{k}) \rho(\mathbf{k}), \quad (1)$$

где E_0 — амплитуда падающего поля, \mathbf{k} — волновой вектор падающей волны, R — расстояние между РЛС и центром массы объекта, Ω — доплеровский сдвиг частоты, связанный с движением центра массы объекта, $H(\mathbf{k})$ — комплексная спектральная характеристика среды распространения волн, $\rho(\mathbf{k})$ — коэффициент рассеяния, связанный с эффективной поверхностью рассеяния соотношением $\sigma = |\rho|^2$ и определяемый уравнением

$$\rho = -\frac{i\mathbf{k}}{\sqrt{\pi}} \int_S (\mathbf{Jn}) e^{i2\mathbf{k} \cdot (\mathbf{Jx})} dS(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где $\mathbf{J} = \mathbf{k}/k$, \mathbf{n} — единичный вектор нормали к элементу поверхности dS , S — видимая поверхность объекта, \mathbf{x} — радиус-вектор, направленный из центра массы объекта к элементу поверхности $dS(\mathbf{x})$, ось x_1 направлена по \mathbf{k} .

Все сомножители в уравнении (1), кроме последнего, не содержат информации о форме объекта. Поэтому после измерения расстояния, доплеровского сдвига частоты и влияния среды из принятого сигнала выделяется и записывается лишь коэффициент рассеяния.

Если характеристика среды неизвестна, коэффициент рассеяния будет измеряться с ошибкой:

$$\tilde{\rho}(\mathbf{k}) = H(\mathbf{k}) \rho(\mathbf{k}). \quad (3)$$

Используя результаты работы [1], упростим связь между коэффициентом рассеяния и формой объекта. Из-за быстрых осцилляций экспоненты и медленных изменений функции (\mathbf{Jn}) вклад в интеграл (2) дают лишь те точки поверхности («блестящие» точки), в которых функция (\mathbf{Jn}) или ее производные имеют разрывы. Пусть $S_1(x_1)$ — площадь проекции освещенной поверхности объекта, отсекаемой плоскостью $x_1 = \text{const}$, на плоскость волнового фронта. Использование метода перевала к уравнению (2) позволяет представить коэффициент рассеяния в таком виде:

$$\rho(\mathbf{k}) = \sum_j a_j \exp(i2\mathbf{kx}_j), \quad (4)$$

где

$$a_j = \frac{B_{r_j}}{\sqrt{\pi}(2ik)^{r_j}}, \quad (5)$$

r_j — порядок производной функции

$$S_2(x_1) = \frac{dS_1(x_1)}{dx_1}, \quad (6)$$

имеющей разрыв;

$$B_{r_j} = \int \frac{d^{r_j+1} S_2(x_1)}{dx_1^{r_j+1}} \exp(-i2\mathbf{kx}_1) dx_1. \quad (7)$$

Интеграл (7) берется на длине объекта, вне объекта первый сомножитель в подинтегральном выражении обращается в нуль.

Таким образом, поле в дальней зоне рассеяния определяется «блестящими» точками объекта, имеющими координаты x_j и дающими дифрагированные волны с амплитудами a_j .

Если волновой вектор изменяется в малых пределах, амплитуды и координаты «блестящих» точек можно считать не зависящими от него. Введем характеристическую функцию объекта, определяемую его геометрической формой,

$$A(x) = \sum_j a_j \delta(x - x_j), \quad (8)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака.

Как видно из уравнения (4), связь коэффициента рассеяния и характеристической функции выражается преобразованием Фурье.

В системах радиовидения при записи поля в дальней зоне восстановление изображения производится с помощью обратного преобразования Фурье:

$$\tilde{A}(x) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_D \tilde{\rho}(K) e^{-iKx} dK, \quad (9)$$

где $K = 2k$, D — область измерений в пространстве K удвоенных волновых векторов.

Угловые размеры области D определяются допустимыми для наблюдения и измерения ракурсами объекта, толщина области — шириной полосы сигнала.

Интегрирование по области D в уравнении (9) можно распространить на все пространство K , если ввести характеристическую функцию области наблюдения:

$$F(K) = \begin{cases} 1 & (\text{внутри } D) \\ 0 & (\text{вне } D) \end{cases}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (9) можно переписать так:

$$\tilde{A}(x) = (2\pi)^{-3} \int \rho(K) H(K) F(K) e^{-iKx} dK = A(x) * G(x), \quad (11)$$

где

$$G(x) = \int H(K) F(K) e^{-iKx} dK. \quad (12)$$

Если среда распространения волн не вносит никаких искажений ($H(K) = 1$), а область D достаточно велика, то

$$G(x) \approx \delta(x) \quad (13)$$

и $\tilde{A}(x) \approx A(x)$. В более общем случае ($H \neq 1$ или форма и размеры области D не позволяют получить функцию $G(x)$, близкую к дельта-функции) восстановленное изображение описывается уравнением

$$I(x) = |\tilde{A}(x)|^2 = \left| \sum_j a_j G(x - x_j) \right|^2. \quad (14)$$

Из (8) и (14) видно, что восстановленные изображения гладких металлических объектов имеют вид набора ярких точек.

2. СВЯЗЬ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ

Если при моделировании сохранить отношение к длине волны всех физических величин, таких, как линейные размеры, проводимость, диэлектри-

ская проницаемость, временные интервалы и т. п., к длине волны, то модель явится уменьшенной копией системы РЛС—среда—объект, и полученные сигналы и изображения будут тождественны реальным, что следует из принципа подобия (см. [2]). Но для создания такого стенда в оптическом диапазоне потребовалось бы изготовить модели объектов размером 10—100 микрон, так как отношение размеров объектов радионаблюдения к длине волны составляет 10—100. Практически невозможно изготовить модели объектов микроскопических размеров заданной формы с зеркально гладкой поверхностью и закрепить их так, чтобы рассеянный опорой свет был мал по сравнению с отраженным самим объектом. Эти трудности можно преодолеть, если увеличить размер модели d до нескольких миллиметров. Однако это приводит к увеличению отношения d/λ . Рассмотрим возможности и ограничения немасштабного моделирования.

Формулы разд. 1 верны, если выполняются следующие условия:

- 1) размер объекта и радиусы кривизны его поверхности гораздо больше длины волны,
- 2) поверхность объекта является хорошим проводником,
- 3) неровности поверхности малы по сравнению с длиной волны.

Если первое условие выполняется в радиодиапазоне, то при оптическом немасштабном моделировании оно также будет выполнено, потому что отношение d/λ увеличивается. Второе условие будет выполняться, если модели объектов изготовить из хорошего проводника. При высоком качестве обработки поверхностей можно выполнить и третье условие. Следовательно, формулы (1)—(14) можно применять в оптическом диапазоне волн при выполнении перечисленных условий.

Главным требованием, предъявляемым к оптическому стенду, является адекватность получаемых на нем изображений объектов радиои изображениям:

$$I_p(x) = c^2 I_o \left(\frac{x}{M} \right), \quad (15)$$

где индексы «р» и «о» обозначают радио и оптический диапазоны волн, c — константа, M — масштаб изображения, равный масштабу изготовления модели объекта. В соответствии с (14) для выполнения (15) необходимо

$$\tilde{A}_p(x) = c \tilde{A}_o \left(\frac{x}{M} \right). \quad (16)$$

Из (11) и (16) получаем два условия:

$$A_p(x) = c A_o \left(\frac{x}{M} \right); \quad (17)$$

$$G_p(x) = G_o \left(\frac{x}{M} \right). \quad (18)$$

Уравнения (8) и (17) приводят к следующим соотношениям:

$$(x_j)_p = M(x_j)_o \quad (j = 1, 2, \dots); \quad (19)$$

$$(a_j)_p = c(a_j)_o \quad (j = 1, 2, \dots). \quad (20)$$

Уравнения (19) выполняются, так как при оптическом моделировании форма объекта сохраняется, а координаты особых точек уменьшаются в M раз. Уравнения (20) выполняются не всегда. Хотя функции $S_1(x_1)$ и $S_2(x_1)$ при оптическом моделировании лишь уменьшаются в M^2

раз независимо от номера j «блестящей» точки, в выражения (5) и (7) для a_j входят степени волнового числа. Показатели степеней могут быть различны для различных точек. Поскольку они определяются только геометрией поверхности, условие (20) ограничивает круг объектов, допускающих немасштабное моделирование, теми, для которых показатели степени волнового числа в выражениях (5) и (7) одинаковы и не зависят от номера «блестящей» точки. В общем случае при изменении длины волны или нарушении отношения d/λ происходит изменение соотношений яркостей точек и немасштабное моделирование дает искаженные восстановленные изображения.

Рассмотрим частные случаи, когда объекты состоят из простых геометрических поверхностей типа плоскостей, цилиндров, конусов и сфер. Для таких фигур коэффициенты a_j можно вычислить аналитически на основании работы [1]. Анализ коэффициентов a_j показал следующую зависимость от волнового числа:

$$a_j = a'_j k^{-m/2}, \quad (21)$$

где a'_j — коэффициент, не зависящий от k ; m — количество ограниченных (не равных бесконечности) радиусов кривизны поверхности. Назовем m порядком кривизны. Для сферы любая точка поверхности имеет два радиуса кривизны ($m = 2$), для цилиндра и конуса $m = 1$, для плоских фигур $m = 0$.

Из формулы (21) видно, что, если поверхность объекта имеет во всех точках одинаковый порядок кривизны, соотношение яркостей «блестящих» точек не изменяется при изменении длины волны, и условия (20) выполняются. Такие объекты допускают исследование немасштабным моделированием, и их характеристические функции в радио- и оптическом диапазонах отличаются лишь мультипликативной постоянной.

Определим, когда выполняется условие (18). Из (12) и (18) следует

$$H_p(K)F_p(K) = H_o(MK)F_o(MK). \quad (22)$$

При заданных $F_p(K)$ и $H_p(K)$ для выполнения уравнения (22) требуется производить измерения коэффициента рассеяния в диапазоне масштабного моделирования, т. е. на миллиметровых или субмиллиметровых волнах. В оптическом диапазоне волн при немасштабном моделировании это равенство не выполняется. Но можно заметить, что если в аргументе правой части уравнения (22) ввести аддитивную константу, то в уравнении (18) появится лишь комплексный множитель с единичной амплитудой, а уравнение (15) не изменится. Обозначим вектором q перенос области измерения из диапазона масштабного моделирования

моделирования (СВЧ) в оптический диапазон немасштабного моделирования (рис. 1). Сохраним

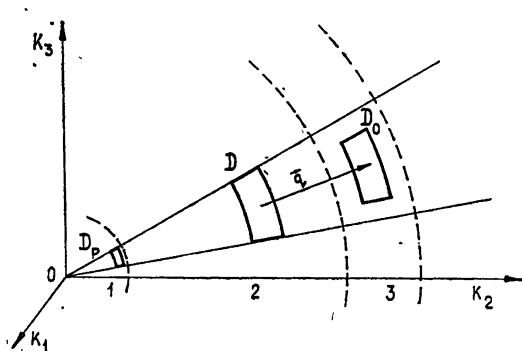


Рис. 1. Пространство векторов K ($K = 2k$): 1—радиодиапазон, 2—область масштабного моделирования (миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны), 3—область немасштабного моделирования (оптический диапазон).

при этом размер области D в пространстве K :

$$F_p(K) = F_0(MK + q); \quad (23)$$

$$H_p(K) = H_0(MK + q). \quad (24)$$

После такого переноса область D_0 должна остаться в пределах телесного угла в пространстве K , опирающегося на область D_p . В противном случае изменится направление наблюдения и характеристическая функция объекта $A(x)$.

Подставим уравнения (23) и (24) в (12):

$$G_p(x) = G_0\left(\frac{x}{M}\right) e^{iqx}. \quad (25)$$

Если расстояние между «блестящими» точками превышает ширину главного лепестка $G(x)$, то из (11), (14) и (25) получим:

$$I_p(x) = \left| \sum_j a_j G_0\left(\frac{x - x_j}{M}\right) \right|^2 = c^2 I_0\left(\frac{x}{M}\right). \quad (26)$$

Следовательно, при выполнении указанных выше условий оптическое немасштабное моделирование позволяет получать изображения, адекватные радиолокационным.

Для пояснения физического смысла уравнений (23) и (24) введем обозначения K_0 и K_p для длин векторов, проведенных из начала координат пространства K в области D_0 и D_p , ΔK_0 и ΔK_p — для размеров областей D_0 и D_p . По определению $K = 4\pi/\lambda$, а из (23) $\Delta K_0 = M\Delta K_p$. Отсюда найдем относительные размеры области D_0 :

$$\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_0 = \left(\frac{\Delta K}{K}\right)_p \frac{M}{N}, \quad (27)$$

где $N = \lambda_p/\lambda_0$. Поскольку при оптическом немасштабном моделировании $N > M$, то $(\Delta K/K)_0 < (\Delta K/K)_p$. Следовательно, физический смысл уравнения (23) заключается в уменьшении относительных диапазона частот и угловых размеров области измерений в N/M раз при сохранении ее формы. Такое уменьшение позволяет сохранить отношение размеров объекта к разрешающей способности — основную характеристику качества изображения — при нарушении отношения d/λ .

Физический смысл уравнения (24) заключается в том, что при моделировании среды ослабление амплитуды волны $|H(K)|$ и набег фазы $\arg H(K)$ должны сохраняться, а масштабы неоднородностей должны быть уменьшены в N/M раз.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Оптическое немасштабное моделирование радиовидения гладких металлических объектов позволяет получать изображения, адекватные радиолокационным.

2) Немасштабное моделирование допускается для объектов, кривизна поверхности которых однородна во всех точках, например, поверхность состоит либо из плоскостей, либо из цилиндров и конусов, либо из сфер. Этот вывод можно распространить и на оптическое немасштабное измерение эффективной поверхности рассеяния объектов.

3) При моделировании апертур сложной формы и широкополосных сигналов угловые размеры апертур и относительные диапазоны перестройки частоты сигналов должны быть в N/M раз меньше, чем радиолокационные.

4) При исследовании влияния среды распространения волн на качество восстановленных изображений ее модель должна быть выполнена в масштабе $1:N/M$, а амплитудно-фазовые параметры должны сохраниться.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Левшин и др., Труды Радиотехнического института АН СССР, № 18, М., 1974.
2. С. Щелкунов, Г. Фрис, Антенны, изд. Сов. радио, М., 1955.

Московский физико-технический институт

Поступила в редакцию
1 июля 1976 г.

POSSIBILITIES AND LIMITATIONS ON OPTICAL NONSCALE MODELLING OF RADAR IMAGING

V. N. Vasil'ev

A method of optical modelling is suggested to investigate the radar imaging processes. The difficulty arose to conserve the ratio of the object size to the wavelength may be overcome by increasing the corresponding ratio 10—100 times. Analysing the formulas describing the measured signals and reconstructed images, the conditions are determined under which the optical nonscale modelling permit to obtain signals and images adequate with radar ones. The limitations on the object form are found.
