

**ПРИМЕНИМОСТЬ ВЫСОКОДЕТАЛИЗИРОВАННОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ
В СТЕНДАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАТОРА
С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ**

В.В. Сюзев

v.suzev@bmstu.ru

И.А. Доденко

bismahrk1939@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Рассмотрены вопросы математического моделирования высокодетализированной фоноцелевой обстановки (подстилающей поверхности) на базе графической 3D модели. Разработка данной модели дает возможность существенно приблизить условия наземной экспериментальной отработки к условиям натурального испытания. Дан сравнительный анализ предлагаемой модели с другими моделями подстилающей поверхности. Приведена методика расчета отраженного радиолокационного сигнала от визируемого участка подстилающей поверхности на основе теории физической оптики. Выполнен анализ точности выдаваемых моделью данных и оценка применимости модели при математическом моделировании функционирования радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны на примере математической модели таких радиолокаторов с реализацией метода прямого вычисления корреляционного интеграла

Ключевые слова

Математическое моделирование, фоноцелевая обстановка, физическая оптика, физическая теория дифракции, синтезирование искусственной апертуры антенны

Поступила в редакцию 02.12.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект 2.7782.2017/БЧ)

Введение. Построение модели фоноцелевой обстановки (ФЦО), позволяющей сформировать сложный отраженный радиолокационный сигнал, т. е. сигнал, близкий по своим характеристикам к рассеянному от реальной подстилающей поверхности, дает возможность существенно приблизить условия наземной экспериментальной отработки к условиям натурального испытания и, следовательно, увеличить эффективность наземной отработки радиолокационного синтезирования апертуры (РСА), алгоритмов его функционирования, методов синтезирования.

К настоящему времени предложено значительное число методик решения этой задачи. Методики можно разбить на две основные группы:

– в первой построение отраженного радиолокационного (РЛ) сигнала проводится с помощью программно-аппаратных комплексов полунатурного моделирования [1, 2], в которых ФЦО представляется в виде математической модели, а задержка, амплитудная и частотная модуляции составляющих РЛ-сигнала, отраженного от элементов ФЦО, реализуется цифровыми модулями обработки;

– во второй группе все стадии имитации отраженного РЛ-сигнала проводятся путем математического моделирования на ЭВМ [3–7].

В части теории рассеивания электромагнитного поля данные методики предполагают использование законов физической оптики (ФО) при локации в дальней зоне [2, 4] и смешанных подходов с применением ФО и физической теории дифракции (ФТД) для построения обобщенной модели отраженного РЛ сигнала в ближней и дальней зонах локации [1, 3, 5].

Большая часть современных методик построения высокодетализированных математических моделей ФЦО основана на использовании фацетной (полигональной) аппроксимации поверхности объектов ФЦО [1–3, 5], например, методом триангуляции поверхности, реализуемой в одном из существующих программных комплексов 3D графики. Для возможности использования данных математических моделей ФЦО в стендах полунатурного моделирования, т. е. в режиме реального времени, в ряде работ [1, 2, 5] предлагается применять менее ресурсоемкие многоточечные модели объектов ФЦО, формируемые путем дальнейшей аппроксимации полигональных моделей, в результате чего объекты радиолокационной сцены представляются в виде набора «блестящих точек». Также зачастую для уменьшения вычислительных затрат предполагается, что значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) элементов однородной подстилающей поверхности имеют некоторое статистическое распределение, а в виде полигональной модели рассматриваются только лишь те объекты ФЦО, подробный анализ рассеянного электромагнитного поля которых считается важным.

Среди иных способов формирования моделей ФЦО можно выделить метод, основанный на использовании цифровых карт местности (ЦКМ) [4], суть которого заключается в том, что каждая точка ЦКМ заменяется на гауссову поверхность с вершиной в этой точке.

Описанная в настоящей работе модель подстилающей поверхности является фацетной и основана на графической 3D модели. Отраженный РЛ-сигнал предлагается формировать, исходя из теории физической оптики, что ограничивает применимость разработанной модели ФЦО только дальней зоной локации.

Особенность предлагаемой же модели заключается в возможности реализации движения объектов ФЦО, гибкости системы подключения большого числа элементов ФЦО, возможности получения информации о визируемом участке ФЦО с разной детализацией путем изменения разрешения виртуальной камеры. Последнее свойство позволяет варьировать число отражающих элементов визируемого участка ФЦО без изменения самой структуры (полигональной сетки) объектов подстилающей поверхности.

Характеристики математической модели ФЦО. Разработанная модель в разрезе теории математического моделирования является структурной и геометрической [8].

Модель несет в себе следующую информацию о каждом составляющем сцену ФЦО объекте, аппроксимированном сеткой плоских трех- или четырехузловых граничных элементов (сегментов):

– координаты центра объекта в глобальной (стартовой) декартовой системе координат (СК) $XYZ — O(O_x, O_y, O_z)$ (рис. 1);

– координаты каждой его вершины в локальной (связанной) декартовой СК $X^{**}Y^{**}Z^{**}$, связанной с его центром — $A_i(x_i^{**}, y_i^{**}, z_i^{**})$ (см. рис. 1);

– координаты каждой его вершины в локальной (сопровождающей) декартовой СК $X^*Y^*Z^*$, связанной с его центром — $A_i(x_i^*, y_i^*, z_i^*)$ (см. рис. 1), которые с глобальной СК имеют следующую взаимосвязь:

$$x_i = x_i^* + O_x;$$

$$y_i = y_i^* + O_y;$$

$$z_i = z_i^* + O_z,$$

где (x_i, y_i, z_i) — координаты вершины A_i в глобальной СК, а $i \in [0; N-1]$ (N — число вершин модели объекта);

– список граничных элементов (сегментов) E_j модели объекта с образующими их узлами A_i , $j \in [0; M-1]$ (M — число граничных элементов модели объекта);

– нормали к поверхности каждого сегмента модели объекта (что задает его ориентацию в пространстве) — $\vec{n}_j = (n_{j,x}, n_{j,y}, n_{j,z})$ (см. рис. 1);

– материалы (металл, дерево, пластик и др.) сегментов модели объекта;

– закон движения объекта (рис. 2):

$$\vec{V}_O(t) = \begin{pmatrix} \frac{dO_x(t)}{dt} \\ \frac{dO_y(t)}{dt} \\ \frac{dO_z(t)}{dt} \end{pmatrix}.$$

Тогда, с учетом изменения ориентации объекта через углы поворота связанной СК — $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$, получаем координаты вершины A_i в сопровождающей СК [9]:

$$\begin{pmatrix} x_i^*(t) \\ y_i^*(t) \\ z_i^*(t) \end{pmatrix} = M_{Z^*}(t) \cdot M_{X^*}(t) \cdot M_{Y^*}(t) \begin{pmatrix} x_i^{**} \\ y_i^{**} \\ z_i^{**} \end{pmatrix},$$

где $M_{Z^*}(t)$, $M_{X^*}(t)$, $M_{Y^*}(t)$ — матрицы поворота вокруг осей Z^* , X^* и Y^* соответственно:

$$M_{Z^*}(t) = \begin{pmatrix} \cos \alpha(t) & -\sin \alpha(t) & 0 \\ \sin \alpha(t) & \cos \alpha(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$M_{X^*}(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta(t) & -\sin \beta(t) \\ 0 & \sin \beta(t) & \cos \beta(t) \end{pmatrix};$$

$$M_{Y^*}(t) = \begin{pmatrix} \cos \gamma(t) & 0 & \sin \gamma(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma(t) & 0 & \cos \gamma(t) \end{pmatrix}.$$

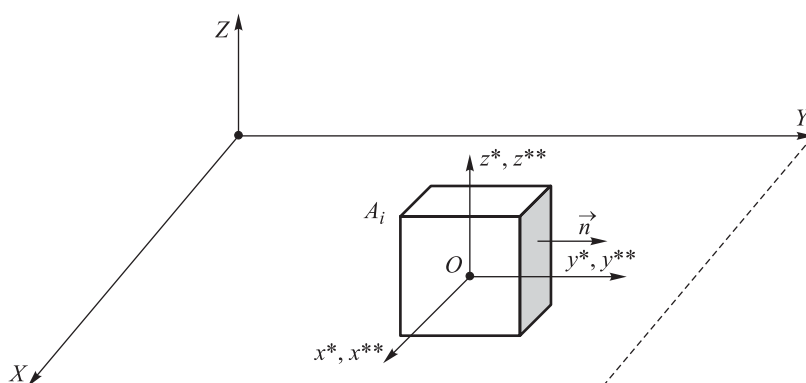


Рис. 1. Система координат математической модели ФЦО

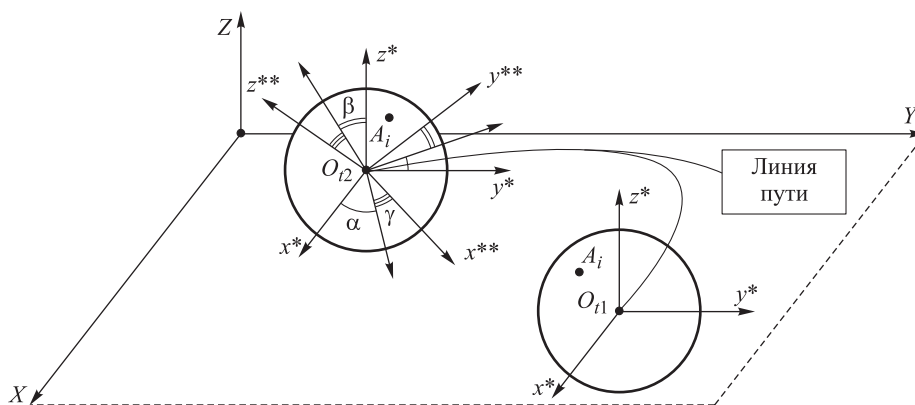


Рис. 2. Движение объекта ФЦО

Для моделирования работы РСА в реальных условиях, т. е. с моделью ФЦО реального участка земной поверхности, стартовая СК привязывается к некоторой точке в географической СК (широта и долгота начальной точки стартовой СК).

Входные данные модели. В начале моделирования математическая модель ФЦО принимает следующие входные данные для каждого объекта:

- начальные координаты центра объекта в стартовой СК — $O(O_x, O_y, O_z)$;

– начальные значения углов ориентации объекта (углов поворота связанной СК) α , β , γ .

На каждом такте моделирования виртуальной камере передаются следующие данные о РСА (рис. 3):

- положение виртуальной камеры в стартовой СК — $K(K_x, K_y, K_z)$;
- углы $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$, определяющие ориентацию виртуальной камеры (продольной оси) в трехмерном пространстве (начальная ориентация камеры по оси Y стартовой СК);
- углы α_K и β_K раскрытия виртуальной камеры, определяющие область визирования РСА;
- разрешение виртуальной камеры (число линий визирования) N_width_K, N_height_K .

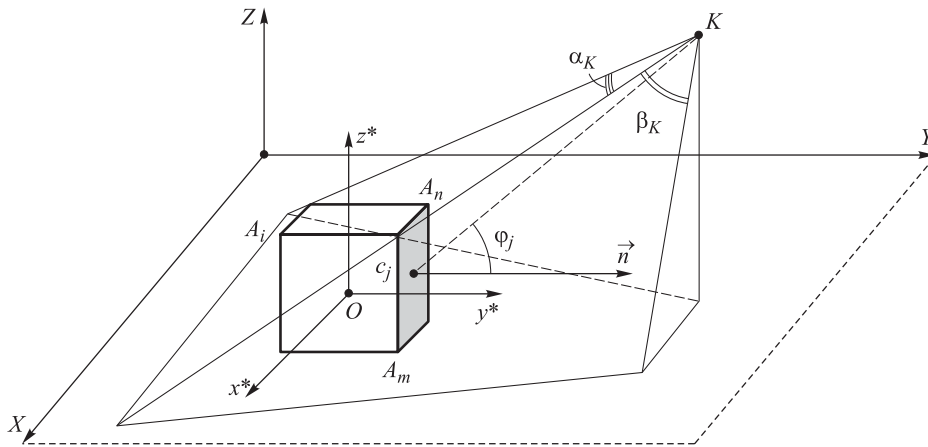


Рис. 3. Визирование РСА сцены ФЦО

Выходные данные модели. На каждом такте моделирования математическая модель ФЦО выдает следующие выходные данные для сцены, попадающей в область визирования РСА (в растров виртуальной камеры):

- координаты точек пересечения линий визирования $\Lambda(\alpha_l, \beta_k)$ с сегментами поверхности объектов, визируемых РСА, в стартовой СК — $C_j(C_{j,x}, C_{j,y}, C_{j,z})$;
- углы ориентации линий визирования

$$\alpha_l = l \frac{\alpha_K}{N_width_K - 1} \text{ и } \beta_k = k \frac{\beta_K}{N_height_K - 1},$$

$$l \in [0; N_width_K - 1], k \in [0; N_height_K - 1];$$

сегмент E_j считается визируемым РСА (видимым обозревателем в растворе виртуальной камеры), если угол между линией визирования сегмента и нормалью \vec{n}_j , определяющей ориентацию данного сегмента в пространстве, лежит в пределах $[0^\circ; 90^\circ]$;

– расстояния R_j между точкой положения РСА (виртуальной камеры) и центрами сегментов объекта, получаемые из формулы

$$R_j = \sqrt{(C_{j,x} - K_x)^2 + (C_{j,y} - K_y)^2 + (C_{j,z} - K_z)^2};$$

– углы φ_j между линиями визирования образующих объект сегментов и их нормальными \vec{n}_j , определяющие ориентацию сегментов объекта в пространстве, вычисляются как

$$\varphi_j = \arccos \left(\frac{\vec{n}_j \cdot \overrightarrow{C_j K}}{C_j K \cdot \vec{n}_j} \right) = \arccos \left(\frac{n_{j,x} (C_j K)_x + n_{j,y} (C_j K)_y + n_{j,z} (C_j K)_z}{R_j} \right),$$

где вектор $\overrightarrow{C_j K}$ имеет координаты $(K_x - C_{j,x}; K_y - C_{j,y}; K_z - C_{j,z})$;

- материалы (металл, дерево, пластмасса и др.) сегментов визируемых РСА;
- площадь текущего элемента разрешения S_j .

Формирование сигнала, отраженного от визируемого участка ФЦО.

Предположим, что визирование участков ФЦО будет проводиться на значительных по сравнению с размерами сегментов поверхности объектов ФЦО расстояниях, что переотражение волн отсутствует и что длина волны сигнала РСА значительно меньше размеров сегментов. Итак, аппроксимация рассматриваемых процессов не выходит за рамки теории физической оптики и выполняются условия дальней зоны локации для каждого из сегментов, образующих объекты ФЦО [5]:

$$L_j \leq \frac{\sqrt{R_j \lambda}}{2},$$

где L_j — характерный размер j -го сегмента и R_j — расстояние до него, λ — длина волны излучения РСА, а фронт падающей волны можно считать плоским [3].

Тогда значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) отдельного сегмента можно рассчитывать по следующей формуле [9]:

$$\sigma_j(\varphi_j) = \frac{4\pi s^2}{\lambda^2} \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \cos^2 \varphi_j, \quad (1)$$

где $s = ab$, $x = \frac{2\pi a \sin \varphi_j}{\lambda}$, a и b — длины смежных сторон сегмента.

Сигнал, излучаемый РСА, является импульсным и в аналитической форме имеет вид

$$F(t) = P_0 e^{i(\omega_0 t + \vartheta(t) + \phi_0)},$$

где P_0 — излучаемая мощность; ω_0 — несущая частота; $\vartheta(t)$ — закон фазовой модуляции; ϕ_0 — начальная фаза; $t \in [t_0; t_0 + t_l]$, t_0 — время начала излучения, t_l — длительность сигнала.

При условии линейности всего тракта распространения радиосигнала и тракта его обработки справедлив постулат, что электромагнитное поле, рассеиваемое объектом ФЦО, будет являться суперпозицией электромагнитных полей, отраженных от сегментов его поверхности. Применяя упрощенную теорию распространения электромагнитных волн в пространстве и формулу (1), получаем отраженный от некоторого объекта математической модели ФЦО сигнал на входе приемника РСА:

$$F_{\text{вх}}(t) = \sum_{j=0}^{M-1} F_{\text{вх}}(t)_j;$$

$$F_{\text{вх}}(t)_j = \begin{cases} P(\sigma_j, R_j) e^{i((\omega_0 + \omega_{\text{д}, j})(t_0 + t - (t_1 + \Delta t_j)) + \vartheta(t_0 + t - (t_1 + \Delta t_j)) + \phi_0)} & \text{при } t \in C; \\ 0 & \text{при } t \notin C; \end{cases}$$

$$P(\sigma_j, R_j) = \frac{\sigma_j \Pi(R_j)}{4\pi R_j^2} s_A = \frac{\sigma_j P_0 \lambda^2 G_u G_A}{(4\pi)^3 R_j^4},$$

где M — число граничных элементов модели объекта; $P(\sigma_j, R_j)$ — мощность, отраженная от j -го сегмента объекта на входе приемника; σ_j, R_j — ЭПР и расстояние

до центра этого сегмента; $s_A = \frac{\lambda^2 G_A}{4\pi}$ — эффективная площадь приемной антенны;

G_A — коэффициент усиления приемной антенны; $\Pi(R_j) = \frac{P_0 G_u}{4\pi R_j^2}$ — плотность потока мощности электромагнитного излучения РСА, облучающего цель; P_0 — мощность излучаемого сигнала; G_u — коэффициент усиления передающей антенны; $\omega_{\text{д}, j}$ — частота Доплера, рассчитанная в направлении сегмента S_j ;

$\Delta t_j = t_0 + 2 \frac{R_j}{c} - t_1$ — задержка сигнала от сегмента S_j , рассчитанная от начала строба приемника t_1 ; c — скорость света; $t \in [t_1; t_1 + T]$; T — длина строба приемника; множество $C = [t_1 + \Delta t_j; t_1 + \Delta t_j + t_l]$.

Тестирование программной реализации математической модели ФЦО. Описанная модель ФЦО была реализована на базе программного комплекса 3D визуализации, основанного на библиотеках OpenGL.

В качестве ФЦО использовали модель сферы радиусом 10 м с числом сегментов поверхности, равным 2048 элементам. Модель сферы была разработана в пакете Autodesk 3ds Max 2015. Все остальное пространство представляло собой бесконечно удаленные точки.

Тестирование проводилось путем расчета параметров каждого пикселя виртуальной камеры на одном такте. Параметры положения камеры в сопровождающей СК были следующие:

– камера смотрит по оси X^* на плоскость Y^*Z^* (на центр сферы), ось камеры совпадает с осью X^* (координаты в сопровождающей СК (500; 0; 0));

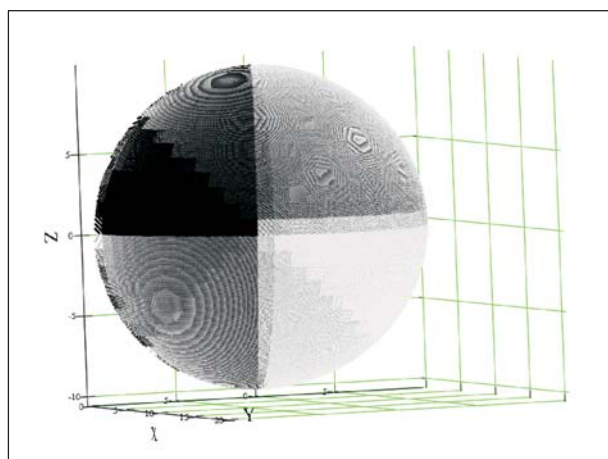
– дальность камеры от центра вращения (геометрического центра объекта) — 500 м;

– угол поворота камеры в вертикальной плоскости и вращения вокруг продольной оси нуль градусов;

– угол поворота камеры в горизонтальной плоскости 90° .

Раскрытие по углу камеры было рассчитано для случая, когда проекция сферы на плоскость Y^*Z^* (круг) вписывается в квадратный растровый кадр камеры — $2,292^\circ \times 2,292^\circ$. Данное раскрытие камеры рассчитывалось в целях качественной оценки верности отображения визуальной информации и данных расчета параметров каждого пикселя виртуальной камеры. Разрешение при моделировании составляло 1024×1024 .

На рис. 4, 5 приведены качественные результаты тестирования разработанного программного комплекса.



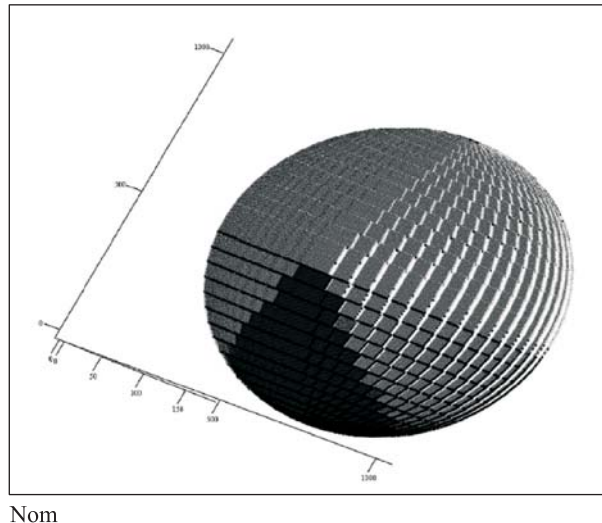
$(XYZ^{(0)}, XYZ^{(1)}, XYZ^{(2)})$

Рис. 4. Координаты точек пересечения лучей визирования пикселей камеры с поверхностью сферы

На данном примере был выполнен количественный анализ точности математической модели путем сравнения рассчитанного радиуса сферы для каждой точки пересечения линиями визирования пикселей поверхности объекта (сферы) с аналитическим значением радиуса $R = 10$ м. Результаты анализа показали, что ошибка вычисления радиуса сферы не превышает 3 см (0,3 %). Такой результат, с учетом размера объекта и детализации ее поверхности, говорит о достаточно высоком уровне точности модели ФЦО.

На рис. 6 приведено изображение, иллюстрирующее возможности ПО в составлении сцен ФЦО.

Применение разработанной модели ФЦО в стенде математического моделирования РСА. Общая структура стенда математического моделирования РСА приведена на рис. 7.



Nom

Рис. 5. Матрица углов между линиями визирования и нормальными к поверхности шара в соответствующих точках пересечения его поверхности этими линиями на равномерной сетке 1024×1024



Рис. 6. Одиночный корабль в море

В качестве метода когерентной обработки был выбран метод прямого вычисления корреляционного интеграла [6], так как он является инвариантным к виду траектории, параметрам движения носителя РСА и углам обзора. В результате может быть применен для формирования РЛ-изображений при малых азимутальных углах обзора и интенсивном маневрировании носителя РСА, когда другие методы не позволяют сформировать РЛ-изображение с высоким разрешением.



Рис. 7. Стенд математического моделирования РСА

Особенность данного метода заключается в том, что опорная функция формируется для каждого отсчета РЛ-изображения в отдельности, а не является единой для всех отсчетов в пределах одной полосы дальности.

Таким образом, синтезирование выполняется следующим образом:

$$I(x_0, y_{0,m}) = \int_0^{L_T} \dot{S}(t_{m,n}(X, y_{0,m})) h(X, Y, Z, x_0, y_{0,m}, z_0) dX,$$

где I — функция РЛ-изображения; S — сигнал на выходе приемника РЛС, полученный на траектории движения ФЦА; $t_{m,n}(X, y_{0,m})$ — число, соответствующее времени положения волнового фронта в пространстве с координатой $y_{0,m}$; $x_0, y_{0,m}, z_0$ — координаты произвольной точки отражающей поверхности; x_0, z_0 — непрерывные переменные; $y_{0,m}$ — дискретная переменная, соответствующая m -й полосе дальности; X, Y, Z — координаты фазового центра антенны в наземной системе координат; h — опорная функция, зависящая от пространственных координат.

При использовании метода прямого решения корреляционного интеграла опорная функция в интеграле (2) рассчитывается для каждого отсчета формируемого РЛ-изображения и определяется расстоянием между фазовым центром антенны и произвольной отражающей точкой $|\vec{r}_0 - \vec{R}_0|$. Функция f_R , определя-

ющая это расстояние, не раскладывается в ряд, а ее значения можно найти из следующего выражения:

$$f_R(X, Y, Z, x_0, y_0, z_0) = |\vec{r}_0 - \vec{R}_0| = \sqrt{(x_0 - X)^2 + (y_0 - Y)^2 + (z_0 - Z)^2}. \quad (2)$$

Результаты эксперимента. Условия математического моделирования следующие.

В качестве ФЦО использовался участок пространства радиусом 2000 м (в плоскости XU стартовой СК), в центре которого расположена модель корабля, разработанная в пакете Autodesk 3ds Max 2015 по геометрическим размерам крейсера УРО Тикондерога (рис. 8). Все остальное пространство представляло собой бесконечно удаленные точки. Модель корабля повернута вокруг оси Z^{**} связанной СК на угол α и для наглядности результатов пропорционально увеличена в 30 раз.

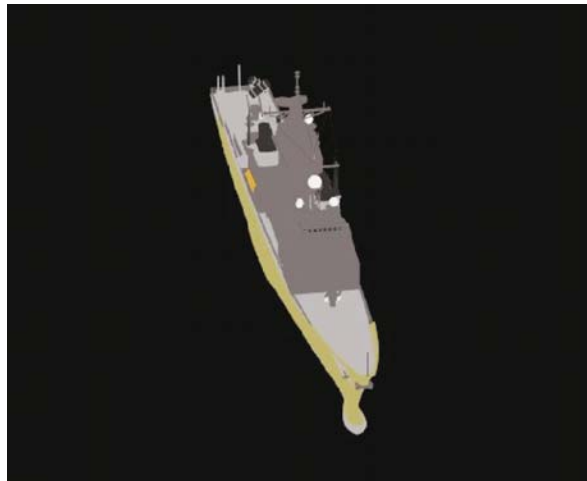


Рис. 8. Сцена ФЦО 512×512 $\alpha = -60^\circ$

Дальность от РСА до центра визируемого участка $\sim 70\,000$ м.

Движение РСА на участке синтезирования — прямолинейное, равномерное ($\overline{V_{\text{РСА}}(t)} \approx \text{const}$).

Вид обзора — переднебоковой.

Тип сигнала — фазокодманипулированный (ФКМ), манипулированный по фазе кодом Баркера на 13 элементов, длительность элемента последовательности 10^{-7} с.

Длительность зондирующего импульса $\tau_i = 13 \cdot 10^{-7}$ с.

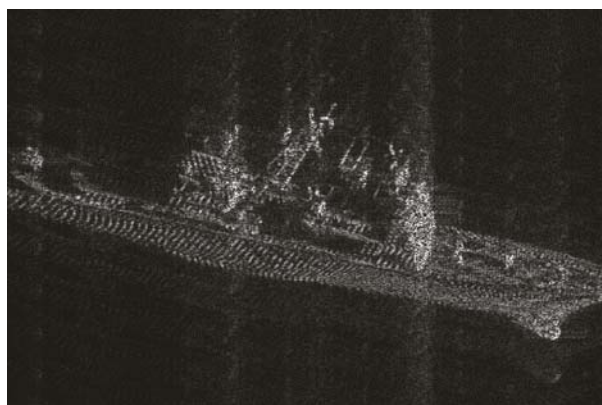
Синтезирование проводилось методом прямого решения корреляционного интеграла [6].

Система координат РЛ-изображения — дальность/доплер.

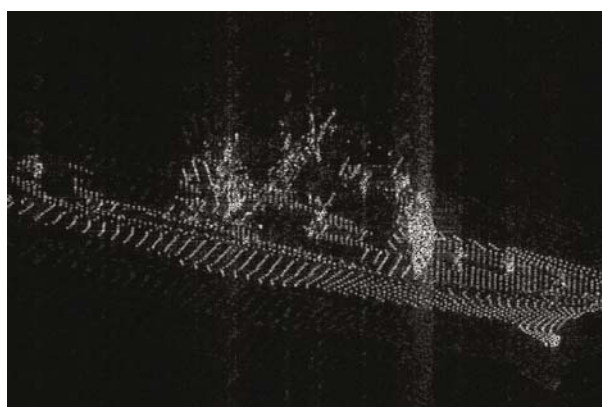
Время синтезирования $T_c = 0,1$ с, что дает разрешение по частоте в спектре доплеровских частот траекторного сигнала $\rho_f \approx 10$ Гц.

Пространственное разрешение $\sim 15 \times 11,3$ м (дальность/азимут).

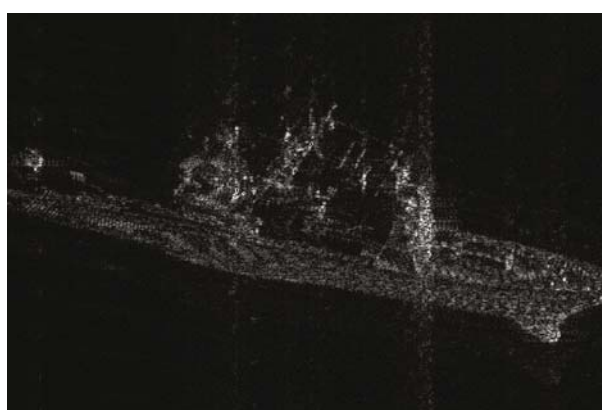
На рис. 8, 9 приведены результаты моделирования при разной детализации сцены ФЦО.



a



б



в

Рис. 9. Синтезированное РЛ-изображение, $\alpha = -60^\circ$:
a — ФЦО 512×512 ; *б* — ФЦО 256×256 ; *в* — ФЦО 1024×1024

Моделирование при разрешении сцены ФЦО 512×512 элементов при раскрытии $3,274^\circ \times 3,274^\circ$ виртуальной камеры дает размер элемента разрешения $49,7 \times 36,7$ м (см. рис. 9, а); моделирование со сценами ФЦО 256×256 и 1024×1024 элементов — $\sim 87,8 \times 65,4$ м и $\sim 29,2 \times 20,7$ м (см. рис. 9, б, в).

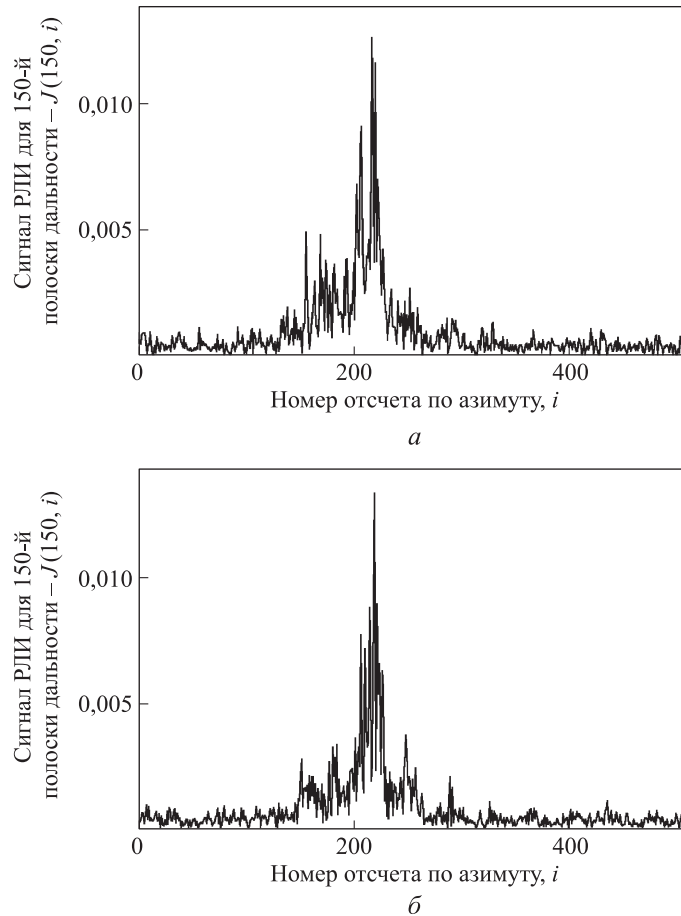


Рис. 10 (начало). Синтезированное РЛ-изображение (РЛИ) для 150-й полосы дальности, $\alpha = -60^\circ$:

a — ФЦО 512×512 ; *б* — ФЦО 256×256

Синтезированное РЛ-изображение 150-й полосы дальности для разных ФЦО и α приведены на рис. 10.

Анализируя результаты моделирований (см. рис. 9, 10), выявили, что при увеличении детализации объектов ФЦО соответствующим образом увеличивается разрешение изображения сцены ФЦО на РЛ-изображении. На рис. 10 видно улучшение азимутального разрешения и отношения сигнал/шум сигнала РЛ-изображения вследствие лучшей фазовой и энергетической свертки траекторного сигнала при увеличении разрешения сцены ФЦО. Из сказанного следует, что разработанная математическая модель подстилающей поверхности

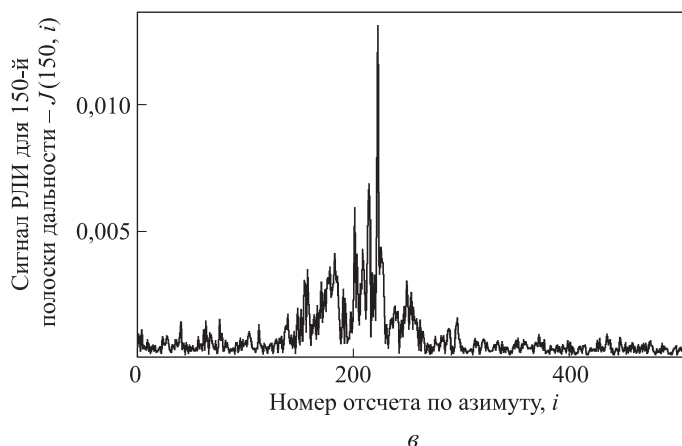


Рис. 10 (окончание). Синтезированное РЛ-изображение для 150-й полосы дальности, $\alpha = -60^\circ$:

σ — ФЦО 1024×1024

может быть применена в стендах математического моделирования РСА как источник исходных данных для формирования траекторного сигнала, поступающего на вход одного из методов когерентной обработки.

Заключение. Изложена методика построения высокодетализированной математической модели фоноцелевой обстановки, использующей фацетную аппроксимацию объектов подстилающей поверхности.

Разработанная модель позволяет гибко менять разрешение визируемого участка ФЦО без изменения характеристик моделей самих объектов ФЦО.

В связи с тем, что отраженный радиолокационный сигнал формируется, исходя из теории физической оптики, данная модель ФЦО может применяться только для дальней зоны локации.

Приведенная математическая модель подстилающей поверхности может быть применена в стендах математического моделирования РСА как источник исходных данных для формирования траекторного сигнала, поступающего на вход одного из методов когерентной обработки.

Разработанная математическая модель ФЦО может быть использована в средствах моделирования РСА без имитации работы в реальном времени, но предоставляет возможность для перевода расчета параметров визируемого участка ФЦО и квадратур отраженного сигнала на графическую вычислительную систему с помощью технологии параллельных вычислений NVIDIA CUDA, что позволит применять предлагаемую модель в условиях реального времени в стендах полунатурного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов К.А., Григорьев В.О., Сучков В.Б., Фабричный М.Г. Вопросы реализации имитатора входных сигналов систем ближней радиолокации для полунатурного моделирования помех от подстилающей поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2006. № 4. С. 45–59.
2. Боков А.С., Важенин В.Г., Дядьков Н.А. Имитация радиосигнала, отраженного от подстилающей поверхности // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». М.: ИРЭ РАН, 2010. С. 79–83.
3. Борзов А.Б., Соколов А.В., Сучков В.Б. Цифровое моделирование входных сигналов систем ближней радиолокации от сложных радиолокационных сцен // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 9–10. С. 38–61.
4. Жиганов С.Н. Построение модели отраженного от подстилающей поверхности сигнала // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 35–38.
5. Сучков В.Б. Метод определения входных сигналов бортовых систем ближней радиолокации от объектов сложной формы на основе использования их полигональных и многоточечных моделей // Спецтехника и связь. 2013. № 3. С. 25–31.
6. Антипов В.Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
7. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Дрофа, 2006. 719 с.
8. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 495 с.
9. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. М.: Академия, 2008. 592 с.

Сюзев Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Компьютерные системы и сети» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Доденко Илья Александрович — аспирант кафедры «Компьютерные системы и сети» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сюзев В.В., Доденко И.А. Применимость высокодетализированной математической модели фоноцелевой обстановки в стендах моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 76–92. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-76-92

POTENTIAL APPLICATION OF A HIGHLY DETAILED MATHEMATICAL MODEL OF THE TARGET ENVIRONMENT IN TEST BENCHES FOR SIMULATING SYNTHETIC-APERTURE RADARS

V.V. Syuzev
I.A. Dodenko

v.suzev@bmstu.ru
bismahrk1939@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article deals with the issues of mathematical simulation of highly detailed target environment (underlying terrain) based on a 3D graphic model. Developing this model makes it possible to have the ground testing conditions approximate full-scale testing conditions much better. We analyse our model in comparison with other underlying terrain models. We present a technique using the theory of physical optics for computing the radar signal reflected from the sighted underlying terrain zone. We analyse the accuracy of the data output by our model and estimate its application potential in mathematical simulation of synthetic-aperture radar operation, using a mathematical model of said radars implementing a direct correlation integral computation method

Keywords

Mathematical simulation, target environment, physical optics, physical theory of diffraction, synthetic aperture

Received 02.12.2016

© BMSTU, 2017

REFERENCES

- [1] Antonov K.A., Grigor'yev V.O., Suchkov V.B., Fabrichnyy M.G. Problems of implementation of input signal imitator of short-range radar systems for quasi full-scale modeling of underlying surface interference. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2006, no. 4, pp. 45–59 (in Russ.).
- [2] Bokov A.S., Vazhenin V.G., Dyad'kov N.A. [Simulation of the radio signal reflected from an underlying surface]. *IV Vserossiyskaya konferentsiya "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* [IV Russ. Conf. "Radiolocation and radio communication"]. Moscow, IRE RAN Publ., 2010, pp. 79–83 (in Russ.).
- [3] Borzov A.B., Sokolov A.V., Suchkov V.B. Input signal digital simulation of short range radiolocation systems from complex radar-locating scenes. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2004, no. 9–10, pp. 38–61 (in Russ.).
- [4] Zhiganov S.N. Making a model of the signal, reflected from underlying surface. *Radio-tekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio and telecommunication systems], 2011, no. 3, pp. 35–38 (in Russ.).
- [5] Suchkov V.B. Method for input signals determination of short-range radar on-board systems from irregular shape objects using their polygonal and multi-point models. *Spetstekhnika i svyaz'*, 2013, no. 3, pp. 25–31 (in Russ.).
- [6] Antipov V.N. Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury anteny [Radar station with digital synthetic antenna aperture]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988. 304 p.
- [7] Gonorovskiy I.S. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio circuits and signals.]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 719 p.
- [8] Zarubin V.S. Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike [Mathematical simulation in technique]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2003. 495 p.
- [9] Kazarinov Yu.M. Radiotekhnicheskie sistemy [Radio-technical systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 592 p.

Syuzev V.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Computer Systems and Networks, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Dodenco I.A. — post-graduate student, Department of Computer Systems and Networks, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Syuzev V.V., Dodenco I.A. Potential Application of a Highly Detailed Mathematical Model of the Target Environment in Test Benches for Simulating Synthetic-Aperture Radars. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 6, pp. 76–92.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-76-92

	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие под редакцией А.И. Николаева</p> <p>«Радиолокационные системы»</p> <p>Изложены вопросы применения радиолокационных систем (РЛС) различного назначения в реальных условиях их функционирования, учитывающих влияние окружающей среды, подстилающей поверхности, воздействия помех. Рассмотрены задачи, требования и принципы построения РЛС управления воздушным движением, РЛС обнаружения, наведения и целеуказания, а также РЛС ракетно-космической обороны.</p> <p>По вопросам приобретения обращайтесь: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru www.baumanpress.ru</p>
--	---