

## ВЫСОКОДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОВ КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ БОКОВОГО ОБЗОРА

И. А. Доденко, Д. А. Ясенцев

*Приводятся результаты апробирования разработанной высокодетализированной математической модели фоноцелевой обстановки и модуля расчета отраженного сигнала в стенде математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны. Дается сравнительный анализ результатов моделирования для каждого из реализованных методов когерентной обработки. Представлено описание математического аппарата разработанной модели фоноцелевой обстановки и методики расчета отраженного радиолокационного сигнала от визируемого участка фоноцелевой обстановки, основанной на теории физической оптики. Показана проблематика и основные подходы к разработке адекватной реальным физическим процессам математической модели фоноцелевой обстановки и методики расчета отраженного радиолокационного сигнала, которые могут быть использованы в стендах математического и полунатурного моделирования функционирования активных радиотехнических средств.*

**Ключевые слова:** метод прямой свертки, метод быстрой свертки, метод гармонического анализа, математическое моделирование, фоноцелевая обстановка, физическая оптика, синтезирование искусственной апертуры антенны.

### Введение

Полнота отработки и оптимизация методов когерентной обработки отраженных сигналов для конкретного вида радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) в процессе наземной экспериментальной отработки являются важнейшими факторами при создании нового типа РСА. Данные меры позволяют существенно уменьшить число натурных испытаний, что, например, особенно важно в случае разработки РСА космического базирования.

Определяющим условием обеспечения полноты наземной отработки РСА является адекватность стендового имитационного оборудования реальным физическим процессам натурального испытания. В случае же отработки функционирования активных радиотехнических средств, таких как РСА, ключевым, и одним из наиболее сложных в реализации, является соответствие сигнала формируемого имитатором отраженного сигнала от моделируемой сцены фоноцелевой обстановки (ФЦО), сигналу рассеянному от реальной подстилающей поверхности и поступающему на вход РСА в процессе натурального эксперимента. Задачу построения такого имитатора невозможно решить без создания высокодетализированной математической модели ФЦО, по данным от которой будет проводиться расчет и формирование отраженного радиолокационного (РЛ) сигнала.

В основном математическое моделирование ФЦО реализуется путем использования факетных (полигональных) аппроксимаций поверхностей объектов ФЦО [1 – 7]. В ряде работ [2 – 3, 4, 6] предлагается применение менее ресурсоемких

многоточечных моделей объектов ФЦО, формируемых 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 математического моделирования ФЦО можно привести метод, основанный на использовании цифровых карт местности (ЦКМ) [8].

Что касается методов построения имитаторов отраженного РЛ сигнала для стендов полунатурного моделирования, в которых приемо-передающий тракт РСА представлен физической реализацией в виде радиотехнических приборов, то они подразделяются на две основные группы:

- построение отраженного РЛ сигнала в цифровом виде проводится с помощью программно-аппаратных комплексов полунатурного моделирования [2 – 3], 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;

- все стадии формирования отраженного РЛ сигнала в цифровом виде проводятся путем математического моделирования на электронно-вычислительной машине [1, 4, 6 – 8].

Для обеих групп, после формирования отсчетов суммарного отраженного сигнала от визируемого участка ФЦО, проводится перенос отсчетов цифрового сигнала на несущую частоту сигнала РСА. То есть проводится физическое формирование отраженного электромагнитного поля (РЛ сигнала).

В случае же только математического моделирования функционирования РСА формирование отраженного сигнала в цифровом виде проводится по тем же вышеуказанным методикам, но без физической имитации отраженного РЛ сигнала. Сформированные отсчеты суммарного отраженного сигнала непосредственно поступают на обработку в математическую модель приемника РСА.

При описании теории рассеивания электромагнитного поля используются законы физической оптики (ФО) в случае локации в дальней зоне [3, 8] и смешанные подходы, с применением ФО и физической теории дифракции (ФТД), для построения обобщенной модели отраженного РЛ сигнала в ближней и дальней зоне локации [1, 2, 4].

Применяемая в данной работе модель подстилающей поверхности является фацетной. Отраженный радиолокационный сигнал формируется исходя из теории физической оптики. Модель позволяет реализовывать движение объектов ФЦО, обладает гибкой системой подключения большого количества элементов ФЦО, имеет возможность получения информации о визируемом участке ФЦО с разной детализацией путем изменения разрешения виртуальной камеры (в рамках графической модели ФЦО виртуальная камера является аналогом РСА), иными словами, варьировать количество отражающих элементов визируемого участка ФЦО без изменения самой структуры (полигональной сетки) объектов подстилающей поверхности.

В большинстве работ апробирование разработанной модели ФЦО и методики расчета отраженного РЛ сигнала проводится путем определения основных радиолокационных характеристик (диаграмма обратного рассеивания, импульсная характеристика объекта, спектральный анализ смоделированного отраженного сигнала в спектре доплеровских частот) определенного объекта ФЦО [1, 4] или же подстилающей поверхности [2]. В некоторых работах [3] апробирование проводится путем сравнения в спектральной и временной области смоделированного отраженного сигнала с теоретически ожидаемым.

Целью и особенностью данной работы является апробирование и анализ результатов моделирования разработанной математической модели ФЦО с модулем расчета отраженного РЛ сигнала в стен-

де математического моделирования РСА (СММ РСА) с реализацией следующих методов синтеза для бокового обзора: метод прямой свертки, метод быстрой свертки и метод гармонического анализа.

#### Математическая модель фоноцелевой обстановки

В разработанной математической модели каждый объект ФЦО привязан к модели эллипсоида Земли WGS-1984 (World Geodesic System – Всемирная геодезическая система) через свои геодезические координаты. Но выдача данных о визируемых объектах в модуль расчета отраженного сигнала проводится в имеющей привязку к геоиду декартовой трехмерной системе координат (СК) XYZ (стартовой СК). Поэтому в рамках статьи математическое описание разработанной графической 3D-модели ФЦО основывается на вышеуказанной стартовой СК XYZ.

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 СК XYZ –  $O(O_x, O_y, O_z)$ . Под центром объекта в общем случае имеется ввиду точка привязки к стартовой СК любого моделируемого объекта ФЦО, которая для симметричных объектов совпадает с их геометрическим центром;

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

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

$$\begin{aligned}x_i &= x_i^* + O_x; \\y_i &= y_i^* + O_y; \\z_i &= z_i^* + O_z,\end{aligned}\tag{1}$$

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 из сегментов модели объекта (что задает ориентацию данного сегмента в пространстве) –  $\vec{n}_j = (n_{j,x}, n_{j,y}, n_{j,z})$ ;

- материалы (металл, дерево, пластик и т. д.) сегментов модели объекта;

– закон движения объекта:

$$\begin{aligned} O_x(t) &= O_{0,x} + Vo_{0,x}t + \frac{ao_{0,x}t^2}{2}; \\ O_y(t) &= O_{0,y} + Vo_{0,y}t + \frac{ao_{0,y}t^2}{2}; \\ O_z(t) &= O_{0,z} + Vo_{0,z}t + \frac{ao_{0,z}t^2}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значения параметров движения  $O_{0,x}$ ,  $O_{0,y}$ ,  $O_{0,z}$ ,  $Vo_{0,x}$ ,  $Vo_{0,y}$ ,  $Vo_{0,z}$ ,  $ao_{0,x}$ ,  $ao_{0,y}$ ,  $ao_{0,z}$  определяются исходными данными моделирования.

Тогда с учетом изменения ориентации объекта через углы поворота связанной СК  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\gamma(t)$  можно получить координаты вершины  $A_i$  в сопровождающей СК:

$$\begin{pmatrix} x_i^*(t) \\ y_i^*(t) \\ z_i^*(t) \end{pmatrix} = M_{Z^*}(t) \cdot M_{X^*}(t) \cdot M_{Y^*}(t) \cdot \begin{pmatrix} x_i^{**} \\ y_i^{**} \\ z_i^{**} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} M_{Z^*}(t) &= \begin{pmatrix} \cos \alpha(t) & -\sin \alpha(t) & 0 \\ \sin \alpha(t) & \cos \alpha(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ M_{X^*}(t) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta(t) & -\sin \beta(t) \\ 0 & \sin \beta(t) & \cos \beta(t) \end{pmatrix}; \\ M_{Y^*}(t) &= \begin{pmatrix} \cos \gamma(t) & 0 & \sin \gamma(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma(t) & 0 & \cos \gamma(t) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

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

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 скорости центра объекта в стартовой СК –  $Vo(Vo_{0,x}, Vo_{0,y}, Vo_{0,z})$ ;

– начальные ускорения центра объекта в стартовой СК –  $ao(ao_{0,x}, ao_{0,y}, ao_{0,z})$ ;

– начальные значения углов ориентации объекта (углов поворота связанной СК) –  $\alpha, \beta, \gamma$ .

На каждом такте моделирования передаются данные о РСА (виртуальной камере) (рис. 1):

– положение виртуальной камеры в стартовой СК –  $K(K_x, K_y, K_z)$ ;

– углы, определяющие ориентацию виртуальной камеры (продольной оси) в трехмерном пространстве –  $\alpha_o, \beta_o, \gamma_o$  (начальная ориентация камеры по оси  $Y$  стартовой СК);

– углы раскрытия виртуальной камеры, определяющие область визирования РСА –  $\Omega_K, \Psi_K$ ;

– разрешение виртуальной камеры (число линий визирования) –  $N\_width_K, N\_height_K$ .

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

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

$\alpha_l = l \frac{\Omega_K}{N\_width_K - 1}$  и  $\beta_k = k \frac{\Psi_K}{N\_height_K - 1}$  – углы

ориентации линий визирования,  $l \in [0; N\_width_K - 1]$ ,  $k \in [0; N\_height_K - 1]$ . Сегмент  $E_j$  считается визируемым РСА (видимым обозревателем в растворе виртуальной камеры), если угол между линией визирования сегмента и нормалью  $\vec{n}_j$ , определяющей ориентация данного сегмента в пространстве, лежит в пределах  $[0^\circ; 90^\circ]$ .

– расстояния между точкой положения РСА (виртуальной камеры) и точками пересечения линий визирования с сегментами объекта –  $R_j$ , получаемых из формулы:

$$R_j = \sqrt{(C_{j,x} - K_x)^2 + (C_{j,y} - K_y)^2 + (C_{j,z} - K_z)^2}; \quad (5)$$

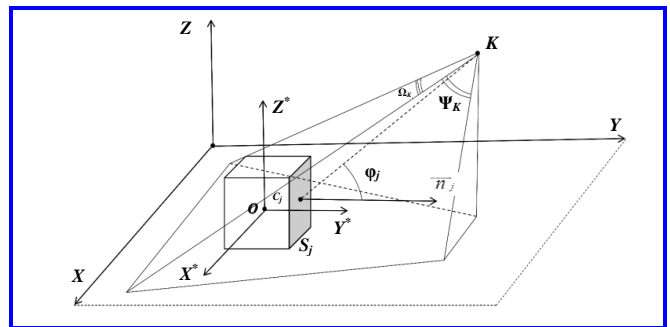


Рис. 1. Схема визирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны сцены фоновцелевой обстановки

– углы между линиями визирования образующих объект сегментов и их нормальными  $\vec{n}_j$ , определяющих ориентации сегментов объекта в пространстве –  $\varphi_j$ , вычисляемые следующим образом:

$$\varphi_j = \arccos \left( \frac{\vec{n}_j \cdot \overline{C_j K}}{\|\vec{n}_j\| \cdot \|\overline{C_j K}\|} \right) = \arccos \left( \frac{n_{j,x} \cdot (C_j K)_x + n_{j,y} \cdot (C_j K)_y + n_{j,z} \cdot (C_j K)_z}{R_j} \right), \quad (6)$$

где вектор  $\overline{C_j K}$  имеет координаты:  $(K_x - C_{jx}; K_y - C_{jy}; K_z - C_{jz})$ ;

– материалы (металл, дерево, пластмасса и т. д.) сегментов визируемых РСА;

– площадь текущего элемента разрешения модели ФЦО –  $S_j$ . Где элементы разрешения  $S_j$  образуются точками пересечения линий визирования с поверхностью сцены ФЦО (сегментами объектов образующих сцену ФЦО). То есть вершинами каждого четырехугольного элемента разрешения являются соответствующие ему точки пересечения четырех линий визирования с поверхностью сцены ФЦО.

### Модуль расчета отраженного радиолокационного сигнала

Предположим, во-первых, что визирование участков ФЦО будет проводиться на значительных по сравнению с размерами элементов разрешения поверхности сцены ФЦО расстояниях, во-вторых, что переотражение волн отсутствует, и в-третьих, что длина волны сигнала РСА значительно меньше размеров элементов разрешения поверхности сцены ФЦО. То есть аппроксимация рассматриваемых процессов не выходит за рамки теории физической оптики и выполняются условия дальней зоны локации для каждого из элементов разрешения поверхности сцены ФЦО [4]:

$$L_j \leq \frac{\sqrt{R_j \lambda}}{2}, \quad (7)$$

где  $L_j$  – характерный размер  $j$ -го элемента;  $R_j$  – рас-

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

$$F_{\text{ВХ}}(t)_j = \begin{cases} P(\sigma_j, R_j) e^{i((\omega_0 + \omega_{\text{д},j})(t_0 + t - (t_1 + \Delta t_j)) + \vartheta(t_0 + t - (t_1 + \Delta t_j)) - \omega_0 \frac{2R_j}{c} + \phi_0)} & \text{при } t \in \hat{T}; \\ 0 & \text{при } t \notin \hat{T}; \end{cases} \quad (10)$$

$$P(\sigma_j, R_j) = \frac{\sigma_j \Pi(R_j)}{4\pi R_j^2} s_\Lambda = \frac{\sigma_j P_0 \lambda^2 G_{\text{И}} G_{\text{А}}}{(4\pi)^3 R_j^4},$$

стояние до него;  $\lambda$  – длина волны излучения РСА, а фронт падающей волны можно считать плоским [1].

Тогда, предполагая, что поверхность сцены ФЦО соответствует по отражающим свойствам материалу типа металл, значение ЭПР отдельного элемента разрешения можно рассчитывать по формуле [1, 7]:

$$\sigma_j = 4\pi R_{\text{см}}^2 \frac{|\dot{E}_{pj}^s|^2}{|\dot{E}_j|^2} = \frac{|\dot{T}_j^s \sum_{i=1}^3 \dot{D}_i|^2}{4\pi |\vec{q}_\perp|^4}, \quad (8)$$

где  $\dot{E}_j$  – величина напряженности поля, падающего в направлении элемента разрешения;  $\dot{E}_{pj}^s$  – величина напряженности поля рассеяния от элемента разрешения в направлении на РСА;  $R_{\text{см}}$  – расстояние от элемента разрешения до РСА;  $\dot{T}_j^s$  и  $\dot{D}_i$  – параметры, определяемые в работах [1, 7];  $\vec{q}_\perp = \{q_x, q_z\}$  – проекция вектора  $\vec{q} = \vec{r}_s - \vec{r}_i$  на плоскость элемента разрешения;  $\vec{r}_i$  – направляющий вектор падающей волны;  $\vec{r}_s = -\vec{r}_i$  – направляющий вектор отраженной волны.

Сигнал, излученный РСА, является импульсным и в аналитической форме имеет вид:

$$F(t) = P_0 e^{i(\omega_0 t + \vartheta(t) + \phi_0)}, \quad (9)$$

где  $P_0$  – излучаемая мощность;  $\omega_0$  – несущая частота;  $\vartheta(t)$  – закон фазовой модуляции;  $\phi_0$  – начальная фаза;  $t \in [t_0; t_0 + t_i]$ ,  $t_0$  – время начала излучения,  $t_i$  – 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 элементов его поверхности. Предполагая, что вторичные источники электромагнитного поля (переотражения сигнала) отсутствуют и, используя формулу (8), получим математическую формализацию отраженного от объекта модели ФЦО сигнала на входе приемника РСА:



где  $M$  – число элементов разрешения модели объекта;  $P(\sigma_j, R_j)$  – отраженная мощность от  $j$ -го элемента разрешения, аппроксимирующего поверхность объекта, на входе приемника;  $\sigma_j, R_j$  – ЭПР и расстояние до этого элемента соответственно;  $s_A = \frac{\lambda^2 G_A}{4\pi}$  – эффективная площадь приемной антенны;  $G_A$  – коэффициент усиления приемной антенны;  $\Pi(R_j) = \frac{P_0 G_{II}}{4\pi R_j^2}$  – плотность потока мощности электромагнитного излучения РСА облучающей цель;  $P_0$  – мощность излучаемого сигнала;  $G_{II}$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $\omega_{д, j}$  – частота Доплера, рассчитанная в направлении элемента разрешения  $S_j$ ;  $\Delta t_j = t_0 + 2 \frac{R_j}{c} - t_1$  – задержка сигнала от элемента разрешения  $S_j$ , рассчитанная от начала строба приемника  $t_1$ ;  $c$  – скорость света;  $t \in [t_1; t_1 + T_{\text{строб}}]$ ;  $T_{\text{строб}}$  – длина строба приемника; множество  $\hat{T} = [t_1 + \Delta t_j; t_1 + \Delta t_j + t_j]$ .

**Стенд математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны с высокодетализированной математической моделью фоноцелевой обстановки**

Общая структура стенда математического моделирования (СММ) РСА представлена на рис. 2.

Для решения текущей задачи в СММ РСА была применена упрощенная модель движения с равноускоренным законом движения РСА как материальной точки в стартовой СК:

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0 + V_{0,x}t + \frac{a_x t^2}{2}; \\ Y(t) &= Y_0 + V_{0,y}t + \frac{a_y t^2}{2}; \\ Z(t) &= Z_0 + V_{0,z}t + \frac{a_z t^2}{2}. \end{aligned} \tag{11}$$

В модуле когерентной обработки отраженных сигналов были реализованы три метода синтеза для бокового обзора [9]: метод прямой свертки, метод быстрой свертки и метод гармонического анализа.

**Тестирование стенда математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны**

Тестирование разработанного СММ РСА с реализацией таких методов синтеза, как метод прямой свертки, метод быстрой свертки и метод гармонического анализа, проводилось с помощью

построения радиолокационных изображений (РЛИ) сцены ФЦО, состоящей из 5 точечных целей (таблица и рис. 3).

Движение объектов ФЦО отсутствует.

Движение РСА на интервале синтеза – равномерное прямолинейное:

$$\begin{aligned} a_x &= a_y = a_z = 0; \\ V_{0,x} &= 100 \frac{\text{М}}{\text{с}}; V_{0,y} = V_{0,z} = 0; \\ X_0 &= Y_0 = 0; Z_0 = 5000 \text{ м}. \end{aligned} \tag{12}$$

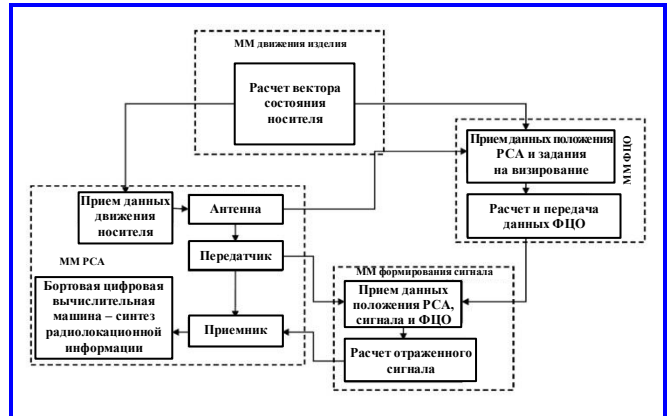


Рис. 2. Структура стенда математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны

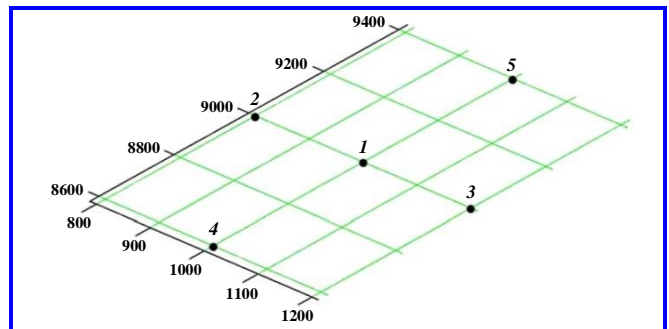


Рис. 3. Тестовая сцена фоноцелевой обстановки

Таблица

**Состав сцены фоноцелевой обстановки (координаты точечных целей в стартовой системе координат)**

№ цели	x, м	y, м	z, м
1	1000	9000	0
2	800	9000	0
3	1200	9000	0
4	1000	8600	0
5	1000	9400	0

Длина волны зондирующего сигнала  $\lambda = 0,0375$  м. Тип сигнала – фазокодоманипулированный (ФКМ), манипулированный по фазе кодом Баркера на 13 элементов, длительность элемента последовательности равна  $10^{-7}$  с. Соответствующее разрешение по дальности  $\rho_r \approx 15$  м. Длительность зондирующего импульса  $\tau_u = 13 \cdot 10^{-7}$  с. Режим обзора – маршрутный режим бокового обзора с углом между вектором полной скорости РСА и осью диаграммы направленности антенны (ДНА)  $\beta_V = 90^\circ$ . Угол раскрытия диаграммы антенны  $\theta_g = 8^\circ$ . Угол ориентации оси ДНА в вертикальной плоскости (угол места)  $\gamma_{\text{ДНА}} = \arccos(Z_0/D_0) \approx 61^\circ$ . Угол ориентации оси ДНА в горизонтальной плоскости (угол азимута)  $\psi_{\text{ДНА}} = 90^\circ$ . Длительность интервала синтезирования  $L \approx 36$  м, соответствующее время синтезирования  $T = L/V_{0,x} \approx 0,36$  с и азимутальное разрешение  $\rho_x \approx 5$  м. Период следования зондирующих импульсов для метода прямой свертки  $T_3 = 1/2fd_{\text{max}} \approx 12,62 \cdot 10^{-4}$  с, где  $fd_{\text{max}}$  – максимальная частота Доплера в траекторном сигнале. Период следования зондирующих импульсов для методов быстрой свертки и гармонического анализа с  $T_3 = 1/4fd_{\text{max}} \approx 6,31 \cdot 10^{-4}$  с. Система координат РЛИ для методов прямой и быстрой свертки – наклонная дальность/смещение РСА вдоль линии пути (ось  $OX$  стартовой СК). Система координат РЛИ для метода гармонического анализа – наклонная дальность/частота Доплера.

На рис. 4 представлена общая схема бокового обзора для всех реализованных методов когерентной обработки сигналов и траектория носителя РСА.

На рис. 5 приведены результаты тестовых моделирований для реализованных методов когерентной обработки отраженного сигнала для бокового обзора,  $j_c = \left[ 2 \frac{D_{9000} - D_{\text{min}}}{\tau_{\text{дискр}} c} \right] = 84$  – номер отсчета

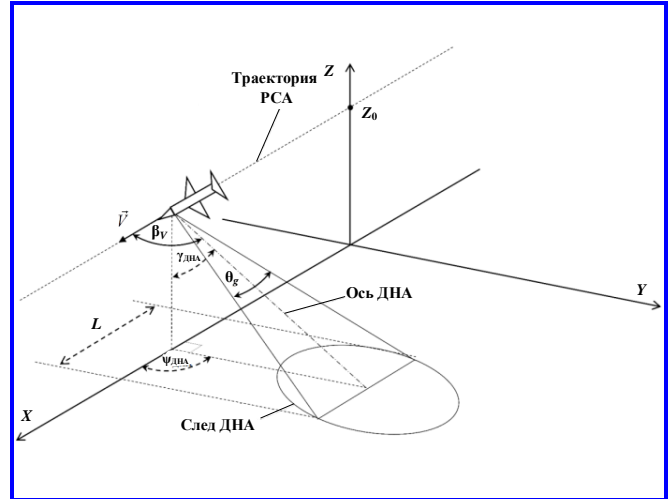


Рис. 4. Схема бокового обзора и траектория радиолокатора с синтезированной апертурой антенны

в строке дальностей, соответствующий полосе дальности, в которой должны находиться цели № 1, 2, 3;  $D_{9000}$  – наклонная дальность до полосы дальностей с целями № 1, 2, 3;  $D_{\text{min}}$  – начало строба дальностей приемника РСА;  $\tau_{\text{дискр}} = \frac{10^{-7}}{2}$  – период дискретизации принятого сигнала;  $c$  – скорость света в вакууме.

Из анализа результатов тестирований видно, что все заданные в условиях эксперимента цели разрешаются по дальности и координате  $X$  РСА в соответствующих, теоретически рассчитанных, полосах дальностей и строках РЛИ. Можно заключить, что СММ РСА с методами прямой свертки (рис. 5, а), быстрой свертки (рис. 5, б) и гармонического анализа (рис. 5, в) реализован корректно и пригоден для проведения апробирования разработанной модели ФЦО и методики расчета отраженного РЛ сигнала.

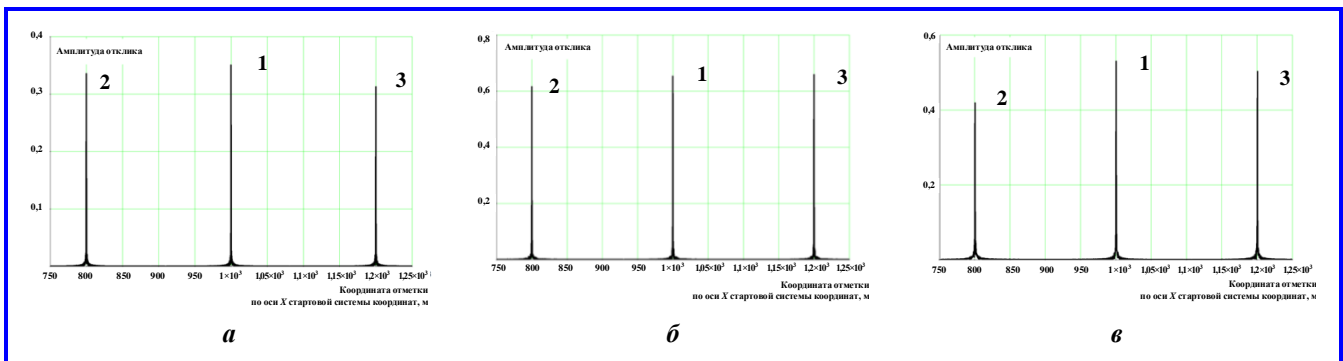


Рис. 5. Результаты тестирования в стенде математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны: а – радиолокационное изображение методом прямой свертки для  $j_c = 84$  полосы дальностей; б – радиолокационное изображение методом быстрой свертки для  $j_c = 84$  полосы дальностей; в – радиолокационное изображение методом гармонического анализа для  $j_c = 84$  полосы дальностей

**Апробирование высокодетализированной модели фоноцелевой обстановки и отраженного радиолокационного сигнала в стенде математического моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны, формирующей радиолокационное изображение методами прямой свертки, быстрой свертки и гармонического анализа**

Математическая модель ФЦО была реализована на базе программного комплекса 3D-визуализации, основанного на библиотеках OpenGL.

В качестве ФЦО использовался участок подстилающей поверхности радиусом 1500 м (в плоскости XY стартовой СК), в центре которого расположена модель электростанции (рис. 6). Координаты точки привязки (центра сцены ФЦО) в стартовой СК: (1000, 9000, 0). Все объекты ФЦО стационарны, вследствие чего алгоритмы селекции движущихся целей (СДЦ) не применяются.

Закон движения РСА, характеристики зондирующего сигнала, тип обзора, характеристики ДНА, интервал синтезирования, время синтезирования и периоды излучения зондирующих импульсов для каждого из методов когерентной обработки, системы координат РЛИ аналогичны приведенным выше для задачи тестирования стенда математического моделирования РСА.

В силу необходимости оценки обнаружения объектов ФЦО на фоне отраженного сигнала от факетной модели подстилающей (фоновой) поверхности, а также того, что в случае наличия сильноотражающего фона влиянием внутренних шумов РСА можно пренебречь [10] в работе моделирование случайных шумов приемника не проводилось.

Результаты моделирования представлены на рис. 7.

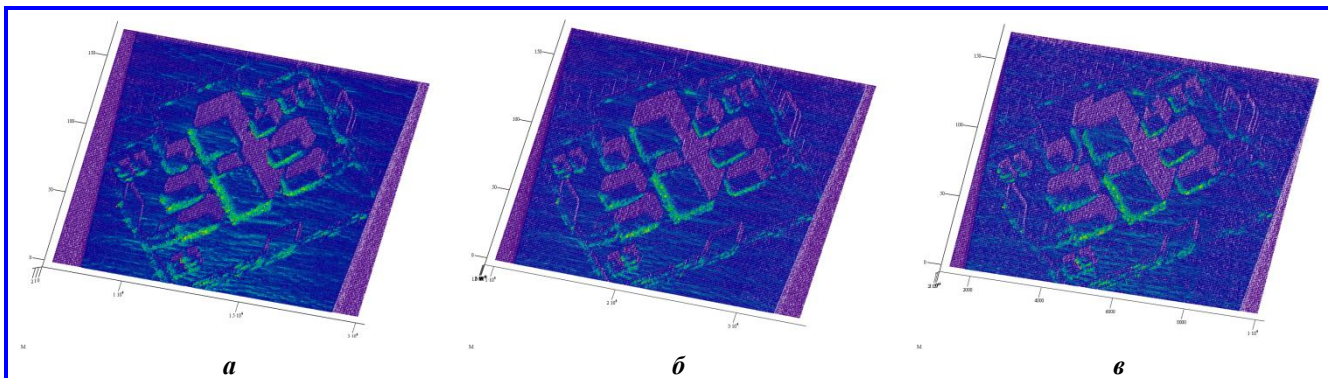
Фиолетовый цвет (см. рис. 7) обозначает минимум отражения (отсутствие сигнала, радиолокационную тень) ( $\approx -50$  дБ); голубой и синий цвета обозначают фоновые отражения ( $\approx -20$  дБ); зеленый, желтый, оранжевый и красный цвета обозначают отражения

от антропогенных объектов сцены ФЦО и максимумы отражения фона (земной поверхности) ( $\approx 0 \div 7$  дБ).

В ходе анализа результатов моделирования на разработанном СММ РСА было выявлено, что лучшие результаты в части отношения сигнал/фон ( $\approx 12$  дБ) и минимума искажений РЛИ показал метод быстрой свертки (БС) (рис. 7, б). Здесь и далее по тексту под фоном понимается отраженный от модели подстилающей (фоновой) поверхности сигнал. Самую высокую скорость обработки сигнала, но и высокий уровень искажений на участках склейки парциальных кадров и фона дал метод гармонического анализа (ГА) (рис. 7, в), а именно, для вышеприведенных условий моделирования, в  $\approx 1,6$  раза быстрее метода БС и в  $\approx 713$  раз быстрее метода прямой свертки (ПС). В свою очередь, метод ПС показал минимальную зависимость от частоты дискретизации траекторного сигнала (частоты следования зондирующих импульсов  $f_3$ ): при  $f_3$  в два раза меньшей, чем у методов БС и ГА, метод ПС показал соотношение сигнал/фон примерно 10 дБ (рис. 7, а), но, ожидаемо, существенно худшие показатели быстродействия.



**Рис. 6. Визуализация 3D-сцены фоноцелевой обстановки с моделью электростанции в центре**



**Рис. 7. Результаты моделирования радиолокационных изображений сцены фоноцелевой обстановки методом: а – прямой свертки; б – быстрой свертки; в – гармонического анализа**



При той же частоте дискретизации траекторного сигнала  $f_3$  синтезирование методом БС порождает существенные ( $\approx 6$  дБ) повторные РЛИ. Исходное отношение сигнал/фон заданной сцены ФЦО имело среднее значение  $\sigma_{\text{п}}/\sigma_{\text{ф}} \approx 14$  дБ, следовательно, в процессе цифровой обработки ухудшение отношения сигнал/фон составило от 2 до 4 дБ. Обнаруженные особенности реализованных методов когерентной обработки сигналов являются для них характерными. Что вместе с качественным анализом полученных РЛИ (см. рис. 7) и графической визуализации 3D-сцены ФЦО (см. рис. 6) говорит об адекватности разработанной математической модели ФЦО и методики расчета отраженного сигнала реальным физическим процессам рассеяния и их применимости в стендах математического моделирования РСА.

### Заключение

В работе дается описание высокодетализированной математической модели фоноцелевой обстановки с методикой построения отраженного радиолокационного сигнала и их апробирование в стенде математического моделирования РСА с реализацией таких методов синтезирования, как метод прямой свертки, метод быстрой свертки и метод гармонического анализа.

Представлен по результатам моделирования сравнительный анализ вышеуказанных методов когерентной обработки РЛ сигналов для бокового обзора.

Показано, что разработанная математическая модель ФЦО и методика расчета, отраженного РЛ сигнала, адекватны реальным физическим процессам рассеяния и могут быть применены в стендах математического моделирования РСА как источник исходных данных для формирования траекторного сигнала, поступающего на вход одного из апробированных в работе методов когерентной обработки.

Разработанный стенд математического моделирования РСА, после соответствующих модификаций под конкретный тип РСА, модуля модели движения носителя и модуля модели приема-передающего тракта, может быть использован при комплексной наземной обработке этого типа РСА, как оптималь-

ное средство предварительной оценки характеристик выбранной концепции построения РСА.

### Литература

1. Борзов, А. Б. Цифровое моделирование входных сигналов систем ближней радиолокации от сложных радиолокационных сцен / А. Б. Борзов, А. В. Соколов, В. Б. Сучков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 9–10. – С. 38–61.
2. Вопросы реализации имитатора входных сигналов систем ближней радиолокации для полунатурного моделирования помех от подстилающей поверхности / К. А. Антонов, В. О. Григорьев, В. Б. Сучков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2006. – № 4. – С. 45–59.
3. Боков, А. С. Имитация радиосигнала, отраженного от подстилающей поверхности / А. С. Боков, В. Г. Вазенин, Н. А. Дядьков // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г. – С. 79–83.
4. Сучков, В. Б. Метод определения входных сигналов бортовых систем ближней радиолокации от объектов сложной формы на основе использования их полигональных и многоточечных моделей / В. Б. Сучков // Спецтехника и связь. – 2013. – № 3. – С. 25–31.
5. Методы синтеза геометрических моделей сложных радиолокационных объектов / А. Б. Борзов, Э. А. Засовин, А. В. Соколов [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2003. – Т. 8. – № 5. – С. 55–63.
6. Борзов, А. А. Многоточечная модель радиолокационной цели в задачах синтеза входных сигналов радиовзрывателей / А. А. Борзов, А. Б. Борзов, В. Б. Сучков // Оборонная техника. – 2007. – № 3–4. – С. 43–55.
7. Борзов, А. Б. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех / А. Б. Борзов, Р. П. Быстров. – Москва : Радиотехника, 2010. – 376 с.
8. Жиганов, С. Н. Построение модели отраженного от подстилающей поверхности сигнала / С. Н. Жиганов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2011. – № 3. – С. 35–38.
9. Антипов, В. Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов. – Москва : Радио и связь, 1988. – 304 с.
10. Кондратенков, Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов. – Москва : Радиотехника, 2005. – 368 с.

Поступила в редакцию 05.11.2024

*Илья Александрович Доденко, соискатель кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: bismahrk1939@gmail.com. (МГТУ им. Н.Э. Баумана).*

*Дмитрий Александрович Ясенцев, доктор технических наук, профессор, т. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru.*

*(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт» (Национальный исследовательский университет)).*



# APPROBATION HIGHLY DETAILED MODEL OF THE UNDERLYING SURFACE BY MATHEMATICAL MODELING OF THE METHODS OF COHERENT PROCESSING OF THE REFLECTED SIGNALS OF THE SIDE VIEW

I. A. Dodenko, D. A. Yasentsev

*The paper presents the results of testing the developed highly detailed mathematical model of the underlying surface and the module for calculating the reflected signal in the stand of mathematical modeling of radar with the synthesized antenna aperture (SMM SAR). A comparative analysis of simulation results for each of the implemented methods of coherent processing is given. A description is given of the mathematical apparatus of the developed model of the underlying surface and the methodology for calculating the reflected radar signal from the underlying surface site to be based on the theory of physical optics. The problems and basic approaches to the development of a mathematical model of the underlying surface adequate to real physical processes and the methodology for calculating the reflected radar signal, which can be used in mathematical and semi-real-time simulations for the functioning of active radio engineering means, are shown.*

**Key words:** direct convolution method, fast convolution method, harmonic analysis method, mathematical modeling, the underlying surface, physical optics, synthesizing artificial antenna aperture.

## References

1. Borzov, A. B. Digital simulation of input signals of systems of a near radar-location from complex radar-tracking scenes / A. B. Borzov, A. V. Sokolov, V. B. Suchkov // The successes of modern electronics. – 2004. – № 9–10. – P. 38–61.
2. Implementation Issues simulator input signals short-range radar systems for seminatural simulation interference from the underlying surface / K. A. Antonov, V. O. Grigoriev, V. B. Suchkov [et al.] // Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N. E. Baumana, Priborostr. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.]. – 2006. – № 4. – P. 45–59.
3. Bokov, A. S. Simulation of a radio signal reflected from an underlying surface / A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, N. A. Dyad'kov // IV All-Russian Conference «Radiolocation and radio communications» – IRE RAS, 29 November – 3 December, 2010. – P. 79–83.
4. Zhiganov, S. N. Building a model of the reflected signal from the underlying surface / S. N. Zhiganov // Radiotechnical and telecommunication systems. – 2011. – № 3. – P. 35–38.
5. Suchkov, V. B. Method for determination of the input signals on-board systems short-range radar from complex shape objects based on use their multi-point and polygonal models / V. B. Suchkov // Special equipment and communication. – 2013. – № 3. – P. 25–31.
6. Methods of synthesis of geometric models of complex radar objects / A. B. Borzov, E. A. Zasovin, A. V. Sokolov [et al.] // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2003. – Vol. 8. – № 5. – P. 55–63.
7. Borzov, A. A. Multipoint model of a radar target in a problems synthesis of input signals of radio fuses / A. A. Borzov, A. B. Borzov, V. B. Suchkov // Defense technology. – 2007. – № 3-4. – P. 43–55.
8. Antipov, V. N. Radar stations with digital synthetic aperture antenna / V. N. Antipov. – Moscow : Radio and Communications, 1988. – 304 p.
9. Borzov, A. B. Millimeter Radar: Detection and Guidance Techniques in Natural and Organized Interference Conditions / A. B. Borzov, R. P. Bistrov. – Moscow : Radio engineering, 2010. – 376 p.
10. Kondratenkov, G. S. Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth / G. S. Kondratenkov, A. Yu. Frolov. – Moscow : Radio engineering, 2005. – 368 p.

*Il'ya Aleksandrovich Dodenko, degree seeker of (sub)department «Autonomous information and control systems»,  
e-mail: bismahrk1939@gmail.com.  
(Bauman Moscow State Technical University).*

*Dmitrij Aleksandrovich Yasentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the department 410,  
t. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru.  
(Moscow Aviation Institute (National Research University)).*