

УДК 621.396.96

КОНСТРУКТОР ОБЪЕКТОВ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

А.С. СОЛОНАР, С.Н. ЯРМОЛИК, А.С. ХРАМЕНКОВ,
А.А. МИХАЛКОВСКИЙ, П.А. ХМАРСКИЙ

*Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 9 апреля 2014

Рассмотрены принципы построения программного комплекса моделирования радиолокационных сигналов, отраженных от объектов различных классов. Имитируемые объекты представляются совокупностью распределенных в пространстве областей локального отражения. Пространственное распределение элементарных отражателей определяется конфигурацией моделируемого объекта. Разработанный программный комплекс учитывает конфигурацию объекта, его ориентацию и особенности пространственного перемещения, наличие на поверхности объекта систем вращающихся отражателей и параметры зондирования. Разработанный программный комплекс может использоваться в интересах решения задач радиолокационного обнаружения, измерения и распознавания объектов.

Ключевые слова: отраженный сигнал, математическая модель цели, «блестящие точки».

Введение

Решение задач радиолокационного наблюдения (обнаружения, измерения, распознавания) предполагает обработку реализаций принятого сигнала [1]. На этапе создания радиолокационного тракта обработки сигналов возникает задача проведения многократных экспериментов, связанных с отладкой алгоритмов проектируемых устройств. Процесс отладки предполагает наличие реализаций случайных сигналов, адекватно характеризующих исследуемые объекты. Такие реализации могут быть получены несколькими способами: путем регистрации записей реальных сигналов наблюдаемых объектов; в результате проведения полунатурных экспериментов; с помощью систем имитационного математического моделирования.

На современном этапе развития вычислительных средств метод математического моделирования приобретает особую актуальность. Являясь экономически наиболее выгодным, он позволяет формировать реализации случайных процессов в соответствии с потребностями решаемых задач: обеспечивает требуемую степень точности описания физических процессов, учитывает характеристики и особенности радиолокационных объектов в заданных условиях наблюдения [2, 3].

В рамках данной статьи рассматриваются особенности построения программного комплекса, обеспечивающего моделирование сигналов, отраженных от наблюдаемых радиолокационных объектов. При этом основное внимание уделено принципам построения конструктора имитируемых радиолокационных целей, обеспечивающего требуемое распределение областей локального отражения по поверхности объекта.

Разработанный программный комплекс позволяет имитировать реализации отраженных радиолокационных сигналов от наблюдаемых надводных, наземных и воздушных объектов. При моделировании реализаций сигналов учитываются пространственное положение цели, ее геометрические размеры и форма, особенности конструкции и наличие наблюдаемых

вращающихся компонент, значение эффективной поверхности рассеяния применительно к заданным параметрам зондирования.

Основная часть

Любой объект радиолокационного наблюдения можно представить совокупностью определенным образом расположенных в пространстве областей локального отражения («блестящих точек» (БТ)) [1] (рис. 1).



Рис. 1. Представление цели в виде совокупности областей локального отражения

В общем случае временная структура отраженного сигнала (ОС) представляет собой результат когерентного сложения сигналов, отраженных от отдельных элементов конструкции цели [1]:

$$m(t) = \sum_{x=1}^{N_\chi} m_x(t) = \sum_{x=1}^{N_\chi} E_x(t) U_L(t - t_{r_x}) e^{j2\pi f_0 [t - t_{r_x}(t)] + \phi_{zc}}, \quad (1)$$

где N_χ – количество областей локального отражения на поверхности объекта (число БТ);

$m_\chi(t)$ – временная структура ОС от χ -й области локального отражения; $E_x(t) = \sqrt{2\sigma_{cx}^2(t)}$ – амплитуда сигнала, отраженного от χ -й БТ; $U_L(t - t_{r_x})$ – комплексный закон модуляции ограниченной последовательности L одиночных радиоимпульсов с учетом текущего времени запаздывания ОС; $t_{r_\chi}(t) = \frac{2r_{ц\chi}(t)}{c}$ – текущее время запаздывания ОС, обусловленное дальностью $r_{ц\chi}(t)$ от РЛС до χ -й БТ; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая несущая частота зондирующего сигнала; ϕ_{zc} – начальная фаза излучаемого зондирующего сигнала.

Приближенное представление наблюдаемого радиолокационного объекта совокупностью распределенных в пространстве наблюдения блестящих точек является физически оправданным, поскольку позволяет при моделировании обеспечить учет основных особенностей отражений, присущих сигналам реальных объектов. При этом существенное упрощение процесса моделирования делает указанный подход весьма привлекательным с точки зрения практической реализации.

Рассматриваемый подход позволяет формировать результирующий сигнал как сумму отражений от совокупности БТ, спроектированных на линию визирования (ЛВ) «радиолокационная станция (РЛС) – цель» (рис. 2).

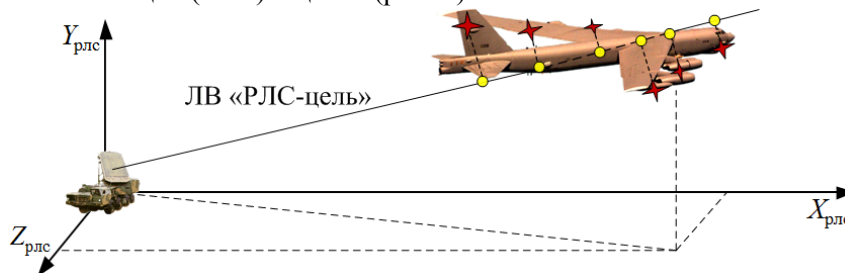


Рис. 2. Проектирование БТ на ЛВ

Разработанный программный комплекс моделирования позволяет формировать реализации сигналов, отраженных от имитируемой цели требуемого класса. При этом обеспечивается имитация дискретных отсчетов ОС с учетом особенностей пространственного

перемещения цели, условий ее наблюдения и значений параметров радиолокатора. Обобщенная структурная схема, поясняющая процесс моделирования ОС, приведена на рис. 3.



Рис. 2. Обобщенная структурная схема, поясняющая процесс моделирования ОС

В состав программного комплекса входят:

- генератор траектории объекта (по исходным данным в требуемые моменты времени обеспечивает выдачу текущих координат и параметров движения объекта);
- конструктор радиолокационных объектов (на основе заданных характеристик моделируемого объекта позволяет имитировать его геометрическую форму и пространственное распределение областей локального отражения);
- формирователь отраженного сигнала (с учетом тактико-технических характеристик РЛС, параметров движения и характеристик цели осуществляет векторное суммирование отражений от проекций совокупности блестящих точек на линию визирования РЛС-цель).

Одним из наиболее значимых компонент программного комплекса является конструктор объектов. В связи с этим целесообразно более детально рассмотреть принципы его построения применительно к задаче формирования ОС.

Особенности реализации конструктора радиолокационных объектов. Конструктор радиолокационных объектов позволяет на основании заданных характеристик цели формировать пространственное распределение совокупности БТ, определяющее отражательные свойства поверхности имитируемого объекта. При этом форма поверхности наблюдаемой цели аппроксимируется совокупностью элементарных геометрических компонент. После определения проекций на ЛВ выбранной совокупности БТ производится расчет реализации ОС (см. (1)).

В процессе моделирования имитируемый радиолокационный объект представляется набором БТ, распределенных в пределах области пространства, ограниченной размерами цели (рис. 1). При этом геометрический объем, занимаемый моделируемым сложным радиолокационным объектом, формируется при помощи m типовых элементарных компонент (ЭК) – геометрических фигур: прямоугольного параллелепипеда, эллипсоида и эллиптического цилиндра. Так, например, планер летательного аппарата может быть представлен эллипсоидом, крылья – прямоугольными параллелепипедами, gondoly двигателей – цилиндрами (рис. 3).

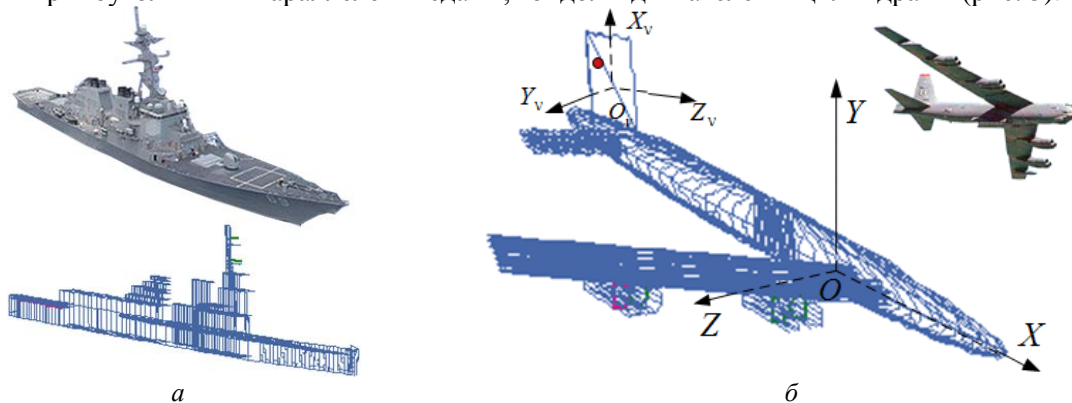


Рис. 3. Задание сложного моделируемого объекта при помощи элементарных компонент: *a* – модель эскадренного миноносца типа «Арли Берк», представленная набором элементарных компонент; *б* – положение элементарных компонент в системе координат моделируемого объекта (стратегического бомбардировщика B-52H)

Каждый ЭК объекта, представляющий собой совокупность связанных отражателей, задается в своей локальной системе координат (СК) X_v, Y_v, Z_v (рис. 3, б).

Для обеспечения имитации отражений от вращающихся элементов конструкции цели, в составе конструктора объектов предусмотрена возможность синхронного вращения выбранной совокупности отражателей («вращающийся компонент»). Такой подход позволяет при расчетах имитировать отражения от наблюдаемых на поверхности объекта вращающихся лопастей винтов, лопаток турбовинтовых и турбореактивных двигателей.

Задание пространственной конфигурации объекта. Имитация пространственной конфигурации каждого ЭК объекта обеспечивается путем генерации совокупности n распределенных в пространстве БТ. При этом точка ν -ой ($\nu = 1..m$) поверхности считается принадлежащей моделируемому объекту, если она находится внутри элементарного компонента, описывающего определенную часть моделируемого объекта (рис. 3, б). Распределение «блестящих точек» в пределах объема элементарного компонента является случайным. Данное распределение может быть выбрано в соответствии с равномерным или гауссовским законами распределения. При моделировании распределение точек по каждой из координат пространства принято независимым.

Следует отметить, что эффективная отражающая поверхность (ЭОП) радиолокационного объекта представляется суммой ЭОП элементарных компонент. При этом ЭОП каждой БТ в пределах ЭК является одинаковой и определяется отношением ЭОП элементарного компонента объекта σ_k к количеству БТ: $\sigma_{\text{БТ}}^k = \sigma_k / n$. Количество БТ задается таким, чтобы их совокупность визуально определяла контуры объекта (рис. 4).

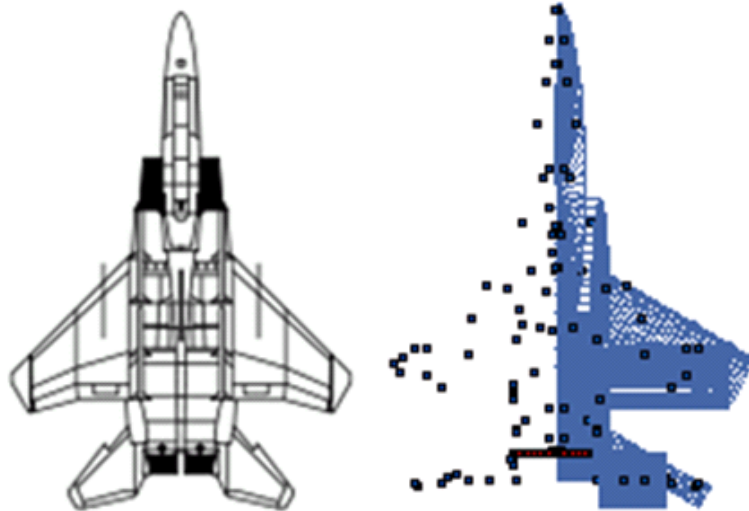


Рис. 4. Модель истребителя F-15SE, представленная совокупностью БТ

Разработанный конструктор радиолокационных объектов позволяет моделировать как симметричные объекты (самолет, ракета) и объекты с отсутствием симметрии (например, вертолет, надводный корабль, некоторые типы наземных объектов). В случае имитации симметричных объектов (рис. 3, б) с целью снижения вычислительных затрат моделируется конфигурация только правой части объекта. Левая часть объекта формируется путем симметричного отображения полученной части модели относительно плоскости симметрии (строительной плоскости XOY).

После получения требуемого распределения совокупности элементарных отражателей производится расчет их проекций на линию визирования.

Расчет проекций БТ на линию визирования. Решение данной задачи предполагает последовательный анализ отражателей всех ЭК объекта. С этой целью каждая БТ, заданная в системе координат элементарного компонента цели, пересчитывается в СК центра масс цели, после чего осуществляется ее пересчет в СК, связанную с радиолокатором.

Основными операциями процесса пересчета координат являются [4]:

- перенос центра анализируемой системы координат;
- повороты анализируемых систем координат.

Процесс переноса центра локальной СК поясняется рис. 5, а.

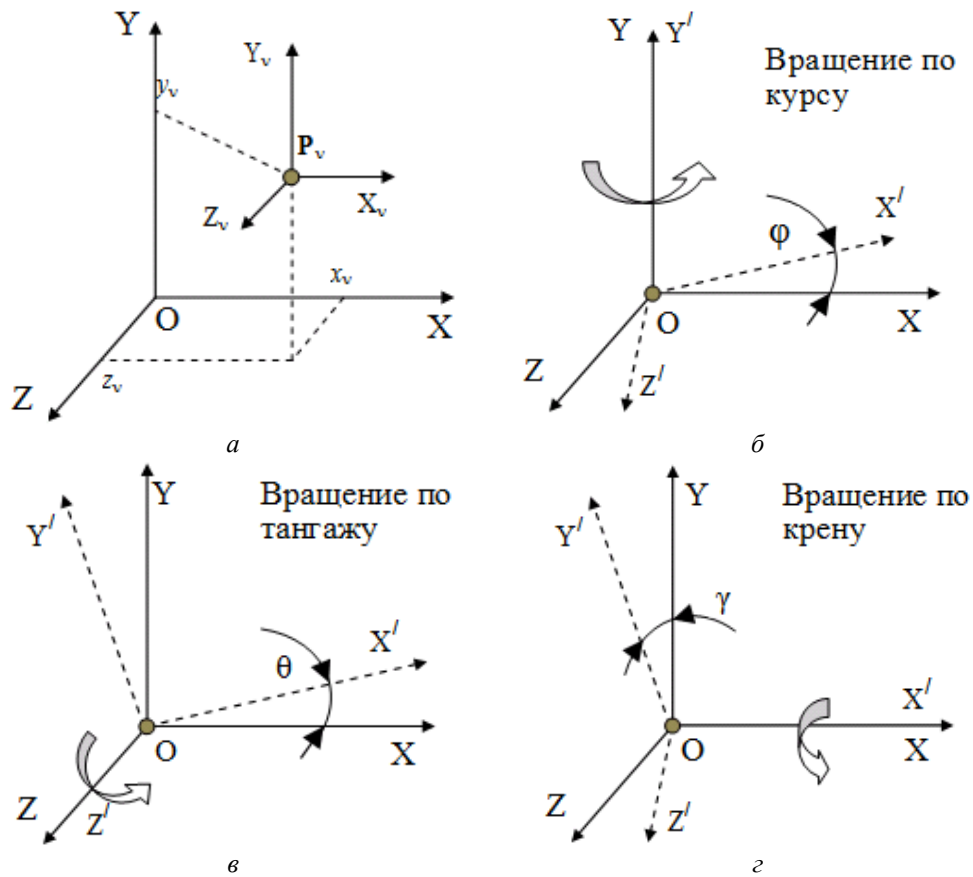


Рис. 5. Операции по пересчету координат:

a – перенос системы координат; *б* – вращение системы координат по курсу; *в* – вращение системы координат по тангажу; *г* – вращение системы координат по крену

Для переноса координат анализируемой точки $\mathbf{P}_v = (x_v, y_v, z_v)^T$ по осям OX , OY , OZ используются соответствующие матрицы переноса (сдвига):

$$\mathbf{M}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_v \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

При вычислениях удобно использовать матрицу переноса, учитывающую совместный сдвиг координат по трем осям:

$$\mathbf{M}(\mathbf{P}_v) = \mathbf{M}_x \mathbf{M}_y \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_v \\ 0 & 1 & 0 & y_v \\ 0 & 0 & 1 & z_v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где x_v , y_v , z_v – требуемая величина смещения координат по каждой из осей.

При моделировании для описания ориентации объекта в пространстве используются следующие параметры [4]:

- угол курса ϕ (изменяется поворотом модели вокруг оси OY);
- угол тангажа θ (изменяется поворотом модели вокруг оси OZ);
- угол крена γ (изменяется поворотом модели вокруг оси OX).

Возможные повороты локальной системы координат поясняются рис. 5, *б*, *в*, *г*.

При моделировании все повороты (изменения углов) осуществляются по часовой стрелке. Для поворота (вращения) вокруг оси OY на угол курса ϕ , вокруг оси OZ на угол тангажа θ , вокруг оси OX на угол крена γ используются соответствующие матрицы поворотов [4]:

$$\mathbf{M}^{OY} = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}^{OZ} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}^{OX} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Рассмотренные преобразования позволяют определить координаты анализируемой БТ поверхности отражения имитируемого объекта в СК радиолокационной станции (рис. 6).

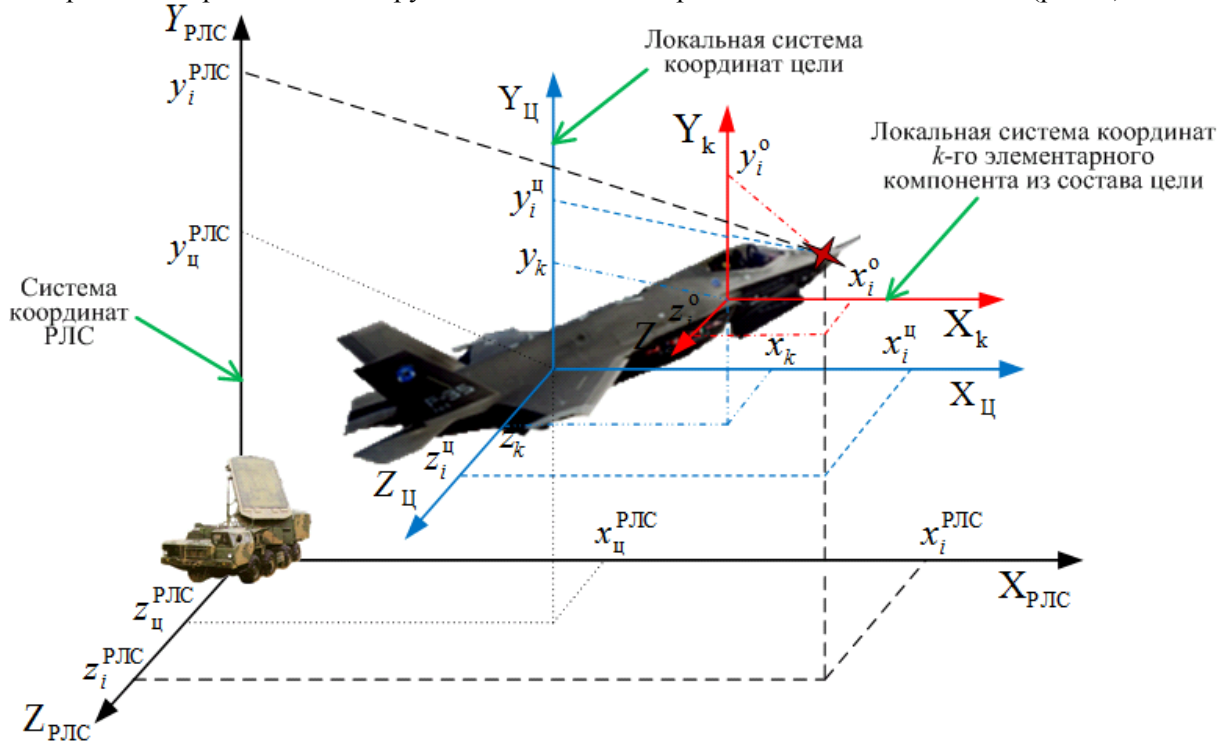


Рис. 6. Получение проекции БТ на ЛВ

Для расчета проекций БТ на ЛВ выполняется следующая последовательность действий:

1. Производится перенос i -ой БТ, характеризующейся координатами $\mathbf{P}_i^o = (x_i^o \ y_i^o \ z_i^o \ 1)^T$ в СК k -го ЭК, из локальной СК анализируемого компонента в СК моделируемого объекта. Для этого выполняются повороты вокруг оси OY_k на угол ϕ_k , вокруг оси OZ_k на угол θ_k , вокруг оси OX_k на угол γ_k , после чего производится смещение в точку $\mathbf{P}_k = (x_k \ y_k \ z_k \ 1)^T$ элементарного k -го компонента.

Матрица преобразования координат для k -го ЭК при этом имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{M}(\mathbf{P}_k) \cdot \mathbf{M}^{OX}(\gamma_k) \cdot \mathbf{M}^{OZ}(\theta_k) \cdot \mathbf{M}^{OY}(\phi_k), \quad (4)$$

Координаты i -ой БТ в СК цели рассчитываются как произведение вектора координат и матрицы преобразования $\mathbf{P}_i^u = (x_i^u \ y_i^u \ z_i^u \ 1)^T = \mathbf{M}_k \cdot \mathbf{P}_i^o$.

2. Координаты БТ в СК РЛС находятся с помощью матрицы преобразования координат $\mathbf{M}_c = \mathbf{M}(\mathbf{P}_c) \cdot \mathbf{M}^{OX}(\gamma_c) \cdot \mathbf{M}^{OZ}(\theta_c) \cdot \mathbf{M}^{OY}(\phi_c)$, где $\mathbf{P}_c = (x_c^РЛС \ y_c^РЛС \ z_c^РЛС \ 1)^T$ – координаты центра масс объекта в СК РЛС.

В результате определяются координаты i -ой БТ в системе координат РЛС

$$\mathbf{P}_i^РЛС = (x_i^РЛС \ y_i^РЛС \ z_i^РЛС \ 1)^T = \mathbf{M}_c \cdot \mathbf{P}_i^u.$$

3. Проекция БТ на ЛВ определяется как скалярное произведение двух векторов:

$$r_i^{\text{ЛВ}} = \frac{x_i^{\text{РЛС}} \cdot x_{\text{ц}}^{\text{РЛС}} + y_i^{\text{РЛС}} \cdot y_{\text{ц}}^{\text{РЛС}} + z_i^{\text{РЛС}} \cdot z_{\text{ц}}^{\text{РЛС}}}{\sqrt{(x_{\text{ц}}^{\text{РЛС}})^2 + (y_{\text{ц}}^{\text{РЛС}})^2 + (z_{\text{ц}}^{\text{РЛС}})^2}}. \quad (6)$$

После определения проекций всех наблюдаемых БТ на ЛВ, согласно выражению (1) осуществляется суммирование комплексных сигналов, отраженных от каждой «блестящей точки». При этом учитываются амплитудные и фазовые соотношения, обусловленные наличием частоты Доплера отраженных сигналов от совокупности БТ для текущих параметров РЛС.

Разработанный комплекс моделирования позволяет формировать случайные реализации сигнала отраженного от наблюдаемого объекта с учетом его размеров и конструктивных особенностей, пространственного перемещения цели, наличия вращающихся отражателей и характеристик излучения радиолокатора.

Заключение

Рассмотрены особенности построения программного комплекса моделирования реализаций сигнала, отраженного от имитируемого радиолокационного объекта. В состав комплекса входят: генератор траектории объекта, конструктор радиолокационных объектов, формирователь отраженного сигнала. Объект радиолокационного наблюдения аппроксимируется набором элементарных компонент (прямоугольного параллелепипеда, эллипса и эллиптического цилиндра). В пределах объема ЭК в случайном порядке распределяются БТ, совокупность которых визуально определяет конфигурацию объекта. ОС представляет собой сумму сигналов, отраженных от наблюдаемых проекций блестящих точек на линию визирования «РЛС-цель». Рассмотрена методика расчета проекций БТ на ЛВ.

Реализованный подход позволил обеспечить требуемую точность вычислений при значительном снижении вычислительных затрат (по сравнению с фасетными моделями отражения [2]). Разработанная модель ОС учитывает основные отличительные признаки отражений радиолокационных объектов для заданных условий наблюдения. Программный комплекс моделирования представляет интерес для ученых и инженеров, занимающихся проектированием и реализацией систем, решающих задачи радиолокационного обнаружения, измерения и распознавания объектов.

THE OBJECT DESIGNER OF PROGRAM MODELLING COMPLEX OF RADAR-TRACKING SIGNALS

A.S. SOLONAR, S.N. YARMOLIK, A.S. KHRAMENKOV,
A.A. MIKHALKOVSKI, P.A. KHMARSKI

Abstract

Principles of construction of program modelling complex of the radar-tracking signals reflected from objects of various classes are considered. The developed complex of modelling allows to form casual realizations of a signal reflected from observable object taking into account its sizes and design features, spatial moving of the purpose, presence of rotating reflectors and characteristics of radiation of a radar.

Список литературы

1. *Охрименко А.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
2. *Сухаревский О.И.* Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами. Х., 2009.
3. *Леонов А.И., Васенев В.И., Гойдуков Ю.И.* Моделирование в радиолокации. М., 1979.
4. *Горбатенко С.А., Максимов Э.М., Полушкин Ю.Ф.* Механика полета. Общие сведения. Уравнения движения. Инженерный справочник. М., 1969.