

УДК 621.391.26

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

А.А. ДЯТКО, С.М. КОСТРОМИЦКИЙ, П.Н. ШУМСКИЙ

ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»  
Коммунистическая, 11, Минск, 220029, Беларусь

Поступила в редакцию 17 апреля 2014

Рассмотрен метод моделирования виртуальной траектории летательного аппарата с целью дезинформации некоторой радиолокационной станции (РЛС) о воздушной обстановке в зоне ее ответственности. Приведены алгоритмы вычисления временных интервалов, определяющих моменты времени для излучения в сторону РЛС сигналов, имитирующих реальную цель.

*Ключевые слова:* траектория, система координат, аффинные преобразования.

### Введение

В современных условиях информация и информационные технологии превратились в важный ресурс, обеспечивающий обороноспособность и национальную безопасность государства. Благодаря достижениям в области информационных технологий, элементной базы и цифровых методов обработки сигналов в последние 15–20 лет наметился явный качественный скачок в развитии радиоэлектронного вооружения. Важнейшее значение в этих условиях имеет применение средств радиоэлектронной борьбы [1]. Без современных средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) невозможно добиться превосходства над противником, которое достигается за счет дезорганизации его информационно-управляющих и телекоммуникационных систем.

В представленной статье демонстрируется один из приемов РЭБ – создание виртуальной траектории летательного аппарата с целью дезинформации РЛС о воздушной обстановке в зоне ее ответственности.

### Постановка задачи

Имеется некоторая радиолокационная станция и система радиоэлектронной борьбы, содержащая помимо прочих устройств радиоприемное и передающее устройства.

Радиолокационная станция предполагается двухкоординатной, т.е. способной определять азимут цели и наклонную дальность до цели. Система РЭБ способна определить необходимые для имитации отраженного от цели сигнала параметры радиолокационной станции (РЛС). Будем полагать, что РЛС не способна различать сигналы, принятые по основному и боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА). Перед системой РЭБ ставится задача: путем излучения радиоимпульсов в направлении РЛС создать у нее иллюзию сопровождения некоторой цели по заданной траектории. Будем говорить о виртуальной цели и виртуальной траектории или просто о цели и траектории.

В силу поставленной задачи возникает необходимость определения моментов времени, в которые РПУ РЭБ должен излучать в сторону РЛС сигналы, имитирующие полет цели по заданной траектории. В статье представлена методика расчета моментов времени для излучения имитирующего сигнала.

### Исходные данные и вычисление моментов времени для излучения имитирующего цель сигнала

Пусть заданы:  $(\vartheta_{RLS}, \psi_{RLS})$  – географические координаты (широта, долгота) точки расположения РЛС;  $(\vartheta_{EW}, \psi_{EW})$  – географические координаты (широта, долгота) точки расположения системы РЭБ; множество декартовых координат  $R_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ , определяющих траекторию цели в СК системы РЭБ;  $\Delta t$  – интервал дискретизации по времени при вычислении координат траектории цели;  $T_a$  – период вращения антенны (период обзора) РЛС,  $T_p$  – период повторения зондирующего сигнала РЛС.

Зададим на земной поверхности, которую будем считать плоской, правую систему координат (СК)  $XYZ$ , ось  $Y$  которой направлена на север. В начале этой СК расположим систему РЭБ (рис.1). Азимут цели в заданной СК будем отсчитывать от оси  $Y$  по часовой стрелке.

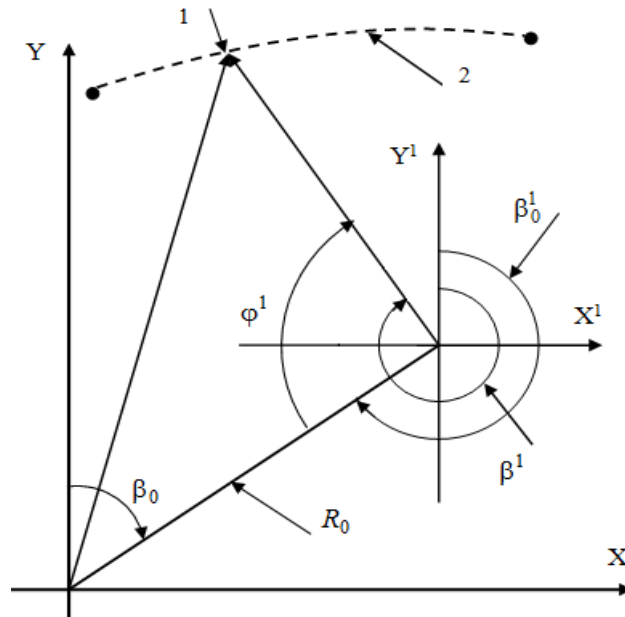


Рис. 1. Системы координат системы РЭБ и РЛС; 1 – текущее положение цели; 2 – фрагмент траектории цели

Введем в рассмотрение и другую правую систему координат  $X^1Y^1Z^1$ , ось  $Y^1$  которой направлена на север, начало которой находится в точке расположения РЛС (рис. 1). Будем полагать, что расстояние между системой РЭБ и РЛС таково, что кривизной земной поверхности и сходом меридианов можно пренебречь. В силу принятого предположения координатные оси обеих систем будут параллельны. Линию, соединяющую точки расположения системы РЭБ и РЛС, назовем линией визирования.

Введем следующие обозначения (рис. 1):  $\beta_0$  – азимут РЛС в СК системы РЭБ (азимут линии визирования);  $R_0$  – горизонтальная дальность точки расположения РЛС от точки расположения системы РЭБ;  $\beta^1$  – азимут луча ДНА РЛС для текущего положения;  $\beta_0^1$  – азимут системы РЭБ в СК РЛС (азимут линии визирования).

Вычислим декартовы координаты РЛС  $(x_s, y_s, y_s)$  в системе координат системы РЭБ:

$$\begin{cases} x_s = R_E \cos \vartheta_{EW} \Delta \psi \\ y_s = R_E \Delta \vartheta \\ z_s = 0 \end{cases}$$

и расстояние между точками расположения системы РЭБ и РЛС:  $R_0 = \sqrt{x_s^2 + y_s^2}$ , где  $\Delta \vartheta = \vartheta_{RLS} - \vartheta_{EW}$ ,  $\Delta \psi = \psi_{RLS} - \psi_{EW}$ ,  $R_E$  – средний радиус Земли.

Воспользовавшись аффинным преобразованием координат [2], получим координаты траектории цели в системе координат РЛС (СК  $X^1Y^1Z^1$ ):

$M^1 = T(x_s, y_s, z_s)M$ , где

$$M = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_N \\ y_0 & y_1 & \dots & y_N \\ z_0 & z_1 & \dots & z_N \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}, T(x_s, y_s, z_s) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_s \\ 0 & 1 & 0 & -y_s \\ 0 & 0 & 1 & -z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M^1 = \begin{pmatrix} x_0^1 & x_1^1 & \dots & x_N^1 \\ y_0^1 & y_1^1 & \dots & y_N^1 \\ z_0^1 & z_1^1 & \dots & z_N^1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Для полученных координат траектории вычислим соответствующие им наклонную дальность и азимут:

$$D_i^1 = \sqrt{(x_i^1)^2 + (y_i^1)^2 + (z_i^1)^2}, \theta_i^1 = \arctg\left(\frac{x_i^1}{y_i^1}\right) + \frac{\pi}{2}(2 - \text{sgn } x_i^1 - \text{sgn } x_i^1 \cdot \text{sgn } y_i^1),$$

$$\text{где } \text{sgn } x = \begin{cases} -1, & \text{при } x < 0 \\ 1, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}.$$

Вычислим также декартовы координаты начала координат системы РЭБ  $V_r = (x_r, y_r, z_r)^T = (0, 0, 0)^T$  в системе координат РЛС

$$V_r' = (x_r', y_r', z_r')^T$$

$$\begin{cases} x_r' = x_r - x_s = -x_s \\ y_r' = y_r - y_s = -y_s \\ z_r' = z_r - z_s = 0 \end{cases}$$

и азимут  $\beta_0^1$  системы РЭБ в СК РЛС (азимут линии визирования со стороны РЛС)

$$\beta_0^1 = \arctg\left(\frac{x_r'}{y_r'}\right) + \frac{\pi}{2}(2 - \text{sgn } x_r' - \text{sgn } x_r' \cdot \text{sgn } y_r').$$

Повернем СК РЛС на угол  $\beta_0^1$  по часовой стрелке так, что ось  $Y^1$  совпадет с линией визирования и будет направлена в точку расположения системы РЭБ. В повернутой системе координат азимут  $\phi^1$  (рис. 1) будет отсчитываться от линии визирования и определяться соотношением  $\phi^1 = \beta^1 - \beta_0^1$ .

Вычислим азимуты точек траектории цели после поворота СК РЛС:

$$\phi_i^1 = \begin{cases} \theta_i^1 - \beta_0^1, & \text{при } \theta_i^1 - \beta_0^1 \geq 0 \\ \theta_i^1 - \beta_0^1 + 2\pi, & \text{при } \theta_i^1 - \beta_0^1 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Выполняя обзор пространства, ДНА один или два раза за период обзора будет направлена в сторону цели либо не встретит цель вообще (в зависимости от азимута цели). На рис. 2 представлена ситуация, когда контакт с целью происходит два раза, а на рис. 3 показан случай отсутствия контакта за период обзора.

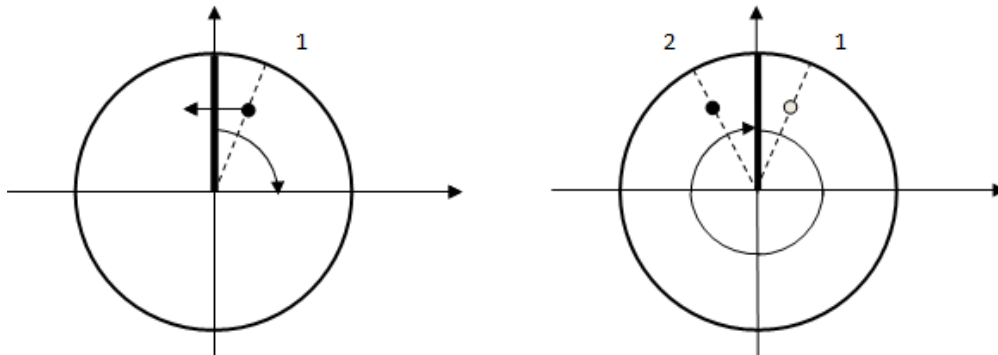


Рис. 2. Иллюстрация двукратного контакта с целью за период обзора

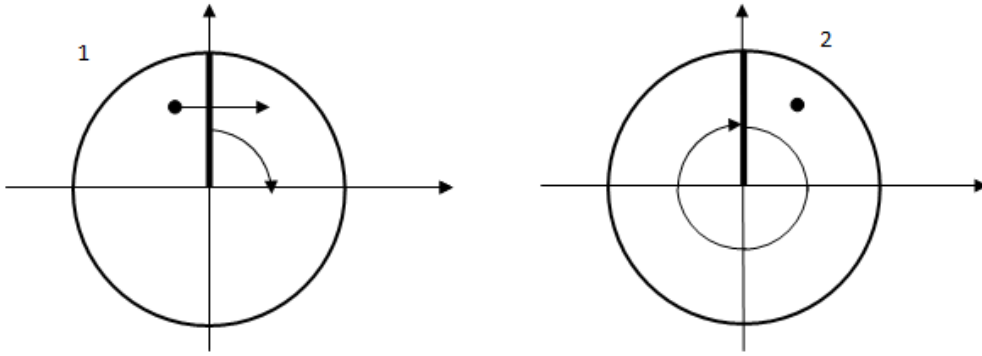


Рис. 3. Иллюстрация отсутствия контакта с целью за период обзора

Для каждого оборота антенны, когда ДНА встречает цель, можно определить момент(ы) времени, считая от момента прохождения линии визирования, когда максимум ДНА имеет направление на цель. Будем полагать, что старт цели происходит в момент времени  $t_0 = 0$  по часам РЛС, когда луч ДНА первый раз проходит линию визирования. Тогда в момент контакта ДНА РЛС с целью справедливо равенство

$$\phi^1(nT_a + t_n^x) = \phi^1(t_n^x), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_a - 1, \quad (2)$$

где  $t_n^x$  – момент времени по часам РЛС, считая от момента прохождения линии визирования, когда на  $n+1$ -ом обороте антенны положение максимума ДНА РЛС соответствует азимуту цели,  $\phi^1 = \phi^1(t)$  – азимут цели в повернутой СК РЛС,  $\phi^1 = \phi^1(t)$  – положение максимума ДНА в повернутой СК РЛС,  $n$  – число полных оборотов антенны РЛС до текущего,  $N_a = \left\lfloor \frac{N\Delta t}{T_a} \right\rfloor$  – число полных оборотов антенны РЛС за время полета цели по заданной траектории,  $[\cdot]$  – целая часть числа. Назовем это время временем виртуального контакта.

Так как  $\phi^1(t) = \omega_a t = \frac{2\pi}{T_a} t$ , где  $\omega_a = \frac{2\pi}{T_a}$  – частота вращения антенны, то уравнение (1)

можно переписать в виде

$$\phi^1(nT_a + t_n^x) = \omega_a t_n^x, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_a - 1. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой нелинейное относительно переменной  $t_n^x$  уравнение, которое для любого значения  $n$  может иметь единственный корень (один контакт с целью за период обзора), два корня (два контакта с целью за период обзора), либо не иметь корней вообще (нет контактов с целью за время обзора) для  $0 \leq t_n^x < T_a$ .

Для поиска корней уравнения (3) можно воспользоваться любым подходящим численным методом. При этом следует иметь в виду, что в случае одного контакта с целью за период обзора решение уравнения (3) следует искать для  $t_n^x \in [0, 2\pi)$ . Если же за период обзора происходит два контакта с целью, то уравнение (3) следует решать дважды – для  $t_n^x \in [0, \pi)$  и  $t_n^x \in [\pi, 2\pi)$ .

Поскольку функция  $\phi^1(t)$  определена набором своих значений (1) в дискретные моменты времени, то для любого момента времени  $t \in [t_k, t_{k+1}]$  можно воспользоваться интерполяционной формулой

$$\phi^1(t) \approx \phi_L^1(t) = \phi_k^1 + \frac{\phi_{k+1}^1 - \phi_k^1}{\Delta t} (t - t_k) = \phi_k^1 + (\phi_{k+1}^1 - \phi_k^1) \left( \frac{t}{\Delta t} - k \right), \quad (4)$$

где  $k = k(t) = \left\lfloor \frac{t}{\Delta t} \right\rfloor$ .

Заметим, что применение интерполяционной формулы (4) для вычисления значения азимута цели имеет свою особенность, связанную с тем, что при изменении угла отклонения цели  $\phi$  от оси  $Y$  в любом направлении азимут всегда находится в пределах  $[0, 2\pi)$  и вычисляется в соответствии с выражениями

$$\alpha = \text{mod}(\phi, 2\pi), \quad (5)$$

$$\phi = \begin{cases} \alpha, & \text{при } \alpha \geq 0 \\ \alpha + 2\pi, & \text{при } \alpha < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где функция  $\text{mod}()$  выполняет операцию деления по модулю  $2\pi$ , т. е. вычисляет остаток от деления значения угла  $\phi$  на  $2\pi$ .

Указанное обстоятельство приводит к тому, что при перемещении цели азимут как функция времени претерпевает скачок на  $-2\pi$  при переходе нулевой отметки (оси  $Y$ ) по часовой стрелке и на  $2\pi$  при переходе нулевой отметки (оси  $Y$ ) против часовой стрелки. Для этих ситуаций необходима модификация алгоритма интерполяции (4), которая приводится ниже.

Рассмотрим сначала вариант пересечения нулевой отметки по часовой стрелке. Пусть  $\phi_k$  – значение азимута до пересечения нулевой отметки, а  $\phi_{k+1}$  – после пересечения нулевой отметки. Введем новую переменную  $\phi'_{k+1}$ , где скомпенсируем скачек на  $-2\pi$ :  $\phi'_{k+1} = \phi_{k+1} + 2\pi$ . Выполним интерполяцию согласно (4), опустив для удобства верхние индексы

$$\beta'(t) = \phi_k + (\phi'_{k+1} - \phi_k) \left( \frac{t}{\Delta t} - k \right) = \phi_k + (\phi_{k+1} + 2\pi - \phi_k) \left( \frac{t}{\Delta t} - k \right) = \phi_L(t) + 2\pi \left( \frac{t}{\Delta t} - k \right).$$

После интерполяции скачек по углу восстанавливается  $\beta(t) = \beta'(t) - 2\pi$  и значение азимута определяется согласно выражениям (5) и (6).

Рассмотрим теперь вариант пересечения нулевой отметки против часовой стрелки. Пусть, как и ранее,  $\phi_k$  – значение азимута до пересечения нулевой отметки, а  $\phi_{k+1}$  – после пересечения нулевой отметки. Введем новую переменную  $\phi'_{k+1}$ , где скомпенсируем скачек на  $2\pi$ :  $\phi'_{k+1} = \phi_{k+1} - 2\pi$ .

$$\text{После преобразований, аналогичных предыдущим, получим } \beta'(t) = \phi_L(t) - 2\pi \left( \frac{t}{\Delta t} - k \right).$$

После интерполяции скачек по углу восстанавливается  $\beta(t) = \beta'(t) + 2\pi$  и значение азимута определяется согласно выражениям (5) и (6). Определим способ фиксации факта пересечения цели нулевой отметки азимута. Пусть  $v = |\vec{v}|$  – модуль вектора скорости цели в некоторой точке имитируемой траектории,  $v_\tau$  – модуль тангенциальной составляющей вектора  $\vec{v}$  и  $D^1$  – соответствующая этой точке дальность до цели в СК РЛС. Положим, что за время  $\Delta t$  изменение модуля азимута цели составит величину  $\Delta\beta$ . Тогда можно записать равенство

$$D^1 \Delta\beta = v_\tau \Delta t. \quad (7)$$

Из (7) получаем, что  $\Delta\beta = \frac{v_\tau \Delta t}{D^1} \leq \frac{(v_\tau)_{\max} \Delta t}{D^1} \leq \frac{v \Delta t}{D^1_{\min}} \leq \frac{v_{\max} \Delta t}{D^1_{\min}}$ , где  $(v_\tau)_{\max} = v$ ,  $v_{\max} = \max(v)$  – максимальное значение модуля скорости цели для всей траектории а  $D^1_{\min}$  – минимальное значение дальности до цели для всей траектории в СК РЛС.

Таким образом, максимальное значение изменения азимута цели за время  $\Delta t$  может составить величину  $\Delta\beta_{\max} = \frac{v_{\max} \Delta t}{D^1_{\min}}$ .

Теперь для каждого номера обзора  $n=0, 1, 2, \dots, N_a$  вычисляем азимут цели для моментов времени  $t_n = nT_a$  и  $t_{n+1} = (n+1)T_a$ :  $\phi_n^1 = \phi^1(nT_a)$ ,  $\phi_{n+1}^1 = \phi^1[(n+1)T_a]$  и значение  $\Delta\phi_n = |\phi_{n+1}^1 - \phi_n^1|$ . Тогда, если  $\Delta\phi_n > \Delta\beta_{\max}$ , то за период обзора цель пересекает нулевую отметку

азимута. При этом, если  $\phi_n^1 > \phi_{n+1}^1$ , то контакт ДНА с целью на обзоре с номером  $n+1$  не происходит (рис. 3), а при  $\phi_n^1 < \phi_{n+1}^1$  происходит два контакта ДНА с целью на одном обзоре номером  $n+1$  (рис. 2).

Далее, представим непрерывное во времени вращение антенны РЛС в виде дискретных перемещений по азимуту с интервалом времени  $T_p$ . Для такой модели излучение зондирующего импульса и прием отраженного от цели сигнала можно интерпретировать как происходящее при неподвижной антенне. Причем посылка зондирующего импульса происходит в момент перехода в очередное дискретное состояние. Пусть  $K = \lceil t_n^x / T_p \rceil$  – ближайшее к  $t_n^x$  целое число периодов излучения РЛС. Будем полагать, что  $t_n^x \approx t_n^0 = KT_p$ . В этом случае азимут цели в несмещенной СК РЛС определится из выражения  $\beta_n^1 = \beta^1(t_n^0) = \omega_a t_n^0 + \beta_0^1$ .

В момент времени  $t_n^0$  РЛС излучает зондирующий импульс и через промежуток времени  $t_n^d$ , определяемый дальностью до цели, должна получить отраженный сигнал.

Значение задержки  $t_n^d$  можно получить, воспользовавшись выражением  $t_n^d = \frac{2D^1(nT_a + t_n^0)}{c}$ , где

$c$  – скорость света, а функция  $D^1(t) \approx D_L^1(t) = D_k^1 + (D_{k+1}^1 - D_k^1) \left( \frac{t}{\Delta t} - k \right)$  представляет собой интерполяционную формулу для вычисления дальности до цели в произвольные моменты времени.

Таким образом, промежуток времени с момента прохождения ДНА линии визирования до получения отраженного от цели сигнала по часам РЛС составит

$$\Delta t_n^1 = t_n^0 + t_n^d = t_n^0 + \frac{2D^1(nT_a + t_n^0)}{c}.$$

Учтем, что в момент прохождения линии визирования РЛС излучает зондирующий сигнал, который принимается приемным устройством РЭБ с задержкой  $\tau_d = R_0/c$ .

Тем самым фиксируется начало отсчета времени по часам системы РЭБ для очередного периода обзора. Сигнал, излученный системой РЭБ в сторону РЛС достигает ее антенны также с задержкой  $\tau_d$ .

С учетом этих замечаний можно определить момент времени (по часам системы РЭБ), когда на  $n+1$ -ом обороте антенны РЛС система РЭБ должна излучить в ее сторону сигнал, имитирующий цель.  $\Delta t_n = \Delta t_n^1 - 2\tau_d$ .

Отсчет времени начинается после приема зондирующего сигнала РЛС в момент прохождения максимума ДНА линии визирования.

### Заключение

Рассмотрен метод имитации сигнала, отраженного от цели, движущейся по заданной траектории, для некоторой РЛС, выполняющей обзор пространства. Это позволяет создать эффект присутствия реального объекта в зоне ответственности этой РЛС. Метод основан на посылке системой РЭБ в сторону подавляемой РЛС сигналов, имитирующих перемещение некоторого объекта по заданной траектории.

## **VIRTUAL TRAJECTORY MODELING**

A.A. DYATKO, S.M. KOSTROMITSKI, P.N. SHUMSKI

### **Abstract**

Considered the method of modeling a virtual path of the aircraft for the purpose of some misinformation radar on the air situation in its area of responsibility. The method is based on the premise system electronic warfare in the overwhelming radar signals that mimic the movement of an object along a predetermined path. The algorithms for calculating time intervals defining moments for the radiation in the direction of the radar signals that mimic the real purpose are given.

### **Список литературы**

1. *Куприянов А.И., Сахаров А.И.* Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. М., 2007.
2. *Порев В.Н.* Компьютерная графика. СПб, 2002.