

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ  
В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИОННО -  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ  
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН**

д.т.н. В.И. Антюфеев, к.т.н. В.Н. Быков,  
А.С. Вильчинский, д.ф.-м.н. Е.Д. Прилепский

*Предложено формализованное описание процесса формирования изображения на борту ЛА, оснащенного радиометрической корреляционно - экстремальной системой навигации, с учетом характеристик подстилающей поверхности, канала распространения радиосигнала и его преобразования в антенне и приемном тракте.*

Принцип действия корреляционно - экстремальных систем навигации летательных аппаратов (КЭСН ЛА) по наземным ориентирам [1] основан на выявлении сходства изображений объектов навигации: текущих изображений, формируемых информационными датчиками поля в процессе полета ЛА, и эталонных изображений объектов, синтезируемых заранее и хранящихся в памяти бортовой электронно - вычислительной машины (БЭВМ). БЭВМ осуществляет корреляционную обработку изображений, определяет величину отклонения траектории полета ЛА относительно заданной. Сравнимые изображения являются двумерными плоскими с определенным количеством разрешаемых элементов [2].

Для моделирования процесса функционирования корректирующей системы – радиометрической (РМ) КЭСН миллиметрового диапазона волн, важное место занимает разработка адекватной модели формирования текущего радиометрического изображения (РМИ) наземных ориентиров навигации. РМ КЭСН миллиметрового диапазона подобно оптическим и инфракрасным системам навигации могут быть построены по многоканальной (матричной) схеме, что позволяет осуществлять обзор земной поверхности одновременно во всех элементах двумерного "кадра" (прямоугольного, квадратного) и таким образом формировать изображение объектов навигации и окружающих фонов за малое время экспозиции.

Описание процесса формирования текущего РМИ в РМ КЭСН является первым этапом моделирования [3]. Оно заключается в формализации в операторной форме следующих процессов:

- приема бортовой многолучевой антенной сигнала - естественного

радиотеплового излучения (РТИ) элементов объектов навигации и окружающих фонов;

- оценки влияния характеристик атмосферного канала на процесс распространения радиосигнала (РТИ) от объекта к антенне;
- преобразования РТИ в антенне и многоканальном радиометрическом приемнике;
- собственно формирования изображения на выходе многоканального РМ приемника.

Целью статьи является разработка описательной части математической модели, позволяющей имитировать процесс прохождения радиосигнала по РМ тракту и формирования текущего РМИ на борту ЛА.

Обобщенная модель формирования РМИ в операторной форме представлена на рис. 1. Рассмотрим элементы такой модели для одного канала РМ КЭСН.

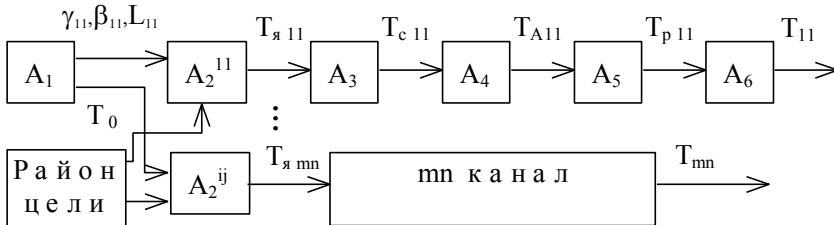


Рис. 1. Обобщенная модель формирования РМИ

Район цели состоит из поверхностей различных типов и объектов, соответствующих материалам, и характеризующихся термодинамической температурой  $T_0$ . Дифференциальный или интегро - дифференциальный оператор  $A_1$ , описывающий движение ЛА, представляет собой отображение

$$A_1 : (\vec{r}_0, \vec{v}_0, t_0) \mapsto (\vec{r}(t), \vec{v}(t)), \quad (1)$$

позволяющее для каждого момента времени  $t > t_0$  для известных начальных фазовых координат центра масс ЛА  $(\vec{r}_0, \vec{v}_0)$  вычислить по уравнениям движения текущие координаты  $(\vec{r}(t), \vec{v}(t))$  в системе координат, связанной с земной поверхностью

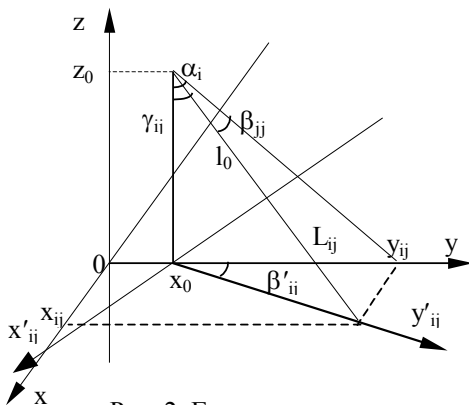


Рис. 2. Геометрия визирования

стью (рис. 2).

Введем антенную систему координат  $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ , центр которой совпадает с центром плоскости апертуры матричной антенны, ось  $\tilde{y}$  совпадает с осью симметрии антенны, оси строчных парциальных диаграмм направленности антенны (ДНА) лежат в плоскостях, проходящих через ось  $\tilde{x}$ , оси столбцовых парциальных ДНА лежат в плоскостях, проходящих через ось  $\tilde{z}$ . Пусть ось  $ij$  - й ДНА задается направляющим вектором  $\bar{l}_1$ , который может быть определен с помощью направляющих косинусов  $\mathbf{a}_1 = \cos(\bar{l}_1, \tilde{y})$ ,  $\mathbf{b}_1 = \cos(\bar{l}_1, \tilde{z})$ ,  $\mathbf{c}_1 = \cos(\bar{l}_1, \tilde{x})$ . В общем случае антенная система может быть повернута относительно системы координат, связанной с корпусом ЛА. Этот разворот описывается углом курса  $\psi_A$  (поворот относительно оси  $\tilde{z}$ ), углом тангажа  $\eta_A$  (поворот относительно оси  $\tilde{x}$ ) и углом крена  $\xi_A$  (поворот относительно оси  $\tilde{y}$ ). Тогда положение  $ij$  - го луча антенны через направляющие косинусы в связанной системе координат можно определить путем преобразования

$$\bar{l}_2 = (\mathbf{a}_2, \mathbf{b}_2, \mathbf{c}_2)^T = \mathbf{A}_0^T(\psi_A, \eta_A, \xi_A)\bar{l}_1,$$

где  $\mathbf{A}_0^T(\psi, \eta, \xi) =$

$$= \begin{bmatrix} \cos \eta \cdot \cos \psi & \sin \psi \cdot \sin \xi - \cos \xi \cdot \sin \eta \cdot \cos \psi & \sin \xi \cdot \sin \eta \cdot \cos \psi \cdot \sin \psi \\ \sin \eta & \cos \xi \cdot \cos \eta & -\sin \xi \cdot \cos \eta \\ -\sin \psi \cdot \cos \eta & \cos \xi \cdot \sin \eta \cdot \sin \psi + \sin \xi \cdot \cos \psi & \cos \xi \cdot \cos \psi - \sin \xi \cdot \sin \eta \cdot \sin \psi \end{bmatrix}.$$

Переходя к декартовой системе координат  $(x, y, z)$  (рис. 2), которая повернута относительно связанной на углы  $\psi_0, \eta_0, \xi_0$ , будем иметь

$$\bar{l}_0 = (\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0, \mathbf{c}_0)^T = \mathbf{A}_0^T(\psi_0, \eta_0, \xi_0)\bar{l}_2.$$

Теперь можно вычислить значения двух плоских углов  $\alpha_i, \beta_{ij}$ , характеризующих направление  $ij$  - го луча:

$$\alpha_i = -\text{arctg} \frac{\mathbf{a}_0}{\mathbf{b}_0}; \quad \beta_{ij} = \text{arctg} \frac{\mathbf{c}_0 \cdot \cos \alpha_i}{\mathbf{b}_0},$$

а также угол  $\gamma_{ij}$  из соотношения  $\gamma_{ij} = \arccos(\cos(\alpha_i)\cos(\beta_{ij}))$ .

По углам  $(\gamma_{ij}(t), \beta_{ij}(t))$  определяются координаты точки пересечения оси парциальной ДНА с земной поверхностью и наклонная дальность  $L_{ij}$  для каждого луча. Если система управления не моделируется (что имеет место, когда не заданы алгоритмы распознавания цели на РМИ), то для описания движения достаточно рассмотреть движение центра масс ЛА без учета вращения вокруг центра масс. В противном случае для определения отображения  $\mathbf{A}_1$  (1) необходимо интегрировать

уравнения движения ЛА вплоть до встречи с земной поверхностью.

РМИ в пассивных КЭСН формируется главным образом за счет собственного излучения объектов и фонов, и различий в их излучательной способности. Оператор  $A_2$  ставит в соответствие термодинамической температуре  $T_0$ , в каждой точке  $\vec{R}$  района цели  $D$ , радиояркую температуру  $T_{я}(\vec{R}, t)$ :

$$T_{я}(\vec{R}, t) = A_2(t, T_0, K(\vec{R}, \gamma(t))), \quad \vec{R} \in D, \quad (2)$$

где  $K(\vec{R}, \gamma(t))$  - коэффициент излучения поверхности, зависящий от типа поверхности, ее радиофизических характеристик и угла визирования  $\gamma(t)$ .

На получаемое РМИ оказывают влияние характеристики атмосферного радиоканала. Во-первых, излучение частично поглощается атмосферой, во-вторых, появляется дополнительная компонента, обусловленная собственным излучением атмосферы. Влияние поглощения излучения в атмосфере на трассе длиной  $L$  оценивается соотношением [4]:

$$T = T_{я} \exp(-\bar{\alpha}L), \quad (3)$$

где  $\bar{\alpha} = L^{-1} \int_0^L \alpha(h) \sec \gamma dh$  - средний коэффициент поглощения;  $\alpha(h)$  - коэффициент поглощения атмосферы в зависимости от высоты.

Влияние собственного излучения атмосферы на РМИ состоит в появлении составляющей

$$T' = \bar{T}_{ат} [1 - \exp(-\bar{\alpha}L)], \quad (4)$$

где  $\bar{T}_{ат} = \int_0^{u(L)} T_{ат}(u) \exp(-u) du \left[ \int_0^{u(L)} \exp(-u) du \right]$  - средневзвешенная температура излучения атмосферы;  $T_{ат}(u)$  - локальная температура атмосферы;  $u = \int_0^z \alpha(z') dz'$ .

Таким образом, оператор  $A_3$  определяется соотношением

$$T_c(\vec{R}, t) = K(\vec{R}, \gamma) T_0 \exp(-\bar{\alpha}L) + \bar{T}_{ат} (1 - K(\vec{R}, \gamma)) (1 - \exp(-\bar{\alpha}L)). \quad (5)$$

Для  $ij$  - й парциальной ДНА введем локальную систему координат  $(\theta, \varphi)$ , центр которой совпадает с центром плоскости апертуры антенны, а направление  $(\theta = 0, \varphi = 0)$  совпадает с осью симметрии антенны. Оператор  $A_4$  описывает выходной сигнал антенной системы с парциальной ДНА  $G(\theta, \varphi)$  и в общем виде определяется выражением

$$T_A(t) = A_4(T_c(\bar{R}, t), G(\theta, \varphi)). \quad (6)$$

В случае аппроксимации парциальной ДНА гауссолой получим

$$G(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\varphi} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2} - \frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}\right),$$

где  $\sigma_\theta = \frac{\theta_0}{2\sqrt{2\ln 2}}$  ;  $\sigma_\varphi = \frac{\varphi_0}{2\sqrt{2\ln 2}}$  ;  $\theta_0 = \frac{\lambda}{D}p_1$  ;  $\varphi_0 = \frac{\lambda}{D}p_2$  ;

$\theta_0, \varphi_0$  - ширина ДНА по уровню половинной мощности соответственно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;  $D$  - диаметр раскрыва антенны;  $p_1, p_2$  - коэффициенты, определяемые параметрами амплитудного распределения поля в раскрыве антенны.

В случае наблюдения в дальней зоне оператор  $A_4$  представляет свертку

$$T_A(t) = \int_D T_c(x, y, t) G(\theta, \varphi) \left| \frac{\partial(\theta, \varphi)}{\partial(x, y)} \right| dx dy, \quad (7)$$

где  $I(x, y) = \left| \frac{\partial(\theta, \varphi)}{\partial(x, y)} \right|$  - якобиан перехода от переменных  $(\theta, \varphi)$  к  $(x, y)$ .

Для вычисления якобиана введем на плоскости  $z = 0$  (рис. 2) систему координат  $(x, y)$  с центром в точке  $(x_0, y_0)$ , повернутую относительно исходной системы координат на угол  $\beta'_{ij}$  и связанную с ней соотношениями

$$x' = (x - x_0) \cos \beta'_{ij} + (y - y_0) \sin \beta'_{ij}; \quad y' = (x - x_0) \sin \beta'_{ij} + (y - y_0) \cos \beta'_{ij},$$

причем  $\beta'_{ij} = \arctg(\tg \beta_{ij} / \sin \alpha_i)$ . Тогда в соответствии с рис. 2 находим:

$$\theta = \arctg\left(\frac{y'}{z_0}\right) - \gamma_{ij}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{x'}{z_0} \cdot \cos \gamma_{ij}\right).$$

Следовательно,

$$I(x, y) = \frac{\cos \gamma_{ij}}{z_0^2 \left[ 1 + \left(\frac{y'}{z_0}\right)^2 \right] \left[ 1 + \left(\frac{x' \cos \gamma_{ij}}{z_0}\right)^2 \right]}.$$

Оператор  $A_5$  описывает преобразование сигнала в радиометрическом канале. Выходной сигнал может быть представлен в виде смеси

$$T_p(t) = A_5(T_A(t), n_{ш}(t)), \quad (8)$$

где составляющая  $n_{ш}(t)$  описывает шумовую компоненту, зависящую как от уровня собственного шума канала, так и от мощности входного сигнала.

В случае использования в качестве интегратора фильтра нижних частот в виде RC - цепочки с импульсной переходной характеристикой

$g(t) = \tau^{-1} \exp(-\tau^{-1}t)$ , ( $\tau$  - постоянная времени фильтра) оператор имеет вид

$$T_p(t) = \tau^{-1} \int_{t-3\tau}^t T_A(\eta) \exp[-\tau^{-1}(t-\eta)] d\eta + n_{ш}(t), \quad (9)$$

где  $n_{ш}(t)$  - нормальный случайный стационарный процесс со среднеквадратическим отклонением  $\sigma_p = k_p(2\Delta f\tau)^{-1/2} T_{ш}$ ;  $T_{ш}$  - эквивалентная шумовая температура РМ канала;  $\Delta f$  - полоса пропускания высокочастотного тракта РМ;  $k_p$  - коэффициент, зависящий от типа радиометра, равный 1...2 [4].

Назначение оператора  $A_6$  состоит в фиксации выходного сигнала канала в момент времени  $t = t_k$ :

$$T_p(t_k) = A_6(T_p(t)). \quad (10)$$

Таким образом, в статье предпринята попытка формализованного описания прохождения радиосигнала по одному из каналов РМ КЭСН. Обобщение процедуры описания на все каналы многоканальной РМ КЭСН позволит промоделировать процесс формирования РМИ в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Корреляционно - экстремальные системы. Вып. 8 / Под ред. В.П. Тарасенко. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. - 134 с.*
2. *Ржевкин В.А. Автономная навигация по картам местности // Зарубежная радиоэлектроника. - 1981. - №10. - С. 3 - 28.*
3. *Борисов Ю.П. Математическое моделирование радиосистем. - М.: Сов. радио, 1976. - 296 с.*
4. *Есеккина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. - М.: Наука, 1973. - 416 с.*

Поступила 05.02.2002

**АНТЮФЕЕВ Валерий Иванович**, доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1969 году окончил ХГУ. Область научных интересов - системы навигации летательных аппаратов, цифровая обработка изображений.

**БЫКОВ Виктор Николаевич**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, начальник НИО научного центра при ХВУ. В 1971 году окончил ХВКИУ. Область научных интересов - системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений.

**ВИЛЬЧИНСКИЙ Александр Станиславович**, зам. нач. НИУ научного центра при ХВУ. В 1978 году окончил ХВВКУ. Область научных интересов - системы навигации летательных аппаратов, восстановление изображений.

**ПРИЛЕПСКИЙ Евгений Дмитриевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой ХВУ. В 1967 году окончил ХГУ. Область научных интересов - цифровая обработка изображений, пространственная фильтрация сигналов.