

УДК 621.396

**В.К. ВОЛОСЮК, А.В. КСЕНДЗУК, Р.П. ВОЛОЩУК***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЛЕКЦИИ ЦЕЛЕЙ  
В БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ  
С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

Методом пространственных частот проведен общий анализ пространственной селекции объектов бистатическими системами с синтезированием апертуры антенны (РСА) авиационного и космического базирования. Показано, что выходной сигнал оптимальной системы обработки определяется спектром пространственных частот траекторного сигнала, формируемого вследствие движения элементов бистатической РСА относительно объекта наблюдения, и линейная разрешающая способность зависит от ширины спектра этого сигнала.

**бистатическая РСА, разрешающая способность, обработка сигналов, пространственная частота, селекция целей, спектр пространственных частот, траектория**

**Введение**

За последние годы вопросам построения многопозиционных радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны (МПРСА) авиационного и космического базирования уделяется значительное внимание [1 – 3]. Повышенный интерес объясняется рядом очень важных преимуществ многопозиционной локации перед однопозиционной, слабо использующей пространственную когерентность радиосигналов [4]: появляются новые возможности селекции целей, повышается качество и информативность изображений, скрытность работы приемных позиций, надежность и гибкость выполняемых задач.

При анализе селективных свойств многопозиционную систему обычно рассматривают как совокупность бистатических (двухпозиционных) приемопередающих пар. В зависимости от необходимости решения той или иной задачи МПРСА может изменять свою пространственную/сигнальную конфигурацию для обеспечения тех или иных режимов работы или для обеспечения требуемых качественных показателей оценки электрофизических параметров поверхности [5].

**Формулирование проблемы.** Ключевой характеристикой селективности любой радиолокационной системы является ее пространственное разрешение. В настоящее время существуют различные подходы к анализу разрешающей способности РСА. Свойства этих станций можно рассматривать с позиции теории информации, используя методы оптимальной обработки принятых сигналов с учетом априорных сведений об относительном перемещении РЛС и цели или на основе теории антенных систем. Применительно к моностатическим станциям обзора земной поверхности широкое применение нашел метод пространственных частот, обладающий большой физической наглядностью и относительной простотой расчетов [6].

**Целью данной работы** является рассмотрение общих закономерностей обработки сигналов и пространственной селекции целей при наблюдении земной поверхности с помощью бистатической РСА методом пространственных частот.

**Решение проблемы**

Без нарушения общности рассмотрения и для упрощения расчетов будем полагать, что передатчик

(transmitter) излучает зондирующий сигнал в направлении цели, находящейся в начале координат  $\vec{r}(0,0,0)$ , а приемник (receiver) осуществляет оптимальную обработку траекторного сигнала цели (рис. 1).

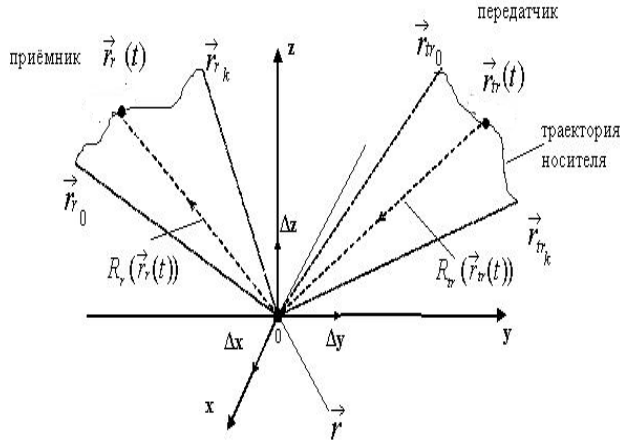


Рис. 1. Геометрия расположения и траектории движения элементов бистатической РСА

Сигнал на выходе системы оптимальной обработки (в данном случае является пространственной функцией неопределенности) может быть записан в виде:

$$\dot{U}_{\text{вых}}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \int_0^T \dot{s} \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} \right) \cdot \dot{s}^* \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} + \Delta \vec{r} \right) dt, \quad (1)$$

где  $\dot{s} \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} \right) = \dot{S} \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} \right) \cdot \exp jk \left\{ R_{\Sigma} \left( \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} \right) \right\}$  – траекторный единичный сигнал;  $\dot{S} \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} \right)$  – комплексная огибающая единичного сигнала;  $R_{\Sigma} \left( \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} \right) = R_{tr} \left( \vec{r}_{tr}(t), \vec{r} \right) + R_r \left( \vec{r}_r(t), \vec{r} \right)$  – суммарное расстояние передатчик-точка поверхности-приемник;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$$\dot{s}^* \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} + \Delta \vec{r} \right) =$$

$\dot{S}^* \left( t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} + \Delta \vec{r} \right) \cdot e^{jk \left\{ -R_{\Sigma} \left( \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \vec{r} + \Delta \vec{r} \right) \right\}}$  – опорный сигнал приемника, комплексно сопряженный принятому сигналу.

Допустим, приемник и передатчик системы находятся в дальней зоне относительно цели, траектории носителей выбраны так, что не требуется фокусировки при обработке сигнала. Разложим в ряд Тейлора суммарное расстояние в области малых значений  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  и ограничимся линейными членами. Тогда *фазовая функция* (выражение под экспонентой в (1)):

$$f(t, \vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), \Delta \vec{r}) = \frac{\vec{r}_{tr}(t) \cdot \Delta \vec{r}}{R_{tr} \left( \vec{r}_{tr}(t) \right)} + \frac{\vec{r}_r(t) \cdot \Delta \vec{r}}{R_r \left( \vec{r}_r(t) \right)} = f_{tr}(t, \vec{r}_{tr}(t), \Delta \vec{r}) + f_r(t, \vec{r}_r(t), \Delta \vec{r}). \quad (2)$$

Не теряя общности рассмотрения, допустим, что основное движение передатчика и приемника осуществляется в направлении  $x$  и сделаем замены:

$$\begin{aligned} x_{tr}(t) \cdot R_r \left( \vec{r}_r(t) \right) + x_r(t) \cdot R_{tr} \left( \vec{r}_{tr}(t) \right) &= x(t); \\ y_{tr}(t) \cdot R_r \left( \vec{r}_r(t) \right) + y_r(t) \cdot R_{tr} \left( \vec{r}_{tr}(t) \right) &= y(t); \\ z_{tr}(t) \cdot R_r \left( \vec{r}_r(t) \right) + z_r(t) \cdot R_{tr} \left( \vec{r}_{tr}(t) \right) &= z(t). \end{aligned}$$

При условии монотонности функции  $x(t)$  введем обратную функцию  $t=x(t)$ . Тогда  $y(t)=y[x(t)]=y_1(x)$ ,  $z(t)=z[x(t)]=z_1(x)$  и выходной сигнал оптимальной системы запишем так:

$$\dot{U}_{\text{вых}}(\Delta \vec{r}) = \int_0^T G(x) \cdot \dot{S}(x) \cdot \dot{S}^*(x) \cdot \exp \left\{ \frac{x \cdot \Delta x + y_1(x) \cdot \Delta y + z_1(x) \cdot \Delta z}{R_{tr}(x_{tr}) \cdot R_r(x_r)} \right\} \cdot t'(x) dx. \quad (3)$$

Обычно область пересечения диаграмм направленности передатчика и приемника  $G(x)$  и произведение огибающих опорного сигнала и отраженного сигнала – медленно меняющиеся функции по сравнению с фазовой функцией в области малых значе-

ний  $\Delta \vec{r}$ . Тогда свойства выходного сигнала определяются поведением фазовой функции (2).

Рассмотрим более простой случай, когда фазовая функция в выражении (3) монотонна. Данное условие накладывает некоторые ограничения на вид траекторий передатчика и приемника, но для начального анализа они оправданы. Введем обозначения для фазовой функции:  $f(x)=\xi$ ,  $f(x_0)=\xi_0$ ,  $f(x_k)=\xi_k$  и  $x=F(\xi)$  и определим пространственную частоту выходного сигнала бистатической РСА:

$$\omega_x = k \cdot \xi = k \frac{x \cdot \Delta x + y_1(x) \cdot \Delta y + z_1(x) \cdot \Delta z}{R_{tr}(x_{tr}) \cdot R_r(x_r)}. \quad (4)$$

В соответствии с допущениями выходной сигнал будет иметь вид:

$$U_{вых}(\Delta \vec{r}) = \int_{\xi_0}^{\xi_k} \frac{G^2[F(\xi)] \cdot S[F(\xi)] \cdot S^*[F(\xi)] \cdot t'[F(\xi)]}{f'[F(\xi)]} \cdot \exp(jk\xi) d\xi. \quad (5)$$

Выражение (5) можно переписать в виде преобразования Фурье:

$$U_{вых}(\Delta \vec{r}) = \int_{\omega_{x \min}}^{\omega_{x \max}} H(\omega_x) \cdot \exp(j\omega_x) d\omega_x, \quad (6)$$

где  $H(\omega_x) = \frac{G^2(\omega_x) \cdot S(\omega_x) \cdot S^*(\omega_x) \cdot t'(\omega_x)}{f'(\omega_x)}$  –

спектр пространственных частот выходного сигнала, ограниченный частотами  $\omega_{\min x}$  и  $\omega_{\max x}$ . Индекс  $x$  означает интегрирование по пространственным частотам по соответствующей оси. В дальнейшем рассмотрим действительный спектр  $\text{Re}(H(\omega))$ . Для оптимальной линейной системы спектр выходного сигнала определяется квадратом модуля спектра входного сигнала

$$H_{вых}(\omega) = \dot{H}_{ex}(\omega) \cdot \dot{H}_{ex}^*(\omega) = \left| \dot{H}_{ex}(\omega) \right|^2 [1].$$

Таким образом, выходной эффект оптимальной системы можно определить по спектру пространственных частот входного траекторного сигнала

(рис. 2), формируемого в приемнике при движении элементов бистатической РСА относительно цели.

При этом

$$\left| \dot{H}_{ex}(\omega_x) \right|^2 = \frac{G^2(\omega_x) \cdot S(\omega_x) \cdot S^*(\omega_x) \cdot t'(\omega_x)}{f'(\omega_x)} \quad (7)$$

характеризует форму спектральной характеристики траекторного сигнала, а выражение

$$\Delta \omega_x = k[f(x_k) - f(x_0)] \quad (8)$$

представляет ширину его спектра в направлении  $x$ .

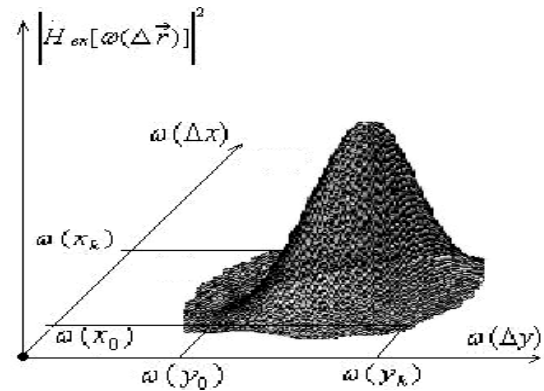


Рис. 2. Спектр пространственных частот траекторного сигнала в плоскости X0Y

Далее распространим результаты для траекторий общего вида и, не теряя общности, запишем выходной сигнал оптимальной системы и ширину спектра пространственных частот траекторного сигнала:

$$U_{вых}(\Delta \vec{r}) = \int_{\omega_{x \min}}^{\omega_{x \max}} \int_{\omega_{y \min}}^{\omega_{y \max}} \int_{\omega_{z \min}}^{\omega_{z \max}} \left| \dot{H}_{ex}[\omega(\Delta \vec{r})] \right|^2 \cdot \exp(j\omega(\Delta \vec{r})) d\omega_z d\omega_y d\omega_x; \quad (9)$$

$$\Delta \omega(\Delta \vec{r}) = k \left[ f(\vec{r}_k) - f(\vec{r}_0) \right]. \quad (10)$$

В случае, если фазовая функция  $f(x)$  немонотонна вследствие различного характера движения носителей бистатической РСА, ее можно разбить на участки где она остается монотонной. Тогда выходной сигнал (6) будет определяться выражением:

$$U_{вых}(\Delta \vec{r}) = \int_{\omega_0}^{\omega_1} H(\omega_x) \cdot \exp(j\omega_x) d\omega_x +$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{\omega_{1x}}^{\omega_{2x}} H(\omega_x) \cdot \exp(j\omega_x) d\omega_x + \\
 & + \int_{\omega_{2x}}^{\omega_{kx}} H(\omega_x) \cdot \exp(j\omega_x) d\omega_x .
 \end{aligned} \quad (11)$$

А ширина спектра пространственных частот будет определяться разницей между максимальной и минимальной частотой траекторного сигнала в соответствующем направлении. Наличие перекрывающихся частот изменит в основном амплитуду выходного сигнала (11) (рис. 3).

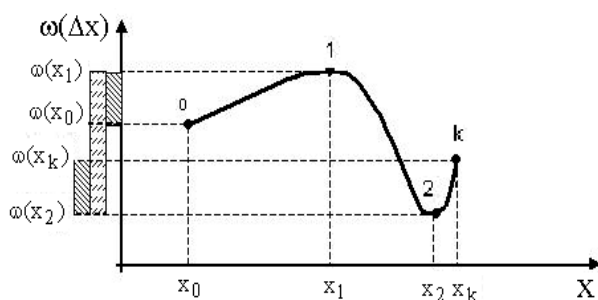


Рис. 3. Спектр пространственных частот бистатической РСА в направлении  $x$  в случае немонотонности фазовой функции  $f(x)$

### Заключение

Таким образом, сущность оптимальной обработки траекторного сигнала состоит в обратном преобразовании Фурье (9) спектральной характеристики (7) пространственных частот (рис. 2), формируемых вследствие движения приемника и передатчика относительно объекта наблюдения. Форма спектра (7) мало влияет на ширину выходного сигнала, и линейная разрешающая способность в направлении  $x$ ,  $y$  или  $z$  бистатической РСА будет, в основном, определяться шириной спектра в соответствующем направлении.

Различному положению в пространстве элементов бистатической РСА соответствует своя пространственная частота.

Проведенный анализ может быть полезен для исследования разрешающей способности и оценки вида траектории перемещения передатчика и приемника в пространстве относительно объекта наблюдения на селективные свойства бистатической РСА.

### Литература

1. Волосюк В.К., Ксендзук А.В., Евсеев И.А. Анализ возможностей многопозиционных РСА и комплексирование измерений // Вестник Харьковского университета. – Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2004. – № 646. – С.121-129.
2. Волосюк В.К., Ксендзук А.В., Евсеев И.А. Многопозиционная РЛС с синтезированной апертурой // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2003. – № 4. – С. 74-78.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 264 с.
4. Кондратьев В.С. и др. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
5. Евсеев И.А. Основные геометрические соотношения в многопозиционных радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 1. – С. 60-66.
6. Реутов А.П., Михайлов Б.А., Кондратенков Г.С., Бойко Б.В. Радиолокационные станции бокового обзора / Под ред. А.П. Реутова. – М.: Сов. радио, 1970. – 360 с.

Поступила в редакцию 2.10.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Э.Н. Хомяков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.