

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).

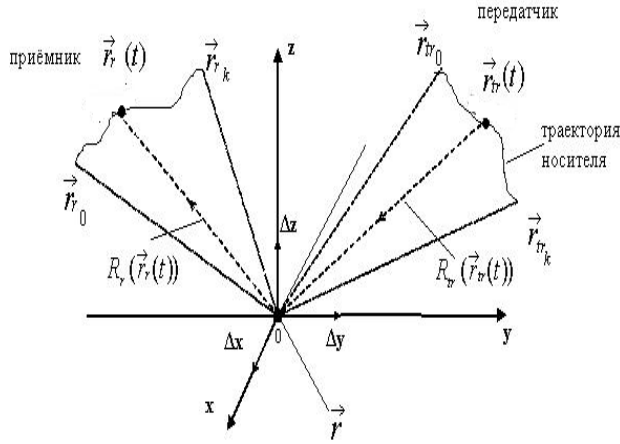


Рис. 1. Геометрия расположения и траектории движения элементов бистатической РСА

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 .

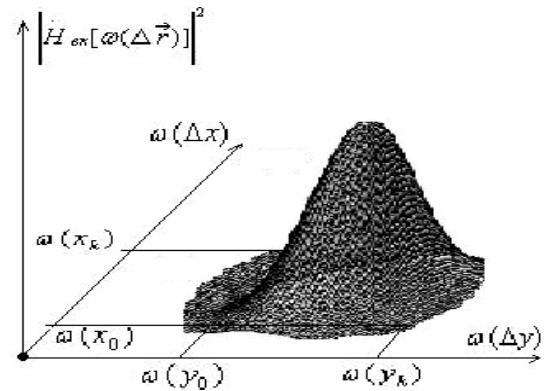


Рис. 2. Спектр пространственных частот траекторного сигнала в плоскости X0Y

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).

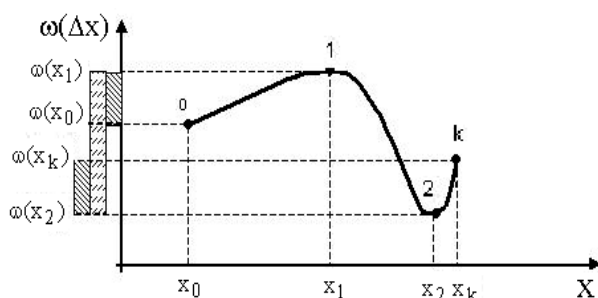


Рис. 3. Спектр пространственных частот бистатической РСА в направлении x в случае немонотонности фазовой функции $f(x)$

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.