УДК 621.396

Р.П. ВОЛОЩУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ БИСТАТИЧЕСКИХ РЛС С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

Приводится новый метод анализа бистатических систем с синтезированием апертуры антенны (РСА), основанный на вычислении ширины пространственного спектра частот отраженного от объекта сигнала и, как следствие, определении пространственной ориентации и ширины функции неопределенности по различным направлениям селекции. Определены основные задачи оптимизации по пространственным частотам. Предложены критерии оптимизации бистатических и многопозиционных РСА.

бистатическая РСА, разрешающая способность, оптимизация, критерий, ширина спектра пространственных частот, траектория, функция неопределенности

Введение

В настоящее время для решения разнообразных задач дистанционного зондирования является актуальным проектирование многопозиционных РСА. Двухпозиционная система зондирования является неотъемлемой частью многопозиционной и определяет её основные характеристики пространственной селекции. Благодаря более эффективному и полному использованию пространственно-частотной информации, получаемой при взаимном пространственном положении и движении позиций (платформ) МПРСА относительно цели, удается значительно повысить оперативность, эффективность и точность решения требуемых задач. Но при этом повышается вычислительная и техническая сложность, что является одним из недостатков МПРСА. Так для создания высокореконфигурируемой комбинации пунктов излучения и приёма, способной решать поставленные задачи, необходимо затратить значительные вычислительные возможности, связанные с анализом пространственных функций неопределённости по различным бистатическим парам. В работе [1] предложен новый метод анализа разрешающей способности и приведён пример оптимизации области обзора МПРСА, основанный на вычислении градиентов к полям равных дельта-запаздываний и тау-запаздываний. В данной работе приводится альтернативный метод анализа разрешающей способности, обладающий простотой и наглядностью вычислений.

Постановка задачи. Положения передатчика и приемника БРСА в пространстве в любой момент времени будет характеризоваться в прямоугольной системе координат XYZ вектором

$$\vec{p}(t) = \left[\vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t)\right]$$

(рассмотрим движение по произвольным траекториям). Объект облучения поместим в центр системы координат (рис. 1). Передатчик излучает в направлении цели импульсный зондирующий сигнал. Приемник осуществляет оптимальную обработку отраженного сигнала на интервале синтезирования Тс. Допустим, точечная цель имеет комплексный коэффициент отражения равный единице, тогда выходной эффект (функция неопределённости) запишем в виде:

$$\dot{\Psi}(\Delta\vec{r}) = \int_0^{Tc} \dot{s}\left(t, \vec{p}(t), 0\right) \cdot \dot{s}^*\left(t, \vec{p}(t), \Delta\vec{r}\right) dt, \qquad (1)$$

где $\dot{s}\left(t, \vec{p}(t), 0\right) = \dot{S}\left(t, \vec{p}(t), 0\right) \cdot \exp jk\left\{R_\Sigma\left(\vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t), 0\right)\right\}$ – траекторный единичный сигнал (сигнал, отраженный от точки с координатами (0,0,0)), $\dot{S}\left(t, \vec{p}(t), 0\right)$ – комплексная огибающая единичного сигнала (включающая модуляцию диаграммой направленности),

$R_{\Sigma}\left(\vec{r}_{tr}(t),\vec{r}_{r}(t)\right)=R_{tr}\left(\vec{r}_{tr}(t)\right)+R_{r}\left(\vec{r}_{r}(t)\right)$ – суммарное расстояние: передатчик – точка поверхности – приёмник;

$k=2\pi/\lambda$ – волновое число;

$\dot{s}^{*}\left(t,\ \vec{p}(t),\Delta\vec{r}\right)=\dot{S}^{*}\left(t,\vec{p}(t),\ \Delta\vec{r}\right)\times \times\exp jk\left\{-R_{\Sigma}\left(\vec{r}_{tr}(t),\vec{r}_{r}(t),\Delta\vec{r}\right)\right\}$ – опорный сигнал приёмника, комплексно сопряжённый принятому сигналу.

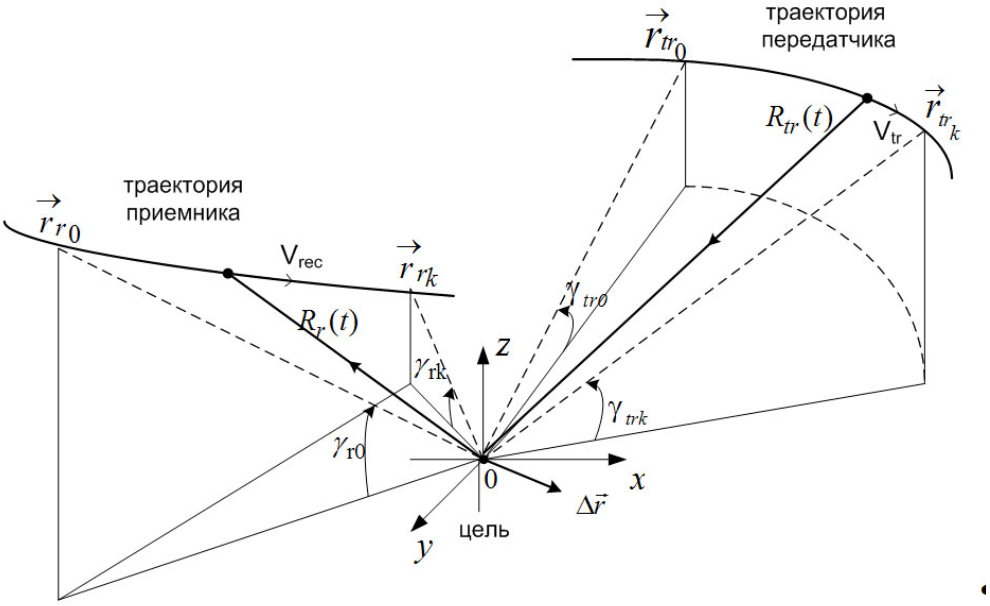

Рис. 1. Геометрия задачи

Цель работы: разработать новый метод анализа и оптимизации биститачеcкой РСА, определить критерии оптимизации.

Решение задачи

Таким образом, БРСА обладает селекцией во всех направлениях в пространстве. Степень селекции (разрешающая способность) определяется длиной вектора $\Delta\vec{r}$, при которой уровень выходного сигнала (1) падает до 0,7. В дальнейшем будем полагать, что расстояния от носителей до цели на много превышают значения компонент вектора $\Delta\vec{r}=(\Delta x,\Delta y,\Delta z)$. Выражение под экспонентой в (1) назовём фазовой функцией. Разложим фазовую функцию в ряд в окрестности точки $\Delta\vec{r}$ и ограничимся линейными членами. Т.е. допустим, что оптимальная система обработки согласована по степеням фазовой функции большим 2 или приемник и передатчик находятся в дальней зоне. Рассмотрим разрешающую способность в плоскости X0Y ($\Delta z=0$).

$$f(\vec{r}_{tr}(t),\vec{r}_{r}(t),\Delta\vec{r})=k\big[R_{tr}(\vec{r}_{tr}(t),0)-$$
$$-R_{tr}(\vec{r}_{tr}(t),\Delta\vec{r})+R_{r}(\vec{r}_{r}(t),0)-R_{tr}(\vec{r}_{tr}(t),\Delta\vec{r})\big]\approx$$
$$\approx k\left[\frac{x_{tr}(t)\cdot\Delta x}{R_{tr}(\vec{r}_{tr}(t),0)}+\frac{y_{tr}(t)\cdot\Delta y}{R_{tr}(\vec{r}_{tr}(t),0)}+\right. \tag{2}$$
$$\left.+\frac{x_{r}(t)\cdot\Delta x}{R_{r}(\vec{r}_{r}(t),0)}+\frac{y_{r}(t)\cdot\Delta y}{R_{r}(\vec{r}_{r}(t),0)}\right]=f_{tr}(t)+f_{r}(t).$$

Тогда операцию оптимальной обработки отраженных сигналов можно рассматривать как преобразование Фурье от пространственного спектра частот [2, 3]:

$$\dot{\Psi}(\Delta\vec{r})=\int\limits_{f_{x\min}}^{f_{x\max}}\int\limits_{f_{y\min}}^{f_{y\max}}\left|\dot{H}[f(\Delta\vec{r})]\right|^{2}\times$$
$$\times\exp(j\cdot f(\Delta\vec{r}))\,d\omega_{y}d\omega_{x}, \tag{3}$$

где $\left|\dot{H}[f(\Delta\vec{r})]\right|^{2}$ – квадрат модуля пространственного спектра, ограниченного частотами $f_{x\min}\cdots f_{x\max}$, $f_{y\min}\cdots f_{y\max}$.

В случае, когда в выражении для суммарного расстояния нельзя пренебрегать членами выше линейного, оптимальная обработка сводится к более сложным преобразованиям.

Выражение (3) можно рассматривать с точки зрения общей теории спектрального анализа. Здесь интегрирование производится по пространственным частотам, результат которого – двумерная функция пространственных координат $\dot{\Psi}(\Delta x, \Delta y)$, модуль которой и определяет селективные свойства системы. При этом ширина выходной функции (разрешающая способность) будет зависеть от ширины пространственного спектра $\left|\dot{H}[f(\Delta \vec{r})]\right|$, форма которого в основном определяет форму функции неопределённости (уровень боковых лепестков) [2].

Таким образом, разрешающая способность бистатической РСА будет зависеть от ширины пространственного спектра частот, формирующегося вследствие движения передатчика и приёмника относительно объекта наблюдения (доплеровского спектра) (4), и от ширины спектра зондирующего сигнала и модуляции диаграммой направленности.

$$\delta\rho(\Delta\vec{r}) = \frac{2\pi}{\Delta f(\Delta\vec{r})} \tag{4}$$

где $\Delta f(\Delta\vec{r}) = \left|f_{\max}(\Delta\vec{r}) - f_{\min}(\Delta\vec{r})\right|$ – ширина спектра частот в координатах $\Delta\vec{r} = (\Delta x, \Delta y)$.

В случае монотонности фазовой функции (2) ширину спектра можно определять как модуль разности её значений в начальный и конечный моменты синтезирования.

$$\begin{aligned}\Delta f(\Delta\vec{r}) &= \left|f(\vec{r}_{tr_k}, \vec{r}_{r_k}, \Delta\vec{r}) - f(\vec{r}_{tr_0}, \vec{r}_{r_0}, \Delta\vec{r})\right| = \\ &= \left|f_k(\Delta\vec{r}) - f_0(\Delta\vec{r})\right|.\end{aligned} \tag{5}$$

Представим элемент разрешения в полярных координатах $\Delta x = \rho\cdot\cos\alpha$, $\Delta y = \rho\cdot\sin\alpha$, а значения фазовой функции заменим тригонометрическими функциями от углов, определяющих положение носителей в пространстве относительно цели (рис. 1, 2).

$$\begin{aligned}f(\rho,\alpha,t) &= \rho\cdot k\left\{\cos\gamma_{tr}(t)\sin\left[\beta_{tr}(t)+\alpha\right]+\right.\\ &\left.+\cos\gamma_r(t)\sin\left[\beta_r(t)+\alpha\right]\right\} = f_{tr}(\rho,\alpha,t) + f_r(\rho,\alpha,t);\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\Delta f(\rho,\alpha) = \rho\cdot k\left|\cos\gamma_{tr_k}\sin\left(\beta_{tr_k}+\alpha\right)-\right.\\ -\cos\gamma_{tr_0}\sin\left(\beta_{tr_0}+\alpha\right)+\cos\gamma_{r_k}\sin\left(\beta_{r_k}+\alpha\right)-\\ \left.-\cos\gamma_{r_0}\sin\left(\beta_{r_0}+\alpha\right)\right|;\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\Delta f(\rho,\alpha) = \rho\cdot k\left|2\cos\gamma_{tr0}\sin\frac{\Delta\beta_{tr}}{2}\cos(\alpha+\beta_{tr\,н})-\right.\\ -\sin(\alpha+\beta_{trk})\cdot\left(\sin\gamma_{tr0}\sin\Delta\gamma_{tr}+\cos\gamma_{tr0}\cdot\frac{\Delta\gamma_{tr}^2}{2}\right)+\\ +2\cos\gamma_{r0}\sin\frac{\Delta\beta_r}{2}\cos(\alpha+\beta_{r\,н})-\\ \left.-\sin(\alpha+\beta_{rk})\cdot\left(\sin\gamma_{r0}\sin\Delta\gamma_r+\cos\gamma_{r0}\cdot\frac{\Delta\gamma_r^2}{2}\right)\right|,\end{aligned} \tag{8}$$

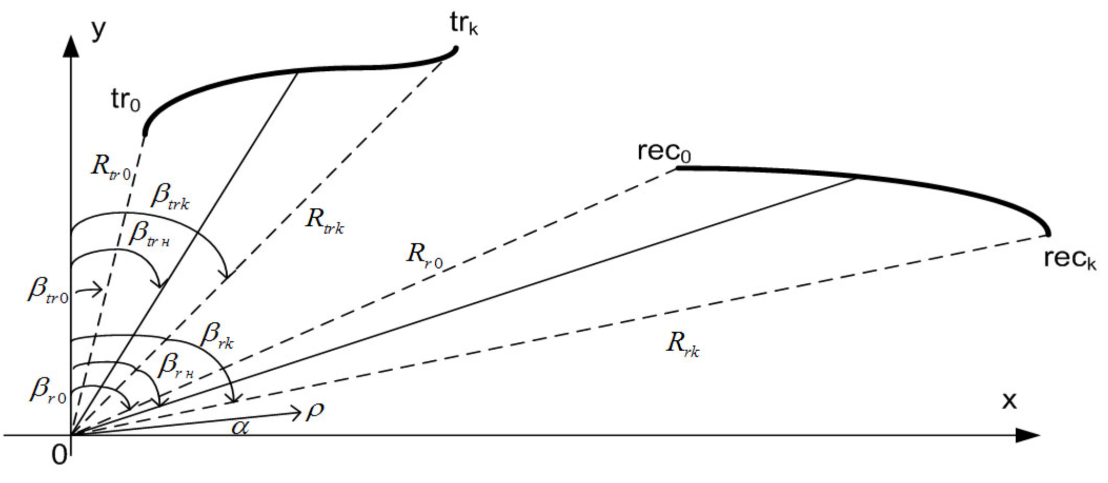

Рис. 2. Проекции траекторий на плоскость XOY

где $\Delta\gamma_{tr} = \gamma_{trk} - \gamma_{tr0}$, $\Delta\gamma_r = \gamma_{rk} - \gamma_{r0}$ – разница между углами возвышения носителей в начальный и конечный моменты синтезирования;

$\Delta\beta_{tr} = \beta_{trk} - \beta_{tr0}$, $\Delta\beta_r = \beta_{rk} - \beta_{r0}$ – угловые размеры траекторий;

$\beta_{tr_н}$, $\beta_{r_н}$ – углы наблюдения передатчика и приёмника, они определяются как направления между объектом наблюдения и точкой на траектории, соответствующей половине интервала синтезирования.

Исходя из условия прямолинейного равномерного движения носителей, углы наблюдения делят траектории передатчика и приемника пополам.

При выводе формулы (8) полагалось, что за время синтезирования значения $\Delta\gamma_{tr}$ и $\Delta\gamma_r$ изменяются незначительно и прямолинейно.

Представление фазовой функции в виде тригонометрических функций позволяет наглядно определить потенциальные возможности бистатической РСА и условия, при которых их можно получить. Например, наилучшее разрешение $\lambda/2$ получается при движении носителей по замкнутым круговым траекториям [4].

Используя формулу (4), можно определить разрешение в любом необходимом направлении α. Особый интерес представляют направления наиболее медленного и наиболее быстрого возрастания фазовой функции (6) – её экстремумы и точки перегиба, где будем наблюдать наихудшую и наилучшую разрешающую способность. В этих направлениях ширина пространственного спектра (8) будет иметь наименьшее и наибольшее значение соответственно.

Чтобы найти направления наилучшего разрешения α_{grad}, необходимо решить уравнение (10):

$$\delta\rho_{\min} = \frac{2\pi}{\Delta f_{\max}(\rho, \alpha_{grad})}, \qquad (9)$$

$$F(\alpha_{grad}) = \frac{\partial(\Delta f(\alpha))}{\partial\alpha} = 0. \qquad (10)$$

Проводя аналогию с методом градиентной оптимизации, можно отметить, что направления наилучшего разрешения соответствуют градиентам к полям равных дельта запаздываний.

Направления наихудшего и наилучшего разрешения, определённого по формуле (10), перпендикулярны.

$$\delta\rho_{\max} = \frac{2\pi}{\Delta f_{\min}\left[\rho, \alpha_{grad} + \frac{\pi}{2}\right]}. \qquad (11)$$

Разрешающую способность, обусловленную шириной спектра огибающей зондирующего сигнала (по дальности), определим на плоскости XOY (рис. 3). Рассмотрим прямоугольный импульсный сигнал с длительностью импульса $\tau_и$ (в пространстве $\Delta r = c\tau_и$), который имеет функцию неопределенности в виде треугольника:

$$\Psi_{зонд}(\alpha) = 1 - \frac{|\Delta R_н(\alpha)|}{\Delta r} \text{ при } |\Delta R_н(\alpha)| \le \Delta r;$$

$$\Psi_{зонд}(\alpha) = 0 \text{ при } |\Delta R_н(\alpha)| > \Delta r, \qquad (12)$$

где $R_{н\Sigma}(\alpha) = \cos\gamma_{tr_н} \cdot \sin(\alpha + \beta_{tr_н}) + \cos\gamma_{r_н} \cdot \sin(\alpha + \beta_{r_н})$ – разность расстояний от точки с координатами (0,0,0) и (ρcosα, ρsinα, 0), разложенная в ряд в момент времени, соответствующий направлению наблюдения.

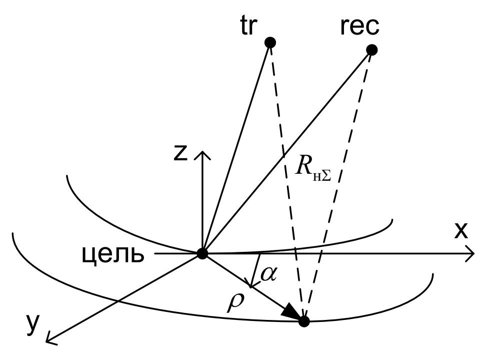

Рис. 3. Определение разрешения по времени задержки огибающей сигнала

Разрешающая способность в направлении α, обусловленная шириной спектра огибающей зондирующего сигнала, будет определяться длиной вектора ρ, при котором выходной сигнал (12) падает до уровня 0,7, т.е.:

$$\delta\rho_{\tau}(\alpha)=\frac{\Delta r-0{,}7\Delta r}{\left|\Delta R_{н}(\alpha)\right|}. \quad (13)$$

Можно определить направление α, где разрешающая способность наилучшая и наихудшая:

$$\delta\rho_{\tau\,\min}=\frac{0{,}3\Delta r}{\left|\Delta R_{н}\,(\alpha_{grad})\right|}; \quad (14)$$

$$F_{\tau}(\alpha_{grad})=\frac{\partial R_{н\Sigma}(\alpha)}{\partial\alpha}=0. \quad (15)$$

Градиенты к линиям равных тау-запаздываний соответствуют направлениям α_{grad}, где разрешающая способность по времени задержки принимает наименьшее значение (15). Направления наихудшего и наилучшего разрешения по времени задержки огибающей также перпендикулярны:

$$\delta\rho_{\tau\,\max}=\frac{0{,}3\Delta r}{\left|\Delta R_{н}\left(\alpha_{grad}+\dfrac{\pi}{2}\right)\right|}. \quad (16)$$

Таким образом, выражения (13), (4) однозначно определяют разрешающую способность по времени задержки и дельта-времени задержки сигнала в любом направлении α.

Можно выделить ***две задачи пространственно-частотной оптимизации бистатической РСА***:

– оптимизация зоны обзора бистатической РСА при фиксированных траекториях;

– оптимизация траекторий передатчика и приёмника и их пространственного положения относительно цели при заданной зоне обзора.

Критерием оптимизации могут быть необходимые значения разрешающей способности в любом выбранном направлении α.

Если необходимо обеспечить наилучшее разрешение не хуже заданного (по направлению наиболее быстрого возрастания фазовой функции и/или направлению наибольшего изменения времени задержки), можно использовать следующий критерий (17) и/или (19), т.е. нужно обеспечить необходимый набег пространственной частоты (18) и/или выполнить условие (19):

$$\delta\rho_{\min}=\frac{2\pi}{\Delta f_{\max}(\alpha_{grad},\vec r_{trk},\vec r_{tr0},\vec r_{rk},\vec r_{r0},\vec r)}\le P_{задан}, \quad (17)$$

$$\Delta f_{\max}(\alpha_{grad},\vec r_{trk},\vec r_{tr0},\vec r_{rk},\vec r_{r0},\vec r)\ge\frac{2\pi}{P_{задан}},\ r\in D, \quad (18)$$

$$\delta\rho_{\tau\,\min}=\frac{0{,}3c\tau_{и}}{\left|\Delta R_{н}\,(\alpha_{grad},\vec r_{trk},\vec r_{tr0},\vec r_{rk},\vec r_{r0},\vec r)\right|}\le P_{задан}\ r\in D. \quad (19)$$

Выполнение условий (17 – 19) в относительно большой области обзора D возможно при усреднении вышеперечисленных критериев в пределах пересечения следов диаграмм направленности:

$$\int_{D}\frac{2\pi}{\Delta f_{\max}(\alpha_{grad},\vec r_{trk},\vec r_{tr0},\vec r_{rk},\vec r_{r0},\vec r)}dr\le P_{задан},$$

$$\int_{D}\frac{0{,}3c\tau_{и}}{\left|\Delta R_{н}\,(\alpha_{grad},\vec r_{trk},\vec r_{tr0},\vec r_{rk},\vec r_{r0},\vec r)\right|}dr\le P_{задан}.$$

Если необходимо одновременно обеспечить наилучшее разрешение по времени задержки и частоте Доплера (наибольшего возрастания фазовой функции), к условиям (17 – 19) можно применять операцию логического умножения:

$$\left[\frac{2\pi}{\Delta f_{\max}(\alpha_{grad})}\right]\ge P_{задан}\ \&\left[\frac{0{,}3c\tau_{и}}{\left|\Delta R_{н}\,(\alpha_{grad})\right|}\right]\ge P_{задан}. \quad (20)$$

В некоторых задачах необходимо знать угол между направлениями наиболее быстрого возрастания фазовой функции и времени задержки огибающей (для обеспечения равномерной области разрешения).

Угол между направлениями можно найти как разницу между значениями решения уравнений (10) и (15):

$$\Delta\alpha_{grad}=F(\alpha_{grad})-F_{\tau}(\alpha_{grad})\in P_0,$$

$$\int_{D}\left(F(\alpha_{grad})-F_{\tau}(\alpha_{grad})\right)dr\in P_0. \quad (21)$$

Если критериями оптимизации одновременно служит разрешение по направлению наибольшей ширины пространственного спектра и наиболее быстрого возрастания времени задержки и угол между этими направлениями, то необходимо использовать условия:

$$\begin{cases} F(\alpha_{grad}) - F_\tau(\alpha_{grad}) \in P_0; \\ \dfrac{2\pi}{\Delta f_{\max}(\alpha_{grad})} \geq P1_{задан}; \\ \dfrac{0{,}3c\tau_u}{\left|\Delta R_н(\alpha_{grad})\right|} \geq P2_{задан}; \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \int\limits_D \left(F(\alpha_{grad}) - F_\tau(\alpha_{grad})\right) dr \in P_0; \\ \int\limits_D \dfrac{2\pi}{\Delta f_{\max}(\alpha_{grad})} dr \leq P_{задан}; \\ \int\limits_D \dfrac{0{,}3c\tau_u}{\left|\Delta R_н(\alpha_{grad},)\right|} dr \leq P_{задан}. \end{cases} \quad (23)$$

Необходимо отметить, что критерием оптимизации могут быть не только разрешающая способность в направлениях α_{grad}, но и в любых других направлениях α области неопределенности. Для этого нет необходимости решать уравнения (10, 15), а в формулах (9 – 23) нужно подставлять просто значения α.

При дистанционном зондировании поверхностями радиолокационными системами обычно применяются периодические последовательности импульсов. Именно такие сигналы позволяют достичь высокой разрешающей способности по дальности и азимуту одновременно. Однако, применение периодических сигналов приводит к неоднозначности измерений в РСА в дальномерной и азимутальной плоскостях. Интервалы неоднозначности находятся в противоречии: при увеличении частоты повторения импульсов, увеличивается интервал однозначности измерений по азимуту и уменьшается по дальности.

Для удовлетворения требований однозначности необходимо варьировать частоту повторения, размер реальной апертуры антенны и время синтезирования [1]. Использование периодических сигналов в РСА приводит к тому, что функция неопределенности становится повторяющейся по направлению наибольшей крутизны фазовой функции α_{grad}. В общем случае условие однозначности измерений в этом направлении обеспечивается так, чтобы на один период доплеровской частоты приходилось как минимум два периода повторения импульсов:

$$\Delta f_{\max}(\alpha_{grad}) \leq \frac{1}{2 \cdot T_n}. \quad (24)$$

Предварительно для расчета минимальных размеров реальной апертуры приемной антенны в направлении движения L можно использовать оценочную формулу $L \geq \left(|V_{tr}| + |V_r|\right) \cdot T_n$, где $|V_{tr}|$, $|V_r|$ – модуль вектора скорости передатчика и приемника [1].

Неоднозначность измерения времени задержки обусловлена периодическим сигналом. При этом для бистатической системы максимальный интервал однозначного измерения времени задержки отраженного сигнала, который находится в пределах одного периода повторения импульсов, определяется выражением:

$$\frac{\left|\Delta R_{н\max}(\alpha_{grad})\right| + \Delta r}{c} \leq T_n, \quad (25)$$

где $\left|\Delta R_{н\max}(\alpha_{grad})\right|/c$ – максимальное значение времени задержки в направлении наилучшего разрешения по дальности.

Отметим, что неоднозначность измерений задержки в бистатической РСА может возникнуть даже при выполнении условия (25), так как сигналы, отраженные от различных точек поверхности, могут иметь одинаковое время задержки [1].

Таким образом, обеспечить однозначность измерений задержки сигналов и частоты Доплера в бистатической системе можно путём варьирования пространственной конфигурации системы, выбора обзора, варьирования размеров апертур приемника и передатчика, скорости, времени синтеза, а также путем изменения ориентации диаграмм направленности.

Предложенный выше метод позволяет достаточно просто исследовать одну из наиболее важных характеристик селекции, разрешающую способность, без построения функций неопределенности. Позволяет оценить ориентацию функции неопределенности, не требуя достаточно объемных вычислений.

Сравнивая пространственно-частотный метод с методом градиентного анализа, можно отметить его наглядность и простоту. Для определения пространственной частоты достаточно знать угловые положения приемника и передатчика относительно цели в начальный и конечный моменты синтезирования при монотонной фазовой функции.

Выводы

Таким образом, в работе исследована геометрия бистатической системы. Особое внимание уделено траекториям движения передатчика и приемника. Введено понятие фазовой функции и пространственного спектра как функции от пространственных координат взаимного расположения передатчика, приемника и цели. Показано, что спектр пространственных частот можно выразить через угловые положения элементов системы относительно объекта наблюдения и разрешающая способность будет зависеть от ширины этого спектра. Новый метод исследования разрешающей способности бистатических систем основан на анализе структуры полезного сигнала и отличается своей наглядностью и простотой вычислений, позволяет оценить вид пространственной функции неопределённости не применяя сложных вычислений.

Необходимо отметить, что предложенный метод можно расширить на многопозиционные системы. Для этого необходимо выполнять исследования и оптимизацию по всем бистатическим парам в зависимости от задач системы.

Предложенный метод можно применять для решения задачи построения траекторных карт полёта передатчика и приемника бистатической РСА.

Литература

1. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф., Ксендзук А.В., Кутуза Б.Г. Градиентная оптимизация многопозиционных радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – №1, т.12. – С. 40-49.

2. 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.

3. Волосюк В.К., Ксендзук А.В., Волощук Р.П. Общие закономерности селекции целей в бистатической радиотехнической системе с синтезированием апертуры антенны // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 5(31). – С. 64-67.

4. Voloschuk R.P., Bogoroditskiy E.A. A potential of the bistatic SAR for aviation and space deployment // 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine. – P.309.

Поступила в редакцию 30.08.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.