

Исследование влияния нестабильностей на работу бистатической РСА

*Национальный аэрокосмический университет «ХАИ»
Харьковский университет Воздушных сил «ХУВС»*

Введение.

Требования увеличения времени наблюдения объекта, получения высокого разрешения при всеракурсном обзоре, высокой помехозащищенности и живучести системы для задач предупреждения об опасных объектах, явлениях и процессах техногенного и естественного происхождения приводят к необходимости создания многопозиционных систем аэрокосмического мониторинга земной поверхности [1].

Повышение информационных возможностей многопозиционных радиолокационных станций с синтезированием апертуры определяется результатом объединения большого количества данных, полученных отдельными бистатическими парами.

В работе [2] получен алгоритм обработки сигналов с целью обеспечения когерентного приема в условиях, когда передатчик и приемник разнесены в пространстве и движутся по различным траекториям

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{Sik}(\mathbf{r}_1) = & \int_0^T \int_D \dot{F}_{ik}[t, \mathbf{r}, \mathbf{p}(\mathbf{r})] K_{ik}(t, \mathbf{r}) \exp\{j[\varphi_{ik}^K(t, \mathbf{r}) - \varphi_{ik}^{Kd}(t)]\} \times \\ & \times G_{ik}(t, \mathbf{r}) \exp\{j[\varphi_{ik}^G(t, \mathbf{r}) - \varphi_{ik}^{Gd}(t)]\} \dot{S}_{0k}[t - \tau_{ik}(t, \mathbf{r})] \dot{S}_{0k}^*[t - \tau_{ik}(t, \mathbf{r}_1)] \times \\ & \times \exp\{-j[\omega_{0k}\tau_{ik}(t, \mathbf{r}) + \omega_{0i}\tau_{ik}(t, \mathbf{r}_1)]\} \exp\{j[\omega_{0k}\tau_{ik}^d(t) - \omega_{0i}\tau_{ik}^d(t)]\} dt d\mathbf{r}. \quad (1) \end{aligned}$$

Данный алгоритм позволяет обеспечить когерентный прием в бистатических системах с синтезированием апертуры антенны и построить комплексные радиолокационные изображения поверхности с точностью до калибровочных величин.

Постановка проблемы. Анализ литературы. Для анализа качества формирования радиолокационных изображений алгоритмом (1) целесообразно выполнить его исследование при наличии различного рода дестабилизирующих факторов – неточностей определения координат и скоростей приемника и передатчика, неконтролируемых изменений траектории носителей, ухода частоты опорных генераторов.

Особенности построения РСА, а также исследование влияния различных помех и нестабильностей (фазовых и частотных искажений сигнала, неконтролируемых изменений траектории носителя) на результат обработки в таких системах изучены достаточно хорошо [3-5], однако бистатические РСА имеют свои особенности.

Разделим время задержки в прямом и отраженном каналах приема на постоянную и переменную во времени составляющие [6]:

$$\tau_{ik}^d(t) = \tau(t, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \tau_{0ik}^d + \tau_{\Delta ik}^d(t) \cong \frac{R_{ki0}(\mathbf{r})}{c} + \frac{\Delta R_{ik}^2(t)}{c2R_{ik0}(\mathbf{r})}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\tau_{ik}(t, \mathbf{r}) &= \tau(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \tau_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) + \tau_{\Delta}(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) \cong \\ &\cong \frac{R_{i0}(\mathbf{r}) + R_{k0}(\mathbf{r})}{c} + \frac{1}{c} \left[\frac{\Delta R_i^2(t, \mathbf{r})}{2R_{i0}(\mathbf{r})} + \frac{\Delta R_k^2(t, \mathbf{r})}{2R_{k0}(\mathbf{r})} \right].\end{aligned}\quad (3)$$

Погрешность определения начальных координат передатчика/приемника $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i + \mathbf{r}'_i$, $\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_k + \mathbf{r}'_k$ приводит к изменению постоянной и переменной частей времени задержки в прямом и отраженном каналах

$$\tau_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \frac{\|\mathbf{r}_i + \mathbf{r}'_i - \mathbf{r}\| + \|\mathbf{r}_k + \mathbf{r}'_k - \mathbf{r}\|}{c}, \quad (4)$$

$$\tau_{\Delta}(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \frac{1}{c} \left[\frac{[\Delta \mathbf{r}_i(t), 0.5 \Delta \mathbf{r}_i(t) - \Delta \mathbf{r}_{i0}(\mathbf{r})]}{\|\mathbf{r}_i + \mathbf{r}'_i - \mathbf{r}\|} + \frac{[\Delta \mathbf{r}_k(t), 0.5 \Delta \mathbf{r}_k(t) - \Delta \mathbf{r}_{k0}(\mathbf{r})]}{\|\mathbf{r}_k + \mathbf{r}'_k - \mathbf{r}\|} \right], \quad (5)$$

$$\tau_0^d(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \frac{\|\mathbf{r}_i + \mathbf{r}'_i - \mathbf{r}_k - \mathbf{r}'_k\|}{c}, \quad (6)$$

$$\tau_{\Delta}^d(t, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \frac{1}{c} \left[\frac{[\Delta \mathbf{r}_{ik}^d(t), 0.5 \Delta \mathbf{r}_{ik}^d(t) - \Delta \mathbf{r}_{ik0}^d]}{\|\mathbf{r}'_i - \mathbf{r}'_k\|} \right]. \quad (7)$$

Погрешность определения скоростей (закон движения носителей на интервале синтеза апертуры принят линейным) влияет исключительно на величину $\tau_{\Delta}(t)$:

$$\tau_{\Delta}(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \frac{1}{c} \left[\frac{[\mathbf{v}'_i t, 0.5 \mathbf{v}'_i t - \Delta \mathbf{r}_{i0}(\mathbf{r})]}{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}\|} + \frac{[\mathbf{v}'_k t, 0.5 \mathbf{v}'_k t - \Delta \mathbf{r}_{k0}(\mathbf{r})]}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}\|} \right], \quad (8)$$

$$\tau_{\Delta}^d(t, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_i) = \frac{1}{c} \left[\frac{[\mathbf{v}'_{ik} t, 0.5 \mathbf{v}'_{ik} t - \Delta \mathbf{r}_{ik0}^d]}{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k\|} \right]. \quad (9)$$

Изменения величин (4-9) приводит к смещению и/или искажению пространственных функций неопределенности при синтезе апертуры. Как показывает анализ этих выражений, ошибки определения времени задержки в канале отраженного сигнала, вызванные нестабильностью траектории носителей, неточностью определения их координат и/или скоростей, оказывают на оценки комплексного коэффициента отражения такое же влияние, как и в случае однопозиционной системы. Особенность заключается в том, что в однопозиционной РСА нестабильность частоты в выражении (1) относится к одному генератору в пределах одного периода повторения зондирующего сигнала, в для случая бистатической системы – это нестабильность опорных генераторов приемника и передатчика.

Дополнительная компонента, определяющая ошибки формирования радиолокационных изображений, связана с предложенным алгоритмом когерентной обработки и определяется неточностью определения времени задержки по прямому каналу $\exp\{j[\omega_0 k \tau_{ik}^d(t) - \omega_0 i \hat{\tau}_{ik}^d(t)]\} dt$. Наиболее существенна такая ошибка в случае близкого расположения приемника и передатчика, при выполнении условия $\text{Max}\{\tau_{ik}^d(t)\} \ll \text{Max}\{\tau_{ik}(t, \mathbf{r})\}$.

Величина этой ошибки может быть уменьшена за счет слежения за временем задержки и частотой Доплера $S_{ik}^d(t, \mathbf{r}, \varphi_k)$. Точность определения этих вели-

чин в случае некогерентной обработки ЛЧМ-сигнала (при несогласованном движении приемника и передатчика прямой сигнал будет модулирован по частоте) определяется матрицей, обратной информационной матрице дисперсий ошибок:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \frac{1+4d^2}{2\mu \cdot (2\pi F_{CK})^2} & \frac{T_{\Delta}(1+4d^2)}{2\mu \cdot (2\pi T_{CK})^2 2F_m} \\ \frac{T_{\Delta}(1+4d^2)}{2\mu \cdot (2\pi T_{CK})^2 2F_m} & \frac{1+4d^2}{2\mu \cdot (2\pi T_{CK})^2} \end{pmatrix},$$

где T_{CK} – среднеквадратическая длительность сигнала; $2F_{CK}$ – среднеквадратическая ширина спектра сигнала; μ – отношение сигнал/помеха; $d = 2F_m T_{\Delta}$ – произведение эффективной длительности сигнала на максимальную частоту доплеровского сдвига.

Исследование влияния погрешностей определения пространственного положения приемника и передатчика, изменения частот опорных генераторов, а также неконтролируемых колебаний траектории выполнялось путем моделирования пространственных функций неопределенности для бистатической системы, обработка в которой ведется в соответствии с предложенным алгоритмом (1). При этом полагалось, что характер этих нестабильностей близок для передатчика и приемника.

На рис.1 показано изменение функции неопределенности бистатической системы в случае неточного определения координат приемной и передающей позиции при обработке алгоритмом (1).

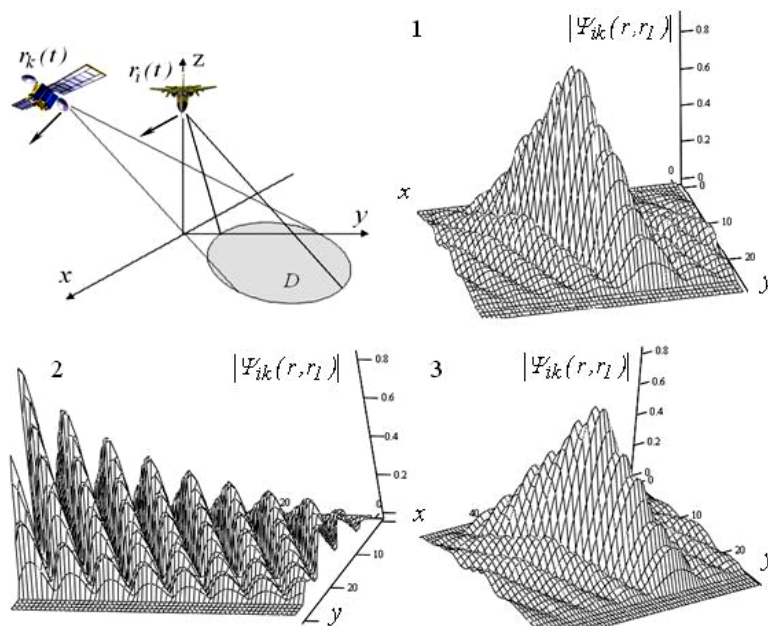


Рис.1. Пространственная конфигурация и вид ПФН бистатической РСА:

- 1 – в идеальном случае, 2 – при неточности определения координат и выполнении условия $\text{Max}\{\tau_{ik}^d(t)\} \ll \text{Max}\{\tau_{ik}(t,r)\}$,
- 3 – при неточном определении координат при $\text{Max}\{\tau_{ik}^d(t)\} \sim \text{Max}\{\tau_{ik}(t,r)\}$

Из результатов моделирования видно, что существенное влияние на поведение ПФН при «плотной» конфигурации элементов бистатической РСА оказыва-

ет ошибка в прямом канале. Для ее уменьшения при $\text{Max}\{\tau_{ik}^d(t)\} \ll \text{Max}\{\tau_{ik}(t,r)\}$ целесообразно использовать дополнительные средства определения вектора состояния и синхронизации шкал времени, например, рассмотренные в [7]. При обработке радиолокационной информации на наземных станциях возможно использование данных определения координат бистатической РСА, полученных системой траекторных измерений.

Исследование влияния неконтролируемых изменений траектории полета приемо-передающих позиций выполнялось путем аппроксимации прямолинейного движения нормальным случайным процессом с последующим вычислением соответствующих ПФН (рис.2).

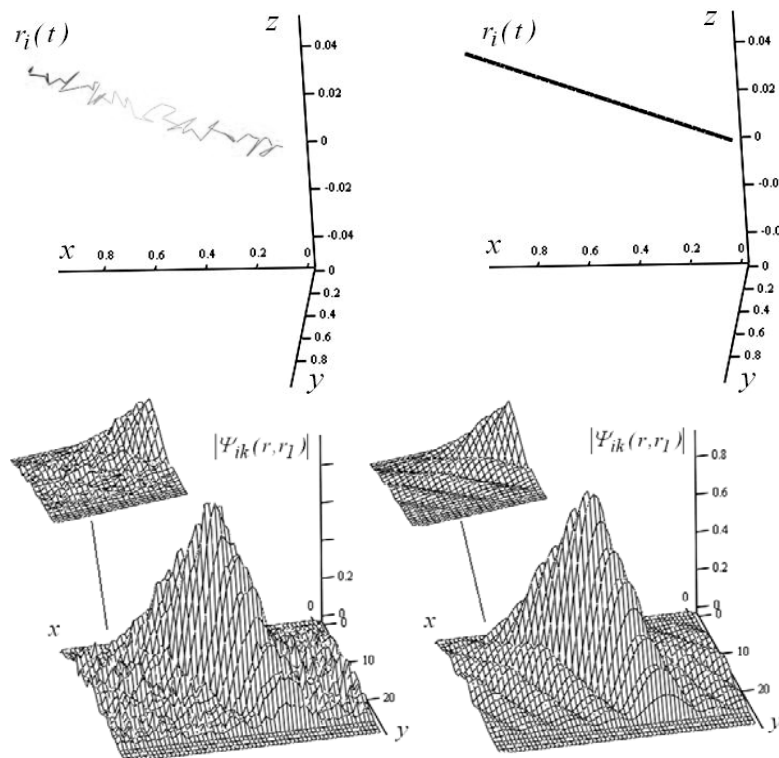


Рис.2. Вид модуля ПФН в зависимости от траектории движения носителя

На рис.3 показан вид функций неопределенности бистатической системы для случая неточного определения векторов скоростей приемной и передающей позиции.

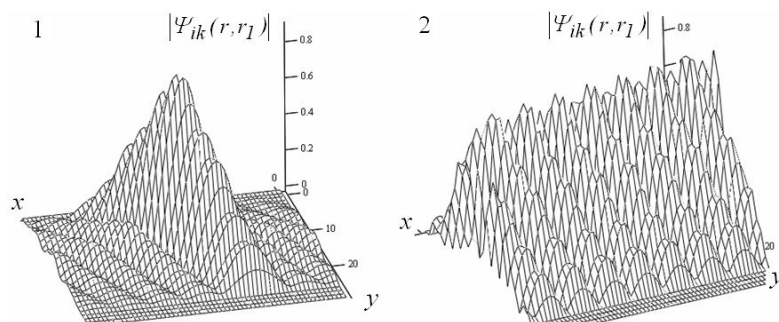


Рис.3. Вид ПФН в идеальном случае (1) и при неточном определении вектора скорости передатчика (2)

Анализ полученных результатов показывает, что ошибки определения времени задержки в канале отраженного сигнала, вызванные нестабильностью траектории носителей, неточностью определения их координат и/или скоростей оказывают на оценки комплексного коэффициента отражения такое же влияние, как и в случае однопозиционной системы.

Ошибка, определяемая неточностью определения времени задержки по прямому каналу, существенна только в случае близкого расположения приемника и передатчика, при выполнении условия $Max\{\tau_{ik}^d(t)\} \ll Max\{\tau_{ik}(t,r)\}$.

Результаты исследования работы предложенного алгоритма когерентного приема позволяют сформулировать требования к стабильности опорных генераторов, точности определения координат приемных и передающих элементов системы, точности привязки во времени для обеспечения необходимого качества формирования радиолокационных изображений в бистатических РСА.

Выводы

Исследовано влияние дестабилизирующих факторов на качество формирования РЛИ путем моделирования пространственных функций неопределенности. Показано, что ошибки определения времени задержки в канале отраженного сигнала, вызванные нестабильностью траектории носителей, неточностью определения их координат и/или скоростей оказывают на оценки комплексного коэффициента отражения такое же влияние, как и в случае однопозиционной системы. Ошибка определения времени задержки по прямому каналу существенна только в случае близкого расположения приемника и передатчика.

Список литературы

1. Волосюк В.К., Ксендзук А.В., Евсеев И.А. Анализ возможностей многопозиционных РСА и комплексирование измерений // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. – 2004. – Вип.2, № 646. – С.124-131.
2. Ксендзук А.В., Евсеев И.А. Разработка алгоритма когерентного приема сигналов с учетом пространственного разнесения приемных и передающих элементов РСА // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 29. – С. 126 – 131.
3. Радиолокационные станции обзора Земли / Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А. – М.: Радио и связь. –1983. – 272 с.
4. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Антипов В.Н. Горяинов В.Т. Кулин А.Н. и др./ Под ред. Горяинова. – М.: Радио и связь. – 1988. – 304 с.
5. Буренин Н.И. РЛС с синтезированной апертурой. - М.: Сов. радио. - 1972. - 212с.
6. Евсеев И.А. Основные геометрические соотношения в многопозиционных радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, ХАИ. – 2005. – №1 (17). – С.60-66.
7. Евсеев И.А. Временная и частотная синхронизация в двухпозиционных радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2005. – №1. – С.20-27.