

УДК 621.396

В.К. ВОЛОСЮК, Р.П. ВОЛОЩУК, Е.А. БОГОРОДИЦКИЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ БИСТАТИЧЕСКИХ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

Благодаря исследованию свойств пространственно-частотной информации, получаемой при оптимальной обработке отраженных от объекта радиолокационных сигналов, в работе определяются траектории полёта передатчика и приемника бистатической системы с синтезированием апертуры антенны (РСА), обеспечивающие наилучшие значения разрешающей способности. Представлены зависимости пространственного разрешения от угла возвышения над целью элементов бистатической системы. Результаты исследований обобщены для радиолокационных систем с синтезированием апертуры авиационного, космического и авиационно-космического базирования.

бистатическая РСА, разрешающая способность, спектр пространственных частот, траектория, функция неопределенности

Введение

Радиолокационным системам с синтезированием апертуры антенны (РСА), построенным по многопозиционной схеме (в частности двухпозиционные), в настоящее время постепенно уделяется все большее внимание в основном благодаря многим преимуществам перед однопозиционными системами. Хотя многопозиционные РСА уступают по своей сложности проектирования и обработки сигналов, но благодаря значительному прогрессу в технике, обработка информации в многопозиционной системе может осуществляться уже в реальном масштабе времени.

Формулирование проблемы. Для бистатической РСА выходной эффект оптимальной системы обработки отражённого от земной поверхности сигнала находят, применяя классический метод синтеза апертуры (в рамках метода максимального правдоподобия). При этом осуществляют корреляционную обработку отражённого сигнала с опорным сигналом приёмника для каждой точки поверхности в пределах зоны обзора РСА. Результатом обработки является оценка комплексного коэффициента рассеяния поверхности (изображение), сгла-

женная функцией неопределённости [1]. Размер области высокой корреляции (разрешающая способность или ширина функции неопределённости на уровне 0,4..0,7) определяет качество изображения. Рассмотрим сигнал, отражённый от одной точки поверхности и имеющий коэффициент рассеяния равный 1 (единичный сигнал). Тогда результатом согласованной обработки за время наблюдения T будет значение корреляционного интеграла или функция неопределённости:

$$\begin{aligned} \dot{I}(\bar{\rho}) &= \int_0^T \dot{s}(t, \bar{\rho}, \bar{p}(t)) \dot{s}^*(t, 0, \bar{p}(t)) dt = \\ &= \int_0^T \dot{A}(t, \bar{\rho}, \bar{p}(t)) \dot{A}^*(t, 0, \bar{p}(t)) * \\ & * \exp\{jk[\vec{r}_{tr}(t, \bar{\rho}) + \vec{r}_r(t, \bar{\rho}) - \vec{r}_{0tr}(t) - \vec{r}_{0r}(t)]\} dt, \quad (1) \end{aligned}$$

где

$\dot{s}(t, \bar{\rho}, \bar{p}(t)) = \dot{A}(t, \bar{\rho}, \bar{p}(t)) \exp\{jk[\vec{r}_{tr}(t, \bar{\rho}) + \vec{r}_r(t, \bar{\rho})]\} dt$ – отражённый от точечного объекта с координатами $\bar{\rho}$ траекторный сигнал;

$\dot{A}(t, \bar{\rho}, \bar{p}(t)) = \sum \Pi(t - t_z(\bar{\rho}, \bar{p}(t)))$ – огибающая траекторного сигнала, обычно последовательность прямоугольных импульсов задержанных на время

распространения зондирующего сигнала на трассе передатчик – точка поверхности – приёмник;

$\vec{p}(t) = [\vec{r}_{tr}(t), \vec{r}_r(t)]$ – вектор, определяющий положение передатчика и приёмника в прямоугольной системе координат XYZ;

$\dot{s}^*(t, 0, \vec{p}(t)) = \dot{A}^*(t, 0, \vec{p}(t)) \exp\{-jk[\vec{r}_{0tr}(t) + \vec{r}_{0r}(t)]\} dt$ – комплексно-сопряженный траекторный сигнал (опорный), отражённый от точечного объекта с координатами $\vec{p} = (0, 0, 0)$.

Разрешающую способность будем характеризовать в плоскости XOY длиной вектора $|\vec{\rho}|$, при котором амплитуда выходного сигнала уменьшается до уровня -3 Дб [2 – 4].

Цель работы: определить траектории движения передатчика и приемника бистатической РСА, обеспечивающие наилучшее значение разрешающей способности, путем анализа пространственно-частотной информации

Решение задачи

Не теряя общности, в дальнейшем положение передатчика и приёмника во времени относительно объекта наблюдения будем характеризовать соответствующими угловыми положениями $\beta_{tr}(t), \beta_r(t)$, элемент разрешения (область высокой корреляции) будем определять в полярной системе координат $\delta x = \rho \cos \alpha$, $\delta y = \rho \sin \alpha$, объект поместим в начало прямоугольной системы координат XYZ (рис. 1). Тогда функцию неопределённости можно представить в таком виде:

$$\begin{aligned} \dot{I}(\rho, \alpha) = & \int_0^T \dot{A}(\beta_{tr}(t), \beta_r(t), \vec{\rho}) \dot{A}^*(\beta_{tr}(t), \beta_r(t)) * \\ & * \exp\{jk\rho[\sin(\alpha + \beta_{tr}(t)) \cdot \cos(\gamma_{tr}(t)) + \\ & + \sin(\alpha + \beta_r(t)) \cdot \cos(\gamma_r(t))]\} dt, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\gamma_{tr}(t)$, $\gamma_r(t)$ – углы возвышения передатчика и приёмника соответственно.

Фазовый множитель в выражении (2) под экспо-

нентой называют *фазовой функцией* [3]. Здесь учтено, что дальности от передатчика и приёмника до объекта наблюдения намного превышают размеры элемента разрешения, т.е. $r_{0tr}(t) \gg \rho$, $r_{0r}(t) \gg \rho$.

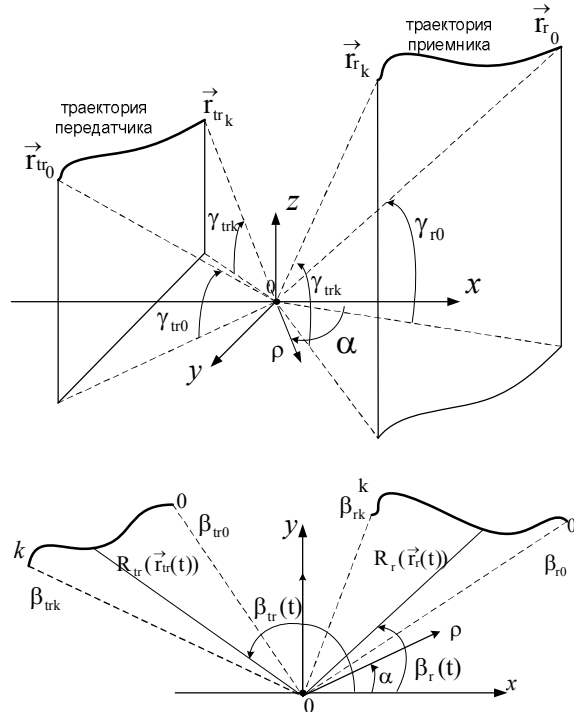


Рис. 1. Пространственное положение элементов бистатической РСА

Скорость изменения во времени фазовой функции и произведения огибающих в выражении (2) значительно отличаются при изменении угловых положений носителей бистатической РСА относительно объекта, что позволяет отдельно анализировать влияние этих факторов на разрешающую способность, и функцию неопределённости представить в виде произведения составляющих модуляции зондирующего сигнала [2, 6].

Функция неопределённости огибающей сигнала имеет периодическую структуру и определяет однозначность измерения координат объекта в плоскости XOY. Соответствующим выбором частоты повторения зондирующих импульсов и скорости перемещения передатчика и приёмника добиваются необходимых значений интервалов однозначности функции неопределённости. В дальнейшем положим, что проблема однозначности измерений решена и рас-

смотрим лишь основной пик функции неопределённости.

Функция неопределённости траекторного сигнала определяется поведением фазовой функции за время синтезирования:

$$f(\rho, \alpha, \vec{p}) = \rho [\sin(\alpha + \beta_{tr}(t)) \cos(\gamma_{tr}(t)) + \sin(\alpha + \beta_r(t)) \cos(\gamma_r(t))]. \quad (3)$$

При этом разрешающая способность в направлении α будет определяться шириной спектра траекторного сигнала [5, 7]:

$$\Delta\omega(\rho, \alpha, \vec{p}) = \rho |f(\rho, \alpha, \vec{p}_k) - f(\rho, \alpha, \vec{p}_0)|, \quad (4)$$

$$\delta\rho(\alpha, \vec{p}) = \frac{2\pi}{k \Delta\omega(\rho, \alpha, \vec{p})}. \quad (5)$$

При монотонном характере изменения фазовой функции разрешающая способность бистатической РСА зависит от угловых секторов, которые проходят передатчик и приёмник за время наблюдения за объектом.

Как будет показано ниже, немонотонность фазовой функции влияет на уровень боковых лепестков.

На рис. 2 изображена геометрия движения передатчика и приёмника.

В дальнейшем полагается, что носители перемещаются с угловой скоростью, кратной град/с.

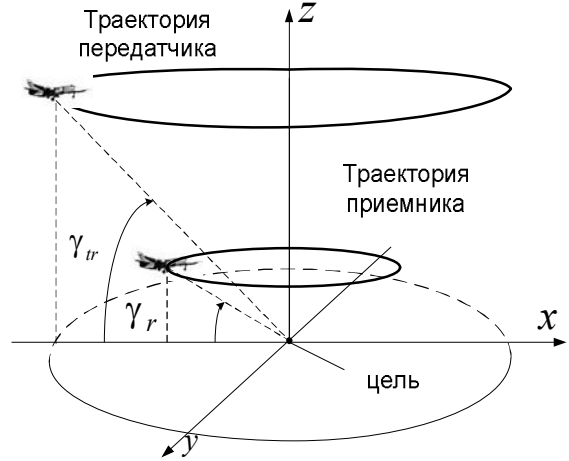


Рис. 2. Передатчик и приёмник перемещаются по замкнутым траекториям

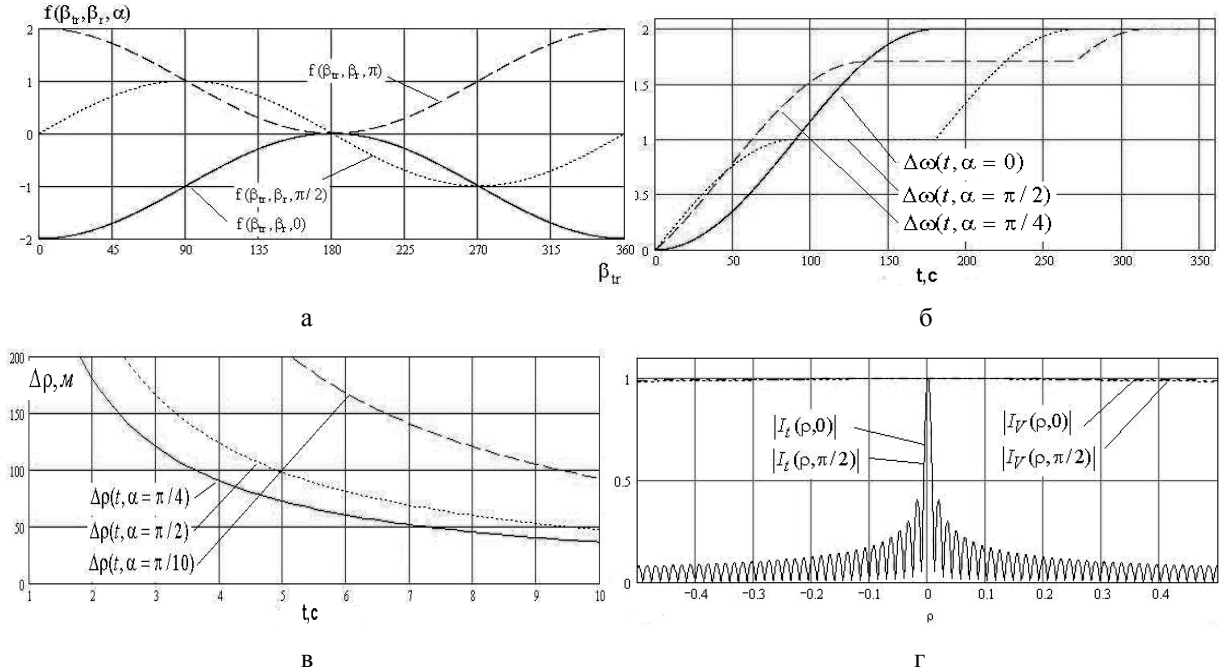


Рис. 3. Один из носителей неподвижный. Зависимость фазовой функции (а), ширины спектра пространственных частот (б), разрешающей способности (в) от времени синтезирования; сечения функции неопределённости траекторного сигнала и огибающей сигнала вблизи основного пика (г); дальность до объекта намного превышает высоту полёта носителей ($\gamma_{tr}(t) \approx \gamma_r(t) \approx 0$)

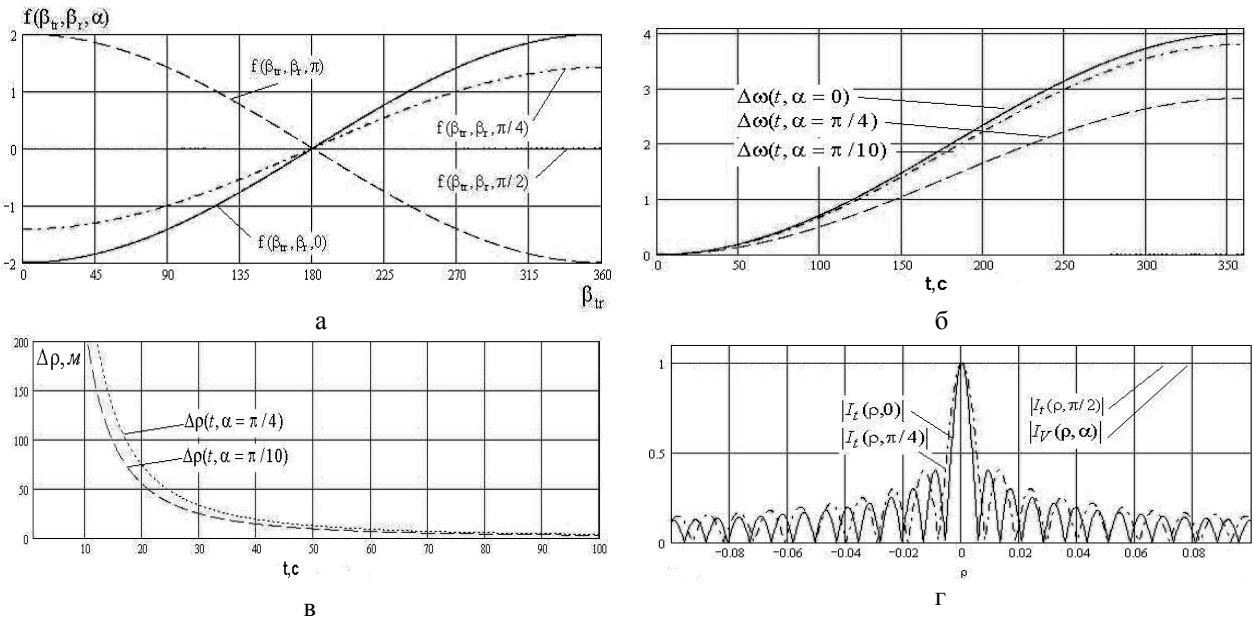


Рис. 4. Приёмник и передатчик движутся с одинаковыми скоростями в противоположных направлениях. Зависимость фазовой функции (а), ширины спектра пространственных частот (б), разрешающей способности (в) от времени синтезирования; сечения функции неопределённости траекторного сигнала и огибающей сигнала вблизи основного пика (г) ($\gamma_{tr}(t) \approx \gamma_{tr}(t) \approx 0$)

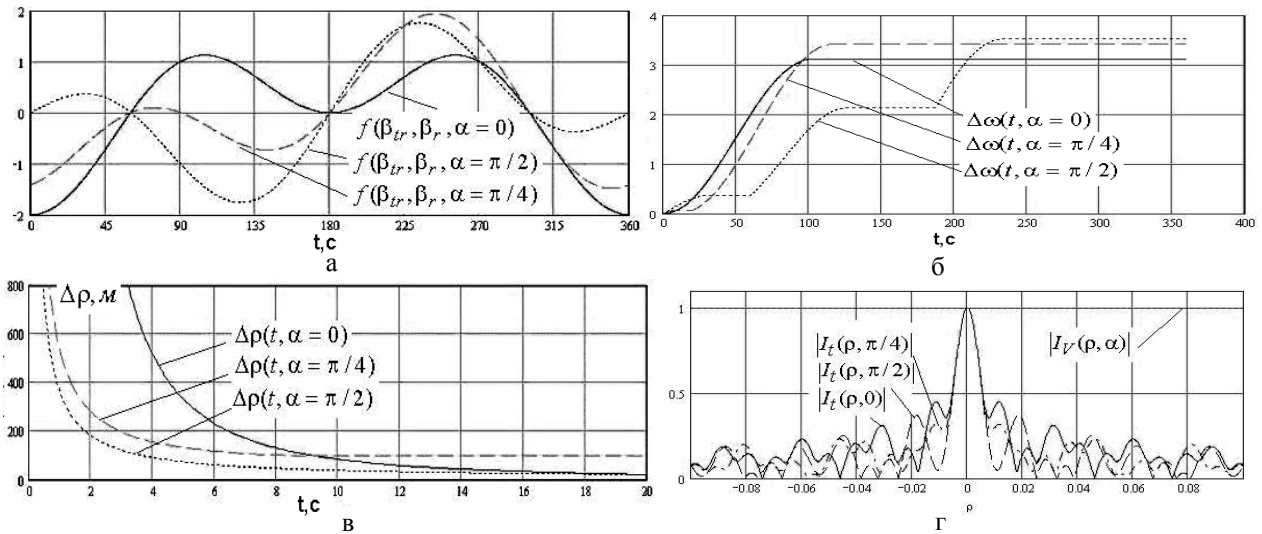


Рис. 5. Передатчик и приёмник движутся в разные стороны и скорость передатчика в 2 раза больше приёмника. Зависимость фазовой функции (а), ширины спектра пространственных частот (б), разрешающей способности (в) от времени синтезирования; сечения функции неопределённости траекторного сигнала и огибающей сигнала вблизи основного пика (г) ($\gamma_{tr}(t) \approx \gamma_{tr}(t) \approx 0$)

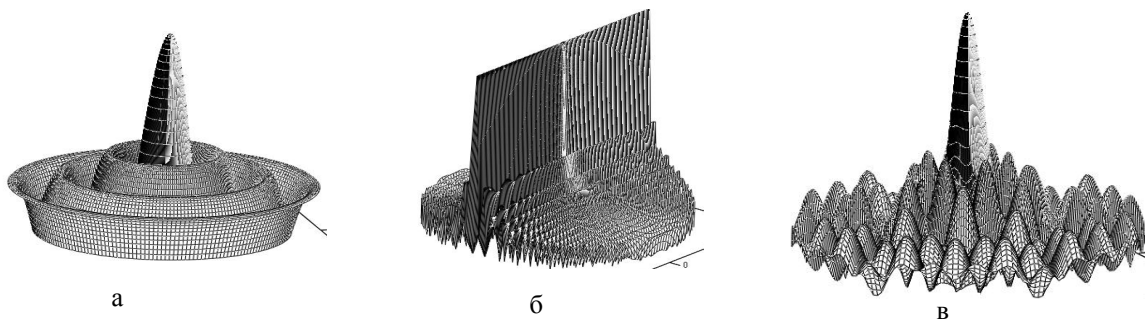


Рис. 6. Вид функций неопределённости: а – для рис. 3; б – для рис. 4; в – для рис. 5

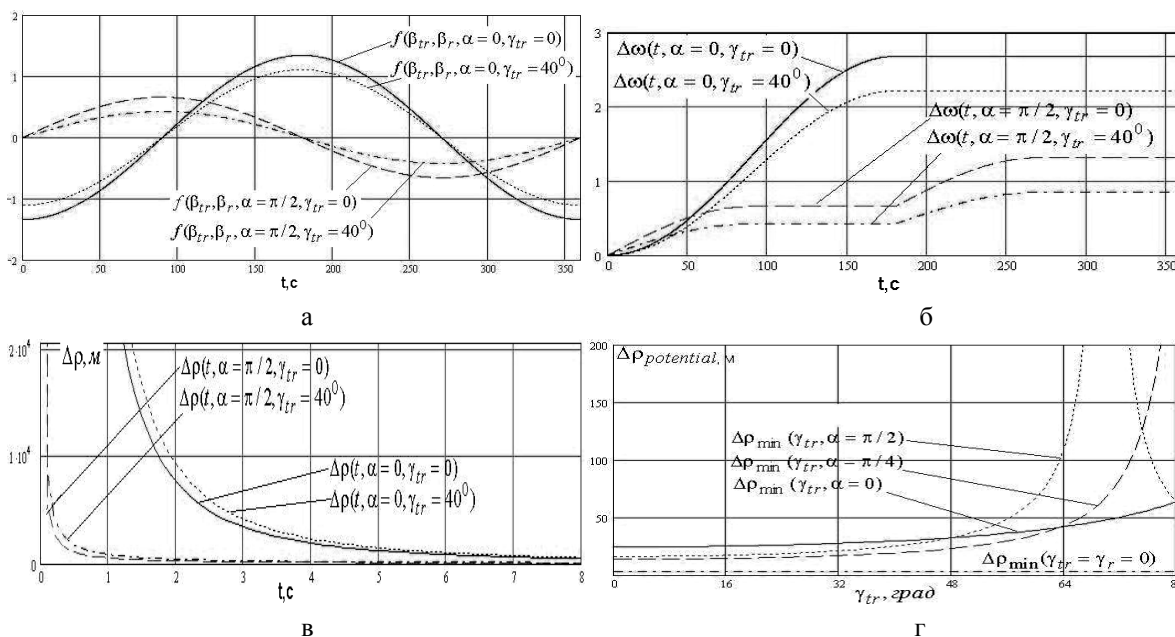


Рис. 7. Возвышение приёмника $\gamma_r = 70^\circ$; зависимости фазовой функции (а), ширины спектра пространственных частот (б), разрешающей способности (в) от времени синтезирования и потенциальных значений разрешения для различных направлений α (г) при разных углах возвышения передатчика γ_{tr}

Заключение

Согласно проведённым исследованиям (рис. 3 – 7) потенциально возможные значения разрешающей способности в выбранном направлении α можно получить при таких траекториях, когда ширина спектра пространственных частот в этом направлении достигнет максимума $\Delta\omega_{max} = 4$ ($\delta\rho_{min} = \lambda/4$). Для моностатической системы такое разрешение во всех направлениях получают, если РСА обходит район цели по замкнутой траектории [5]. Для бистатической РСА – когда направления на цель передатчика и приёмника совпадают и за время обработки отражённого сигнала они проходят вокруг цели по замкнутой кривой.

При неподвижном передатчике/приёмнике (рис. 3) бистатическую систему рассматривают как пассивную, где фазовая функция формируется за счёт движения одного из носителей – получают максимальное и одинаковое во всех направлениях разрешение (кнопочная ФН) $\delta\rho_{min} = \lambda/2$. Одинаковое во всех направлениях разрешение можно также полу-

чить, если передатчик и приёмник движутся в одном направлении с одинаковыми скоростями (рис. 5).

Тогда

$$\delta\rho_{min} = \frac{\lambda}{4 \cos(\beta_{bist} / 2)}.$$

Если движутся оба носителя (рис. 5) с разными, но постоянными скоростями, обеспечить одновременно наилучшее разрешение во всех направлениях не удаётся.

Фазовые функции имеют периодическую структуру, а ширина пространственного спектра и соответствующие значения разрешения стремятся к постоянной величине, которая зависит от геометрии передатчик-цель-приёмник и характера движения носителей.

В ряде случаев возможны компенсации фазовых набегов передатчик-цель и цель-приёмник, что приведёт к отсутствию разрешающей способности в соответствующем направлении α (рис. 4, а, г, рис. 7, г).

Наличие перекрывающихся значений фазовой функции (пространственных частот) приводит лишь

к суммированию интенсивностей соответствующих гармоник и изменению вида и уровня боковых лепестков ФН, не влияя при этом на потенциальные значения разрешения.

Выводы

Разрешающая способность бистатической РСА определяется угловыми размерами траекторий носителей, которые они проходят за время наблюдения, и в явном виде не зависит от дальности до объекта. Потенциально возможное значение разрешающей способности $\delta r_{\min} = \lambda/4$ получают, если направления наблюдения передатчика и приёмника совпадают, они движутся с одинаковыми угловыми скоростями, углы возвышения равны нулю и осуществляется оптимальная обработка отражённого траекторного сигнала на всей траектории. При этом и передатчик и приёмник должны обойти полный угловой сектор в 360° вокруг цели.

В остальных случаях наилучшие значения разрешающей способности зависят от геометрии расположения РСА и цели.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании бистатических станций, обладающих постоянной разрешающей способностью, исследованию траекторий и их влияния на разрешение в реальных условиях работы современных радиолокационных систем с синтезированием апертуры.

Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 264 с.
2. Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А. Радиолокационные станции обзора Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. Костылев В.И., Перов В.М. Обобщённая автокорреляционная функция бистатической наземно-космической РЛС с синтезированием апертуры передатчика // Вестник ВГУ. – 2004. – № 1. – С. 10-14.
5. 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.
6. Фалькович С.Е., Волосюк В.К., Горбуненко О.А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования: Учебн. пос. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2002. – 157 с.
7. Volosuk V.K., Voloschuk R.P. Interpretation of an influence of the transmitter and receiver bistatic SAR tracks to resolution // The Sixth International Kharkov Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'07) and workshop on terahertz technology (TERATECH'07). – Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007. – Volume 1. – P. 458.

Поступила в редакцию 24.09.2007

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