

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. — М.: Радио и связь, 1988. — 304 с.
2. Калмыков А. И., Сеницын Ю. А., Сытник О. В., Цымбал В. Н. Информативность радиолокационных систем зондирования Земли из космоса // Изв. вузов. Радиофизика. — 1989. — 32, № 9. — С. 1055—1062.
3. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 200 с.

#### SURVEYING RADAR SYSTEM FOR THE REMOTE SENSING OF THE EARTH WITH ENHANCED AZIMUTHAL RESOLUTION

*V. B. Efimov, A. S. Kurekin, O. V. Sytnik,  
V. N. Tsybal, A. S. Gavrilenko, A. V. Kabanov*

The system is offered for the remote sensing of the Earth on the basis of the pulse coherent radar operating in two modes, surveying and

of high resolution. In the surveying mode the radar has an azimuthal resolution 50—100 m and swath about 500—600 km at a height of orbit from 650 to 750 km. In the mode of high resolution the radar works on the SAR principle and has a potential resolution 2—5 m in swath 10—15 km in any part of general swath of 500 to 600 km. SAR radiates the sequence of packs of pulses with bearing frequency changing from one impulse to the other. Thus, pulse repetition frequency in a pack is chosen to describe the displacement of trajectory signal Doppler frequency, but the frequency of packs is chosen low enough to exclude an ambiguity on distance. The frequency selection of impulses within the limits of one pack is carried out in the wideband of intermediate frequency with the general width of band about 100 MHz. The signal processing block is built on a multichannel scheme. The amount of channels of the block is determined by the number of frequency changes into the pack of impulses. The frequency-temporal selection of the signals reflected from the surface and compression of impulses for providing high range resolution are carried out in every channel separately. The features of construction of multichannel structure of SAR receiving device and algorithm of the trajectory signal processing are examined. The limitations on the amount of additional narrowband channels and width of frequency band of every channel is the subject of wide discussion.

УДК 621.396:621.391.82

**О. В. Сытник<sup>1</sup>, В. Б. Ефимов<sup>2</sup>,  
В. Н. Цымбал<sup>2</sup>, А. В. Кабанов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков  
ssvpl1@ire.kharkov.ua

<sup>2</sup>Центр радиофизического зондирования Земли им. Л. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков  
kalmukov@ire.kharkov.ua

## Динамическая адаптивная коррекция радиолокационных изображений

*Представлено 25.06.07*

Розглядаються задачі побудови адаптивних алгоритмів синтезу радіолокаційних зображень поверхневих шарів місцевості по сигналам когерентного бортового радіолокатора. Запропонований алгоритм належить до класу адаптивних алгоритмів, які вилучають інформацію о траєкторних похибках безпосередньо з відбитого від поверхневого шару землі радіолокаційного сигналу. Як інформаційні параметри використовується математичне очікування оцінки зсуву доплеровського спектру на інтервал синтезування, а також її вищі похідні. Це забезпечує можливість автоматичного корегування зображень, що обумовлені не тільки похибками по швидкості польоту носія, а також дозволяють урахувати похибки прискорення та швидкості прискорення при формуванні радіолокаційних зображень. У роботі наведені результати обробки сигналів бортового РСА. Обговорюються особливості роботи алгоритму у різних умовах.

Отклонения от заданной траектории полета носителя радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) [3, 5], которые не учтены в алгоритме обработки сигнала в виде соответствующих кор-

ректирующих функций, приводят к искажениям результирующего радиолокационного изображения. В частности это расфокусировка, смещение объектов относительно их истинного положения, потеря

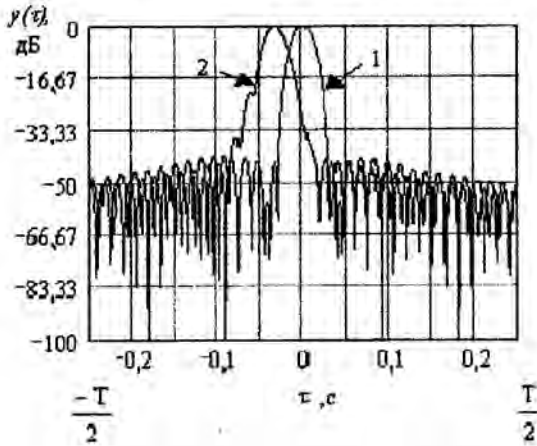


Рис. 1. Искажения синтезированной диаграммы направленности антенны РСА

яркости изображения, увеличение боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности (ДН) и ряд других искажений [1, 4, 6, 7].

Создание радиолокационной аппаратуры, инвариантной к типу и характеристикам бортовых навигационных средств, и одновременно обеспечивающей автоматическую коррекцию радиолокационных изображений, возможно благодаря извлечению информации о траекторных ошибках непосредственно из отраженного сигнала.

В общем виде алгоритм формирования синтезированной апертуры в азимутальном направлении для фиксированной дальности можно представить в виде интеграла свертки [3]:

$$y(\tau) = \text{mod} \left\{ \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{x}(t - \tau) \dot{h}(t) dt \right\}, \quad (1)$$

где  $\text{mod}\{\cdot\}$  — операция вычисления модуля,  $T_c$  — интервал времени, в течение которого выполняется синтезирование апертуры антенны,  $\dot{x}(t - \tau) = \dot{s}(t - \tau) + \dot{h}(t)$  — аддитивная смесь отраженного от подстилающей поверхности сигнала  $\dot{s}(t - \tau) = A(t - \tau)e^{-11.4\pi r_i(t)/\lambda}$ ,  $A$  — амплитуда отраженного сигнала,  $r_i(t)$  — текущее значение наклонной дальности от фазового центра передающей антенны до  $i$ -го точечного отражателя,  $\lambda$  — длина волны зондирующих колебаний (без потери общности множитель  $\omega_0 t$  в этом выражении опущен) и некогерентного гауссовского шума  $\dot{h}(t)$  с дисперсией  $\sigma^2$  и нулевым математическим ожиданием;  $h(t) = H(t)e^{j2\pi v t / (\lambda r_0)}$  — опорная функция, где  $H(t)$  — весовая функция (в простейшем случае  $H(t) \equiv 1$ ),  $v$  — путевая скорость движения носителя РСА.

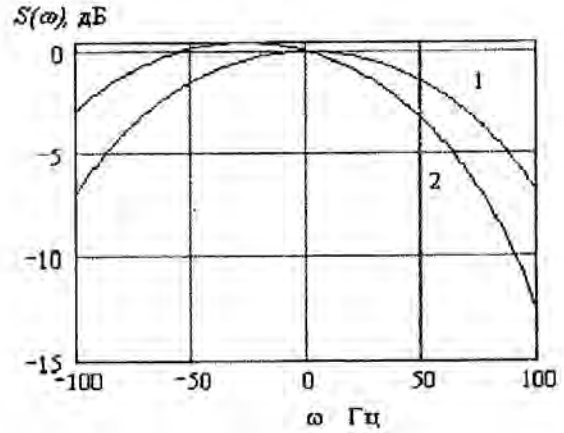


Рис. 2. Идеализированная форма диаграммы направленности антенны РСА огибающей спектра доплеровских частот

В результате работы алгоритма (1) при отсутствии траекторных ошибок формируется ДН эквивалентной антенны, показанная на рис. 1 (кривая 1). Кривая 2 иллюстрирует характер искажений, возникающих при нестационарном движении летательного аппарата. Характер изменения траекторного сигнала на интервале синтезирования  $T_c$  при облучении бортовым локатором точечной цели подчиняется закону линейного частотно-модулированного колебания с круговой частотой  $\omega = 4\pi v(t) / (\lambda r_0)$ . При  $v(t) = \text{const}$  закон изменения частоты сигнала в пределах главного лепестка реальной ДН есть линейная функция, а огибающая его спектра — симметрична относительно центрального элемента массива отсчетов траекторного сигнала и монотонно убывает с увеличением частоты (как показано на рис. 2, кривая 1). Ошибки в определении параметров движения носителя РСА приводят к искажениям формы спектральной плотности, в частности к ее асимметрии относительно середины распределения (кривая 2, рис. 2). Поэтому кажется перспективным использование отличия формы реального спектра сигнала от идеального путем введения соответствующих корректирующих составляющих в опорную функцию алгоритма синтезирования (1).

Амплитудный спектр доплеровских частот реального сигнала, отраженного от различных по масштабу и радиофизическим свойствам элементов подстилающей поверхности, носит флуктуационный характер, и его непосредственное использование для построения корректирующей опорной функции затруднительно. На рис. 3 показан усредненный по 128 соседним строкам наклонной дальности спектр траекторного сигнала на участке траекто-

рии, где летательный аппарат совершал маневр.

Из-за значительной дисперсии отсчетов огибающей спектра построить формализованную процедуру вычисления достоверных оценок величин смещения и коэффициентов асимметрии для получения корректирующих составляющих опорной функции затруднительно. Однако, если полученные из реальной последовательности спектральные отсчеты аппроксимировать известной функцией, например полиномом, то процедура вычисления корректирующих коэффициентов опорной функции легко

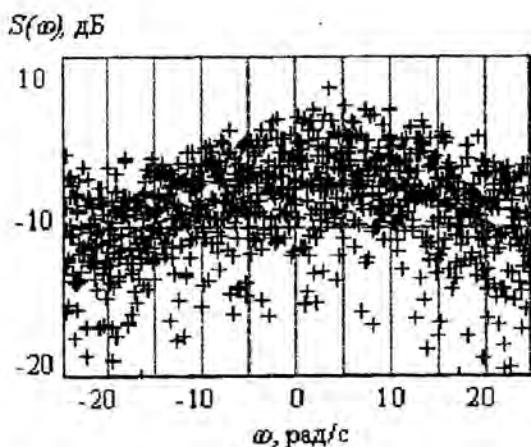


Рис. 3. Спектр траекторного сигнала

формализуется. Здесь крестиками показаны спектральные отсчеты траекторного сигнала, а сплошной линией — его полиномиальная аппроксимация полиномом третьей степени с коэффициентами 24.469, 0.024,  $1.656 \cdot 10^{-5}$ ,  $-4.507 \cdot 10^{-8}$ .

Среднее квадратичное значение ошибки  $\sigma_p$  аппроксимации не превышало 0.248. Фазовые ошибки, связанные с неадекватным представлением закона изменения путевой скорости, можно представить в упрощенном виде:

$$\varphi_v(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left[ \Delta v t + \frac{1}{2} a t^2 + \frac{1}{6} a' t^3 \right], \quad (2)$$

где  $\Delta v$ ,  $a$ ,  $a'$  — ошибки измерения путевой скорости, ускорения и производной от ускорения соответственно.

Корректирующие фазу опорной функции (1) коэффициенты  $\Delta v$ ,  $a$ ,  $a'$  найдем из сравнения кривых 1 и 2 рис. 2. В качестве кривой 2 необходимо использовать модель аппроксимирующей функции, показанной на рис. 3. Ошибку  $\Delta v$  определения путевой скорости вычислим путем отыскания смещения экстремума кривой 2 по отношению к эталонной кривой 1. Формализовать эту процедуру можно при помощи метода сопряженных градиентов [2]. Обозначим смещенную спектральную плотность как  $S_2(\omega)$ . Тогда значение аргумента  $\omega = \omega^*$ , соответствующее экстремуму  $\omega^*$ , находится путем итерирования:

$$\omega^{k+1} = \omega^k - \alpha_k \nabla S_2(\omega^k) + \beta_k (\omega^k - \omega^{k-1}), \quad (3)$$

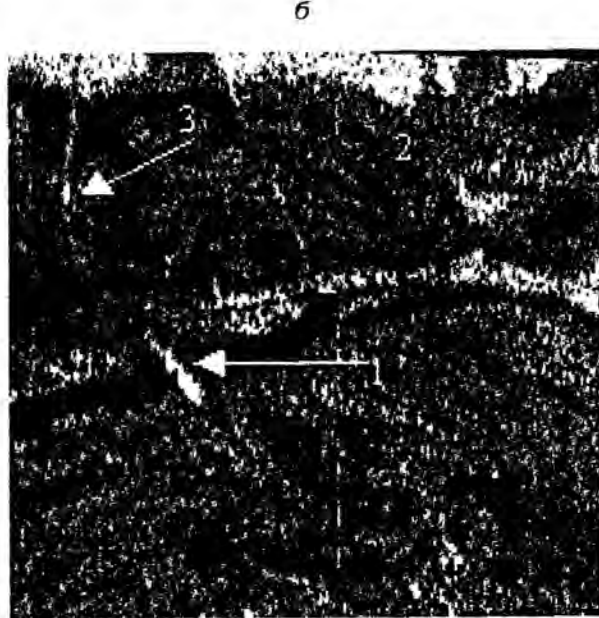
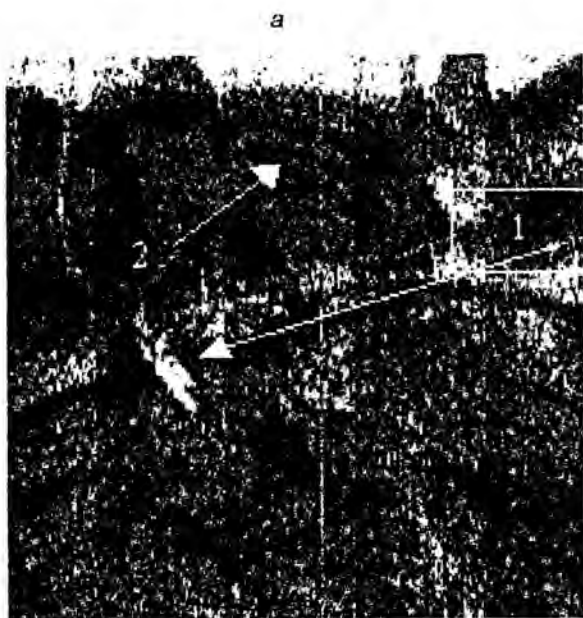


Рис. 4. Радиозображение местности: а — при маневре летательного аппарата, б — при адаптивной компенсации траекторных ошибок

где оптимальные значения коэффициентов  $\alpha_k, \beta_k$  на каждом шаге вычисляются из условия

$$\{\alpha_k, \beta_k\} = \underset{\{\alpha_k, \beta_k\}}{\operatorname{argmin}} \{S[\omega^k - \alpha_k \nabla S_2(\omega^k) + \beta_k(\omega^k - \omega^{k-1})]\}.$$

Для упрощения вычислительной процедуры коэффициенты  $\alpha_k, \beta_k$  можно выбирать в пределах  $0 < \alpha \leq 1, 0 \leq \beta < 1$ . Тогда метод сопряженных градиентов (3) сводится к методу тяжелого шарика [2].

Эффект от применения адаптивной коррекции изображения, которое получено при синтезировании из голограммы самолетного радиолокатора дециметрового диапазона ( $\lambda = 0.23$  м), виден при сравнении рис. 4, а и б. Здесь азимутальное направление показано сверху вниз, а направление по наклонной дальности — слева направо. Разрешение по наклонной дальности составляло 22.5 м, а по азимуту — примерно 10 м. В частности, в результате применения адаптивной коррекции радиоизображения повтор объекта 1 на рисунках отсутствует. Периодическая структура, отмеченная цифрой 2 на обоих рисунках, осталась практически без изменения. При вычислении корректирующих коэффициентов использовалась спектральная оценка, показанная на рис. 3. Кроме визуальной оценки синтезированных изображений подстилающей поверхности, в качестве оперативного критерия можно использовать сравнительный анализ радиолокационных контрастов вдоль строки записи сигнала на протяжении всего сеанса работы.

Таким образом, исходная когерентная запись траекторного сигнала подвергается предварительному фурье-анализу, и одновременно отсчеты траекторного сигнала сохраняются в элементах памяти. Затем с целью снижения дисперсии флуктуационной составляющей сигнала выполняется усреднение по нескольким соседним строкам дальности. Полученную таким образом спектральную оценку подвергают полиномиальной аппроксимации, и результирующий полином исследуют на экстремум при помощи рекуррентной двухшаговой процедуры. В зависимости от степени полинома, заранее заложенной в модель, алгоритм способен вычислять корректирующие коэффициенты  $\Delta v, a, a'$  опорной

функции. Выбор двухшаговой рекуррентной процедуры обусловлен необходимостью компромисса между скоростью сходимости и объемом вычислений, проходящихся на одну итерацию.

1. Ицкоки Я. С., Сазонов Н. А., Толстов Е. Ф. Основные характеристики РСА при произвольном движении летательного аппарата // Радиотехника и электроника. — 1984. — 29, № 11. — С. 2164—2172.
2. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию. — М.: Наука, 1983. — 384 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. — М.: Радио и связь, 1988 — 304 с.
4. Сытник О. В., Кабанов А. В., Ефимов В. Б. и др. Критерий качества радиолокационного изображения когерентных систем дистанционного зондирования // Космічна наука і технологія. — 2002. — 8, № 2/3. — С. 287—288.
5. Томиясу К. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры и их применение для отображения поверхности океана // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. — 1978. — 66, № 5. — С. 40—67.
6. Hounam D. Motion errors and compensation possibilities // AGARD Lecture Series 182. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR). — 1992. — P. 31—42.
7. Moreira J. A. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time SAR motion compensation // Proc., IGARSS Symposium, Vancouver, Canada. — 1999. — P. 1—7.

#### DYNAMIC ADAPTIVE CORRECTION OF RADAR-TRACKING IMAGES

O. V. Sytnik, V. B. Efimov, V. N. Tsybal, A. V. Kabanov

We consider the problems of construction of adaptive algorithms for synthesizing radar-tracking images of spreading surface on the basis of signals of a coherent onboard radar. The offered algorithm belongs to the type of self-adapting algorithms in which the information on trajectory mistakes is taken directly from the reflected signal. As the information parameters, we use the estimation of displacement of a Doppler spectrum on the interval of synthesizing which is averaged on inclined range together with its supreme derivatives. This provides the possibility of automatic correction of the images caused not only by mistakes in speed of flight of the carrier, mistakes in the acceleration and speed of acceleration change. The results of synthetic aperture radar signals are given. Some features of the algorithm operation in various conditions are discussed.