

УДК 621.396.621.391.82

В. Б. Ефимов¹, А. С. Курекин¹, О. В. Сытник²,
В. Н. Цымбал¹, А. С. Гавриленко¹, А. В. Кабанов¹

¹Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков
kalmykov@ire.kharkov.ua

²Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков
ssvp11@ire.kharkov.ua

Обзорная радиолокационная система дистанционного зондирования Земли с повышенным азимутальным разрешением

Представлено 25.06.07

Пропонується система для дистанційного зондування Землі на основі імпульсного когерентного радіолокатора, що працює в двох режимах — оглядовому і високій роздільній здатності. У оглядовому режимі радіолокатор має азимутну роздільну здатність 50—100 м і смугу огляду 500—600 км при висоті орбіти носія 650—750 км. У режимі високої роздільної здатності локатор працює за принципом радіолокатора з синтезом апертури антени (РСА) і має близьку до потенційної роздільну здатність, що приблизно дорівнює 2—5 м в смузі 10—15 км в будь-якій частині загальної смуги огляду 500—600 км. РСА випромінює послідовність пачок радіоімпульсів з носійною частотою, яка змінюється від імпульсу до імпульсу. При цьому частота повторення імпульсів в пачці вибрана високою для однозначного опису доплерівського зсуву частоти, а частота випромінювання пачок вибрана настільки низькою, щоб виключити неоднозначність за дальністю. Частотна селекція імпульсів в межах однієї пачки здійснюється в широкосмуговому тракті проміжної частоти із загальною шириною смуги близько 100 МГц. Блок обробки сигналів будується за багатоканальною схемою. Кількість каналів блоку обробки визначається числом частотних зсувів усередині пачки імпульсів. Частотно-часова селекція відбитих від поверхні Землі сигналів і стиснення імпульсів для забезпечення високої роздільної здатності за дальністю здійснюється в кожному каналі окремо. У роботі розглядаються особливості побудови багатоканальної структури приймального пристрою РСА і алгоритм обробки траєкторного сигналу. Обговорюються обмеження на кількість додаткових вузькосмугових трактів і ширину частотної смуги кожного каналу.

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам, связанным с экологическим и кризисным глобальным мониторингом Земли космическими системами дистанционного зондирования. К этим проблемам относятся наблюдения природных ледовых систем Арктики и Антарктики, обнаружение и оценка параметров активных метеорообразований над морской поверхностью, в том числе тропических ураганов, тайфунов и т. д. Все это требует использования адекватных средств дистанционного зондирования космического базирования, обеспечивающих оперативную съемку поверхности Земли в полосе обзора 400—500 км и более. Известен опыт многолетней эксплуатации космических радиолокаторов бокового обзора ИСЗ «Космос-1500»/«Океан»/«Сич-1» [2, 3]. В настоящее время успешно функционируют радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) спутников RADARSAT, ENVISAT [www.rsi.ca/products/sensor/radarsat/

radarsat1.asp и www.esa.int/envisat], которые обеспечивают в режиме «Scan SAR» наблюдения в полосе обзора порядка 400 км. Реализация такого режима предполагает использование крупногабаритной и дорогостоящей фазированной антенной решетки.

В работе предлагается РСА для малых космических аппаратов (весом до 1000 кг). Радиолокатор для дистанционного зондирования Земли обеспечивает возможность проведения съемки поверхности Земли в одном из двух режимов:

- обзорный режим — в полосе обзора 500—600 км с разрешением 50—100 м;
- детальный режим в полосе захвата 500—600 км при полосе обзора 10—15 км с разрешением 2—5 м.

При выборе технических характеристик РСА, в частности полосы обзора и потенциально достижимого разрешения, существует ряд ограничений,

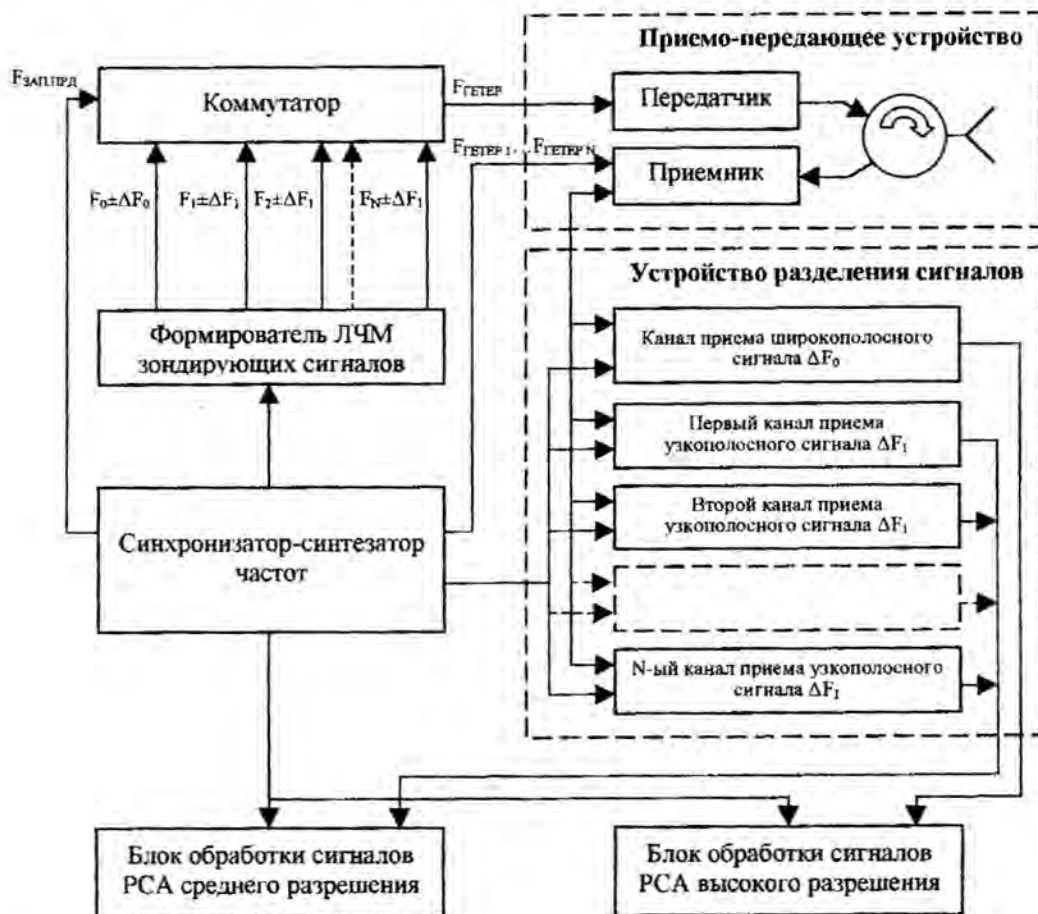


Рис. 1. Увеличенная структурная схема двухрежимного РСА

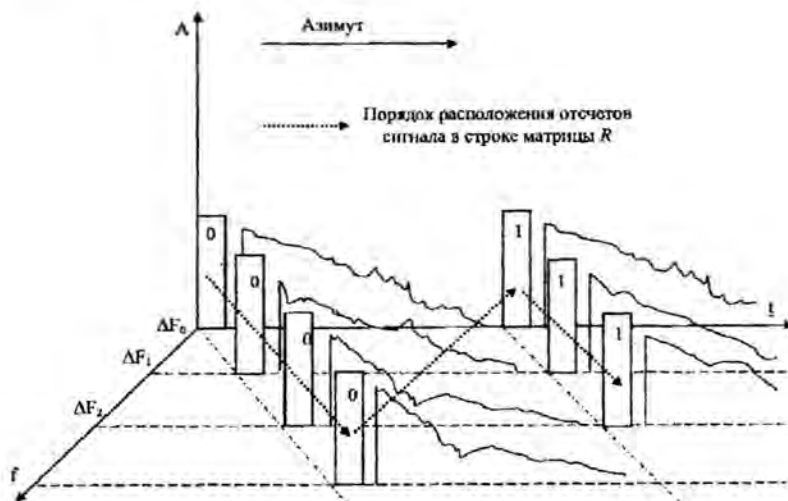


Рис. 2. Порядок расположения отсчетов сигналов в плоскости задержка — частота

связанных с особенностями построения этих систем. Так, максимальная полоса обзора РСА ограничена выбором минимально возможной частоты повторений ($f_{p \min}$) зондирующих сигналов. Величина минимальной частоты повторений определяется из требований к описанию доплеровского спектра траекторного сигнала как

$$f_{p \min} \geq 2v/d, \quad (1)$$

где v — скорость движения носителя РСА, d — размер апертуры антенны в азимутальной плоскости. В то же время потенциальное разрешение РСА в азимутальной плоскости составляет $L_a = d/2$. В свою очередь, для однозначного разделения сигналов по дальности (в угломестной плоскости) частота повторений ($f_{p \max}$) зондирующих сигналов должна удовлетворять соотношению

$$f_{p \max} \leq 1/[2\tau_a + 2\Delta R/c], \quad (2)$$

где ΔR — полоса обзора, τ_a — длительность зондирующего импульса, c — скорость света.

Для однозначного описания траекторного сигнала по дальности предлагается формировать пачку из n радиоимпульсов с разными (но достаточно близкими) несущими частотами. При этом частота повторения импульсов в пачке определяется соотношением (1), а частота следования пачек — соотношением (2). Для однозначного разделения сигналов в угломестной плоскости проводится фильтрация траекторного сигнала в частотной области и пространственная селекция по дальности. Процедура синтезирования в азимутальной плоскости проводится с учетом изменения несущей частоты зондирующих импульсов в пределах последовательности. Укрупненная структурная схема двухрежимного РСА показана на рис. 1.

При реализации двухрежимной системы целесообразно использовать общие широкополосные (порядка 100 МГц) узлы приемо-передатчика, а переключения режимов фактически сводится к изменению режимов в формирователе зондирующих радиосигналов и режимов работы антенны. Характерная полоса канала для обзорного режима 1—2 МГц, количество каналов 5—10 при полосе обзора порядка 500—600 км.

Синтезирование антенны в азимутальной плоскости в блоке обработки сигналов РСА высокого разрешения осуществляется методом свертки опорной функции и траекторного сигнала по известному алгоритму [1]. Полоса захвата 500—600 км обеспечивается перенацеливанием антенной системы.

В блоке обработки сигналов РСА среднего разрешения отсчеты сигналов каждого узкополосного частотного канала предварительно сжимают по дальности при помощи линий задержки, оцифровывают и записывают в ячейки памяти на сдвиговых

регистрах, откуда они поступают через коммутатор в блок памяти, где формируется матрица отсчетов сигналов взятых с выходов каждого частотного канала для последующего синтезирования и формирования радиолокационного изображения подстилающей поверхности. Порядок расположения отсчетов сигналов в плоскости задержка-частота при формировании матрицы сигналов показан на рис. 2. Результирующая матрица R , элементы которой есть отсчеты траекторного сигнала, взятые в соответствии с теоремой Котельникова из каждого узкополосного канала и расположенные вдоль азимутальных строк следующим образом:

$$R^0 = \begin{pmatrix} r_{1,1}^0 & r_{1,2}^0 & \dots & r_{1,m}^0 \\ r_{2,1}^0 & r_{2,2}^0 & \dots & r_{2,m}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p,1}^0 & r_{p,2}^0 & \dots & r_{p,m}^0 \end{pmatrix}, \dots,$$

$$R^n = \begin{pmatrix} r_{1,1}^n & r_{1,2}^n & \dots & r_{1,m}^n \\ r_{2,1}^n & r_{2,2}^n & \dots & r_{2,m}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p,1}^n & r_{p,2}^n & \dots & r_{p,m}^n \end{pmatrix}.$$

Здесь верхний индекс — номер отсчета в выбранном узкополосном канале по дальности, нижний двойной индекс — номер импульса в выбранном узкополосном канале и номер узкополосного частотного канала.

Таким образом, матрица R имеет размер $m \cdot p \cdot n$, где m — число отсчетов сигнала по дальности; p — число импульсов одного частотного канала, которые используются для синтезирования текущей азимутальной строки (или число импульсов, укладываемых на интервале синтезирования $L_{\text{синт}}$); n — число частотных каналов блока обработки.

Синтезирование апертуры антенны в k -й строке дальности теперь может выполняться путем свертки k -й строки матрицы R с соответствующей опорной функцией, то есть

$$S_i^k = R^k \otimes H^k = \sum_{j=0}^{(n-1)p} R_{k,i+j} h_{k,j},$$

$$i = 0, 1, \dots, (n-1)p,$$

где $h_{k,j}$ — элементы весовой функции, k — номер строки по дальности.

Таким образом, благодаря многоканальной структуре приемного устройства с частотной окраской каждого излученного импульса оказывается возможным одновременное выполнение условий (1) и (2) для заданных ΔR и V/d . Ограничения на количество дополнительных узкополосных каналов и ширина частотной полосы каждого канала определяются требуемым разрешением и заданной шириной полосы обзора.

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. Сытник¹, В. Б. Ефимов²,
В. Н. Цымбал², А. В. Кабанов²**

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

²Центр 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 доплерівського 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