

## **Технический облик многоапертурного космического радиолокатора с синтезированной апертурой на основе АФАР X-диапазона**

С.Л. Внотченко, А.И. Коваленко, В.В. Римап, А.В. Шишанов

*ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов»,  
ул. Декабристов 51, 127490 Москва, Россия,  
Тел: (495)402-92-77, Факс(495)404-91-91, E-mail:Alexander.Kovalenko@niitp.ru*

*В докладе рассматриваются технический облик и основные характеристики многоапертурного РСА, реализуемого на основе сегментированной поляриметрической активной фазированной антенной решётки (АФАР) X-диапазона с применением технологий многомерного кодирования сигнала (при передаче) и цифрового формирования луча антенны (при приёме).*

*This report presents technical pattern and characteristics of the SAR, that is based on segmented polarimetric wide-band active phased array and multichannel digital subsystem for signal parameters control. The system uses technologies of 'multidimensional waveform encoding' for transmitted signal and 'digital beam forming' (DBF) for echoed signal receiving.*

### **Введение**

Существующие космические радиолокационные средства наблюдения Земли при формировании радиолокационных изображений (РЛИ) земной поверхности функционируют как одноканальные импульсные когерентные радиолокаторы бокового обзора. *Эффект неоднозначности*, присущий системам такого типа, существенно ограничивает возможности получения детальных РЛИ земной поверхности с широкой полосе захвата [1].

Одним из кардинальных способов снятия данных ограничений является реализация *многоапертурных (многоканальных) РСА* с использованием технологий многомерного кодирования формы сигнала (при передаче) и цифрового формирования луча антенны (при приёме) (см., например, [2-5]). Подобные принципы реализации радиолокационного наблюдения можно реализовать в РСА, построенных на базе *приёмо-передающих АФАР X-диапазона*.

### **Построение бортовой аппаратуры РСА**

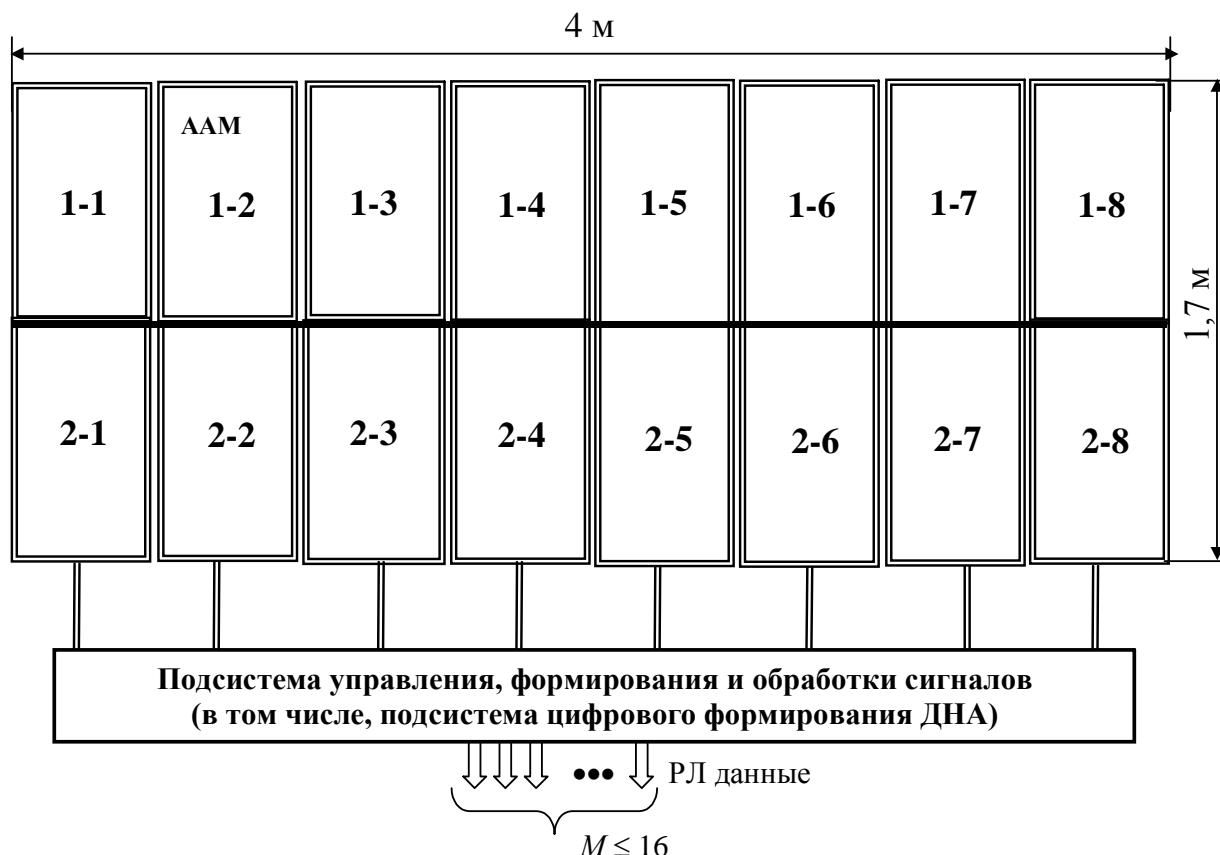
Основными составными частями бортовой аппаратуры РСА являются активная фазированная антенная решётка (АФАР) и многоканальная подсистема управления, формирования и обработки сигналов (ПУФОС). Структура бортовой аппаратуры РСА показана на рис. 1.

*Активная фазированная антенная решётка (АФАР)* размером раскрыва около  $4 \times 1,7 \text{ м}^2$  совмещает функции многоапертурного антенного устройства и многоканального когерентного приёмо-передающего тракта радиолокатора. АФАР обеспечивает формирование диаграммы направленности антенны (ДНА) с заданными параметрами (на двух ортогональных поляризациях) и электронное сканирование антенного луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Базовой структурной единицей АФАР является *активный антенный модуль (ААМ)*, представляющий собой, по существу, автономную АФАР, антенное полотно которой является одним из сегментов антенного полотна всей АФАР. Всего в состав АФАР входит 16 активных антенных модулей, в состав которых входит набор *групповых 4 – канальных приёмо-передающих модулей (ГППМ)*.

Многоканальная подсистема управления, формирования и обработки сигналов (ПУФОС) обеспечивает формирование зондирующего сигнала, приём, оцифровку и

предварительную фильтрацию многоканального отражённого сигнала для когерентно связанной совокупности *цифровых радиолокационных поляриметрических каналов*, параметры которых управляются программным образом. Дальнейшая обработка принимаемого сигнала ведётся с помощью распределённой вычислительной подсистемы *цифрового формирования диаграммы направленности антенны (ДНА)*.



**Рис. 1. Структура бортовой аппаратуры многоапертурного РСА**

### **Реализация режимов многоканальной съёмки**

Возможности оперативного управления амплитудно-фазовым распределением АФАР и параметрами зондирующего сигнала в сочетании с применением технологий многомерного кодирования формы сигнала и цифрового формирования луча антенны позволяет реализовать в РСА *режимы радиолокационного наблюдения с улучшенными геометрическими характеристиками радиолокационных изображений (РЛИ)*.

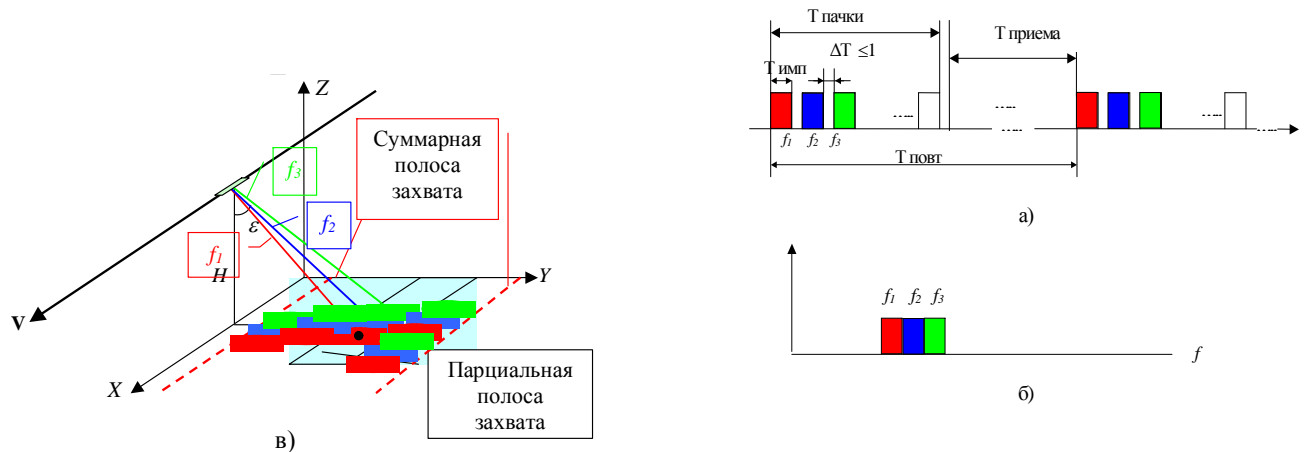
Основная идея метода иллюстрируется рис. 2 и состоит в следующем:

1. *При излучении* формируется импульсная последовательность сигналов, каждый из которых представляет собой пачку коротких широкополосных субимпульсов (в общем случае разнесённых по частоте) (см. рис. 2а, б)). При этом каждому субимпульсу соответствует своя отдельная реализация амплитудно-фазового распределения возбуждающего поля на апертуре АФАР и, как следствие, характеристика направленности антенны (*парциальная ДНА*). В результате размер участка земной поверхности, "засвечиваемого" всей импульсной последовательностью становится существенно больше размера следа ДНА АФАР (рис.2в).

2. *Приём отражённого сигнала* осуществляется всеми антенными модулями АФАР, выходные сигналы которых переводятся в цифровую форму, и поступают на

вычислительную подсистему *цифрового формирования диаграммы направленности антенны (ДНА)*.

3. Результатом *когерентной M-канальной обработки* 16 выходных сигналов сегментов АФАР является *синтезирование приёмной антенны* радиолокатора в виде *многолучевой антенной решётки*. При этом *m-й* выходной сигнал представляет собой радиолокационный отражённый сигнал, принятый всем полотном АФАР при реализации параметров *m-й* парциальной диаграммы направленности.



**Рис. 2. Реализация многоканальной маршрутной съёмки:**

- а) временная диаграмма излучения и приёма многочастотного пачечного сигнала;**
- б) спектр зондирующего сигнала;**
- в) геометрия визирования ( $M=3$ )**

Рассмотрим несколько примеров реализации таких режимов.

Пример 1. Маршрутная съёмка с предельным разрешением

В этом случае излучаемые субимпульсы имеют максимальную ширину спектра и, соответственно, одинаковую несущую частоту ( $f_1 = f_2 = f_3$ ).

На рис. 2в показано расположение следов диаграмм направленности синтезированной многолучевой приёмной антенны на поверхности Земли ( $H$  – высота орбиты,  $\square$  - рабочий угол места,  $\mathbf{V}$  – вектор скорости КА). В данном конкретном примере три парциальных ДНА разнесены по азимутальному направлению; когерентная обработка полученной таким образом "трёхканальной" радиоголограммы позволяет существенно (в данном конкретном примере, втрое), увеличить время синтеза апертуры, и, тем самым, реализовать нестандартный режим *высокодетальной маршрутной съёмки*.

При сохранении средней излучаемой мощности показатели качества формируемых в этом режиме радиолокационных изображений будут несколько отличаться от параметров базового режима высокодетального наблюдения, реализуемого прожекторной (телескопической) съёмкой ("*Spotlight*"). Следует ожидать незначительного уменьшения энергетического потенциала системы и существенного (в данном примере, в три раза) роста первичного информационного потока на выходе бортовой аппаратуры РСА.

Пример 2. Широкозахватная маршрутная съёмка с высоким разрешением

Так как в данном режиме не требуется предельного пространственного разрешения, то возникает возможность разнесения субимпульсов в пачке по частоте (см. рис.2а и 2б). Тогда организация угломестного сканирования ДНА во время съёмки (т.е. реализация *многоканального режима типа ScanSAR*) позволяет резко увеличить количество парциальных полос захвата, и, тем самым, суммарную полосу захвата, по

сравнению с параметрами стандартного режима полосовой съёмки (типа *Stripmap*) при сохранении остальных характеристик РЛИ (разрешающей способности, энергетических характеристик и уровня неоднозначности) (см. рис. 2в).

### Информационные возможности РСА.

В рамках сформированного технического облика бортового радиолокационного комплекса нашли отражение основные современные тенденции развития космических средств радиолокационного наблюдения Земли из космоса, а именно:

- использование технологии активных фазированных антенных решёток (АФАР);
- применение широкополосных и сверхширокополосных зондирующих сигналов;
- реализация поляриметрических режимов радиолокационной съёмки;
- применение цифровых методов многоканального формирования и обработки радиолокационных сигналов с помощью переконфигурируемых распределённых бортовых вычислительных средств.

Представление о системных характеристиках и параметрах стандартных и многоканальных режимов наблюдения РСА дают данные таблицы.

Таблица. Характеристики многоапертурного РСА

Характеристика	Режим съёмки			
	Телескопический (Spotlight) (Высокодетальный маршрутный)	Маршрутный (Stripmap) (Широкозахватный маршрутный)	Сканирующий (ScanSAR) I	Сканирующий (ScanSAR) II
Высота орбиты, км	500			
Частотный диапазон	X (длина волны 3,1 см)			
Максимальная ширина спектра сигнала, МГц	600			
Поляризационные режимы (передача/приём)	В/В, Г/Г, В/В+ В/Г, Г/Г+ Г/В, В/Г+Г/В В/В+ В/Г + Г/Г+ Г/В, эллиптическая поляризация с заданными параметрами			
Линейное разрешение, м	0,5-1 (0,67)	2 (3,3)	6-10	100-150
Полоса захвата, км	7,5-20 (20)	7,5-20 (80)	15-80	≤400
Полоса обзора, км	400	400	400	500

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: "В" – вертикальная поляризация, "Г" – горизонтальная поляризация.

Функциональные возможности комплекса бортовых и наземных средств РСА позволяют реализовать обширную номенклатуру режимов функционирования радиолокационной системы наблюдения, том числе, таких как:

- формирование радиолокационных изображений;
- интерферометрия; измерение параметров рельефа и смещений;
- поляриметрия;

- измерение удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) объектов наблюдения;
- измерение параметров движения наземных объектов;
- измерение параметров морской поверхности.

Таким образом, данный радиолокационный комплекс позволяет решать большой круг научных и прикладных задач дистанционного зондирования Земли за счёт высоких показателей качества формируемой радиолокационной информации и большой степени функциональной гибкости аппаратуры при проведении радиолокационных съёмок, обработке и интерпретации радиолокационной информации.

### **Выводы**

1. Построение бортовой аппаратуры РСА на основе двумерной сегментированной цифровой активной фазированной антенной решётки (ЦАФАР) позволяет существенно ослабить ограничения на тактико-технические характеристики радиолокационной системы наблюдения, обусловленные наличием эффекта неоднозначности при периодическом зондирующем сигнале.

2. Сочетание методов многомерного кодирования формы сигнала при передаче и цифрового формирования диаграммы направленности при приёме сигнала позволяет в РСА с АФАР реализовать большую номенклатуру режимов наблюдения земной поверхности, в том числе, высокодетальных и широкозахватных детальных режимов маршрутной съёмки земной поверхности.

3. Для радиолокаторов с синтезированной апертурой, построенных на основе АФАР X-диапазона, представленный технический облик бортовой аппаратуры позволяет реализовать информационные и функциональные возможности радиолокационного наблюдения Земли из космоса, близкие к предельным.

### **Литература**

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы зондирования Земли. - М.: Радиотехника, 2005. – 366 с.
2. G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira. Multidimensional Waveform Encoding: A New Digital Beamforming Technique for Synthetic Aperture Radar Remote Sensing. /IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No. 1, January 2008
3. N. Gebert, G. Krieger, A. Moreira. Digital Beamforming on Receive: Techniques and optimization Strategies for High Resolution Wide-Swath SAR Imaging. / IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 45, No. 2, April 2009
4. C. Fischer, C. Heer, G. Krieger, R. Werninghaus. A high resolution wide swath SAR. Proc. EUSAR 2006, 6<sup>th</sup> European Conference on Synthetic Aperture Radar, 16-18 May 2006, Dresden, Germany
5. C. Fischer, C. Schaefer, C. Heer. Technology Development for the HRWS (High Resolution Wide Swath) SAR. IRS 2007
6. Коваленко А. И. Анализ эффекта доплеровской неоднозначности для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой детального наблюдения Земли // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. - Т.13, № 4. - С. 22-33