

## **Оценка предельной пространственной разрешающей способности РСА космического базирования с бортовой обработкой сигналов**

В.В.Костров, А.В. Ракитин, А.А. Сидоров

*Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых 602264 г.Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23. ФРЭКС, каф. РТ. E-mail:vvk@mit.ru*

*Рассмотрен вариант организации обработки сигналов РСА на борту космического аппарата. Проведен расчет предельной пространственной разрешающей способности при использовании цифровых сигнальных процессоров платформы «Мультикор».*

*The variant of organization of SAR signals processing onboard a space vehicle is considered. The account of limiting spatial resolution is carried out at use of digital signal processors of a platform «Multicore».*

В современных радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования формирование радиолокационных изображений (РЛИ) чаще всего осуществляется в наземных центрах обработки информации [1]. В соответствии с [2] для развития комплексных систем предполагается создать Единую территориально-распределенную информационную систему дистанционного зондирования (ЕТРИС ДЗ). Данная система призвана функционально объединить разобщенные и принадлежащие разным ведомствам наземные комплексы и центры приема, обработки и распространения космической информации. Одной из основных функций центров приема является подготовка потребителям оптико-электронных снимков и обработка радиоголограмм (формирование и обработка РЛИ). Важнейшим компонентом ЕТРИС ДЗ является система геопорталов, позволяющая включить в территориально-распределенную систему банков геоинформационные данные различных организаций. Тем самым будет создан единый банк геоинформационных данных ЕТРИС ДЗ, обеспечивающий свободный доступ потребителям информации и учитывающий возможности иностранных поставщиков космической информации.

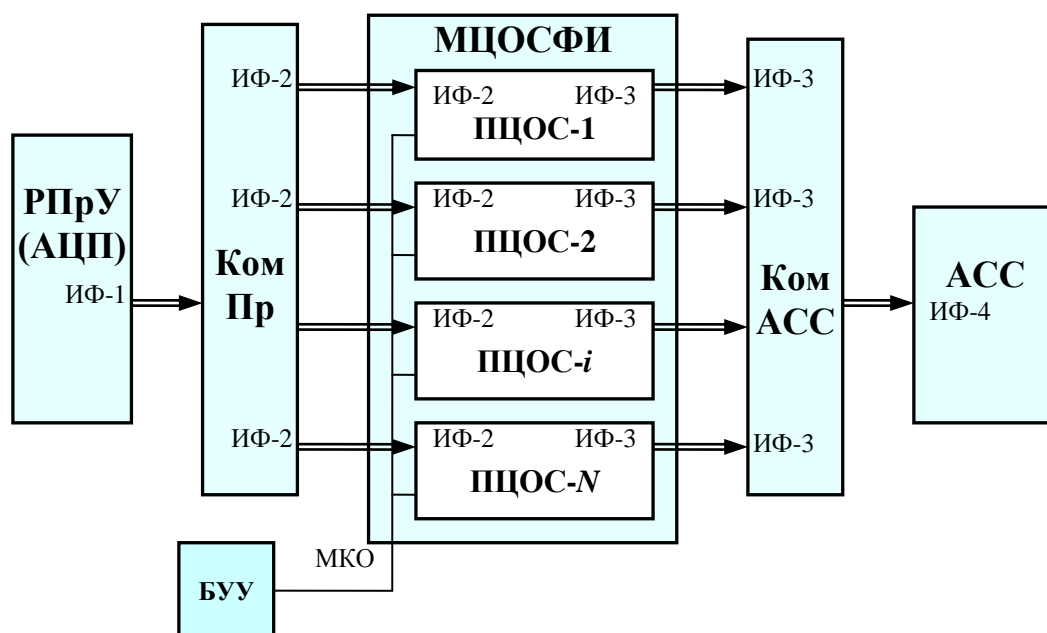
Одной из основных проблем функционирования ЕТРИС ДЗ является большая задержка выдачи потребителям обработанных изображений. Задержка в выдаче изображений составляет до 2 часов для оптико-электронных средств и до 8 суток для радиотехнических средств космического аппарата (КА) [3]. Следует заметить, что ЕТРИС ДЗ, будучи сложной разветвленной и распределенной системой, использующей космические линии связи, не является системой реального времени. Для обеспечения режима реального времени получения информации в состав бортовой аппаратуры КА включается радиационно стойкий вычислительный кластер, осуществляющий цифровую обработку сигналов и формирование первичного РЛИ. Современные РСА позволяют получить субметровую разрешающую способность [4], что обеспечивает детальную съемку местности. Однако для реализации потенциальных возможностей РСА требуется обеспечить высокую производительность вычислительных средств, характеристики которых становятся определяющими качество синтезирования РЛИ.

*Цель данного доклада – определить ограничения, которые вносит устройство синтезирования РЛИ с использованием отечественных процессоров, а также предельные характеристики землеобзора и пространственного разрешения.*

В качестве базового элемента для построения системы цифровой обработки сигналов (ЦОС) далее рассматривается радиационно стойкий процессор платформы «Мультикор». Как правило, на таких процессорах строится вычислительный кластер,

образующий модуль цифровой обработки сигналов и формирования изображения (МЦОСФИ). В элементарном кластере процессоры ЦОС (ПЦОС) подключаются к коммутатору-маршрутизатору по LINK-портам, через которые происходит обмен информацией с внешними устройствами. В элементарном кластере может содержаться 2...4 ПЦОС, а в МЦОСФИ – несколько элементарных кластеров.

Упрощенная структурная схема МЦОСФИ и основных цепей его взаимодействия с радиоприемным устройством (РПрУ), бортовым устройством управления (БУУ) и аппаратурой спутниковой связи (АСС) представлена на рис. 1. Получение информации о параметрах и режимах съемки, о навигационных параметрах, передача служебной информации от БУУ производится по мультиплексным каналам обмена (МКО). Полученные РСА сигналы оцифровываются с помощью АЦП и передаются по информационному каналу ИФ-1 в коммутатор-маршрутизатор КомПр. Ввод данных в МЦОСФИ и вывод полученных в результате обработки данных из МЦОСФИ производится по информационным каналам ИФ-2 и ИФ-3 с помощью 2-х коммутаторов: КомПр и КомАСС.



**Рис. 1. Обобщенная структурная схема формирования и передачи РЛИ**

Коммутатор-маршрутизатор оцифрованных данных с выхода радиоприемника КомПр осуществляет:

- ✓ упаковку данных в 32-х разрядные слова;
- ✓ коммутацию кадров данных по каждому процессору ЦОС (ПЦОС).

Коммутатор данных на выходе КомАСС осуществляет:

- ✓ сбор обработанных данных (фрагментов РЛИ) от каждого процессора по мере их готовности;

- ✓ упорядочивание данных каждого ПЦОС, что завершает формирование первичного радиолокационного изображения.

Сформированное первичное РЛИ в виде пакетов передается с заданной скоростью потребителям по спутниковому каналу связи. Отметим, что в данном случае потребитель может находиться на подвижном объекте, где производится окончательная (тематическая) обработка изображений. Таким образом, при изложенном построении системы обеспечивается оперативность получения информации об интересующем участке поверхности Земли. Вместе с тем из-за ограничения вычислительных ресурсов

на борту КА и борту подвижного объекта трудно обеспечить высокое качество первичного РЛИ и глубокую тематическую обработку для решения задач различных потребителей.

Одной из основных характеристик всей системы получения РЛИ является ее пространственное разрешение. Рассмотрим возможности МЦОСФИ на процессорах платформы «Мультикор» для получения предельной разрешающей способности и рекомендации по выбору предельных параметров сигналов с широкой полосой. Типичное значение тактовой частоты процессора составляет  $f_{CLK} = 80$  МГц. Скорость входного потока данных, передаваемых в процессор по одному каналу, ограничена величиной 40 Мбайт/с (соответствует  $f_{CLK}/2$ ). В каждом процессоре имеется 2 канала LINK, что потенциально увеличивает тактовую частоту приема до 80 МГц, однако накладные расходы снижают максимальную скорость приема данных и записи их в память до величины примерно 70 Мбайт/с.

Если каждый передаваемый в МЦОСФИ байт содержит информацию об одном отсчете сигнала (2 квадратурных составляющих сигнала в виде четырех разрядных чисел), то потенциальная скорость передачи данных (отсчетов) из приемника составляет 70 Мбайт/с. Поскольку максимальная скорость приема данных остается постоянной, то с повышением разрядности представления отсчетов максимальное число дискретов, поступающих на обработку, будет пропорционально снижаться. Это эквивалентно снижению частоты выборок с выхода приемника. Так при представлении одного комплексного отсчета 2-мя байтами (8-ми разрядные квадратуры) максимально возможная частота дискретизации равна примерно 35 МГц. При использовании представления 16-ти разрядными числами максимальная частота дискретизации составит 17 МГц.

Скорость оцифровки данных в приемнике может быть несколько увеличена за счет накопления данных за время стробирования приемника  $T_{ПРМ}$  и трансформации времени при выдаче данных (увеличение времени выдачи до периода следования зондирующих импульсов  $T_{П}$ ) [5]. Введение блока изменения временного масштаба позволяет примерно на 40...50% увеличить частоту дискретизации в АЦП. Таким образом, тактовая частота АЦП может быть доведена до величины  $f_T = (1,4...1,5) \times 70$  МГц = 98...105 МГц  $\approx 100$  МГц. При использовании для модуляции псевдослучайных последовательностей, например, М-последовательности, максимальная тактовая частота кода берется равной  $f_k = f_T/2$ , т.е. 50 МГц, поэтому ширина спектра зондирующего сигнала не должна превышать 50 МГц. Для реализации метода трансформации времени при выдаче данных в коммутаторе КомПр необходимо предусмотреть буферизацию данных одной строки. С этой целью в состав КомПр вводится двухстраничная высокоскоростная память (для разделения процессов записи – считывания). Аналогичная двухстраничная память должна быть предусмотрена в КомАСС.

Приведенные данные позволяют оценить потенциальное разрешение по дальности. Цена дискрета по наклонной дальности  $\delta R_d = 0,5 \cdot c \cdot f_T^{-1}$ , где  $c$  – скорость света. При  $f_T = 100$  МГц имеем  $\delta R_d = 1,5$  м. Первичное разрешение по координате наклонной дальности  $\delta R_H$  определяется длительностью кода (шириной спектра зондирующего сигнала) и для предельных частот дискретизации составляет  $\delta R_H = 3,0$  м.

Разрешающая способность по дальности на Земле (на местности) зависит от позиции луча  $\beta$ . Для элемента кода (первичная разрешающая способность) и одного дискрета разрешающая способность по дальности на местности  $\delta R_3$  и  $\delta R_{3д}$  составляет

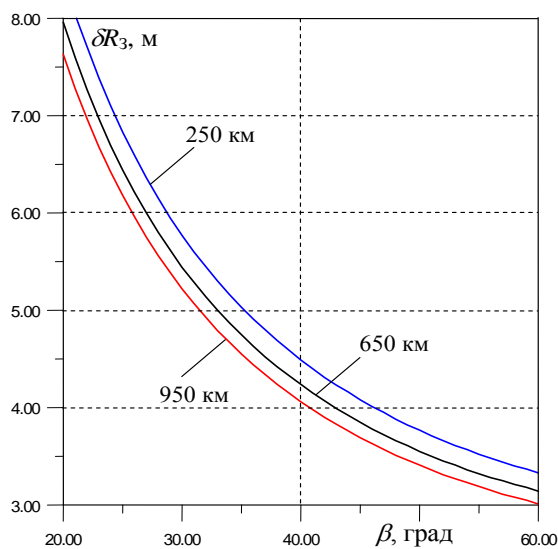
соответственно  $\delta R_3 = \frac{\delta R_H}{\cos \gamma}$ ,  $\delta R_{3д} = \frac{\delta R_д}{\cos \gamma}$ , где  $\gamma$  – угол между направлением на фазовый центр РСА и местным горизонтом. На рис. 2 приведены зависимости потенциальной разрешающей способности по дальности на местности  $\delta R_3$  от угла визирования луча  $\beta$  для 3-х значений высоты орбиты КА (250, 650 и 950 км). Из графиков видно, что в широком диапазоне изменения высоты орбиты разрешающая способность изменяется незначительно (на 5...10 %). Вместе с тем она существенно зависит от угла визирования: при малых углах луча  $\beta$  разрешение по дальности падает более чем в 2,5 раза. Первичная разрешающая способность  $\delta R_3$  изменяется в пределах 3...8 м. Отметим, что угол  $\beta = 60$  град является критическим для высоты орбиты 950 км, поэтому значение разрешающей способности на поверхности Земли практически совпадает с разрешением по координате наклонной дальности  $\delta R_H$ .

Потенциальное разрешение по азимутальной координате существенно зависит от режима съемки и линейных размеров антенной системы. Кроме того, в РСА космического базирования скорость движения луча по поверхности Земли снижается, поэтому разрешающая способность улучшается. С учетом этого потенциальная разрешающая способность по азимутальной координате для РСА космического базирования определяется соотношением

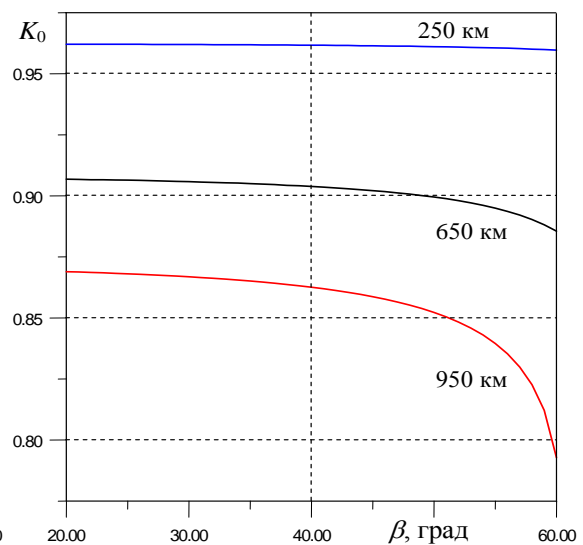
$$\delta_{x0} = \frac{L_{az}}{2} \cdot \frac{V_{A0}}{V_0} = K_0 \frac{L_{az}}{2},$$

где  $L_{az}$  – линейный размер антенны в азимутальной плоскости,  $V_{A0}$  – скорость движения луча по поверхности Земли,  $V_0$  – скорость движения носителя,  $K_0$  – коэффициент улучшения азимутальной разрешающей способности.

Зависимость  $K_0$  от угла визирования  $\beta$  приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что для низкоорбитальных КА улучшение разрешения незначительно (около 4%). Однако при увеличении высоты орбиты оно может достигать 15...20 %, причем увеличение  $\beta$  приводит к улучшению азимутальной разрешающей способности ( $K_0$  уменьшается).



**Рис. 2. Зависимость разрешающей способности по дальности от угла визирования**



**Рис. 3. Зависимость коэффициента улучшения азимутальной разрешающей способности от угла визирования**

Обобщим полученные выше результаты. Примем для определенности раскрыв

антенны в азимутальной плоскости  $L_{аз} = 5$  м, тогда  $\delta_{x0} = 2,5 \cdot K_0$  м. Расчетные значения предельной пространственной разрешающей способности для различных ситуаций сведены в таблицу.

Таблица. Значения потенциальной разрешающей способности

Угол визирования $\beta$	Высота орбиты		
	250 км	650 км	950 км
20 град	8,3 м × 2,4 м	7,9 м × 2,3 м	7,6 м × 2,2 м
60 град	3,4 м × 2,4 м	3,2 м × 2,2 м	3,0 м × 2,0 м

При отношении сигнал-шум 10 дБ сформированное РЛИ дает радиометрическое разрешение порядка 3 дБ [3]. Для повышения качества РЛИ и достижения требуемого радиометрического разрешения необходимо проводить некогерентное накопление сигналов от ячеек первичного разрешения ( $N = N_x N_y$ ,  $N_x$  – число некогерентных накоплений по азимуту,  $N_y$  – число некогерентных накоплений по дальности). Одновременно можно выровнять размер ячеек. Например, при высоте орбиты 650 км можно получить при угле установки луча  $\beta = 20$  град ( $N_y = 1$ ,  $N_x = 3$ ) – 7,9 м × 6,9 м; при угле  $\beta = 60$  град ( $N_y = 2$ ,  $N_x = 3$ ) – 6,4 м × 6,6 м. Это обеспечит достижение радиометрического разрешения порядка 2...2,4 дБ. Для некоторых задач землеобзора требуется радиометрическое разрешение менее 1 дБ [3]. Его обеспечение за счет некогерентного накопления приведет к еще большей деградации пространственного разрешения, которое составит примерно  $\approx 16$  м × 18 м. Этого явно недостаточно для решения ряда тематических задач.

Таким образом, одним из факторов, сдерживающих совершенствование высококачественного формирования РЛИ на борту космического аппарата, является ограничение быстродействия сигнальных процессоров и скорости обмена с памятью. Нарращивание вычислительной мощности и глубокое распараллеливание вычислительных процессов приводит к ухудшению энергетических и массогабаритных характеристик вычислительного кластера МЦОСФИ. Такой путь для малых космических аппаратов не приемлем. В связи с этим перед электронной промышленностью должны быть поставлены задачи по налаживанию отечественного производства высокоскоростных радиационно стойких процессоров и высоконадежных интерфейсов. Появление на рынке подобных интегральных схем позволит в значительной степени решить проблему повышения уровня и качества обработки радиолограммы на борту космического аппарата.

### Литература

1. Носенко Ю.И., Лошкарев П.А. Единая территориально-информационная система дистанционного зондирования Земли – проблемы, решения, перспективы (Часть 1) // ГЕОМАТИКА (GEOMATICS). 2010. №3. С.35-42.
2. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. – М.: Федеральное космическое агентство, 2006. – 82 с.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
5. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов и др. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531с.