

8. КОСМИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР "СЕВЕРЯНИН-М" С ШИРОКОЙ ПОЛОСОЙ СЪЁМКИ

**С.Л. Внотченко, М.Ю. Достовалов, В.С. Дудукин, А.И. Коваленко,
Т.Г. Мусинянц, В.В. Риман, А.И. Селянин, С.Н. Смирнов, А.В. Шишанов**

ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов»

Аннотация. Рассматриваются основные проектные характеристики космического бортового радиолокационного комплекса "Северянин-М". Приводятся примеры радиолокационных изображений земной поверхности, полученные в процессе лётных испытаний комплекса.

ВВЕДЕНИЕ

Малогабаритный бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК) "Северянин-М" является радиолокатором космического базирования и предназначен для решения задач исследования природных ресурсов Земли и оперативной гидрометеорологии, включая мониторинг ледовой обстановки. До сих пор эти задачи в нашей стране решались некогерентными радиолокаторами бокового обзора, имевшими линейное разрешение порядка 1,3-2,5 км в полосе съёмки до 460 км. При разработке нового радиолокатора "Северянин-М" ставилась задача улучшить основные потребительские характеристики системы в условиях ограничений на массу и энергопотребление аппаратуры, определяемых возможностями КА "Метеор-М". В первую очередь предполагалось увеличить полосу съёмки и повысить пространственное разрешение.

В радиолокаторах космического базирования для достижения широкой полосы съёмки используется два принципиально разных подхода:

- 1) режим бокового обзора с некогерентной обработкой, использовавшийся, например, в радиолокаторе бокового обзора (РБО) космического аппарата "Океан" [1];
- 2) обзорный режим со сканированием антенного луча по углу места (ScanSAR), нашедший широкое применение в когерентных радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА).

Первый подход потенциально может обеспечивать очень широкую полосу съёмки, но азимутальное разрешение РБО здесь ограничено шириной диаграммы направленности (ДН) антенны в горизонтальной плоскости, т.е., в конечном счёте, допустимой длиной антенны.

Второй подход не имеет столь сильных ограничений по азимутальному разрешению, но достижимая полоса съёмки здесь лимитируется максимальным углом места, который, в свою очередь, определяется площадью раскрытия антенны РСА.

Для БРЛК "Северянин-М" был предложен новый способ радиолокационной съёмки, при котором достигается такая же, как в РБО полоса съёмки, но благодаря особому режиму излучения обеспечивается возможность некоторого улучшения азимутального разрешения.

РЕЖИМ ИЗЛУЧЕНИЯ

В радиолокаторе "Северянин-М" используется пачечный режим излучения, показанный на рис. 1:

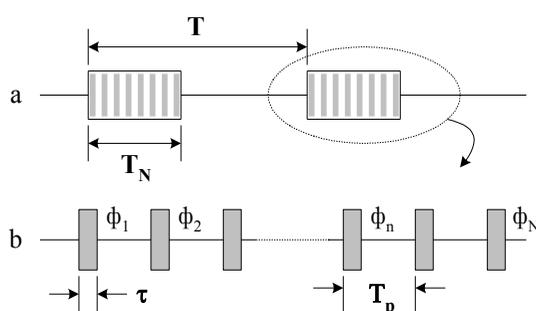


Рис. 1. Зондирующий сигнал

Вид зондирующего сигнала – пачка импульсов с фазокодовой модуляцией [2]. Импульс в пачке имеет длительность t . Это прямоугольный радиоимпульс, у которого меняется только начальная фаза f_n ($0, \pi$). Частота повторения импульсов внутри пачки $F_p = 1 / T_p$, где $T_p = Qt$ (скважность импульсов в пачке выбрана равной $Q = 4$, что связано с особенностями применяемого в передатчике клистрона). Количество импульсов в пачке равно N . Длительность пачки равна $T_N = (N - 1)T_p$. Период повторения пачек $T = 19$ мс. В зависимости от используемой длительности импульса t и периода повторения T_p БРЛК имеет два режима съёмки: низкого разрешения (НР) $t = 4$ мкс, $T_p = 16$ мкс и среднего разрешения (СР) $t = 2$ мкс, $T_p = 8$ мкс.

Для повышения азимутального разрешения БРЛК выбран достаточно длинный зондирующий сигнал, причём максимальная протяжённость излучаемого зондирующего сигнала T_N ограничивается временем его распространения до ближнего края полосы съёмки и обратно, т.е.

$$T_N J 2R_{\min} / c. \quad (1)$$

При минимальной высоте орбиты КА 815 км эта длительность составляет $T_N J 5,9$ мс. Для обеспечения однозначности по дальности следующий зондирующий сигнал излучается только после приёма отражённых сигналов со всей полосы съёмки.

Повышенное азимутальное разрешение радиолокатора I_x может обеспечиваться за счет когерентной обработки (синтезирования апертуры) на длине одного зондирующего сигнала, т.е. $T_{\text{сint}} = T_N$. Имеется принципиальный предел линейного разрешения по азимуту $I_{x \min}$ при таком методе обработки. При синтезировании апертуры по пачке импульсов фиксированной длины наилучшее азимутальное разрешение $I_{x \min}$ достигается на ближнем краю полосы съёмки ($R = R_{\min}$)

$$I_{x \min} = \frac{\lambda R_{\min}}{2 V T_{\text{сint}}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны; R – наклонная дальность; V – орбитальная скорость; $T_{\text{сint}}$ – временной интервал синтезирования.

Подставляя условие (2) в (3) можно получить оценку предельного разрешения на ближнем краю полосы съёмки

$$I_{x \min} \approx \lambda c / 4V, \quad (3)$$

В верхней части X-диапазона (3,1 см) наилучшее разрешение по азимуту достигает величины $I_{x \min} \approx 300$ м. Во всей полосе съёмки азимутальное разрешение несколько хуже. Таким образом, синтезирование апертуры за время излучения одной пачки T_N позволяет в несколько раз повысить азимутальное разрешение БРЛК по сравнению с некогерентными системами.

ПАРАМЕТРЫ РАДИОЛОКАТОРА

Для обеспечения широкой полосы съёмки в БРЛК "Северянин-М" используется антенное устройство со специальной (косекансного типа) формой диаграммы направленности в вертикальной (угломестной) плоскости. Требования к ДН такой антенны в рабочем секторе углов места (от 25° до 48°) определяются исходя из постоянства мощности отражений. Форма угломестной ДН антенны показана на рис. 2.

В азимутальной плоскости антенна имеет узкую ДН – ее ширина по уровню половинной мощности примерно равна $0,12^\circ$. Особенностью ДН является отклонение антенного луча от нормали в азимутальной плоскости на величину около 8° . Этим

Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой

обеспечивается минимизация влияния интенсивных отражений от области надир (первой зоны Френеля), которые особенно опасны при длинном зондирующем сигнале и широкой полосе съёмки.

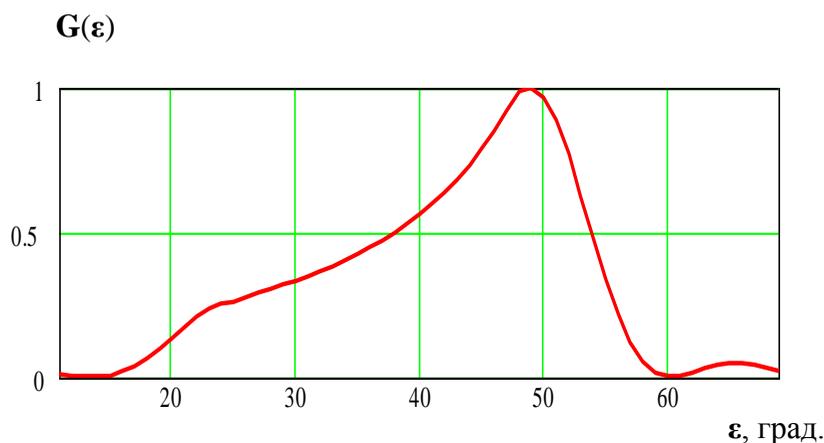


Рис. 2. Форма нормированной ДН антенны по мощности

Антенна выполнена на основе волноводно-щелевой решетки. Поляризация антенны на излучение и прием – вертикальная. Масса антенного полотна не превышает 40 кг.

Основные проектные характеристики БРЛК "Северянин-М" для высоты орбиты КА 832 км приведены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики БРЛК "Северянин-М"

Параметры	Значения	
Длина волны радиолокатора	3,1 см	
Коэффициент усиления антенны	38,5 дБ	
Длина раскрыва антенны	13,4 м	
Мощность передатчика	0,8 кВт	
Номинальная полоса съёмки	600 км	
Рабочие углы съёмки	25°-48°	
Режимы съёмки	Режим НР	Режим СР
Чувствительность приёмника	-146 дБ/Вт	-143 дБ/Вт
Линейное разрешение по азимуту	800-1250 м	350-500
Линейное разрешение по дальности	750-1300 м	400-650
Шумовой эквивалент УЭПР	-23 дБ	-20 дБ
Расширенная полоса съёмки	750 км	
Рабочие углы съёмки	22°-50°	

Режимы съёмки	Режим НР	Режим СР
Линейное разрешение по азимуту	800-1250	350-550
Линейное разрешение по дальности	750-1450	400-750
Поток информации	не более 10 Мбит/с	
Энергопотребление бортовой аппаратуры	не более 1 кВт	
Масса бортовой аппаратуры	не более 150 кг	

ПРОВЕДЕНИЕ СЪЕМОК

После вывода БРЛК "Северянин-М" на орбиту большинство характеристик аппаратуры радиолокатора соответствовало норме, за исключением параметров антенного устройства, которое имело сниженный на 3,5-4,5 дБ коэффициент усиления и искажённую форму диаграммы направленности (ДН) антенны. Причины возникновения этого дефекта не являются предметом рассмотрения в данной работе.

Учитывая, что описанный дефект ДН, хотя и ухудшал параметры комплекса, тем не менее, позволял проводить съёмки; с конца октября 2009 года по апрель 2010 года было выполнено более 100 сеансов суммарной продолжительностью свыше 12 часов.

Обработка данных съёмки с целью получения радиолокационных изображений (РЛИ) требует точной оценки угловой ориентации ДН антенного устройства в азимутальной плоскости, поскольку БРЛК обладает очень высокой чувствительностью к этому показателю. Причём, следует учитывать, что ширина ДН составляет $0,12^\circ$, в то время как суммарная погрешность ориентации ДН антенного устройства, складывающаяся из нескольких составляющих угловых ошибок, даже в штатных условиях может достигать $0,9^\circ$.

Формирование РЛИ обеспечивается за счёт специальной обработки радиолокационных данных в частотно-временной области. При этом, для получения значения разрешения по азимуту около 500 м реализуется частотная полоса менее 200 Гц, что в угловых единицах соответствует примерно $0,02^\circ$. Отсюда следует, что чем больше неизвестная угловая разориентация антенны по азимуту, тем больше область поиска доплеровской частоты, на которой происходит оптимальное сжатие сложного сигнала в каждом элементе РЛИ.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

Проблема усугубляется тем обстоятельством, что из-за пониженного отношения сигнал/шум точные измерения доплеровской частоты требуют обработки и усреднения больших массивов данных.

С учетом описанных особенностей были предложены принципы формирования РЛИ, обеспечивающие надежное функционирование алгоритмов при искаженной ДН антенны и при низком отношении сигнал/(шум+помеха). В настоящее время созданы предварительные версии программ формирования РЛИ.

ПРИМЕРЫ

Первые радиолокационные изображения (рис. 3-4) были получены в ноябре-декабре 2009 года. Для них характерна низкая контрастность и большой уровень шумов.

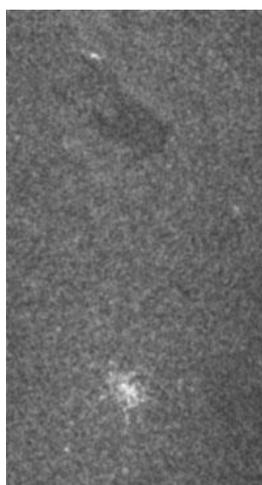


Рис. 3

Виток 591: в нижней половине РЛИ – Москва; в верхней – Рыбинское водохранилище

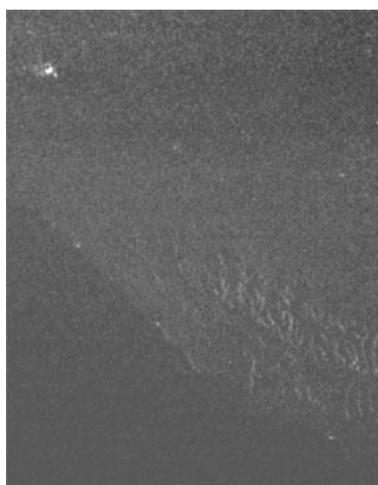


Рис. 4

Виток 861: вверху слева – Краснодар; внизу побережье Черного моря и Кавказские горы

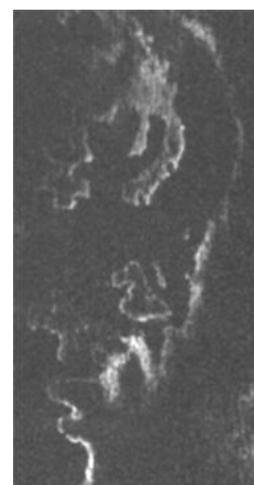


Рис. 5

Виток 1730: вверху – остров Александер

Впоследствии удалось несколько поднять контраст (рис. 5), однако оставались ещё ряд проблем и, в первую очередь, обеспечение хорошей фокусировки РЛИ по всему полю снимаемого сюжета. Совокупное влияние многих факторов делало задачу точного определения доплеровской частоты для фокусировки каждого участка РЛИ весьма сложной. Тем не менее, эта задача в основных чертах была решена. Ценой

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

некоторой потери разрешения были получены контрастные хорошо сфокусированные изображения обширных территорий, включая морскую поверхность.

В качестве примера на рис. 6 представлено РЛИ Антарктического полуострова. На изображении хорошо наблюдаются горные массивы и ледники в восточной части Земли Палмера. Уверенно определяются границы шельфового ледника Ларсена. В море Уэдделла видны плавающие айсберги разного размера. Видно, что пролив между островом Александер и Землей Палмера существенно освободился ото льда.

Ещё несколько примеров радиолокационных изображений: рис. 7 – Дальний Восток и Япония, рис. 8 – острова Северная Земля и полуостров Таймыр и, наконец, иллюстрирующий реальную производительность БРЛК рис. 9.

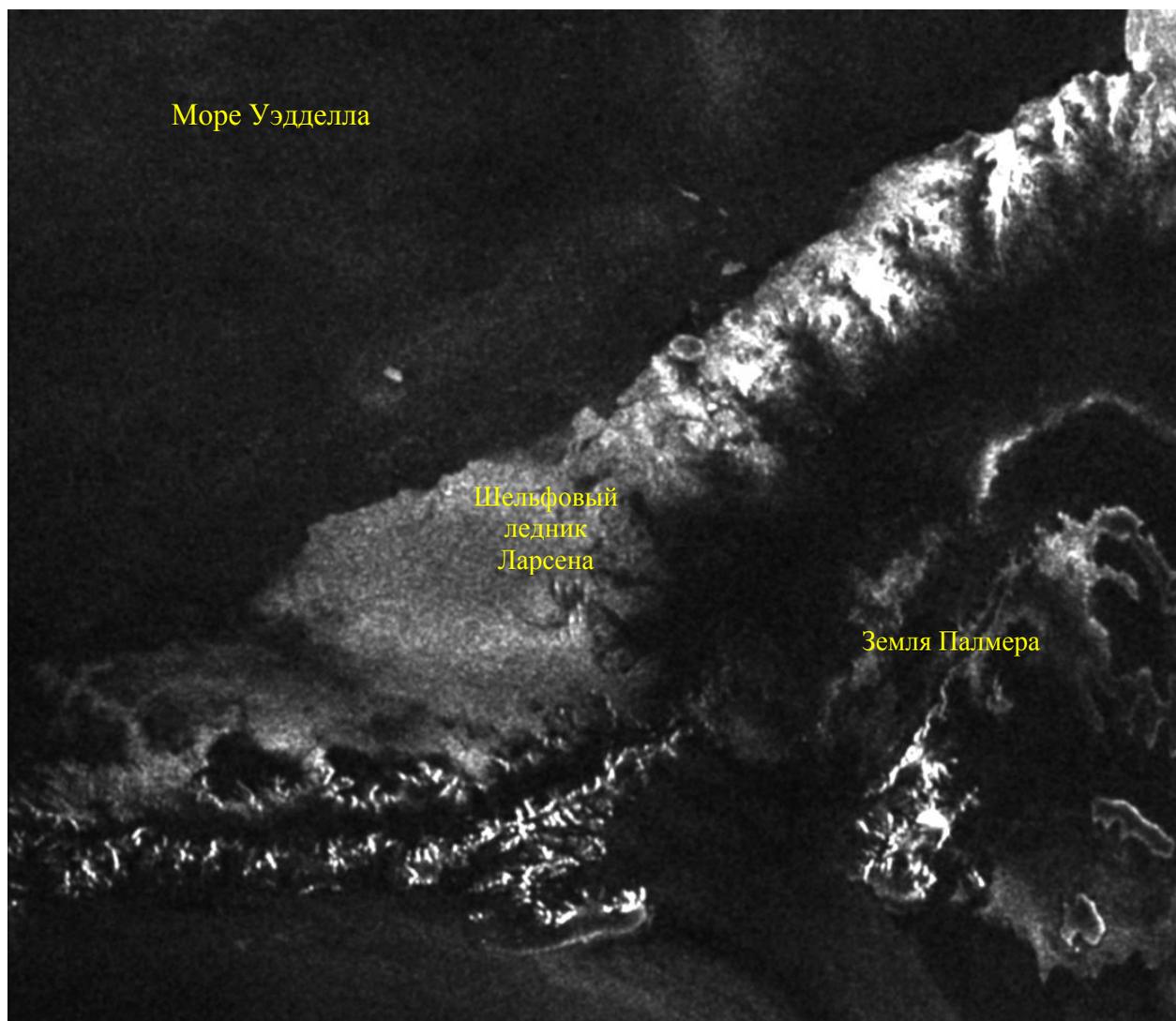


Рис. 6. Виток 1712 (16.01.10): режим среднего разрешения. Антарктида

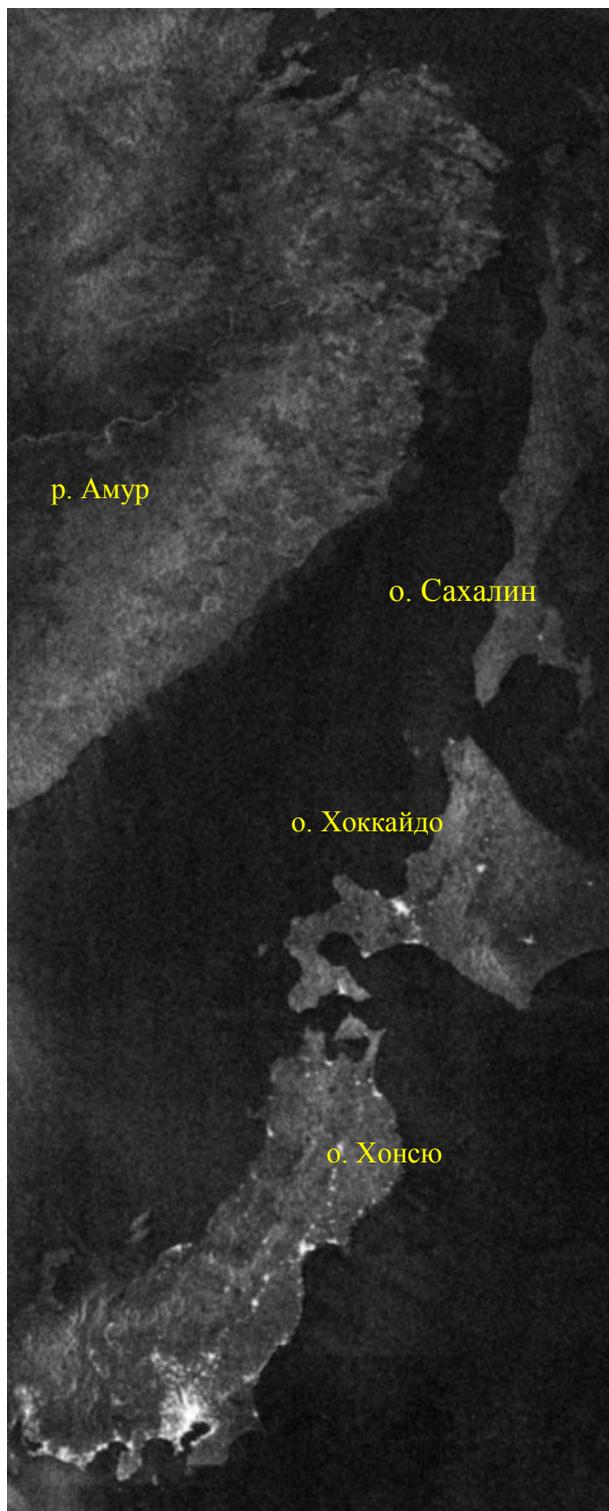
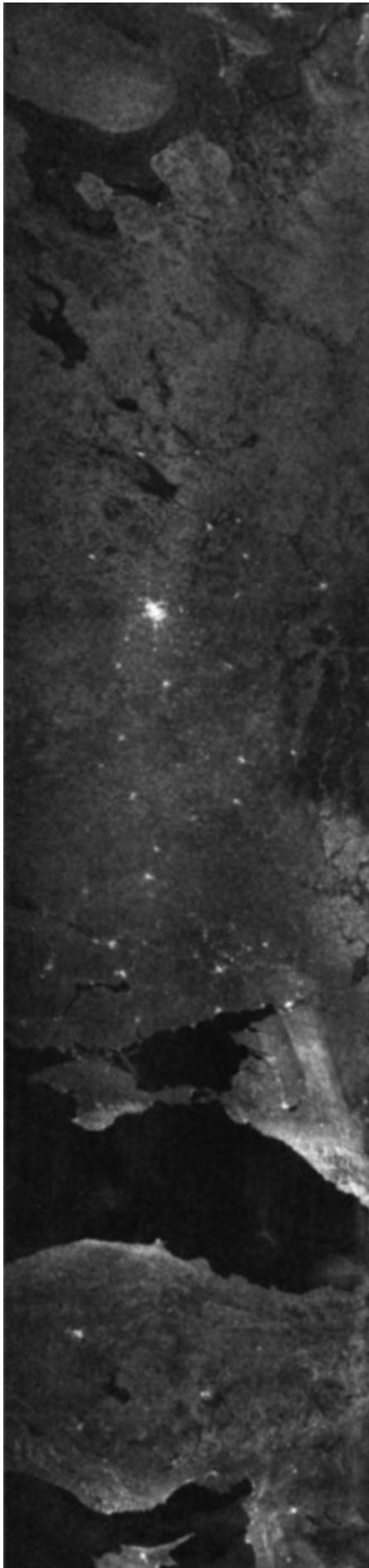


Рис. 7. Виток 1717 (16.01.10): режим среднего разрешения. Вверху слева – Дальний Восток (видна р. Амур); справа о. Сахалин; внизу - Япония



Рис. 8. Виток 1754 (19.01.10): режим среднего разрешения. Вверху слева – о-ва Северная Земля; в центре – замёрзшие озёра; внизу видны русла рек



*Рис. 9. Виток 2751 (30.03.10):
режим среднего разрешения.*

Иллюстрация производительности
БРЛК «Северянин-М»
при продолжительности съёмки
10 минут.

Сверху вниз:

Кольский полуостров,
Белое море,
Онежское озеро,
Рыбинское водохранилище,
Москва,
города Центральной и Южной России,
Азовское море,
Крым,
Чёрное море,
Турция,
Средиземное море,
остров Кипр

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Примеры радиолокационных изображений (РЛИ), представленные выше, позволяют сделать вывод, что основные особенности наблюдаемых сюжетов отображаются вполне корректно. В первую очередь это относится к воспроизведению контуров границ («море-суша») и элементов рельефа (горы). Хорошо различимы также образования, составленные из ярких точек (города). В результате можно сделать вывод о том, что БРЛК «Северянин-М» достоверно воспроизводит различные сюжеты.

Рассмотрим геометрические свойства изображений, к которым относятся длина маршрута, ширина полоса съёмки, углы визирования и линейное разрешение.

Длина маршрута при продолжительности съёмки 10 мин. превышает 4000 км, что согласуется с экспериментальными данными (рис. 9).

Ширина полосы съёмки в соответствии с техническими требованиями к БРЛК должна быть не менее 600 км. При этом минимальный угол съёмки равен 25° , а максимальный – 48° . Кроме того, требуется обеспечить получение радиоголограммы (т.е. первичной радиолокационной информации) в расширенной до 750 км полосе съёмки и при увеличенном до 22° - 50° диапазоне углов съёмки.

В аппаратуре БРЛК интервал получения радиоголограммы задаётся двумя параметрами: задержкой начала дискретизации, равной 5927 мкс и задержкой конца дискретизации, равной 15767 мкс. В зависимости от высоты орбиты H эти задержки соответствуют углам визирования, представленным в табл. 2.

Табл. 2. Углы съёмки в зависимости от высоты орбиты

Высота орбиты	Минимальный угол	Максимальный угол
$H = 815$ - 850 км	$22,01^\circ$ - $15,86^\circ$	$60,68^\circ$ - $59,86^\circ$
$H = 820$ км	$21,24^\circ$	$60,56^\circ$

Максимальный угол, определяемый задержкой конца дискретизации, реализуется в БРЛК с большим запасом. Фактически угломестная ДНА имеет заметный спад, начиная с 51° - 52° (см. рис. 2). Таким образом, расчётная полоса съёмки при рабочих углах 22° - 50° составляет 759 км ($H = 820$ км) и быстро увеличивается с увеличением угла съёмки: при 22° - 51° (810 км), при 22° - 52° (866 км) и т.д. Следует подчеркнуть, что чёткая граница для максимального рабочего угла отсутствует.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

Фактически этот угол определяется энергетикой сигнала и, в частности, отражающими свойствами наблюдаемых на дальнем краю РЛИ поверхностей.

Что касается выбора максимального рабочего угла, то практически он осуществляется оператором в процессе формирования радиолокационного изображения. Экспериментальные измерения РЛИ (рис. 10) подтверждают возможность проведения съёмки в полосе 750 км.

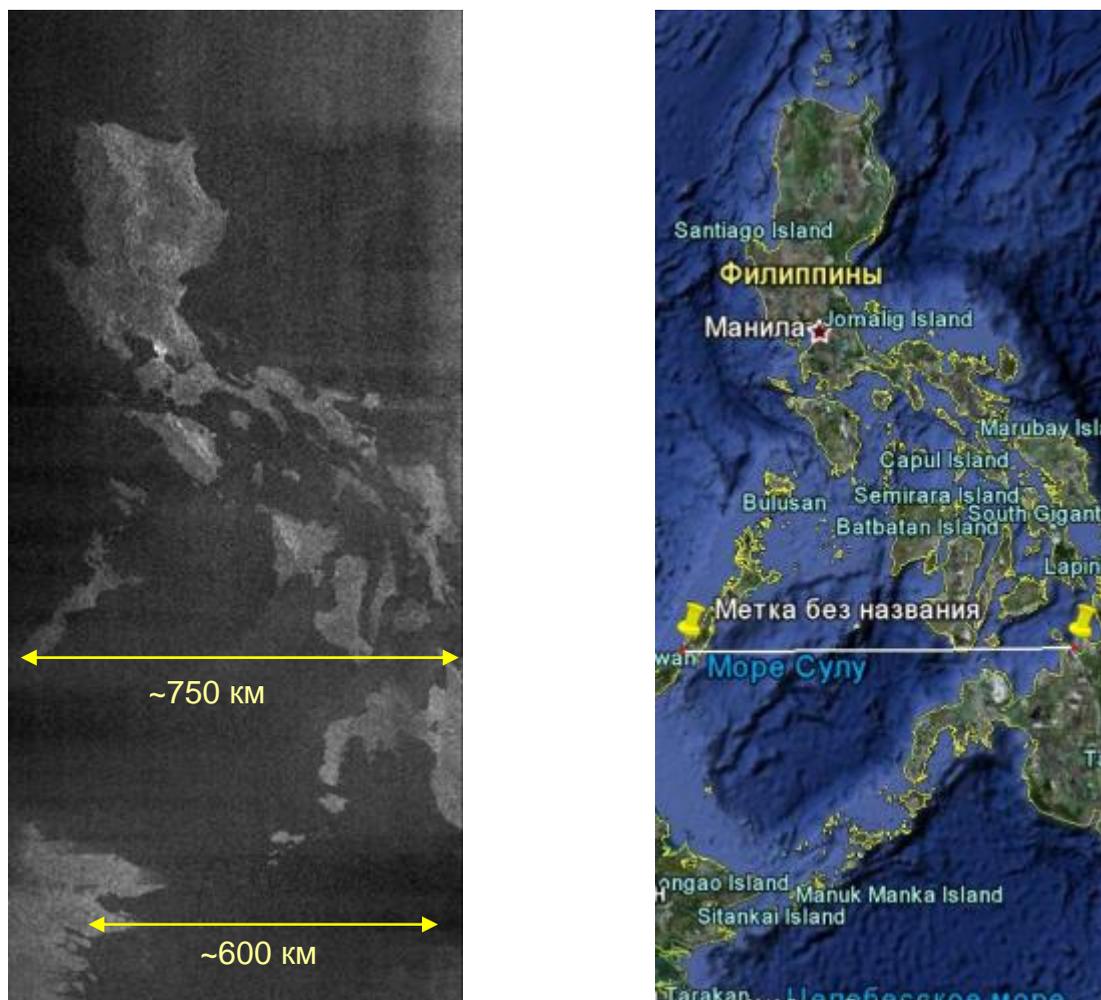


Рис. 10. Слева – радиолокационное изображение, полученное БРЛК «Северянин-М»; справа – соответствующий фрагмент карты Google Earth

Линейное разрешение БРЛК в диапазоне углов 25° - 48° должно составлять:

- в режиме среднего разрешения 400-650 м;
- в режиме низкого разрешения 800-1300 м.

Корректное экспериментальное подтверждение линейного разрешения требует разработки специальной методики, предусматривающей как использование соответствующих аппаратных средств (систем радиолокационных отражателей), так и специализированного программного обеспечения.

В данном случае была осуществлена приближённая оценка по имеющимся радиолокационным изображениям (рис. 4). Сначала выбирались характерные точечные отражения на РЛИ, определялись их яркостные сечения по горизонтальной дальности и по азимуту. Затем указанные сечения усреднялись, и оценивалась их ширина по уровню

-3 дБ. Рис. 11 иллюстрирует экспериментальную оценку линейного разрешения БРЛК по РЛИ в режиме среднего разрешения (ССР). Точечные цели выбирались при средних углах визирования ($\sim 30^\circ$ - 40°).

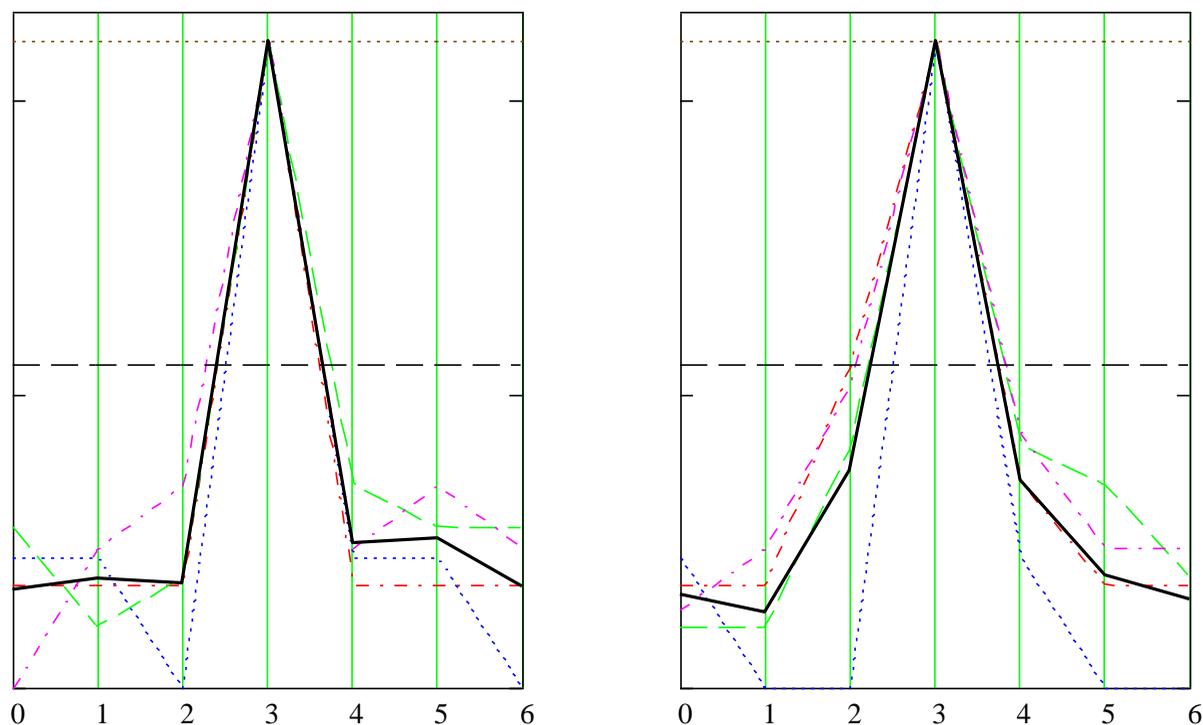


Рис. 11. Сечения усреднённого отклика на точечную цель:

слева – по горизонтальной дальности (разрешение 550 м);
справа – по азимуту (разрешение 650 м)

Сопоставление полученных оценок с расчётными данными показывает, что разрешение по горизонтальной дальности приблизительно соответствует

прогнозируемому, а разрешение по азимуту примерно на 60-80% хуже расчётного, что объясняется сложностью точного определения доплеровских частот при формировании РЛИ из-за низкой энергетики отражённого сигнала.

Следует подчеркнуть, что приведённые оценки разрешения относятся к радиолокационным изображениям, показанным на рис. 3-5. Изображения на рис. 6-10 сформированы с использованием алгоритмов, приводящих к некоторой потере линейного разрешения. Величина этих потерь требует отдельного рассмотрения.

В целом полученные экспериментальные результаты подтверждают правильность научно-технических решений, принятых при создании бортовой электронной аппаратуры БРЛК «Северянин-М».

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокация поверхности Земли из космоса. / Под ред. Л.М. Митника и С.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990.
2. Внотченко С.Л., Теличев А.В. Выбор бинарных кодовых сигналов для радиолокатора с доплеровской обработкой. / III Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва, ОАО «Российские космические системы», 1-3 июня 2010. (в печати).