

Системные принципы реализации космического радиолокатора «Северянин-М»

С.Л. Внотченко, А.И. Коваленко, В.В. Риман, А.В. Теличев, В.С. Чернышов,
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

Описываются основные системные решения и проектные характеристики бортового радиолокационного комплекса "Северянин-М". Приводятся оценки геометрических характеристик радиолокационных изображений, полученные по результатам лётных испытаний комплекса, а также теоретические оценки энергетических характеристик радиолокационных изображений.

The basic system decision and design performance of space borne radar "Severyanin-M" is described. Estimations of geometrical characteristics of the radar images, received during flight test are resulted and theoretical estimations of power characteristics of radar images are discussed.

Введение

Малогобаритный бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК) "Северянин-М" является радиолокатором космического базирования X-диапазона и предназначен для решения задач исследования природных ресурсов Земли, оперативной гидрометеорологии, включая мониторинг ледовой обстановки. До сих пор эти задачи решались некогерентными РЛС бокового обзора (БО) космических аппаратов "Океан" [1] и "Сич-1М" [2], имеющими линейное разрешение порядка 1,3-2,5 км в полосе обзора 450-460 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, повысить пространственное разрешение и несколько улучшить отношение сигнал/шум. Для достижения поставленных задач в космическом радиолокаторе "Северянин-М" были предусмотрены специальные технические решения, а именно:

- антенна с диаграммой направленности (ДН) в угломестной плоскости косекансного типа, обеспечивающая широкую полосу съёмки;
- специальный режим излучения, обеспечивающий однозначность по задержке и доплеровской частоте при небольшой площади антенны;
- зондирующий сигнал в виде длинной пачки фазоманипулированных импульсов, который при когерентной обработке позволяет реализовать синтезирование апертуры для получения повышенного азимутального разрешения.

При этом проектные характеристики БРЛК "Северянин-М" следующие:

- несущая частота зондирующего сигнала 9,6 ГГц (длина волны 3,1 см);
- рабочие углы съёмки, отсчитываемые от вертикали 25°– 48°;
- ширина полосы съёмки – не менее 600 км;
- линейное разрешение в полосе съёмки в режиме среднего разрешения 400–650 м; в режиме низкого разрешения 800–1300 м;
- шумовой эквивалент УЭПР без учета некогерентного накопления минус 20 дБ;
- энергопотребление бортовой аппаратуры радиолокатора – не более 1 кВт;
- масса бортовой аппаратуры – не более 150 кг.

Кроме того, должна быть обеспечена возможность экспериментальной съёмки в

расширенной до 750 км полосе захвата при углах места $22^\circ - 50^\circ$.

Характеристики антенного устройства

Для обеспечения широкой полосы съёмки используется антенна со специальной (косекансного типа) формой диаграммы направленности в вертикальной (угломестной) плоскости. Требования к форме ДН такой антенны в рабочем секторе углов места ε определяются исходя из постоянства мощности отражений для заданного класса протяженной поверхности. При этом принимаются во внимание следующие факторы, влияющие на изменение мощности отражений в полосе съёмки:

- 1) переменная наклонная дальность $R(\varepsilon)$, действующая как $1 / R^3(\varepsilon)$;
- 2) линейное разрешение по горизонтальной дальности L_z , величина которого пропорциональна $1 / \sin(\varepsilon)$;
- 3) зависимость удельной ЭПР от угла наблюдения ε , которая описывается законом Ламберта.

Аналитическое выражение для рабочего участка угломестной ДН с учетом сферичности земной поверхности имеет вид

$$G(\varepsilon) = \frac{1}{K_{\text{norm}}} \cdot \sqrt{\frac{\sin \varepsilon \cdot \left[K_s \cos \varepsilon - \sqrt{1 - (K_s \sin \varepsilon)^2} \right]^3}{\cos^2 [\arcsin(K_s \sin \varepsilon)]}}, \quad (1)$$

где $K_s = 1,1303$; $K_{\text{norm}} = 0,1569$.

Требуемая форма ДН антенны $G(\varepsilon)$ в вертикальной плоскости показана на рис. 1 штрихпунктирной линией, причем выражение (1) описывает её рабочий участок, т.е. угловой сектор от 25° до 48° . Сплошной линией изображена практически реализованная угломестная ДН, измеренная на стенде.

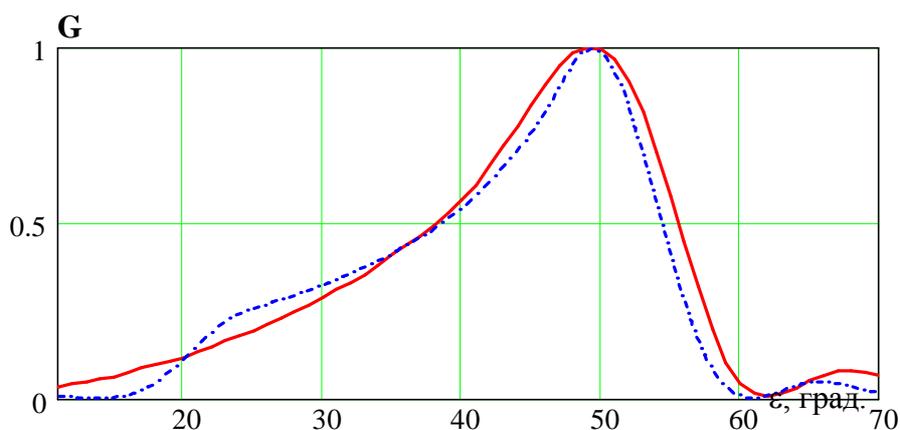


Рис. 1. Форма нормированной ДН антенны по мощности

В азимутальной плоскости антенна имеет узкую ДН – ее ширина по уровню половинной мощности примерно равна $0,12^\circ$. Особенностью ДН является отклонение антенного луча в азимутальной плоскости на величину около 8° . Этим обеспечивается минимизация влияния интенсивных зеркальных отражений от области надир, которые особенно опасны при длинном зондирующем сигнале и широкой полосе съёмки.

Антенное устройство выполнено на основе волноводно-щелевой решетки. Поляризация антенны на излучение и прием – вертикальная. Коэффициент усиления в максимуме ДН составляет не менее 7000 (38,5 дБ). При общих размерах волноводно-

щелевой решетки $13,4 \text{ м} \times 0,25 \text{ м}$ (площадь около $3,5 \text{ м}^2$), масса антенного полотна не превышает 40 кг .

Режим излучения

В радиолокаторе "Северянин-М" используется пачечный режим излучения, показанный на рис. 2:

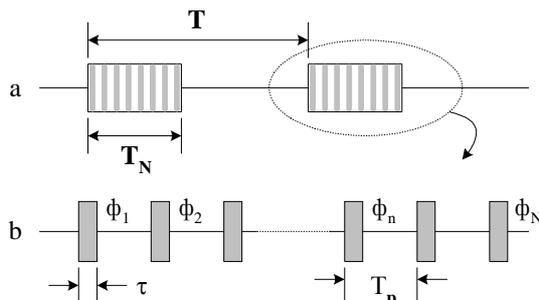


Рис. 2. Зондирующий сигнал

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

Для обеспечения однозначности по дальности максимальная длительность излучаемого зондирующего сигнала T_N ограничивается временем распространения сигнала до ближнего края полосы захвата и обратно, т.е.

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

При минимальной высоте орбиты КА 815 км эта длительность составляет $T_N \leq 5,9 \text{ мс}$. 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. $T_{\text{синт}} = T_N$. 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 ($R = R_{\min}$)

$$I_{x \min} = \frac{\lambda R_{\min}}{2VT_{\text{синт}}}, \quad (3)$$

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

Подставляя условие (2) в (3) можно получить оценку предельного разрешения

$$I_{x \min} \geq \lambda c / 4V. \quad (4)$$

которая в X-диапазоне имеет значение $I_{x \min} \approx 300 \text{ м}$. Таким образом, синтезирование

апертуры за время излучения одной пачки T_N позволяет в несколько раз повысить азимутальное разрешение по сравнению с некогерентными системами.

Фазокодовые сигналы

Для определения требований к зондирующим сигналам и выбора вида модуляции проводились исследования функции неопределённости (ФН) различных кодовых последовательностей [3]. Основным требованием к сигналам является минимум боковых лепестков ФН. При этом необходимо минимизировать как максимальный уровень отдельных лепестков, хорошо видимых на радиолокационных изображениях, так и интегральный уровень боковых лепестков (УБЛ), который заметно влияет на воспроизведение контрастов на радиолокационных изображениях протяжённых участков земной поверхности.

Практические аспекты поиска и выбора сигналов по параметрам автокорреляционной функции (АКФ) и ФН иллюстрирует таблица 1. Представлены три наиболее интересных типа бинарных сигналов: составной из кодов Баркера (13С13), код с минимальным интегральным УБЛ АКФ и пара «код – опорная функция». Оценивается максимальный и интегральный УБЛ. Во всех случаях длина кода $N = 169$; а для третьего варианта сигнала длина опорной функции равна $3N = 507$.

Таблица 1. Параметры АКФ и ФН

№№	Код	УБЛ АКФ, дБ		УБЛ ФН, дБ	
		максимальный	интегральный	максимальный	интегральный
1	Составной из кодов Баркера	-22,3	-8,3	-7,3	1,8
2	С минимальным УБЛ АКФ	-23,7	-9,7	-12,7	1,4
3	Пара «код-опорная функция»	-38,5	-30,0	-7,1	1,6

Из таблицы 1 следует, что при выборе сигналов необходимо ориентироваться, прежде всего, на параметры ФН. Примечательно, что пара «код – опорная функция», обладая высокими показателями АКФ, для решения задач БРЛК "Северянин-М" не приемлема из-за большого значения максимального УБЛ ФН. Ориентируясь на анализ ФН, для БРЛК были выбраны коды со следующими параметрами:

- для режима низкого разрешения $N = 161$, максимальный УБЛ -12,3 дБ, интегральный УБЛ 1,08 дБ;
- для режима среднего разрешения $N = 723$, максимальный УБЛ -14,8 дБ, интегральный УБЛ 5,39 дБ.

Геометрические характеристики изображений описывают такие параметры, как линейное разрешение, ширина полоса съёмки, углы визирования и длина маршрута.

Применение вышеописанных зондирующих сигналов позволяет повысить линейное разрешение БРЛК "Северянин-М" по азимуту I_x , которое обеспечивается за счет синтезирования апертуры на временном интервале, ограниченном длительностью одной излучаемой пачки $T_{\text{синт}} = T_N = (N - 1) \cdot T_p$. Для режимов НР и СР оценивалось разрешение по азимуту, соответствующее номинальной длине используемых кодовых пачек: 2,56 мс ($N = 161$) и 5,78 мс ($N = 723$). Линейное разрешение БРЛК по горизонтальной дальности I_z определялось как $I_z = ct / 2K_s \cdot \sin(\epsilon)$. В таблице 2 представлены расчётные значения I_x и I_z для нескольких характерных углов ϵ при длительности импульсов $\tau = 2$ мкс (СР) и $\tau = 4$ мкс (НР)

Ширина полосы съёмки в радиолокаторе ограничивается временем приёма

отражённых сигналов. В аппаратуре БРЛК интервал получения радиоголограммы задаётся двумя параметрами: задержкой начала дискретизации, равной 5,9 мс и задержкой конца дискретизации, равной 15,8 мс. При таких значениях обеспечить требуемую полосу съёмки (600-750 км) не представляет проблемы.

Таблица 2. Расчётные разрешения: по азимуту / по горизонтальной дальности

Угол места, град.	22°	25°	32°	48°	50°
Режим НР, м	742 / 1416	762 / 1255	824 / 1001	1116 / 714	1182 / 692
Режим СР, м	329 / 708	338 / 627	365 / 500	495 / 357	524 / 346

Протяжённость маршрута БРЛК при времени съёмки 10 мин. превышает 4000 км.

Предварительные экспериментальные результаты

На рис. 3 представлено радиолокационное изображение наблюдаемого участка Земли, снятое БРЛК "Северянин-М" в процессе лётных испытаний и позволяющее оценить полосу съёмки. Полоса составляет не менее 600 км и может достигать 750 км.

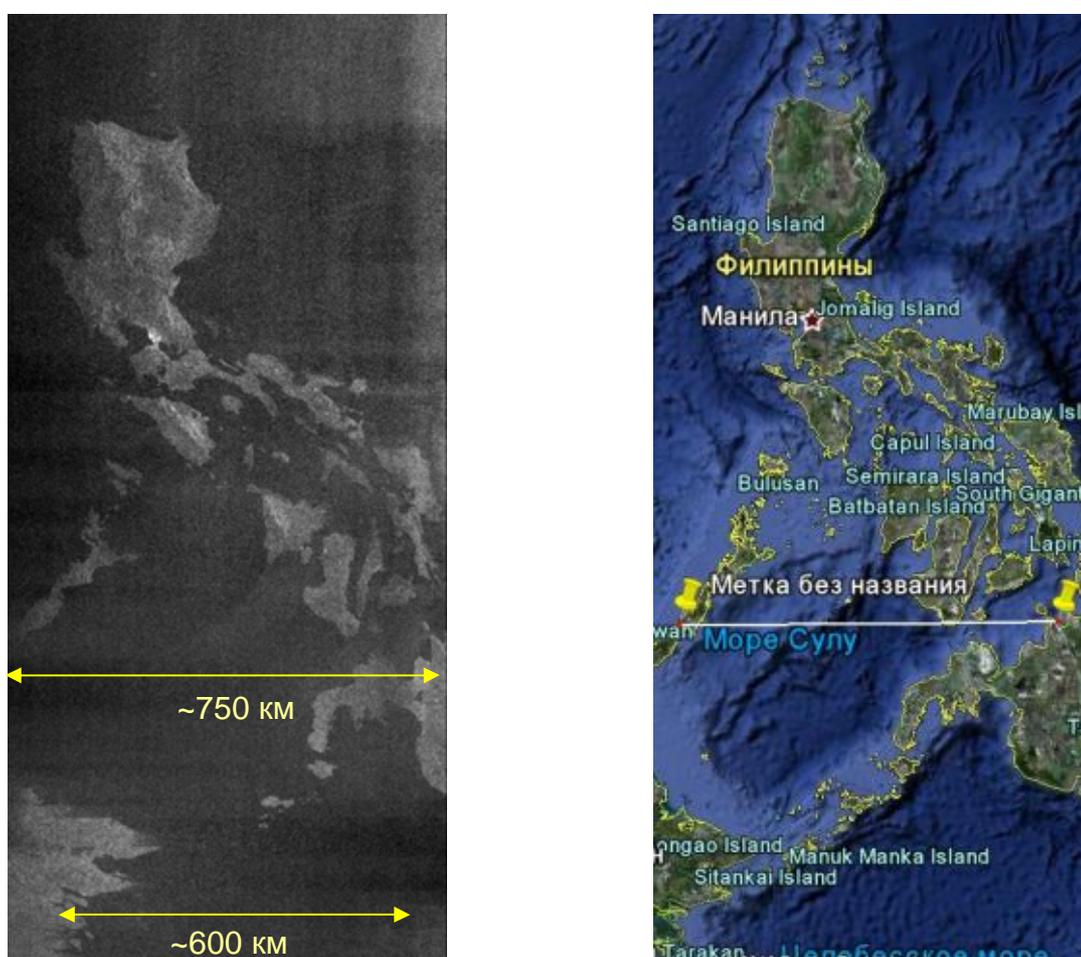


Рис. 3. Слева – радиолокационное изображение, полученное БРЛК «Северянин-М» в режиме СР; справа – фрагмент карты Google Earth

Линейное разрешение БРЛК оценивалось в режиме СР по протяжённости усреднённых откликов на точечные цели при средних углах визирования (~30°-40°). Были получены следующие значения разрешения: по горизонтальной дальности 550 м, по азимуту 650 м.

Энергетические характеристики радиолокационных изображений определяют

возможность наблюдения различных отражающих поверхностей и объектов. Основными характеристиками являются шумовой эквивалент УЭПР, отношение сигнал/шум и радиометрическое разрешение. Ниже рассматриваются характеристики отражений и приводится теоретическая оценка отношения сигнал/шум.

Оценки УЭПР

Одной из важных и наиболее сложных задач для БРЛК "Северянин-М" является мониторинг ледовой обстановки с возможностью идентификации различных типов льда. Зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) σ^0 для ледовых поверхностей от угла визирования ε при вертикальной поляризации зондирующего излучения даны на рис. 4 (зарубежные данные [4]), на рис. 5 (данные съемок РЛС БО КА "Океан" [5]). Здесь наиболее существенными для радиолокационной аппаратуры являются два параметра: абсолютные значения УЭПР разных поверхностей и относительные изменения УЭПР в рабочем секторе углов.

Усредненное изменение УЭПР от угла места учитывается в форме диаграммы направленности (ДН) антенны. Это изменение обеспечивается использованием закона Ламберта с перепадом УЭПР в рабочем секторе углов порядка 4,5 дБ. Такое решение позволяет сократить динамический диапазон отраженных сигналов и одновременно несколько повысить коэффициент усиления антенны.

Абсолютные значения УЭПР разных поверхностей также учитываются при оценке энергетических характеристик БРЛК.

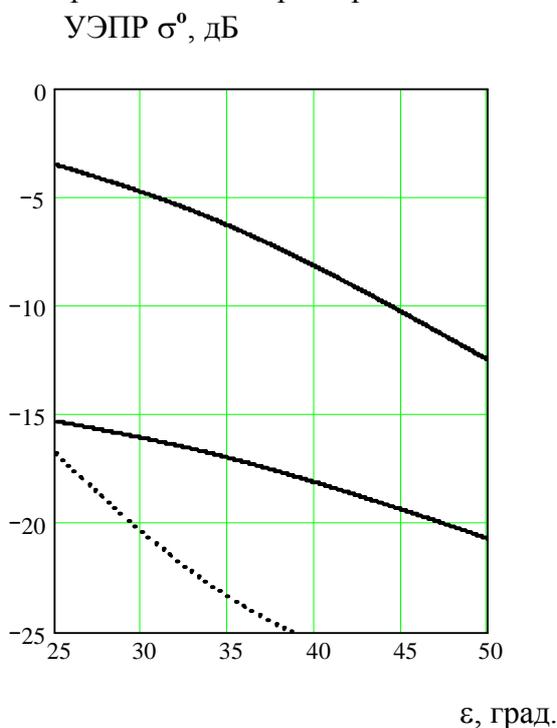


Рис. 4. (сверху-вниз: многолетний лед и однолетний лед, пунктир – "усредненное" море)
Энергетика для одиночного импульса

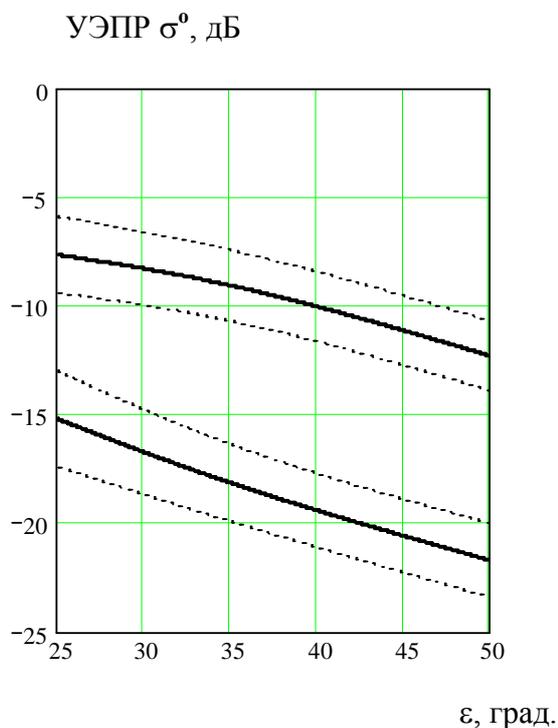


Рис. 5. (сверху-вниз: многолетний лед и однолетний лед; пунктир – разброс значений УЭПР)

Для одного излученного импульса в пачке отношение сигнал/шум q_1 может быть определено в соответствии с уравнением радиолокации

$$Q_1 = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{PG^2\sigma^0 I_x I_z}{P_n L_\Sigma R^4}, \quad (5)$$

где P – импульсная мощность передатчика; G – коэффициент усиления антенны; σ^0 – удельная эффективная площадь рассеяния; I_x – разрешение по азимуту, которое зависит от ширины ДН антенны в азимутальной плоскости $\Delta\alpha$ как $I_x = R \cdot \Delta\alpha$; I_z – разрешение по горизонтальной дальности, рассчитываемое для угла места ϵ по формуле $I_z = c/2\Delta F \cdot k_s \cdot \sin(\epsilon)$; ΔF – ширина спектра зондирующего сигнала и согласованная с ним полоса приёмника; P_n – мощность шума приемника; L_Σ – суммарные потери; R – наклонная дальность.

Поскольку БРЛК "Северянин-М" разрабатывался в качестве функциональной замены радиолокатора бокового обзора (РБО) КА "Океан", представляется актуальным сопоставить энергетические характеристики этих двух радиолокаторов. В [1] по поводу РБО КА "Океан" указывалось следующее: «В общем случае потенциал РЛС БО обеспечивает наблюдение на краю полосы обзора поверхности с УЭПР σ^0 , равной –20 дБ при отношении сигнал/шум, равном 1».

Учитывая, что РБО КА "Океан" является некогерентным и его отношение сигнал/шум определяется по одному излученному импульсу, для сравнительного анализа радиолокаторов удобно воспользоваться формулой (5). Из результатов расчётов следует, БРЛК при одном излучаемом импульсе имеет худшее, чем РБО отношение сигнал/шум: в режиме среднего разрешения (СР) – на 13 дБ, а в режиме низкого разрешения (НР – данные в скобках) – на 7 дБ.

Здесь следует отметить два важных обстоятельства:

1. РБО КА "Океан" по данным многолетней эксплуатации обеспечивал высокое качество радиолокационных изображений, вполне достаточное для ведения ледовой разведки.
2. Для достижения аналогичных результатов в БРЛК "Северянин-М" отношение сигнал/шум должно быть повышено: в режиме среднего разрешения – на 13 дБ, а в режиме низкого разрешения – на 7 дБ.

Увеличение отношения сигнал/шум в БРЛК "Северянин-М" обеспечивается применением длинного пачечного зондирующего сигнала с фазовым кодированием от импульса к импульсу.

Отношение сигнал/шум для пачки импульсов

Для *пачки* импульсов расчет отношения сигнал/шум не может быть выполнен простым умножением (5) на длину пачки N . Дело в том, что в данном случае эффективное увеличение отношения сигнал/шум имеет место только на начальном этапе накопления импульсов в пачке, пока элемент разрешения по азимуту I_x в результате когерентного суммирования импульсов не становится меньше площадки, облучаемой реальной ДНА. Последующее накопление импульсов приводит к уменьшению элемента разрешения по азимуту I_x , поэтому дальнейшего увеличения отношения сигнал/шум не происходит. Чтобы корректно учесть описанные эффекты необходимо рассмотреть согласованную фильтрацию траекторного сигнала БРЛК и вызванное обработкой изменение азимутального разрешения.

1. В процессе съемки радиолокатор излучает пачку зондирующих импульсов, которая описывается функцией $u(t) = U(t) \cdot \exp(j\omega t)$. Отраженный от точечного объекта сигнал $s(t)$ представляет собой сумму теплового шума и задержанного во времени, а также ослабленного зондирующего сигнала. В общем случае согласованная обработка обеспечивается в результате вычисления свертки отраженного сигнала $s(t)$ и опорной функции $u(t)$

$$\mathbf{w}(\tau_1, \tau_2) = \int_t \mathbf{S}(t - \tau_2) \exp[j\omega(t - \tau_2)] \mathbf{U}(t - \tau_1) \exp[-j\omega(t - \tau_1)] dt, \quad (6)$$

где $w(\tau_1, \tau_2)$ – отклик на точечный объект; $\tau_1 = 2R_1/c$ и $\tau_2 = 2R_2/c$; R_1 и R_2 – текущие наклонные дальности; ω – круговая частота $\omega = 2\pi f = (2\pi c/\lambda)$.

Практически обработка сигнала в РСА обычно разделяется на внутриимпульсную и межпериодную (траекторную). В результате внутриимпульсной обработки (свертки) $\mathbf{S}(t - \tau_2) \cdot \mathbf{U}(t - \tau_1)$ формируется отклик (АКФ) одиночного импульса с интенсивностью $\sqrt{q_1}$. Межпериодная траекторная обработка (синтезирование апертуры) сводится к когерентному суммированию импульсов в пачке, поэтому формула (6) с учётом введённых обозначений может быть записана в виде

$$\mathbf{w}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \sqrt{q_1} \sum \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} 2(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)\right]. \quad (7)$$

Разность наклонных дальностей $(R_2 - R_1)$ с использованием обозначений, показанных на рис. 6, представляется как $\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 \approx (2\mathbf{nVTx} - x^2)/2R_0$. Тогда (7) можно записать в виде

$$\mathbf{w}(\mathbf{x}) = \sqrt{q_1} \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2}{2R_0}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \mathbf{nTV} \cdot \frac{\mathbf{x}}{R_0}\right). \quad (8)$$

Используя представление азимутального угла визирования α в виде $\sin(\alpha) \cong x/R_0$ и вводя обозначение $\phi = (2\pi/\lambda)TV \cdot \sin(\alpha)$ можно осуществить суммирование с применением формулы для суммы геометрической прогрессии

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2n\phi) = \frac{\exp(j2N\phi) - 1}{\exp(j2\phi) - 1} = \exp[j(N-1)\phi] \cdot \frac{\sin(N\phi)}{\sin(\phi)}.$$

В результате нормировки модуль выражения (8) примет вид

$$\mathbf{w}(\alpha, N) = \frac{\sin\left[\frac{(2\pi/\lambda)NVT \sin(\alpha)}{N \sin\left[\frac{(2\pi/\lambda)VT \sin(\alpha)}{N}\right]}\right]}{N \sin\left[\frac{(2\pi/\lambda)VT \sin(\alpha)}{N}\right]}. \quad (9)$$

Функция $w(\alpha, N)$ представляет собой синтезированную диаграмму направленности по напряжению, поэтому для вычислений по мощности должен использоваться квадрат этой функции $w^2(\alpha, N)$.

2. Эффективная ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости $\Delta\alpha$, определяющая азимутальное разрешение радиолокатора l_x , для пачки из N импульсов вычисляется следующим образом:

$$\Delta\alpha(N) = \int w^2(\alpha, N) g^2(\alpha) d\alpha, \quad (10)$$

где $g(\alpha)$ – диаграмма направленности реальной антенны БРЛК (по мощности); $g^2(\alpha)$ – та же ДН для двукратного

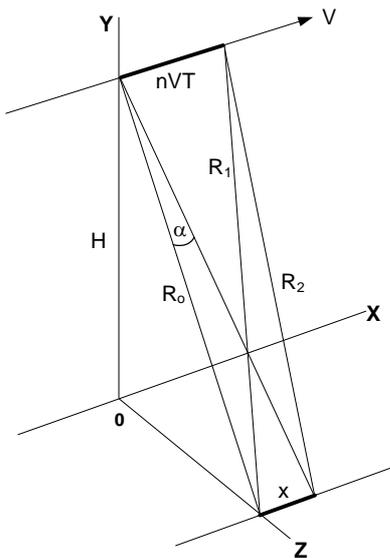


Рис. 6.

распространения; $w^2(\alpha, N)$ – квадрат модуля нормированной синтезированной ДН (9). Соответственно, линейное азимутальное разрешение определяется как

$$l_x(N) = R \cdot \Delta\alpha(N). \quad (11)$$

3. Быстрое увеличение отношения сигнал/шум имеет место только на начальном этапе накопления импульсов. Количественно описать данный эффект можно

подставляя в формулу (5) выражение (11). Тогда зависимость отношения сигнал/шум от числа когерентно обрабатываемых импульсов $q(N)$ может быть представлена как

$$q(N) = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{PG^2 N \sigma^0 \Delta\alpha(N) I_z}{P_n L_\Sigma R^3}, \quad (12)$$

где величина N в числителе учитывает когерентную обработку, эффективность которой снижается из-за $\Delta\alpha(N)$.

На рис. 7 показана зависимость отношения сигнал/шум от длины используемого кода N для двух режимов съёмки. Из графиков следует, что существенное увеличение $q(N)$ происходит только на начальном участке ($N = 50-100$), а далее рост $q(N)$ замедляется. В результате обработки пачки импульсов отношение сигнал /шум увеличивается соответственно на 17 дБ в режиме НР и на 20 дБ в режиме СР. При этом некоторое уменьшение длины кода (длины излучаемой пачки) относительно максимально допустимой, почти не влияет на энергетику БРЛК.

Шумовой эквивалент УЭПР (в дБ) определяется как $N\sigma = -20 \text{ дБ} - q(\text{дБ})$ и в пределе составляет: в режиме СР -20 дБ , в режиме НР -23 дБ .

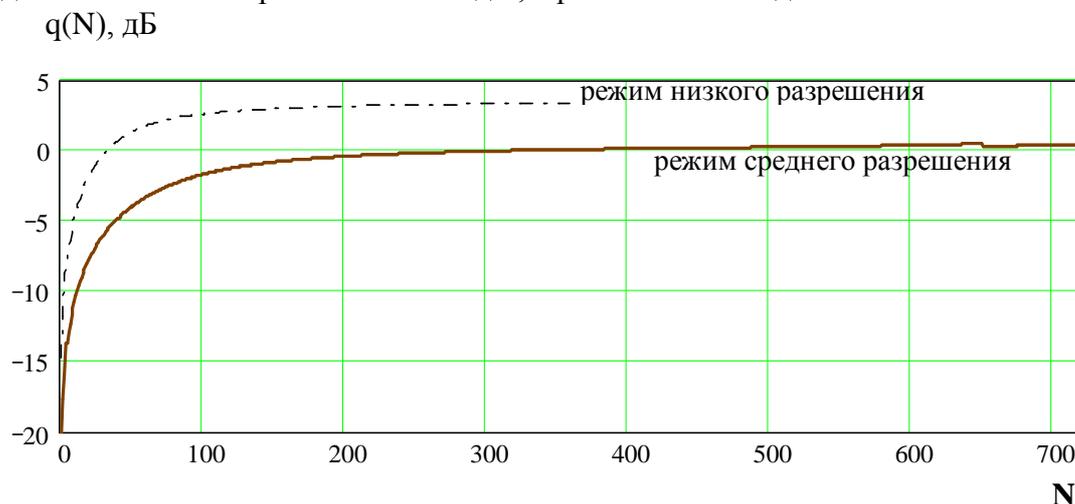


Рис. 7.

Радиометрическое разрешение

Этот параметр характеризует способность радиолокатора различать слабые контрасты на радиолокационных изображениях. Величина R_r оценивается по формуле

$$R_r = 10 \cdot \lg[1 + (1 + 1/q)/N_n^{1/2}], \quad (13)$$

где N_n – коэффициент некогерентного накопления РЛИ. В свою очередь величина N_n определяется через размер азимутальной ДН $\Delta\alpha$ (в радианах), минимальную наклонную дальность R_{\min} , орбитальную скорость КА V и период повторения пачек ($T = 19 \text{ мс}$) следующим соотношением:

$$N_n = \Delta\alpha R_{\min} / (V T).$$

Для БРЛК "Северянин-М" некогерентное накопление равно $N_n \approx 12$. Рассчитанное по формуле (13) радиометрическое разрешение составляет:

- в режиме низкого разрешения (при $q = 3 \text{ дБ}$) $R_r \approx 1,56 \text{ дБ}$;
- в режиме среднего разрешения (при $q = 0 \text{ дБ}$) $R_r \approx 1,98 \text{ дБ}$.

В свою очередь увеличение отношения сигнал/шум за счёт некогерентного накопления составит $\sqrt{12} = 3,4$ раза или $5,4 \text{ дБ}$, т.е. эквивалентное отношение сигнал/шум будет равно примерно 25 дБ .

Выводы

1. Системные принципы, реализованные в аппаратуре бортового

радиолокационного комплекса космического базирования "Северянин-М", обеспечивающих возможность получения радиолокационных изображений земной поверхности в широкой полосе захвата с улучшенным, по сравнению с РБО КА "Океан" и "Сич-1М", пространственным разрешением.

2. Характерной особенностью построения БРЛК является сочетание принципа синтезирования апертуры антенны с использованием зондирующего сигнала специального вида и антенного устройства с относительно малой площадью.
3. Предварительные оценки геометрических характеристик радиолокационных изображений (размер полосы захвата, разрешающая способность), полученные в процессе лётных испытаний КА "Метеор-М", близки к проектным значениям.
4. Расчётные оценки показывают, что проектные энергетические характеристики БРЛК "Северянин-М" не уступают соответствующим характеристикам РБО КА «Океан».

Литература

1. Радиолокация поверхности Земли из космоса. / Под ред. Л.М. Митника и С.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990
2. Приём первого радиолокационного изображения со спутника «Сич-1М» http://www.ntsomz.ru/news/news_center/sich_29_03_05
3. Теличев А.В., Внотченко С.Л. Корреляционные характеристики сигналов, составленных из бинарных кодов, при несогласованной обработке. / XXV Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред», 2009
4. Kim Y.S., Moore R.K., Onstott R.G., Gegineni S. Towards identification of optimum radar parameters for sea-ice monitoring. / Journal Glaciol., v.31, No.109, p. 383-388, 1985.
5. Кровотынцев В.А., Милехин О.Е. Характеристики радиолокационного обратного рассеяния морских льдов Арктики по данным ИСЗ «Океан». / Исследование Земли из космоса. № 2, стр. 68-80, 1998.