

## Верификация параметров космического радиолокатора «Северянин-М» по тропическим лесам Амазонки

С.Л. Внотченко, В.С. Дудукин, А.И. Коваленко, Т.Г. Мусинянц, В.В. Римап, С.Н. Смирнов

*Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт точных приборов»*

*127490, Москва, Декабристов ул., владение 51, E-mail alexander.kovalenko@niitp.ru*

*Изложены основные результаты измерений параметров космического радиолокатора «Северянин-М», выполненных по радиолокационному изображению леса. Представлены данные по диаграмме направленности антенны в вертикальной плоскости, шумовому эквиваленту УЭПР и радиометрическому разрешению.*

*In this paper the results of measurements spaceborne system "Severyanin-M", based on the radar image of rain forests are presented. Data under the antennas pattern in a vertical plane, noise equivalent sigma zero (NESZ) and the radiometric resolutions are presented.*

### 1. Особенности радиолокационных измерений

Малогобаритные радиолокационные комплексы (РЛК) «Северянин-М» входят в состав бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли космических аппаратов (КА) серии «Метеор-М». Радиолокаторы предназначены для решения задач исследования природных ресурсов Земли и оперативной гидрометеорологии, включая мониторинг ледовой обстановки. В сентябре 2009 года был запущен КА «Метеор-М» № 1 с РЛК «Северянин-М» [1-3], а в июне 2014 года выведен на орбиту КА «Метеор-М» № 2. Оба радиолокатора осуществляют съёмку в полосе до 750 км и благодаря использованию зондирующих фазокодоманипулированных (ФКМ) сигналов обеспечивают разрешение около 0,5 км. Во второй комплект РЛК был добавлен экспериментальный режим съёмки с ЛЧМ сигналом, обладающий улучшенными радиометрическими свойствами. Ниже описываются методика и результаты измерений, выполненных по радиолокационному изображению (РЛИ) тропических лесов Амазонки для второго комплекта РЛК.

Тропические леса Амазонки благодаря стабильности обратного радиолокационного рассеяния находят широкое практическое применение для решения задач верификации параметров и амплитудной калибровки космических радиолокаторов. Область тропических лесов, используемая для радиолокационных измерений [4], лежит между 70° и 60,5° западной долготы и между 2,5° северной и 5° южной широты. Особенности климата обеспечивают отсутствие сезонной и годовой изменчивости радиолокационных отражений, которые могут быть определены соотношением [4, 5]:

$$\gamma_0 = \text{const} = \sigma^0 / \cos(\eta), \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  – изотропный коэффициент рассеяния;

$\sigma^0$  – удельная ЭПР;

$\eta$  – угол падения.

Эти свойства, впервые отмеченные аппаратурой космического аппарата (КА) Seasat, справедливы для всех радиолокационных средств дистанционного зондирования, которые работают в X, C и L-диапазонах и детально исследовались скаттерометрами и радиолокаторами с синтезированной апертурой (ERS-1, ERS-2, RADARSAT, JERS-1, SIR-C и др.). Постоянство изотропного коэффициента рассеяния в диапазоне углов падения  $\eta = 20^\circ - 55^\circ$ , малые перепады рельефа (< 200 м), а также отсутствие изменения

во времени величины  $\gamma_0$  делают использование лесов Амазонки наиболее удобным местом для измерения формы диаграммы направленности антенны и верификации других радиолокационных параметров. Многократно измеренная зависимость [5] изотропного коэффициента рассеяния  $\gamma_0$  от угла падения  $\eta$  представлена на рисунке 1. Диапазон изменения величины  $\gamma_0$  приблизительно составляет от  $-6,2$  дБ до  $-6,8$  дБ со средним значением  $-6,5$  дБ.

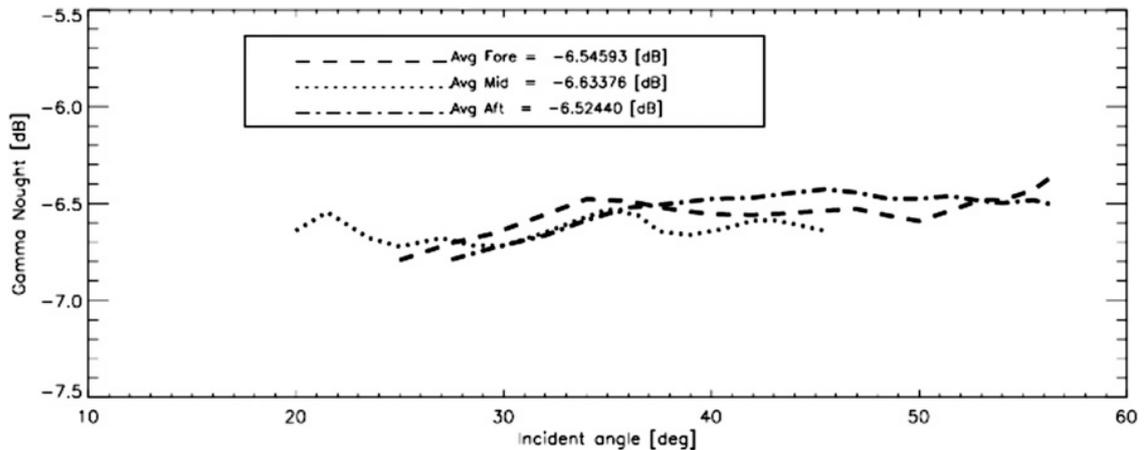


Рис. 1. Зависимость коэффициента рассеяния  $\gamma_0$  от угла падения  $\eta$

Съёмка тропических лесов в бассейне Амазонки была выполнена вторым комплектом РЛК в процессе лётных испытаний с использованием зондирующего ЛЧМ сигнала. Полученное изображение представлено на рисунке 2.

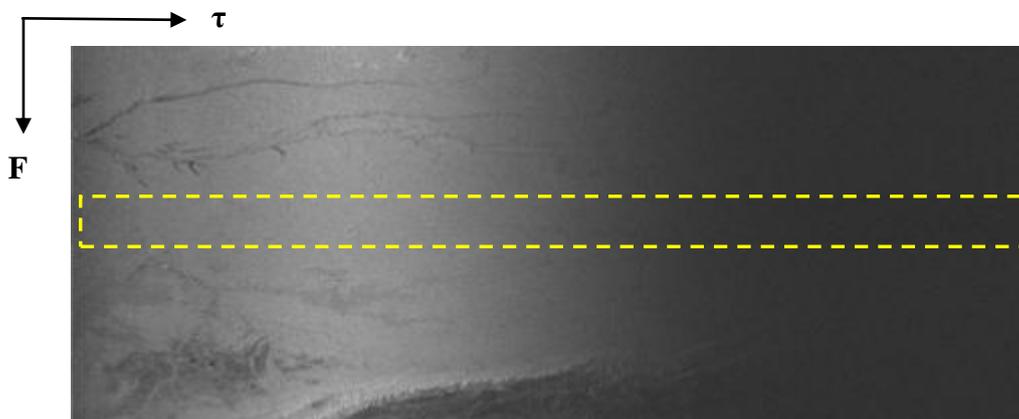


Рис. 2. РЛИ участка съёмки

## 2. Оценка формы угломестной ДН антенны

Одной из особенностей РЛК «Северянин-М» является применение антенны, имеющей в вертикальной (угломестной) плоскости ДН косекансного типа. Благодаря этому ширина полосы съёмки составляет не менее 750 км. Для измерения формы ДН антенны был выбран максимально однородный по отражающим свойствам участок поверхности, который на рисунке 2 выделен пунктирной линией.

Применяется следующая методика обработки данных. Для минимизации влияния флуктуаций отражений на оценку измеренной мощности  $P_i$  выполняется усреднение отсчётов в доплеровской плоскости  $F$ , в результате чего получается зависимость, показанная на рисунке 3 серым цветом. Затем используется дополнительное медианное сглаживание данных по  $\tau$ . Результат сглаживания на рисунке 3 показан чёрной линией. Обе зависимости приведены к угловой координате  $\epsilon$ , отсчитываемой от направления на

надир. Полученные графики описывают сумму отражённого сигнала и тепловых шумов, причём правый горизонтальный участок графика соответствует только шумам, поскольку отражения от поверхности здесь уже отсутствуют. Чтобы определить форму ДН в вертикальной плоскости из зависимости необходимо вычесть пьедестал, формируемый шумами, а также выполнить ряд других преобразований.

Проектная ДН антенны в угломестной плоскости определена как [1-3]

$$g(\varepsilon) = \sqrt{\frac{R^3(\varepsilon) \sin(\varepsilon)}{\sigma_L^0 \cos^2(\arcsin(K_s \sin(\varepsilon)))}}; \quad \varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \quad (2)$$

где  $R(\varepsilon)$  – наклонная дальность до текущей точки поверхности;

$K_s = 1 + H/R_s$ ;

$H$  – высота орбиты;

$R_s$  – средний радиус Земли;

$\sigma_L^0 \cdot \cos^2(\arcsin(K_s \sin(\varepsilon)))$  – описывает УЭПР, соответствующую закону Ламберта.

Учитывая (1) и связь между углом падения  $\eta$  и углом визирования  $\sin(\eta) = K_s \cdot \sin(\varepsilon)$ , можно получить окончательное выражение для экспериментальной ДН в виде

$$g_i(\varepsilon) = \sqrt{\frac{P_i(\varepsilon) \cdot R^3(\varepsilon) \sin(\varepsilon)}{\cos(\arcsin(K_s \sin(\varepsilon)))}} \quad (3)$$

Результаты представлены в виде графиков на рисунке 4, где показаны: измеренная ДН (сплошная линия), пересчитанная по формуле (3) и диаграмма направленности, определяемая техническими требованиями к антенне (пунктир).

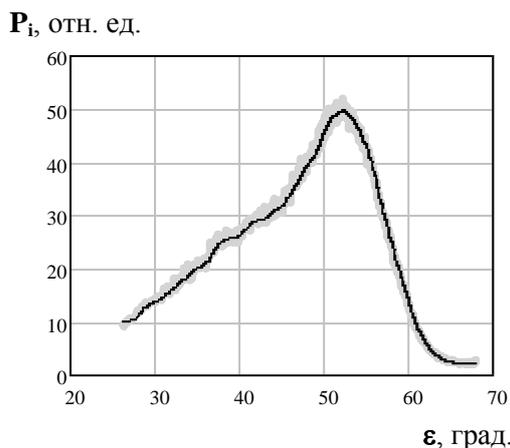


Рис. 3. Измеренная мощность отражений

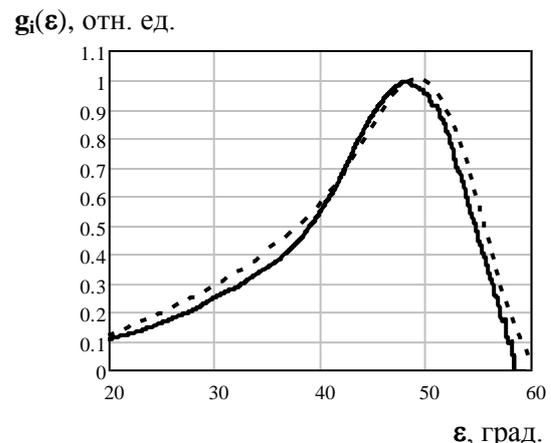


Рис. 4. Угломестная ДН антенны

Анализ измерений диаграммы направленности антенны в вертикальной (угломестной) плоскости, выполненных по РЛИ тропических лесов Амазонки, подтвердил её хорошее соответствие заданной ДН с учётом допусков, определённых в технических требованиях к антенному устройству РЛК «Северянин-М».

### 3. Шумовой эквивалент УЭПР радиолокатора

Для экспериментального измерения шумового эквивалента УЭПР (ШЭ УЭПР), также называемого радиометрической чувствительностью, использовалось РЛИ тропических лесов Амазонки, на котором были выделены следующие фрагменты:

1) область размером  $1923 \times 606$  пикселей без некогерентного накопления  $N_n = 1$  (увеличенный азимутальный размер использован для повышения точности оценок при имеющих место значительных флуктуациях отсчётов РЛИ);

2) однородная область размером  $1920 \times 100$  пикселей, с некогерентным накоплением по дальности – 3, по азимуту – 10 и итоговым  $N_n = 30$ ;

Методика обработки РЛИ, как и ранее, предусматривает усреднение отсчётов в доплеровской плоскости  $F$  и медианное сглаживание данных по  $\tau$ , что необходимо для минимизации влияния флуктуаций отражений на оценку измеренной суммарной мощности сигнала и шума  $P_i = P_s + P_n$ . Оценка шумового эквивалента УЭПР с учётом соотношения  $\sin(\eta) = K_s \cdot \sin(\epsilon)$  для пересчёта углов падения  $\eta$  в углы визирования  $\epsilon$  имеет вид

$$\sigma_n^o(\epsilon) = \frac{\gamma_o \cos(\arcsin(K_s \sin(\epsilon)))}{P_i(\epsilon)/P_n - 1}, \quad (4)$$

где  $\sigma^o(\epsilon)$  – фактическая УЭПР лесов Амазонки, отражения от которых описываются соотношением (1);

$P_n$  – мощность шума, определяемая при углах  $\epsilon \geq 58^\circ$ , где отражения отсутствуют из-за кривизны земной поверхности.

На рисунке 5 представлены графики: рассчитанного по формуле (4) шумового эквивалента УЭПР  $\sigma_n^o$  без некогерентного накопления (пунктир) при наличии некогерентного накопления (сплошная линия). Расхождение между двумя графиками на рисунке 5 составляют менее 1 дБ, что связано с использованием для измерений участков с разными размерами.

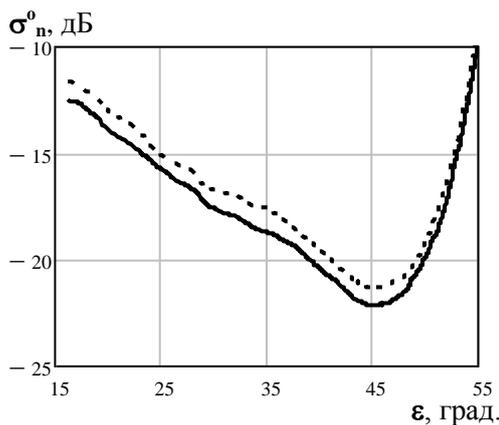


Рис. 5. Шумовой эквивалент УЭПР

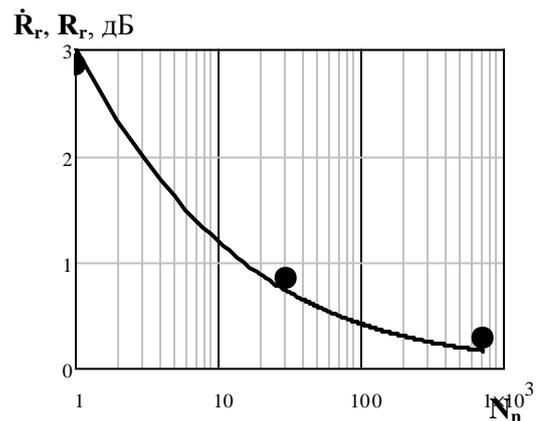


Рис. 6. Радиометрическое разрешение

Анализ полученных результатов показывает, что необходимое значение  $\sigma_n^o \leq -20$  дБ достигается лишь в ограниченной полосе съёмки шириной примерно 315-405 км, тогда как в соответствии с техническими требованиями эта величина должна обеспечиваться при углах визирования  $25^\circ$ - $48^\circ$  в полосе 600 км. Причина данного эффекта связана со снижением коэффициента усиления антенны из-за нештатного функционирования механизма раскрытия.

#### 4. Радиометрическое разрешение радиолокатора

Известно несколько аналитических определений радиометрического разрешения  $R_r$ . В данной работе используется следующая формула

$$R_r = 10 \cdot \lg\left(1 + 1/\sqrt{N_n}\right), \quad (5)$$

где  $N_n$  – коэффициент некогерентного накопления, который подлежит оценке по экспериментальному РЛИ.

Величина  $N_n$  рассчитывается исходя из статистического представления отражённых сигналов гамма-распределением с  $N_n$  степенями свободы. Моменты этого распределения: математическое ожидание  $M\xi = N_n / \lambda$ ; дисперсия  $D\xi = N_n / \lambda^2$ , где  $\lambda = 1 / (P_c + P_n)$  – параметр гамма-распределения. Откуда следует, что число независимых отсчетов в элементе разрешения может быть определено по формуле

$$\dot{N}_n = \frac{(M\xi)^2}{D\xi}. \quad (6)$$

Чтобы обеспечить приемлемую точность статистических оценок, для измерений выбирался однородный участок достаточно большого размера. Для устранения корреляции соседних отсчетов осуществлялось прореживание не менее, чем на удвоенное разрешение РЛК. Экспериментальное измерение  $N_n$  осуществлялось по трём фрагментам РЛИ со следующими значениями накопления:  $N_n = 1$ ;  $N_n = 30$ ;  $N_n = 720$ . Значения оценок  $\dot{M}\xi$  и  $\dot{D}\xi$  определялись по типовым методикам математической статистики.

Результаты статистических оценок представлены на рисунке 6 в виде трёх экспериментальных значений  $\dot{R}_r$  (показаны кружками). Для сравнения сплошной линией изображена теоретическая зависимость радиометрического разрешения  $R_r = f(N_n)$  рассчитанная по формуле (5). Полученные экспериментальные значения  $\dot{R}_r$  хорошо совпадают с расчётными величинами  $R_r$ .

В целом выполненная верификация параметров РЛК «Северянин-М» с использованием ЛЧМ сигнала позволило получить важные объективные результаты. Экспериментальные съёмки предполагается продолжить для контроля и уточнения характеристик РЛК.

### Литература

1. С.Л. Внотченко, А.И. Коваленко, В.В. Рима́н, А.В. Теличев, В.С. Чернышов, А.В. Шишанов. Системные принципы реализации космического радиолокатора «Северянин-М». / Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Муром, 2010
2. С.Л. Внотченко, М.Ю. Достовалов, В.С. Дудукин, А.И. Коваленко, Т.Г. Мусинянц, В.В. Рима́н, А.И. Селянин, С.Н. Смирнов, А.В. Шишанов. Космический радиолокатор "Северянин-М" с широкой полосой съёмки. / Российская научная конференция «Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой», Улан-Удэ, сентябрь 2010
3. Sergey Vnotchenko, Michail Dostovalov, Vladimir Dudukin, Alexander Kovalenko, Tomas Musinyants, Viktor Riman, Aleksey Selyanin, Stanislav Smirnov, Andrey Telichev, Valentin Chernishov, Anatoliy Shishanov. / Wide-Swath Spaceborne SAR System "Severyanin-M" For Remote Sensing: First Results. / 9th European Conference EUSAR 2012. April 2012
4. R.K. Hawkins, E. Attema, R. Crapolichchio, P. Lecomte, Josep Closa, P.J. Meadows, and S.K. Srivastava. Stability of Amazon Backscatter at C-band: Spaceborne Results from ERS-1/2 and Radarsat-1. [Http://wmsmir.cits.rncan.gc.ca/index.html/pub/geott/ess\\_pubs/219/219593/4720.pdf](http://wmsmir.cits.rncan.gc.ca/index.html/pub/geott/ess_pubs/219/219593/4720.pdf)
5. C. Anderson, J. Figa, H. Bonekamp, J. J. W. Wilson, J. Verspeek, A. Stoffelen, M. Portabella. Validation of Backscatter Measurements from the Advanced Scatterometer on MetOp-A / Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Volume 29. January 2012