

## Методы измерения и контроля характеристик направленности АФАР космического РСА при наземной отработке

А. И. Коваленко, М. С. Милосердов

ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов»,  
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51, Тел: (495)402-92-77, Факс(495)404-91-91, E-mail: miloserd1@mail.ru

*Излучающая система является важнейшим элементом радиолокационного комплекса и определяет его функциональные возможности. Измерение электрофизических параметров и наземная экспериментальная отработка сложных излучающих систем занимает ключевое место при разработке радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования. В статье рассмотрены методы, позволяющие провести корректные измерения сложной излучающей системы на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР).*

*Radiating system is a primary element of the radar and defines its functionality. The ground tests and measure of the difficult radiating system is important step in the development of space-based synthetic aperture radar (SAR). The correct measurements methods of the difficult radiating systems based on active phased array is discussed.*

### Введение

Космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), реализуемые на основе технологии активных фазированных антенных решёток (АФАР), являются одними из самых перспективных и высокопроизводительных средств дистанционного зондирования Земли.

Спецификой применения АФАР в РСА является необходимость реализации относительно больших электрических размеров излучающего полотна антенны. Так, для РСА с АФАР X-диапазона (рабочая длина волны около 3,1 см) TerraSAR-X, TanDEM-X (Германия) [1] и COSMOSkyMED (Италия) [2] площадь антенного полотна составляет 3.36 м<sup>2</sup> и 7.98 м<sup>2</sup>, соответственно. Новое поколение разрабатываемых РСА также ориентировано на применение цифровых АФАР, позволяющих реализовать режим многоканального цифрового формирования лучей [3]. Поэтому вопросы наземной экспериментальной отработки АФАР являются ключевыми при практической реализации такого рода проектов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы оптимизации методик измерения и контроля характеристик направленности АФАР методом ближней зоны с учётом конструктивных особенностей построения АФАР космического РСА [3].

### Особенности наземной отработки АФАР

Базовой структурной единицей полноразмерной АФАР космического РСА [3] (с раскрытием примерно 4×1,6 м<sup>2</sup>) является *активный антенный модуль (ААМ)*, представляющий собой, по существу, автономную АФАР (*подрешётку*), антенное полотно которой является одним из сегментов антенного полотна всей АФАР. Всего в состав АФАР входит 18 активных антенных модулей, укомплектованных набором *групповых 2 –канальных приёмо-передающих модулей (ГППМ)*.

Каждая подрешетка (активный антенный модуль) АФАР включает в себя 32 линейных излучателя. К каждой линейке подключено два приёмо-передающих канала (ППК), один - для работы на вертикальной поляризации, другой - на горизонтальной.

Наземную отработку АФАР космического РСА можно разделить на три основных этапа: отработка отдельных подрешеток АФАР; фазировка подрешеток в составе

АФАР с последующей верификацией её характеристик направленности; наземная проверка работоспособности АФАР в составе космического аппарата.

При отработке подрешеток АФАР требуется измерение диаграммы направленности (ДН), подстройка управляющих команд (уставок) для фазовращателей, в том числе, в зависимости от температуры, диагностика отказов приёмо-передающих модулей (ППМ) и отработка алгоритма выбора оптимального амплитудно-фазового распределения при обнаружении одного или нескольких отказов. Один из возможных способов – проводить измерения подрешетки АФАР в промежуточной зоне, используя методы дальней зоны в совокупности с коррекцией фазового распределения, учитывающего сферичность фронта волны. Другой способ – проводить измерения поля в ближней зоне и по полученным данным восстанавливать ДН.

При отработке полноразмерной АФАР основная задача – фазировка и синхронизация подрешеток. После проведения фазировки требуется контрольное измерение ДН АФАР. Методы ближней зоны позволяют измерить характеристики направленности крупногабаритной АФАР, но на это требуется относительно большое время. Время измерения ограничено диапазоном рабочих температур, в котором обеспечивается фазовая стабильность отдельных элементов системы. В зависимости от температуры изменяются характеристики фазовращателей и, следовательно, изменяется АФР на апертуре.

### **Отработка подрешетки АФАР**

Самый простой способ измерения ДН подрешетки АФАР с точки зрения радиотехники – измерения в дальней зоне. Дальняя зона для рассматриваемой антенны составляет 50 м. При измерениях в безэховой камере (БЭК) длина рабочей трассы  $d$  в несколько раз меньше, поэтому необходимо учитывать сферичность фронта волны в промежуточной зоне. Другими словами, фазовое распределение поля в раскрыве должно быть выбрано таким, чтобы подрешетка АФАР была сфокусирована на плоскости измерений, а не на бесконечности, как, например, при равномерном АФР. Такой метод измерений называется автоколлиматорным [4]. Однако, на практике использование автоколлиматорного метода приводит к погрешностям в установке АФР. Это прежде всего связано с не идеальностью фазовращателей. При переключении фазы немного изменяется амплитуда сигнала, поступающего на линейку излучателей, что в масштабах всей подрешетки приводит к падению эффективной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) в направлении максимума ДН и к небольшому изменению формы ДН.

Классические методы измерения параметров антенн в ближней зоне подразумевают регистрацию значений амплитуды и фазы вектора напряженности электрического поля в узловых точках пространственной сетки, расположенной над поверхностью антенны, с помощью измерительного зонда. Выбор вида поверхности измерения и её размеров связан с исследуемым типом антенны. В случае остронаправленных антенн с плоским раскрывом измерения проводятся на плоскости. В этом случае пересчет поля из ближней зоны в дальнюю производится известным образом, посредством преобразования Фурье [4, 5]:

$$F_{x,y}(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{x,y}(x, y) e^{ik(ux+vy)} dx dy, \quad (1)$$

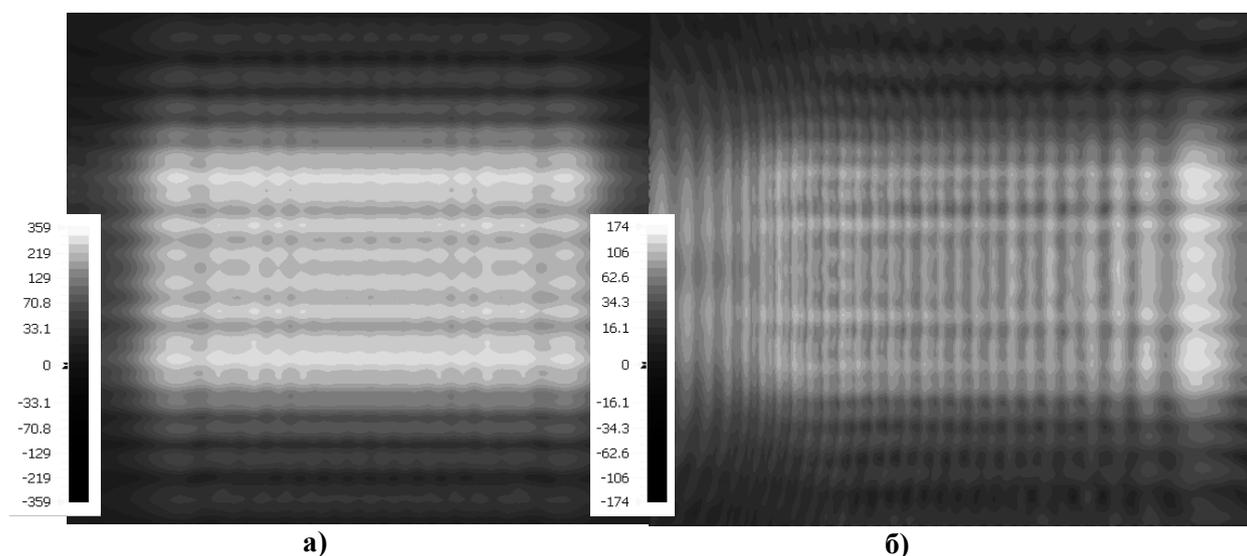
где  $F_{x,y}(u, v)$  – ДН антенны,

$u = \sin(\alpha) \cos(\beta)$  и  $v = \sin \beta$ ;  $E_x(x, y)$  и  $E_y(x, y)$  – тангенциальные составляющие вектора напряженности электрического поля, измеренные на рабочей поверхности позиционера при ориентации зонда вдоль осей  $x$  и  $y$  выбранной системы координат,

соответственно (поляризация зонда должна совпадать с направлением орта соответствующей оси). После восстановления ДН массив полученных значений необходимо поэлементно (для соответствующих углов) поделить на пронормированный к максимуму массив значений ДН зонда, тем самым скомпенсировав его воздействие [4, 6]. Минимальный шаг пространственной сетки выбирается равным  $\lambda/2$ , что обосновывается теоремой Котельникова, примененной в области пространственных частот. Шаг сетки можно выбрать грубее, руководствуясь в первом приближении следующим неравенством:  $0.5\lambda \leq \tau \leq \lambda/(2\sin \alpha)$  [].

Для обоснованного выбора максимально грубой пространственной сетки с целью сокращения времени измерения было проведено численное моделирование электродинамических характеристик подрешетки АФАР методом конечных разностей во временной области [7]. Размер подрешетки на основе печатных микрополосковых излучателей составляет  $800 \times 446$  мм.

В результате моделирования получена ДН и распределение поля, создаваемое подрешеткой АФАР на плоскости измерения при синфазном возбуждении и при отклонении луча ДН на  $15^\circ$ . Двумерное распределение амплитуды напряженности электрического поля на плоскости измерения показано на рисунке 1.

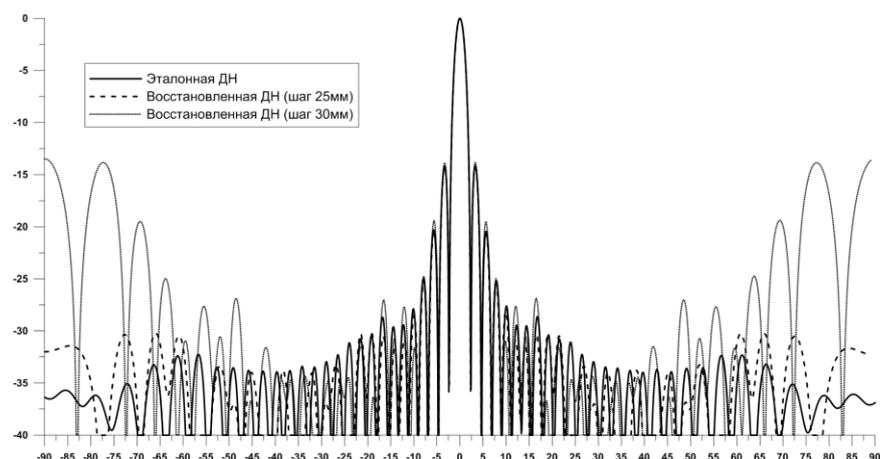


**Рис. 1. Распределение амплитуды напряженности электрического поля по плоскости, находящейся на расстоянии 250 мм от подрешетки АФАР при синфазном возбуждении (а) и при отклонении луча на  $15^\circ$  (б).**

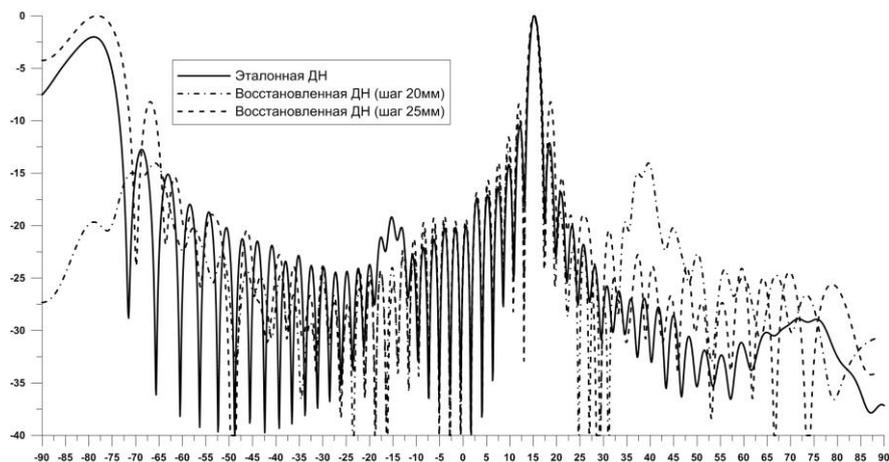
При известном распределении поля на плоскости измерений и известной ДН, которые порождены одним и тем же источником поля (подрешеткой АФАР), решается целый ряд задач: выбирается оптимальный шаг пространственной сетки, проводится комплексная оценка методических погрешностей (дискретизации и ограниченности), проверяется алгоритм восстановления поля в дальней зоне. Кроме того, появляется возможность проверки на численной модели подхода к измерению ДН в одном сечении в плоскости сканирования подрешетки АФАР при измерении характеристик поля вдоль линии симметрии подрешетки, проведенной перпендикулярно линейкам излучателей.

На рисунках 2 и 3 показаны графики эталонной, полученной по результатам моделирования методом конечных разностей во временной области, и восстановленной ДН, рассчитанной для известного распределения поля над подрешеткой АФАР, взятого с равномерным шагом дискретизации от 20 до 30 мм по обеим координатам. Анализируя графики, можно сделать следующий вывод: для синфазного возбуждения

достаточно использовать шаг пространственной сетки 25 мм. При отклонении луча на  $15^\circ$  шаг сетки требуется уменьшить до 20 мм.

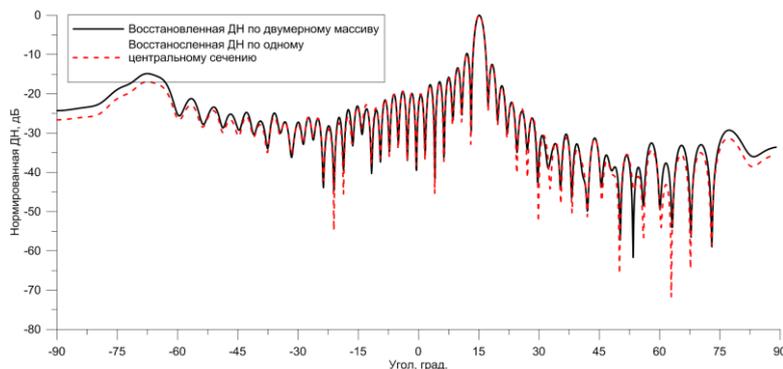


**Рис. 2. Сравнение эталонной ДН в плоскости сканирования с восстановленной (поверхность  $1000 \times 800$  мм, расстояние от антенны 250 мм, шаг дискретизации 25 и 30 мм). Синфазное возбуждение.**



**Рис. 3. Сравнение эталонной ДН в плоскости сканирования с восстановленной (поверхность  $1000 \times 800$  мм, расстояние от антенны 250 мм, шаг дискретизации 20 и 25 мм). Отклонение луча на  $15^\circ$ .**

Процесс измерения ДН в ближней зоне можно существенно ускорить путём учёта конструктивных особенностей подрешетки АФАР. Вдоль каждого линейного излучателя подрешетки АФАР посредством микрополоскового делителя/сумматора задается равномерное распределение в дискретных точках апертуры. Следовательно, амплитуды поля в дискретных точках над каждой линейкой симметричны относительно центра, а фазы в максимумах и минимумах поля примерно одинаковы. Соответственно, для определения одного сечения ДН в плоскости ортогональной к каждой линейке излучателей (в плоскости сканирования) необходимо и достаточно измерить значения поля вдоль линии симметрии подрешетки АФАР с заданным пространственным шагом. Справедливость данного утверждения проверена с помощью прямого численного эксперимента, моделирующего процедуру измерения ДН в одном сечении в плоскости сканирования, результаты которого представлены на рисунке 4.



**Рис. 4. Восстановленная по измерениям в ближней зоне на двумерной и одномерной пространственной сетке ДН подрешетки АФАР в плоскости сканирования при отклонении луча на 15°.**

Из рисунка 4 видно, что при использовании модифицированной методики заметные различия ДН наблюдаются в области дальних боковых лепестков, которая практически не влияет на работоспособность космического РСА. Модифицированная методика сокращает количество проводимых измерений ближнего поля в 30 раз относительно стандартной процедуры, что позволяет применить её также в процессе наземной отработки полномасштабной АФАР при реализации штатных режимов функционирования аппаратуры космического РСА.

### **Заключение**

Рассмотрены методы измерения и контроля характеристик направленности подрешетки АФАР космического РСА при наземной отработке. Предложена обоснованная методика выбора шага пространственной сетки при измерениях распределения поля в ближней зоне АФАР для последующего восстановления диаграммы направленности (ДН). Доказана возможность проводить быстрые измерения одного сечения ДН (в плоскости сканирования) подрешетки АФАР при проходе измерительного зонда над её центральной линией симметрии.

### **Литература**

1. Benjamin Bräutigam, Paola Rizzoli, Carolina González, Donata Polimeni, Dirk Schrank, Marco Schwerdt. SAR Performance of TerraSAR-X Mission with Two Satellites. / EUSAR 2010.
2. Italian Space Agency. COSMO-SkyMed Mission. COSMO-SkyMed System Description & User Guide. [http://www.e-geos.it/products/pdf/csk-user\\_guide.pdf](http://www.e-geos.it/products/pdf/csk-user_guide.pdf)
3. С. Л. Внотченко, А. И. Коваленко, В. В. Риман, А. В. Шишанов. Технический облик многоапертурного космического радиолокатора с синтезированной апертурой на основе АФАР X-диапазона. // Труды Всероссийских радиофизических научных чтений-конференции памяти Н. А. Арманда. Муром, 2010.
4. Бахрах. Л.Д. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. / Ленинград: Наука, 1985, 272 с.
5. Захарьев Л.И., Леманский А.А., Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Щеглов К.С.. Методы измерения характеристик антенн СВЧ под ред. Цейтлина. / М.: Радио и связь, 1985, 368 с.
6. G. Repjar, A.C. Newell, M.H. Francis. Accurate Determination of Planar Near-Field Correction Parameters for Linearly Polarized Probes. // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 36, № 6, JUNE 1988.
7. Гринев А. Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. / М: Радиотехника, 2012, 336 с.