

Методические аспекты измерения основных параметров аппаратуры космического РСА на базе цифровой АФАР

М.С. Милосердов, Г.Ю. Кузнецов, А.И. Коваленко, М.Л. Булыгин

Акционерное общество «Научно исследовательский институт точных приборов», г. Москва, ул. Декабристов, владение 51

Тел: (495)402-92-77, Факс (495)404-91-91, E-mail: Maxim.Miloserdov@niitp.ru

В космических радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА) с высокой разрешающей способностью требуется использовать крупногабаритные антенные системы. В современных РСА для расширения возможностей управления лучом начинают использовать цифровые активные фазированные антенные решетки (АФАР). Рассматривается крупноапертурная цифровая АФАР, состоящая из 18 подрешеток, каждая из которых снабжена цифровым блоком, отвечающим за формирование и оцифровку сигнала. Измерение параметров решетки, включающей 18 блоков формирования сигнала, требует серьезного метрологического и методического обеспечения. Особенности, с которыми приходится сталкиваться при измерении диаграммы направленности, рассматриваемой цифровой АФАР, изложены в статье.

High-resolution space-borne synthetic aperture radars (SAR) utilize electrically large antenna systems. To improve the beam steering capabilities, modern SAR systems are based on digital active phased antenna arrays. A large digital antenna array is currently are considering. The array consists of 18 digital sub-arrays which form, radiate, receive and sample the signal. Measurement of digital antenna parameters requires solving several metrological issues. Main features of measuring the radiation pattern of such arrays are presented in this paper.

Введение

Структура и общий вид аппаратуры РСА, включая устройство цифровой АФАР, а также основные этапы наземной обработки аппаратуры, достаточно подробно рассматривались в предыдущих публикациях [1–4], поэтому, далее будут описаны только самые основные особенности аппаратуры. Главные акценты будут сделаны на особенностях методик измерения основных параметров аппаратуры РСА и на анализе данных экспериментальных исследований.

Рассматриваемая цифровая АФАР состоит из 18 цифровых подрешеток (рисунок 1). В состав каждой цифровой подрешетки входит аналоговая подрешетка АФАР, модуль формирования и оцифровки сигнала (МФОС) и приёмо-передающее устройство (ППУ). В состав аналоговой подрешетки АФАР входят 64 приёмо-передающих модуля (по 32 на каждую поляризацию), обеспечивающих сканирование диаграммы направленности антенны РСА по углу места. Модуль формирования и оцифровки сигнала (МФОС) имеет в своём составе АЦП и ЦАП, которые работают с сигналами на нулевой частоте.

Для формирования суммарной диаграммы направленности (ДН) от подрешеток АФАР все МФОС последовательно связаны высокоскоростными каналами передачи информации. Таким образом реализуется последовательное когерентное суммирование принимаемых сигналов в цифровой форме. ППУ осуществляет перенос сигнала с нулевой частоты на несущую и обратно. Кроме того, в ППУ предусмотрен контрольный выход, на которой поступает излученный или принятый сигнал в зависимости от режима работы подрешетки АФАР.

При такой структуре аппаратуры, общем случае, требуется проводить измерения как ДН антенны, так и параметров широкополосного зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Предмет настоящей статьи ограничен рассмотрением измерений ДН. Особенности измерения параметров ЛЧМ сигнала будут освещены в последующих работах.

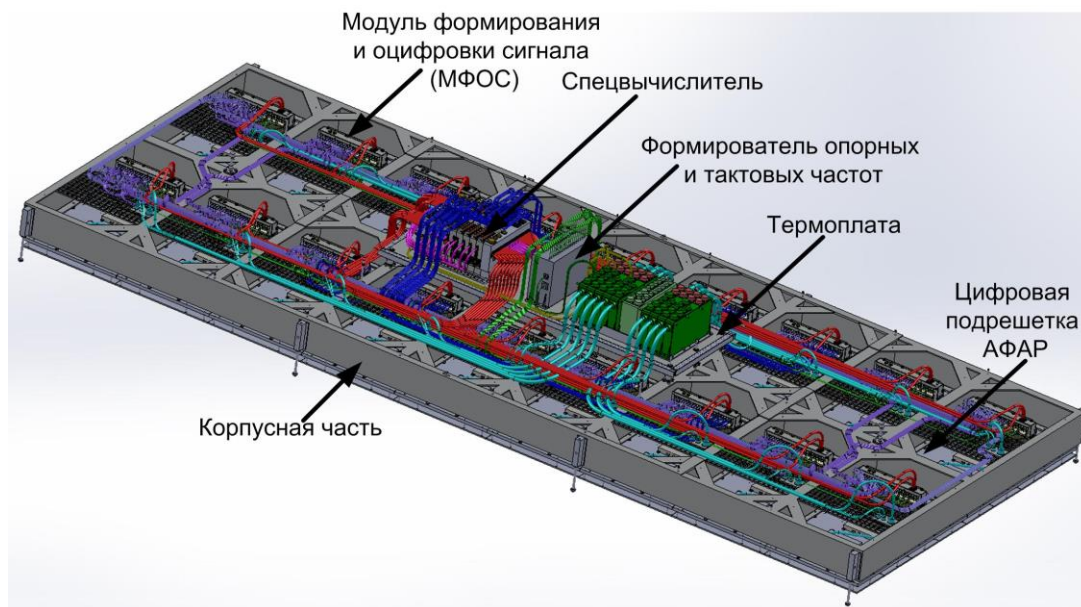


Рисунок 1 – Конструкция АФАР

Отдельно стоит отметить, что штатное время непрерывной работы аппаратуры РСА не превышает 10 минут, что накладывает серьезные ограничения с точки зрения возможности проведения антенных измерений.

Ранее (см.[2]) рассматривались этапы наземных испытаний АФАР космического РСА (рисунок 2). В рамках реализации четвертого этапа разработаны оригинальные методики измерения ДН, основные особенности которых будут рассмотрены в настоящей работе.

Этапы наземных испытаний цифровой АФАР космического базирования				
1	2	3	4	5
Измерения параметров <i>аналоговой</i> части подрешетки АФАР в промежуточной зоне	Измерения параметров <i>цифровой</i> подрешетки АФАР в промежуточной зоне	Измерения параметров цифровой подрешетки АФАР в <i>ближней</i> зоне	Измерения параметров цифровой АФАР в составе бортовой аппаратуры в ближней зоне	Контроль работоспособности АФАР в составе космического аппарата
Задачи: - Измерение ДН и её параметров (ширина основного лепестка, УБЛ) при синфазном возбуждении в широком диапазоне углов; - Измерение ДН и её параметров при сканировании в широком диапазоне углов; - Измерение ЭИИМ.	Задачи: - Измерение параметров зондирующего сигнала с ЛЧМ модуляцией с полосой 600 МГц; - Измерения ДН и её параметров для синфазного возбуждения и при сканировании; - Измерения ЭИИМ.	Задачи: - Измерения ДН и её параметров для синфазного возбуждения и при сканировании в диапазоне температур в узком диапазоне углов; - Измерение уровня кросс поляризации; - Определение амплитудно-фазового распределения токов по апертуре антенны в диапазоне температур; - Контроль исправности всех элементов подрешетки.	Задачи: - Фазировка цифровых подрешеток АФАР в составе изделия - Измерения ДН и её параметров для синфазного возбуждения и при сканировании в диапазоне температур в узком диапазоне углов; - Определение амплитудно-фазового распределения токов по апертуре антенны в диапазоне температур; - Контроль исправности цифровых подрешеток АФАР.	Задачи: - Измерение уровня излучаемой мощности во всех приемо-передающих каналах АФАР при помощи специализированной антенной насадки.

Рисунок 2 – Этапы наземных испытаний АФАР космического РСА

Измерение ДН подрешетки цифровой АФАР

Первый этап, касающийся измерения параметров аналоговой подрешетки АФАР, существенных особенностей не имеет, поэтому не рассматривается в дальнейшем.

После установки приемо-передающего устройства (осуществляет перенос частоты) и модуля формирования и оцифровки сигнала (МФОС) на аналоговую подрешетку, она становится цифровой. Управление подрешеткой и приём сигнала осуществляется через МФОС, причём принятый сигнал выдаётся в цифровой форме. Очевидно, что МФОС не является измерительным прибором, но по факту должен выполнять его функции, так как по принятому цифровому сигналу нужно вычислять амплитуду и фазу. С точки зрения корректности метрологического обеспечения - это обстоятельство является большой проблемой. Для её парирования при измерении ДН используется технологический контрольный выход ППУ, на который выводится полезный сигнал на несущей частоте.

В результате оптимизации процесса подтверждения параметров подрешеток АФАР, на поворотном устройстве в промежуточной зоне проводятся только измерения энергетической характеристики АФАР - эквивалентной импульсной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ), являющимся единственным параметром, который нельзя измерить в ближней зоне. Измерения ЭИИМ проводятся при трёх положениях луча: -15° , 0° , $+15^\circ$. В ближней зоне используется оригинальная аттестованная методика измерения ДН по одному сечению в плоскости сканирования [1] (свидетельство об аттестации №547-RA.RU.311243-2018), которая позволяет измерять ширину ДН и уровень боковых лепестков (УБЛ) с точностями $\pm 0.05^\circ$ и $\pm 1,5$ дБ, соответственно. Измерения в ближней зоне проводятся через радиопрозрачное окно климатической камеры [3], что позволяет контролировать изменения ЭИИМ и параметры ДН в диапазоне рабочих температур. Контроль параметров ЛЧМ сигнала тоже проводится в ближней зоне в одной точке над центром апертуры для разных значений рабочей температуры АФАР.

Измерение ДН цифровой АФАР

С точки зрения метрологии, методика измерения параметров цифровой АФАР существенно отличается при работе в режиме приёма и передачи. Разберём оба случая.

Схема измерения ДН цифровой АФАР при работе в режиме передачи показана на рисунке 3. Основное отличие цифровой решетки от аналоговой, с точки зрения измерения ДН в ближней зоне, заключается в том, что излученный сигнал формируется не внешним генератором, с которого легко вывести опорный сигнал для измерения фазы, а внутренним формирователем сигнала на основе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Проблема организации опорного сигнала для измерения фазы может быть решена двумя способами. Первый вариант – использования (при наличии) технологического аналогового выхода, сигнал с которого подается на амплифазометр. Второй вариант (показан на рисунке 3) более универсальный, когда опорный сигнал подаётся с вспомогательного зонда, установленного около края апертуры. Измерения амплитуды и фазы осуществляется амплифазометром, в качестве которого у нас используется осциллограф. Применение осциллографа позволяет проводить разные измерения при одной конфигурации стенда, например, измерять параметры ЛЧМ сигнала, однако на оцифровку сигнала на несущей частоте и его обработку (вычисление амплитуды и фазы) тратится значительное количество времени, что вынуждает останавливать зонд на десятые доли секунды в каждой точке измерительной сетки.

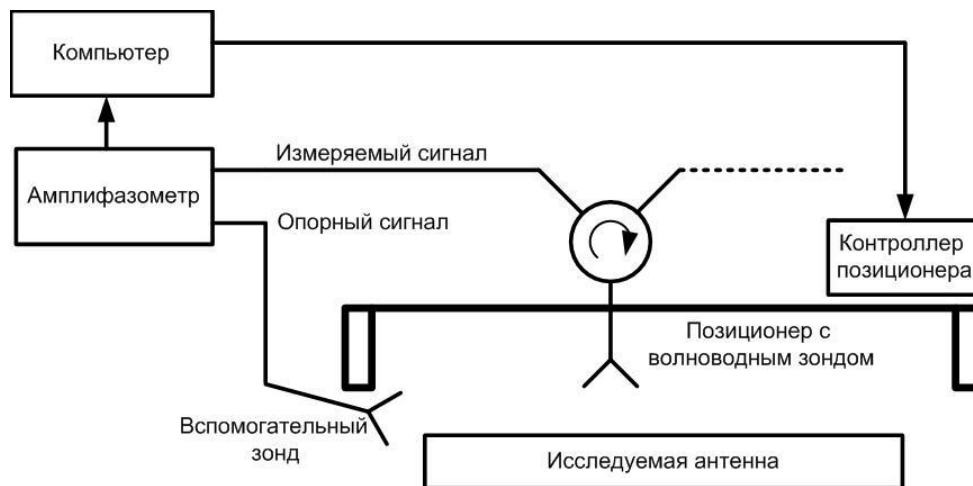


Рисунок 3 – Схема измерения параметров цифровой АФАР при работе в режиме передачи

Схема измерения ДН цифровой АФАР в режиме приема показана на рисунке 4. Основная сложность, с точки зрения метрологии, заключается в том, что ДН формируется суммированием в цифровой форме сигналов с 18 цифровых подрешеток, следовательно, выходной сигнал для измерения ДН может быть взят только с цифрового выхода АФАР. Фактически измерения амплитуды и фазы поля проводятся устройствами, входящими в состав исследуемой антенны, которые не являются измерительными приборами, что противоречит основополагающим принципам метрологии. Однозначного ответа, как устранить эту коллизию, нет. На текущий момент времени предлагается следующее решение: на первом, подготовительном этапе, проводится градуировка цифрового выхода АФАР по амплитуде и по фазе, потом проводятся измерения, после измерений повторно проводится градуировка. В процессе градуировки устанавливаются соответствия амплитуд и фаз на цифровом выходе АФАР амплитудам и фазам на осциллографе.

Вторая проблема связана с организацией опорного сигнала. В исследуемой цифровой АФАР отсутствует возможность синхронизации с внешним генератором, поэтому целесообразно использовать для измерений сигнал, который формируется в АФАР на излучение. В результате сформирована следующая схема измерений (рисунок 4): в цифровой АФАР формируется излучаемый сигнал, который выводится через аналоговый контрольный выход ППУ, далее сигнал подается на линию задержки и поступает на измерительный зонд. Линия задержки требуется для того, чтобы АФАР успела переключиться из режима передачи в режим приёма.

Сигнал, сформированный в АФАР, до и после линии задержки измеряется осциллографом, что позволяет компенсировать влияние линии задержки и контролировать стабильность излучаемого сигнала в процессе измерений. Кроме того, такая схема позволяет проводить градуировку цифрового выхода АФАР без изменения конфигурации стенда.

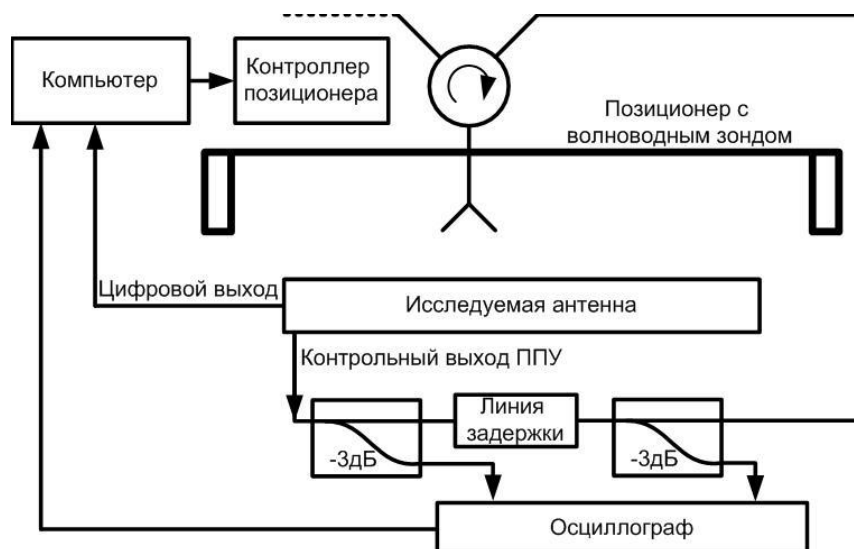


Рисунок 4 – Схема измерения параметров цифровой АФАР при работе в режиме приёма

Особенности измерения ДН цифровой АФАР на разреженной пространственной сетке

Как уже упоминалось ранее, время, отводимое на измерение ДН исследуемой цифровой АФАР, сильно ограничено. Кроме штатного времени работы АФАР, время измерений ограничено эффектом изменения температуры (нагревом) активных элементов во время функционирования АФАР. При слишком большой длительности может возникнуть ситуация, в которой измерения поля с разных сторон антенны проводятся при разных температурах. Чтобы избежать такой ситуации, необходимо минимизировать время измерений что приводит к необходимости проведения измерения ДН на разреженной пространственной сетке.

В данном случае измерения проводятся на прямоугольной сетке, параметры которой выбраны в соответствии с известным ГОСТ 8.309-78. Сектор сканирования антенны составляет $\pm 15^\circ$ в угломестной плоскости и $\pm 1^\circ$ в азимутальной плоскости, чем и определяются параметры сетки. Шаг сетки по оси X (угломестная плоскость) составляет $1,35\lambda$, по оси Y (азимутальная плоскость) – $14,3\lambda$. Сектор углов, однозначно восстанавливаемый при такой сетке измерений, равен

$$\Delta\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{2 \cdot 14,3\lambda}\right) = 3,9^\circ (\pm 1,95^\circ), \quad \Delta\varepsilon = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{2 \cdot 1,35\lambda}\right) = 43^\circ (\pm 21,5^\circ).$$

Расстояние до плоскости измерений составляет при этом 8λ . Положение точек измерения относительно антенны показано на рисунке 5.

При такой редкой сетке можно ожидать, что погрешности восстановления ДН будут значительными. Чтобы оценить эти погрешности, можно рассчитать статистику ошибок определения характеристик ДН при различных возбуждениях антенны – различных видах амплитудно-фазовых распределений (АФР). В нашем случае амплитудное распределение принималось квазиравномерным с величиной отклонений не более $\pm 1,5$ дБ. Фазовое распределение выбиралось таким образом, чтобы сформировать луч в заданном направлении; при этом отклонения фазы от идеального линейного распределения составляли не более 15° . Для каждого положения луча выбиралось 100 различных реализаций АФР, после чего рассчитывалась разница между

значениями параметров ДН, полученных по результатам измерений на разреженной сетке, и параметров, полученных прямым расчётом ДН с помощью модели.

Особенно значительными оказались ошибки при измерении уровня боковых лепестков (УБЛ). Функция распределения ошибки измерения УБЛ (для первого бокового лепестка) представлена на рисунке 6.

По результатам, представленным на рисунке 6, можно сделать вывод, что ошибка метода измерения УБЛ при использовании разреженной сетки составляет от -1 до $+2$ дБ.

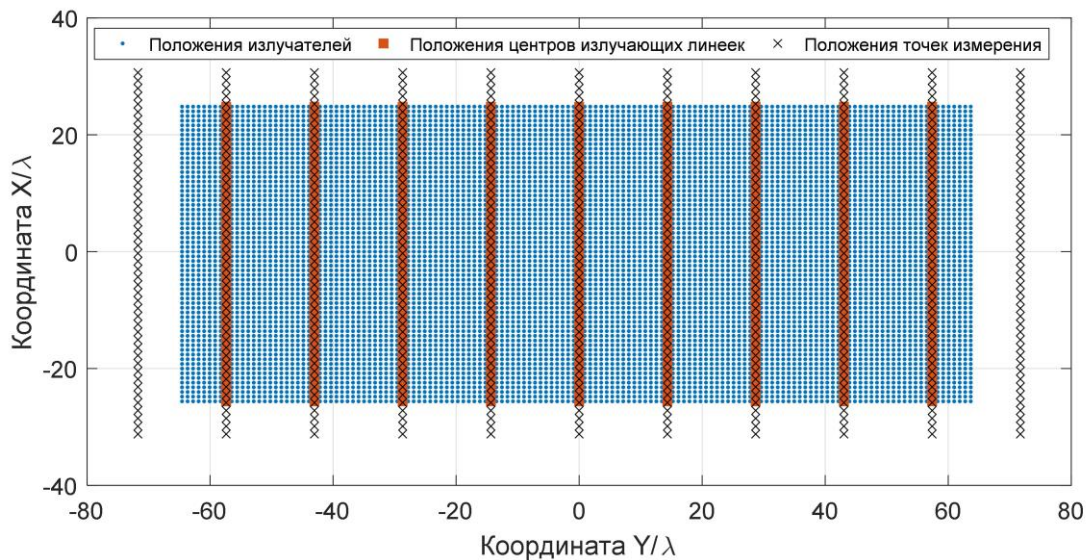


Рисунок 5 – Положение точек измерения

Строго говоря, любые подобные оценки погрешности метода измерения верны только тогда, когда статистические характеристики (среднеквадратичное отклонение) амплитудно-фазового распределения в измеряемой решетке соответствуют диапазону значений параметров отклонений АФР от номинальных значений, задаваемых при моделировании. Поэтому для того, чтобы полученная оценка погрешности была корректной при применении, необходимо контролировать статистические свойства амплитудно-фазового распределения в решетке.

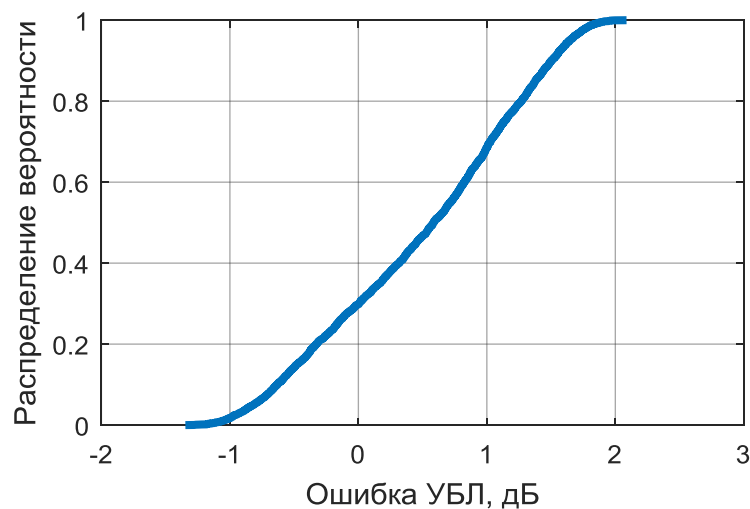


Рисунок 6 – Распределение вероятности ошибки

Существуют различные методы, позволяющие проконтролировать АФР в апертуре антенны [5,7]. Одним из самых простых является метод пересчета поля в апертуру, основанный на разложении поля в спектр плоских волн [7]. В нашем случае исследуемую решетку можно условно разбить на 9 пар подрешеток и измерить поле с малым шагом пространственной сетки, обеспечивающим высокую точность, после чего восстановить поле в апертуре для пары подрешеток. При этом статистические характеристики АФР определяются как ошибками при физической реализации АФР, так и ошибками применяемого метода восстановления АФР. По нашим предварительным оценкам, достигаемая точность достаточна для контроля статистических характеристик полученного случайного АФР (СКО) и подтверждения того, что СКО амплитуды и фазы поля не выходят за пределы, заложенные при моделировании. Контроль СКО целесообразно проводить до и после измерений на разреженной двумерной сетке.

Таким образом, полный цикл измерения параметров ДН цифровой АФАР на разреженной сетке, в первом приближении, включает в себя проведение следующих этапов:

1. Проведение статистического моделирования метода восстановления ДН по разреженной сетке. Определение статистических характеристик ошибок определения параметров ДН (матожидания и среднеквадратического отклонения), полученных по ансамблю амплитудно-фазовых распределений с заданными статистическими свойствами.

2. Определение статистических характеристик параметров амплитудно-фазового распределения на фрагменте АФАР по прямым измерениям поля в ближней зоне, обусловленных влиянием погрешности метода восстановления и присутствием случайных ошибок в реализации АФР. Сравнение со статистическими характеристиками АФР, используемыми в модели п.1.

3. В случае если среднеквадратичное отклонение суммарной погрешности, полученной по п.2, меньше, чем используемое в модели п.1, проводится измерение параметров ДН цифровой АФАР методом регистрации ближнего поля на разреженной сетке с известной погрешностью, определенной в п.1.

4. Вторичная обработка результатов измерения параметров ДН (исключение систематических ошибок и т. п.)

Заключение

При подтверждении характеристик цифровой АФАР возникает ряд методических и метрологических проблем, связанных как с организацией опорного сигнала для измерения фазы, так и с использованием цифрового сигнала при измерении ДН в режиме приёма. Цифровой выход АФАР не может быть источником сигнала, по которому измеряются амплитуда и фаза поля, так как АФАР не является и не может являться средством измерений. Однако, ДН цифровой АФАР формируется в цифровой форме, поэтому для измерения ДН можно использовать только цифровой выход. Для устранения создавшейся коллизии в статье предложен ряд методических решений, главным из которых является градуировка цифрового выхода по амплитуде и фазе поля. Процедура градуировки позволяет замкнуть цифровой выход АФАР на государственный эталон при помощи поверенного измерительного прибора и не превращать отдельные приборы, входящие в состав АФАР в средства измерений.

Для реализации измерения ДН АФАР в ближней зоне в условиях ограничений по времени проведения измерений целесообразно применять разреженную пространственную сетку; при этом особое внимание должно быть уделено разработке методического обеспечения контроля уровня погрешности данного метода измерений.

Литература

1. Коваленко А. И., Милосердов М. С. Методы измерения и контроля характеристик направленности АФАР космического РСА при наземной обработке. // V Всероссийские Армандовские чтения. Муром, 2015.
2. Милосердов М. С., Кузнецов Г. Ю., Коваленко А. И., Булыгин М. Л. Сквозная технология наземной обработки АФАР космического РСА. // VII Всероссийские Армандовские чтения. Муром, 2017.
3. G. Yu. Kuznetsov, M. S. Miloserdov, V. S. Temchenko, A. I. Kovalenko, D. I. Voskresenski, S. L. Vnotchenko, V. V. Riman, A. V. Shishanov. // Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS). St. Petersburg, 2017.
4. M. Miloserdov, G. Kuznetsov, M. Bulygin, I. Chechina, A. Kovalenko, V. Riman. A novel approach to measurement and calibration of space-borne SAR active phased array. // 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2018, Aachen, Germany.
5. Lee J.J., Ferren E.M., Woollen D.P., Lee K.M. Near-field probe used as a diagnostic tool to locate defective elements in an array antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 36, issue: 6, June 1988, pp. 884 – 889.
6. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. Комбинированный метод диагностики антенных решеток на основе ограниченного набора измерений полевых характеристик в ближней зоне // Наукоемкие технологии. 2015. №8. С.48 – 53.
7. J.J.H. Wang. An Examination of Theory and Practices of Planar Near-Field Measurement // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 6, 1988, pp. 11–17.