

УДК 621.396.6

DOI: 10.15827/2311-6749.18.2.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАДРАТУРНЫХ МОДУЛЯТОРОВ В ПЕРЕДАЮЩЕМ ТРАКТЕ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ X-ДИАПАЗОНА

С.В. Мацыкин, к.т.н., доцент, msev2000@mail.ru

*(Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
Волоколамское шоссе, 4, г. Москва, 125993);*

С.Б. Савилкин, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник, osv_42@mail.ru

*(Центр визуализации и спутниковых информационных технологий,
ФНЦ НИИ системных исследований РАН, Нахимовский просп., 36, г. Москва, 117218);*

А.В. Гурковский, начальник сектора, decto4134@mail.ru; В.О. Фролов, инженер

(АО «Корпорация «Комета», ул. Велозаводская, 5, г. Москва, 115280)

В работе представлены исследования возможности реализации схемы построения передающего тракта активной фазированной антенной решетки X-диапазона, в которой полностью отсутствуют аппаратные аттенюаторы и фазовращатели, а реализация амплитудного и фазового распределений в каждом канале решетки осуществляется за счет использования квадратурного модулятора. В работе предложен метод задания амплитудно-фазового распределения в раскрыве решетки, рассмотрены результаты обработки предлагаемой схемы на макете.

Ключевые слова: АФАР, балансный модулятор, антенны, амплитудно-фазовое распределение, фазовращатель.

Развитие современных радиоэлектронных средств обмена информации, в том числе с использованием космических аппаратов (КА), влечет за собой значительное повышение требований, предъявляемых к приемо-передающей аппаратуре космического базирования. Для удовлетворения современных потребностей в объеме и скорости передаваемой информации в составе КА должны использоваться современные антенно-фидерные системы (АФС), такие как активные фазированные антенные решетки (АФАР), которые позволяют мгновенно перенацеливать главный луч диаграммы направленности (ДН), сохраняя при этом высокий энергетический потенциал радиолинии. Одним из наиболее актуальных вариантов развития современных АФС космического базирования является использование в составе КА цифровых активных фазированных антенных решеток (ЦАР). ЦАР обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими аналоговыми АФАР, а именно:

- улучшенная помехозащищенность тракта в целом;
- организация нескольких приемо-передающих лучей на различных частотах;
- повышенная энергетическая эффективность радиолиний;
- оперативность обработки полезных сигналов на борту.

Однако цифровые решетки также не лишены недостатков, основными из которых являются сложность разработки и довольно высокая стоимость подобных изделий. При разработке ЦАР космического базирования должны быть учтены высокие массогабаритные требования, предусмотрены средства защиты от воздействия электромагнитных полей космического пространства.

Основой построения цифровой АФАР является *приемо-передающий модуль* (ППМ) [1–7]. В ЦАР формирование ДН и обработка сигнала производятся цифровыми методами, поэтому для преобразования цифрового сигнала в аналоговый в передающем тракте применяется *цифро-аналоговый преобразователь* (ЦАП), а для преобразования аналогового сигнала в цифровой в приемном тракте применяется *аналого-цифровой преобразователь* (АЦП). Для усиления сигналов, как и в аналоговой решетке, в передающем тракте располагаются мощные СВЧ-усилители, а в приемном тракте – маломощные усилители. Непосредственно формирование ДН и обработка сигнала производятся в модуле цифрового диаграммообразования, в качестве такого модуля могут выступать как специализированные цифровые сигнальные процессоры, так и ПЛИС. Совокупность данных элементов и представляет из себя ППМ.

Проведенное исследование различных вариантов схем диаграммообразования позволило выделить следующие варианты реализации передающей части многолучевой АФАР.

1. Традиционная АФАР. Формирование требуемой ДН АФАР при работе на передачу производится путем управления фазовыми сдвигами, создаваемыми обычными аппаратными *фазовращателями* (ФВ) и аттенюаторами, которые компенсируют неидеальность *амплитудно-фазовой характеристики* (АФХ) ФВ. В такой АФАР полезный сигнал на рабочей частоте раздается (делится) на множество ФВ (которые задают нужный фазовый сдвиг). Сдвинутые по фазе сигналы проходят через аттенюаторы (которые ком-

пенсуют АФХ ФВ), после чего сигналы всех трех каналов суммируются и подаются на линейный усилитель мощности.

2. Цифровая АФАР. Фазовые сдвиги формируются цифровыми синтезаторами частот (аналогичные предполагается применить в приемном тракте в качестве гетеродинов).

3. Комбинированная (квадратурная) АФАР. Сигналы нужных фаз формируются путем сложения сигналов двух квадратурных сигналов с соответствующими амплитудами.

При анализе данных вариантов учитывались следующие показатели:

- аппаратные затраты (количество функциональных элементов – фазовращателей, генераторов, смесителей, фильтров и т.д.);
- массогабаритные характеристики, в том числе характеристики кабельной сети;
- энергопотребление;
- сложность изготовления и настройки.

Если обозначить количество элементов АФАР через N , то количество функциональных элементов будет таким, как представлено в таблице 1.

Таблица 1

Вариант реализации	ФВ	Аттенюатор	Синтезатор частоты	КМ IQ	Фильтр
Традиционная АФАР	N	N	–	–	1
Цифровая АФАР	–	–	N	N	N
Квадратурная АФАР	–	–	–	$2N$	2

Анализ таблицы 1 показывает, что самым неблагоприятным случаем с точки зрения количества активных элементов является 2-й (цифровая АФАР). Если не брать в расчет количество БМ и фильтров (поскольку и те, и другие являются пассивными элементами), то большое количество синтезаторов частоты резко снижают преимущества данного способа по критериям надежности и энергопотребления. Преимуществами этого способа являются возможность крайне малого дискрета управления фазой сигнала, что теоретически позволяет вести электронную настройку АФАР (и не только настройку, но и подстройку в процессе полета летательного аппарата), и (опять же теоретически) менее жесткие требования к выравниванию фазовых путей сигналов, поскольку выравниванию в этом случае подлежат пути подачи сигнала опорной частоты для синтезатора частоты (частота которого относительно невелика и может составлять величину порядка 100 МГц).

Традиционная АФАР очень хороша в плане количества функциональных элементов – по сути она вообще не имеет активных элементов, все ее элементы являются пассивными. К недостаткам этого варианта следует отнести следующие:

- жесткие требования к выравниванию фазовых путей сигналов от делителя до каждого элемента АФАР;
- необходимость наличия подстроечных элементов (что приводит к ручной настройке такой АФАР);
- более грубый дискрет управления фазой;
- полное отсутствие возможности подстройки во время полета летательного аппарата.

По выбранной схеме квадратурной АФАР в передающем тракте каждого ППМ имеется *квадратурный модулятор* (КМ), на высокочастотный вход которого подается заранее сформированный сигнал на несущей частоте. Изменение АФХ несущей достигается путем подачи на синфазный и квадратурный входы модулятора модулирующих сигналов, которые изначально формируются в цифровом виде в ПЛИС, а затем преобразуются в аналоговую форму в ЦАП. Схема представлена на рисунке 1.

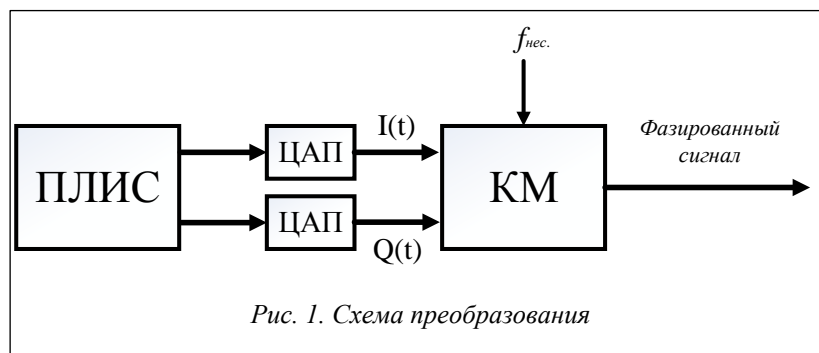


Рис. 1. Схема преобразования

Одной из основных проблем является подбор элементной базы, так как, учитывая специфику применения АФАР и вытекающие из этого требования, очевидно, что в ППМ должны использоваться элементы в виде готовых *интегральных микросхем* (ИМС). Несмотря на то что выбор готовых ИМС КМ, работающих в X-диапазоне, практически отсутствует, все же была найдена ИМС MLIQ-0218

фирмы MarkiMicrowave. Для формирования модулирующих сигналов применяются ЦАП AD7399 фирмы AnalogDevices. В качестве модуля цифрового диаграммообразования была выбрана ПЛИС MaxII.

Данная схема реализована на макете. Для управления фазовым сдвигом макет подключался к ПК с разработанным специальным ПО, позволяющим управлять балансными модуляторами через последовательный порт.

Был разработан макетный стенд и проведены тестовые испытания с последующим сравнением эталонного диаграммообразования с полученными результатами. Он позволил отработать следующие вопросы:

- методика управления фазой с помощью IQ-модуляторов;
- оценка влияния разброса фазовых путей до IQ-модуляторов;
- оценка возможности компенсации разброса фазовых характеристик элементов каналов передатчика цифровыми методами;
- отработка методик управления передатчиком;
- оценка взаимного влияния входной и выходных мощностей и реальных коэффициентов усиления каналов передатчика;
- оценка тепловых режимов, КПД и энергопотребления передатчика.

В состав стенда входит разработанная макетная плата, которая позволила смоделировать двухканальную приемо-передающую схему.

В качестве управляющего устройства в плате используется ПЛИС MAXPERM240T100C4N, которое является достаточно простым в управлении и программировании устройством, при этом его функциональные возможности отвечают всем заданным требованиям. Количество программируемых выходов и логика работы ПЛИС позволяют использовать все применяемые элементы платы, а при необходимости подключить дополнительные. Программирование ПЛИС MAXPERM240T100C4N проводится с помощью ПО производителя QuartusII.

Для передачи высокочастотного сигнала по каждому выходу устройства используются два усилителя мощности HMC7357LP5GE. Рабочее напряжение одного усилителя мощности составляет 8 В, что является наибольшим значением на всей плате, поэтому источник питания всей платы также соответствует рабочему напряжению в 8 В. Усилителям мощности высокочастотного сигнала свойственно резкое повышение температуры при работе, поэтому в плате предусмотрены температурные датчики TMP04FT9.

Температурные датчики TMP04FT9 производства AnalogDevices представляют собой датчики с тремя выходами. Температурные датчики TMP04FT9 устанавливаются непосредственно на плату в допустимой близости к усилителям мощности HMC7357LP5GE. Для лучшего теплообмена между датчиком TMP04FT9 и усилителем мощности HMC7357LP5GE допускается опустить термодатчик TMP04FT9 на корпус усилителя мощности, предварительно обеспечив требуемую фиксацию датчика на корпусе усилителя мощности с помощью теплопроводящей пасты. Получение полезной информации с термодатчика TMP04FT9 происходит через ПЛИС MAXPERM240T100C4N, к которому и подключается термодатчик TMP04FT9.

Топология платы устроена таким образом, что высокочастотный сигнал поступает на плату по двум входам с разным частотным диапазоном. В программной среде проводится моделирование делителей мощности непосредственно на плате передающего тракта многолучевой АФАР. На поверхности стеклотекстолита трассируются медные дорожки соответствующей длины и ширины для обеспечения наилучшего коэффициента стоячей волны. Вследствие моделирования дорожек минимизируется вероятность получения неудовлетворяющего показателя потерь высокочастотного сигнала при прохождении сигнала на поверхности слоя стеклотекстолита. С помощью делителей высокочастотный сигнал подается на IQ-модуляторы, в которых формируется необходимая фаза сигнала.

Для отклонения луча АФАР от нормали в направлении целеуказания используются IQ-модуляторы MLIQ-0218. В IQ-модуляторе формируется фаза сигнала в зависимости от разницы входных напряжений на устройстве. Управляя каждым IQ-модулятором, можно получить суммарный сигнал с необходимой фазой на каждом выходе платы передающего тракта многолучевой АФАР. Управление IQ-модуляторами происходит с помощью ЦАП AD7399BRU.

В таблице 2 в столбцах «I» и «Q» представлены значения управляющих напряжений синфазной и квадратурной составляющих, используемых для изменения фазового состояния исходного сигнала. Столбцы «Эталон» и «Макет», помимо таблицы 1, также представлены на рисунке 2 и наглядно отражают результаты предполагаемого и реального отклонений фазы сигнала в результате испытаний макета элементов передающего тракта с использованием квадратного балансного модулятора.

Таблица 2

Эталон, Δφ°,	Макет, Δφ°,	“I”, мВ	“Q”, мВ
0°	0°	500	0
10°	7.2°	492	87
35°	34.7°	410	287
40°	38°	383	321
45°	41.5°	354	354
50°	45.1°	321	383
55°	48.2°	287	410
60°	51.3°	250	433
80°	64.6°	87	492
85°	67.1°	44	498
90°	70.5°	0	500

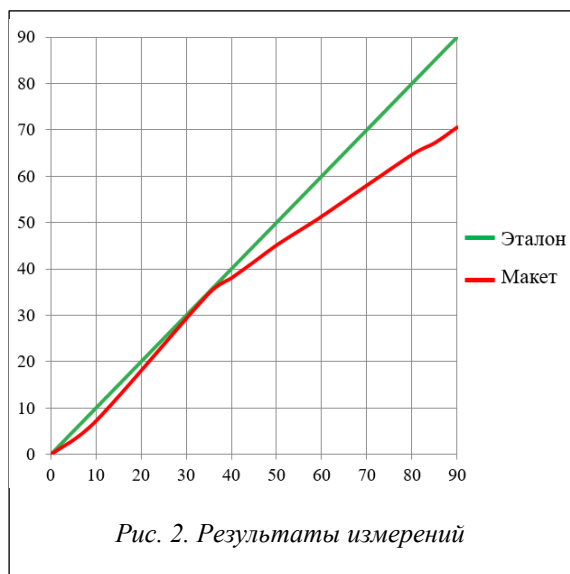


Рис. 2. Результаты измерений

В представленной работе проведен сравнительный анализ возможных диаграммообразующих схем АФАР с учетом особенностей их реализации. В результате проведенных исследований была подтверждена принципиальная возможность формирования амплитудно-фазового распределения в раскрытии АФАР с использованием квадратурных балансных модуляторов MLIQ-0218, которые выполняют функции задержки сигнала и задания определенного уровня сигнала в каждом канале. Учитывая полученные результаты, предложенная схема может быть использована в составе АФАР, однако для достижения наилучших характеристик необходима ее дальнейшая проработка.

Литература

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток; [под ред. Д.И. Воскресенского]. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
2. Генов А.А., Мацыкин С.В., Осипов В.В., Савилкин С.Б. Концепция построения передающего тракта многолучевой цифровой приемо-передающей активной фазированной антенной решетки X-диапазона // Научн. труды (Вестн. МАТИ). 2014. С. 91–101.
3. Генов А.А., Осипов В.В., Савилкин С.Б. О возможности реализации мобильной сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса в X-диапазоне // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 237–244.
4. Глазунов Р.А. Планарный излучатель для ПИМ 3D // Антенны. 2012. № 11. С. 67–75.
5. Глазунов Р.А., Баландин Ю.В. Перспективные излучатели АФАР сантиметрового диапазона. М.: Фазотрон, 2012. № 1. С. 45–52.
6. Imanaka Y., Multilayered Low Temperature Cofired (LTCC) Technology, Springer Science+Business Media, Inc. 2005, 230 p.
7. Кищинский А. Твердотельные СВЧ усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: матер. 16-й Междунар. Крымской конф. Севастополь: Вербер, 2009. С. 11–16.