

# Многолучевые приемные АФАР систем спутниковой связи

А.Г. Ефимов, А.Г. Каменев, С.А. Корнеев

ООО «Ижевский радиозавод»

**Аннотация:** Рассмотрены варианты построения многолучевых приемных антенных систем на основе АФАР. Представлены критерии выбора излучателей для антенн различного диапазона и назначения. Показано, что использование фазовращателей на основе арсенид-галлиевых ПТШ в пассивном включении позволяет снизить потребление по цепям управления без ухудшения технических параметров. Приведены оценки энергетических характеристик АФАР трех типов. Даны рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости связных систем.

**Ключевые слова:** СВЧ, приемная АФАР, излучатель, фазовращатель, устройство управления, малошумящий усилитель, полосно-пропускающий фильтр

## 1. Введение

Использование многолучевых антенных систем в системах связи позволяет за счет пространственно-частотного разделения расширить зону обслуживания и повысить количество абонентов. Использование активных фазированных антенных решеток (АФАР) дает возможность перераспределять информационную емкость системы связисканированием независимых лучей с электронным управлением [1].

В данной работе рассмотрены варианты построения многолучевых приемных АФАР различных частотных диапазонов и различной орбиты космического аппарата.

Типовая схема приемной АФАР приведена на рис.1. Антенна имеет  $N$  независимых приемных каналов. Сигнал принимается излучателем Изл и поступает на малошумящий усилитель МШУ, коэффициент шума которого определяет чувствительность приемного тракта. Усиленный сигнал поступает на делитель мощности Д с  $M$  выходами, каждый из которых нагружен на дискретный фазовращатель. Число фазовращателей  $M$ , включенных параллельно, определяет число приемных лучей. Сигнал с фазовращателей соответствующих лучей суммируется в лучевых сумматорах С и после фильтрации полосно-пропускающим фильтром ППФ поступает на выходной усилитель У. Фазовые команды на фазовращатели, соответствующие фазовым программам для каждого положения луча, формируются блоком управления БУ.

В блоке управления происходит вычисление дифференциальных фазовых сдвигов, определяющих фазовый фронт сигналов по апертуре АФАР с учетом расстояния между излучателями по осям АФАР  $dY$  и  $dZ$  соответственно:

$$DPS_{\alpha} = \frac{-2\pi dY \cos \alpha}{\lambda_0} \quad DPS_{\beta} = \frac{-2\pi dZ \cos \beta}{\lambda_0} \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны, соответствующая центральной частоте рабочего диапазона АФАР [2].

На основании дифференциальных фазовых сдвигов в блоке управления вычисляются 3...6 разрядные фазовые программы с учетом позиционных двоичных номеров  $i, j$  излучателей в координатной сетке АФАР:

$$PP_{ij} = |iDPS_{\alpha} + jDPS_{\beta}| \bmod^{\circ} 360 \quad (2)$$

Фазовая программа в виде управляющих сигналов выдается на фазовращатели соответствующего луча АФАР.

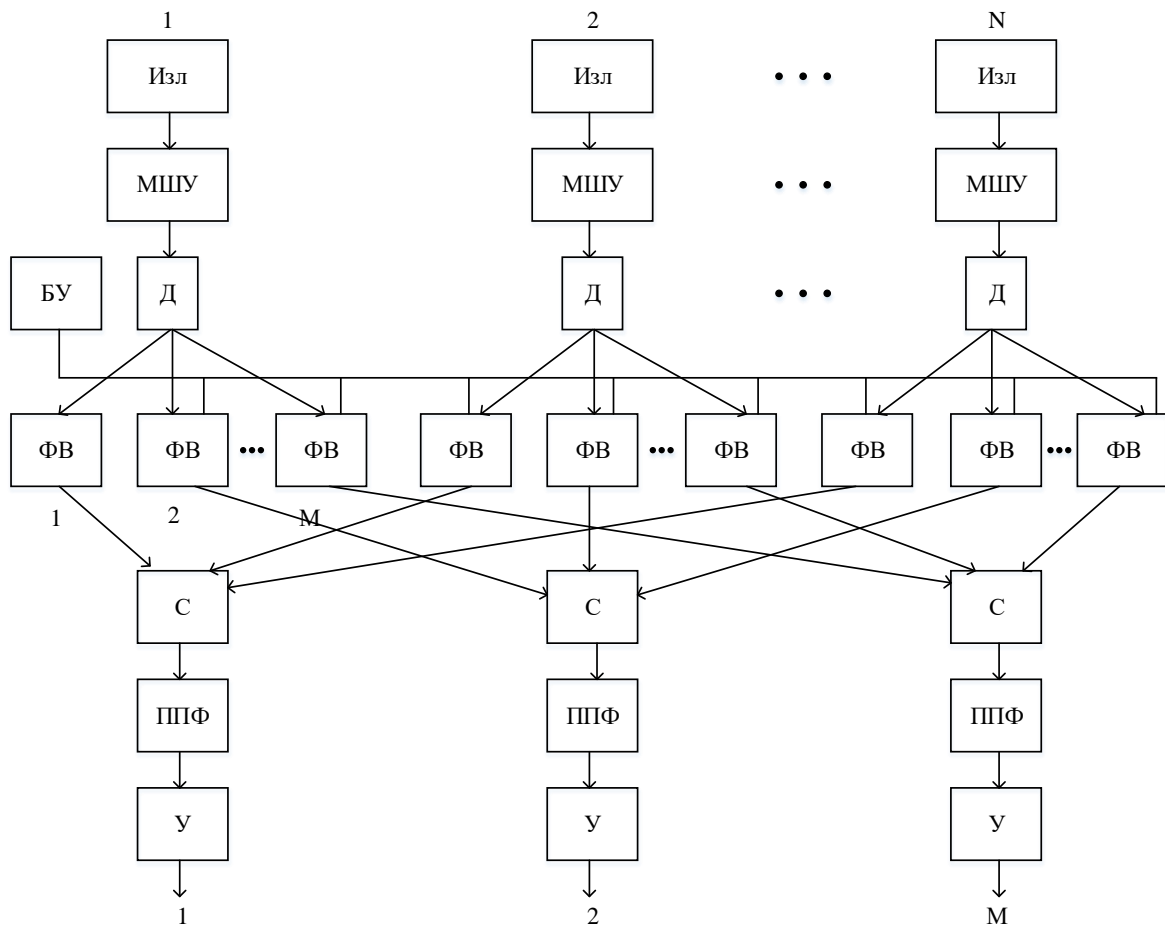


Рисунок 1. Схема многолучевой АФАР

Выбор типа излучателя определяется сектором сканирования и частотным диапазоном антенны с учетом технологичности изготовления. Для получения высокого коэффициента усиления при небольшом секторе сканирования используются рупорные и спиральные излучатели. Для широкоугольного сканирования больше подходят турникетные и плоскочатные излучатели. Общее усиление антенны складывается из усиления единичного излучателя и количества излучателей. Добротность системы на прием  $G/T$  будет определяться общим усилением антенны  $G$  и шумовой температурой приемного канала  $T$  с учетом потерь на входе МШУ. Следует учитывать, что в некоторых случаях на входе приемного тракта необходима установка фильтра, потери которого неизбежно повысят интегральную шумовую температуру приемного тракта.

В многолучевых АФАР наиболее массовым элементом является фазовращатель, их количество определяется числом приемных каналов  $N$  и числом лучей  $M$ . Кроме того скорость переключения фазовых состояний определяет скорость переключения луча, а потребление по цепям управления фазовращателя играет важную роль. Наибольшее распространение получили фазовращатели на основе арсенид-галлиевого полевого транзистора с затвором Шоттки (ПТШ) в пассивном включении. Скорость переключения такого элемента составляет единицы наносекунд, а токи управления определяются токами утечки затвора ПТШ, которые составляют единицы микроампер [3]. Использование арсенида галлия обеспечивает высокую радиационную стойкость и позволяет реализовать функциональные узлы в виде монолитных интегральных

схем. Для управления такими фазовращателями требуется отрицательное напряжения для преобразования логических уровней.

## 2. Выбор элементов АФАР и экспериментальные результаты

В Табл.1 приведены характеристики многолучевых приемных АФАР, которые изготавливались или проектировались на предприятии ООО «Ижевский радиозавод».

Таблица 1. Характеристики приемных АФАР

Диапазон	Число излучателей	Число лучей	Сектор сканирования	Г/Т, дБ/К	Тип излучателя
Ка	64	4	$\pm 8,5$	6,5	рупорный
С	256	19	$\pm 8,5$	9/3	спиральный
S	16	8	$\pm 52$	Минус 11	турникетный

Антенна первого типа предназначена для геостационарного ретранслятора Ка диапазона, что определяет угол сканирования и выбор тонкостенного рупорного излучателя с линейной поляризацией, рис.2. Каждый одноканальный приемный модуль содержит МШУ и четыре трехрядных фазовращателя, реализованные в виде гибридной ИС на поликорена основе переключательного ПТШ с балочными выводами

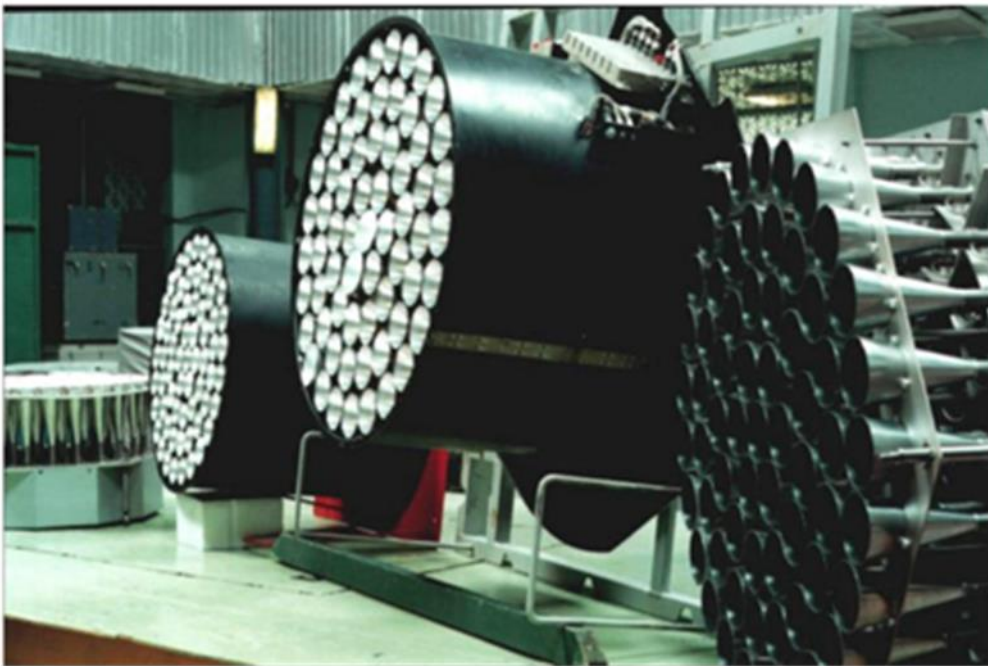


Рисунок 2. Антенна Ка диапазона с рупорными излучателями

Антенна второго типа для геостационарного ретранслятора С-диапазона имеет спиральные излучатели с круговой поляризацией, рис.3, и построена на основе четырехканальных приемных модулей [4]. В каждом канале установлено по восемь трехрядных фазовращателей в гибридном исполнении на основе транзистора 3П388 с разрядами  $180^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $45^\circ$ . В формировании узких лучей участвуют фазовращатели всей апертуры антенны, для формирования нескольких широких лучей задействованы фазовращатели части апертуры. Всего АФАР формирует 4 узких луча с шириной диаграммы направленности  $1,7^\circ \times 1,7^\circ$  и 16 широких лучей с шириной диаграммы направленности  $3,5^\circ \times 3,5^\circ$ .



**Рисунок 3.** Спиральный излучатель С-диапазона

Восьми-лучевая приемная АФАР S-диапазона для низколетящего космического аппарата построена на турникетных излучателях с круговой поляризацией, реализованных печатным способом на текстолите и представленных на рис. 4.



**Рисунок 4.** Турникетные излучатели S-диапазона

Многоканальный приемный модуль содержит по восемь фазовращателей в каждом канале, реализованных в виде интегральных схем. На входе каждого приемного канала устанавливается полосно-пропускающий фильтр на высокочастотных диэлектрических резонаторах для обеспечения электромагнитной совместимости [5].

Во всех случаях использовались кольцевые бинарные делители, что обеспечивает

развязку между каналами порядка 20 дБ. В первых двух случаях делители и сумматоры реализованы на поликоре, а для S-диапазона использован стеклотекстолит. Степень взаимного влияния каналов оценивалась по изменению коэффициента передачи и фазового сдвига при управлении соседним каналом приемного модуля.

### 3. Заключение

Рассмотрены варианты построения приемных многолучевых антенных систем спутниковой связи на основе АФАР. Представлены критерии выбора излучателей с учетом диапазона рабочих частот и высоты орбиты космического аппарата. Показано, что использование фазовращателей на основе арсенид-галлиевых ПТШ в пассивном включении позволяет снизить потребление по цепям управления до единиц микроампер при скорости переключения фазовых состояний единицы наносекунд. Приведены оценки энергетических характеристик приемных антенн трех типов, полученные при промышленном изготовлении. Даны рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости связанных систем и снижению взаимного влияния каналов АФАР.

#### Список литературы

1. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйбус А.Г. Многолучевые антенные системы HTS // Технологии и средства связи. 2013, № 6-2 (99), с. 54 – 67.
2. R.C. Hansen Phased array Antenas Second edition A. John Willey & Sons, Inc., Publication, 2009 p.550.
3. Aysli Y. Microwave switching with GaAs MESFET. Microwave J., vol.25, №11, 1982, p. 61-74.
4. V. Timoshenkov, A. Efimov, V. Losev Multi-Channel Receiving Module of Multi Beam C-Band Active Phased Array Antenna // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus) p.4 – 7.
5. Безбородов Ю.М., Нарытник Т.Н., Федоров В.Б. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. К.: Техника, 1989.-184 с.