

# ФАР ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ВСТРОЕННЫМ ЦИФРОВЫМ ПРИЕМНИКОМ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рассмотрена возможность применения фазированной антенной решетки дециметрового диапазона с встроенным цифровым приемником, предназначенной для работы в качестве антенной системы измерительных телеметрических комплексов. Представлены результаты исследований.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении испытаний ракетно-космической техники (РКТ) в составе измерительных комплексов наземной инфраструктуры используется целый ряд различных антенных систем, часть из которых разработана еще с 70–80-х годов прошлого века, отличающихся диапазонами частот принимаемых сигналов, принципами формирования диаграммы направленности (ДН), эффективной площадью, коэффициентом усиления и другими параметрами [1]. Причем с тех пор многие антенные системы уже устарели не только физически, но и морально.

В ходе проведения летных испытаний РКТ востребованы антенные системы, обладающие заданными характеристиками по дальности приема и обеспечивающие многоканальный прием сигналов телеметрии в широком динамическом диапазоне с возможностями наведения и сопровождения контролируемого объекта в различных режимах управления, включая автосопровождение.

Таким образом, существует научно-техническая задача — обеспечение надежного приема телеметрических сигналов от бортовых радиотелеметрических систем, используемых при проведении летных испытаний на всех участках полета РКТ.

В статье рассмотрены особенности построения и применения антенных систем, применяемых в радиотелеметрии, показана возможность использования в качестве антенной системы наземных измерительных телеметрических комплексов фазированной антенной решетки дециметрового диапазона с встроенным цифровым приемником.

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Используемые в измерительных комплексах для приема телеметрической информации антенные системы (АС) обеспечивают одновременный прием сигналов в различных частотных диапазонах по двум ортогональным линейным поляризациям от бортовых радиотелеметрических устройств. Часть АС относится к классу зеркальных антенн, используются также и фазированные антенные решетки (ФАР). По площади эффективной поверхности, определяющей дальность приема, антенные системы делятся на системы с высокой эффективностью (более  $25 \text{ м}^2$ ), а также со средней (менее  $25 \text{ м}^2$ ) и малой эффективностью (менее  $5 \text{ м}^2$ ).

Характеристики антенной системы в части наведения и слежения за объектом РКТ (скорость и ускорение при наведении по углу места и по азимуту, секторы поворота) определяет опорно-поворотное устройство. Антенные системы могут работать в нескольких режимах наведения:

- ручное дистанционное управление;
- программное управление;
- автоматическое сопровождение по сигналу от объекта;
- автоматическое наведение от ведущей антенны.

Особенностью построения радиоприемного тракта большинства рассматриваемых антенных систем является использование широкополосных усилителей в метровых диапазонах и широкополосного конвертора в дециметровом, а также применение аппаратуры коммутации трактов, позволяющей подключить к одной антенной системе несколько приемно-регистрирующих станций, каждая из которых может действовать на собственной частоте. Принятый антенной сигнал после его преобразования на промежуточную частоту поступает на приемно-регистрирующую станцию.

В целом эксплуатирующиеся антенны представляют собой достаточно сложные системы, как конструктивно, так и схемотехнически, но на сегодняшний момент большинство из них устарело и не удовлетворяет современным требованиям по динамическому диапазону, быстродействию, помехоустойчивости и другим характеристикам.

АС для приема телеметрии работают в условиях помех, создаваемых внешними радиоэлектронными средствами, а также в условиях воздействия отраженных сигналов при многолучевом распространении. Анализ множества требований к АС (диапазона рабочих частот, дальности, коэффициента усиления, энергопотребления и массогабаритных характеристик), зачастую противоречащих друг другу, показывает, что их реализация на современном этапе развития микроэлектроники возможна на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Современные АФАР развиваются в направлении создания цифровых антенных решеток. В этом случае сигналы с выходов приемных модулей подвергаются аналого-цифровому преобразованию с последующей цифровой пространственной обработкой. Такое построение АФАР дает качественно новые возможности по управлению формой ДН, созданию многолучевых ДН, обеспечивает гибкость в управлении [2]. При этом формирование диаграммы направленности антенны цифровыми методами позволяет повысить помехозащищенность путем

пространственной селекции, основанной на формировании «адаптивных нулей» в диаграмме направленности.

Кроме того, анализ особенностей построения и условий применения антенных и приемно-регистрирующих телеметрических станций показывает, что выполняемые алгоритмы обработки принимаемых сигналов в антенных комплексах для реализации функции автосопровождения зачастую во многом совпадают с алгоритмами обработки, используемыми в приемно-регистрирующей аппаратуре для выделения телеметрической информации.

Таким образом, дальнейшее совершенствование и развитие измерительных комплексов целесообразно вести по пути интеграции антенных систем и приемно-регистрирующей аппаратуры, с учетом обеспечения возрастающих требований по информативности и расширению функциональных возможностей.

Одной из современных концепций построения приемного тракта АС является программно-определяемая радиосистема (SDR, software defined radio). При этом преобразование входного сигнала происходит непосредственно на несущей частоте, позволяя существенно упростить аналоговую часть приемной системы, сводя ее по существу к малошумящему усилителю. Использование технологии SDR обеспечивает [3]:

- сокращение числа компонентов схемы за счет исключения преобразования частоты;
- повышение помехозащищенности (подавление внеполосного сигнала до  $-100$  дБ) за счет исключения зеркального и побочных каналов приема, отсутствия паразитных комбинационных составляющих;
- расширение линейного динамического диапазона на  $30-40$  дБ;
- программную адаптацию к структурам принимаемых сигналов.

Программируемая радиосистема обладает простотой адаптации к параметрам и структурам принимаемых сигналов телеметрии без изменения аппаратной части. В основе программной обработки сигналов любой телеметрической системы заложен принцип корреляционной свертки, заключающийся в выделении полезного сигнала из исходной шумовой последовательности.

Хорошо известен алгоритм цифровой обработки сигналов с использованием корреляционной свертки на основе квадратурного демодулятора. Общими выполняемыми процедурами для всех телеметрических систем являются расчет синфазной и квадратурной составляющих сигнала, а также их фильтрация на фильтре нижних частот. Особенность рассматриваемого случая заключается в том, что дальнейшая обработка после демодуляции выполняется в декодере по алгоритмам, зависящим от типа телеметрической системы и характеристик принимаемого сигнала.

Реализация демодулятора телеметрического сигнала на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и АЦП позволяет осуществлять прием сигнала телеметрии с любым видом модуляции и кодирования путем программирования микросхемы ПЛИС.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Примером интеграции АС и приемно-регистрирующих средств служит АС на основе ФАР с встроенным цифровым приемником на ПЛИС, обеспечивающая прием и регистрацию телеметрической информации в широко распространенном дециметровом диапазоне. АС (рис. 1) относится к особому классу АФАР — функционально законченных антенных систем, использующих цифровую обработку сигналов, и выполнена в виде поворотной наземной антенны, размещаемой на опоре и включающей элементы:

- антенну на основе ФАР;
- малошумящие усилители (МШУ);



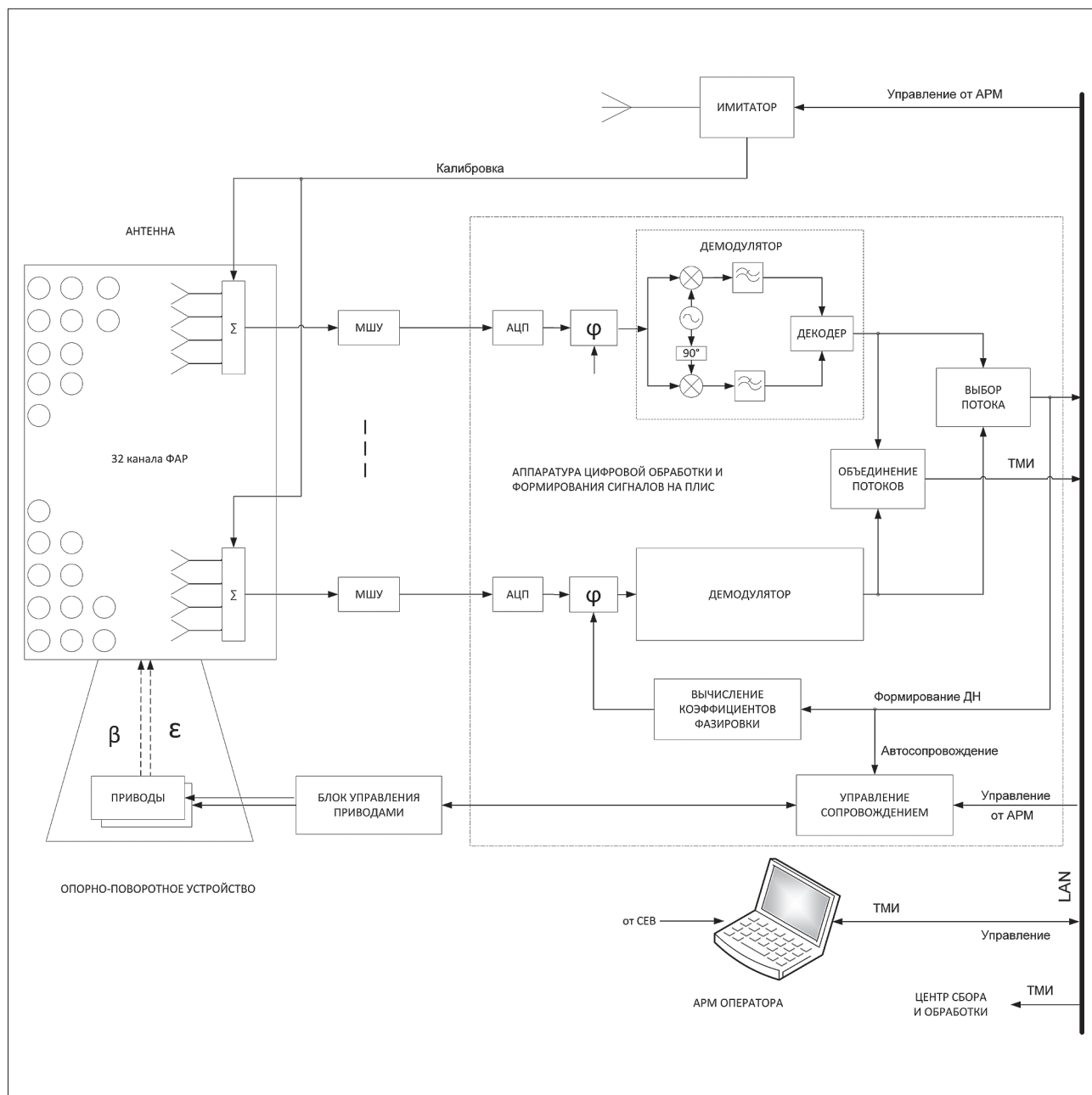
▲ Рис. 1. АС на основе ФАР со встроенным цифровым приемником

- опорно-поворотное устройство (ОПУ), обеспечивающее вращение антенны по азимуту и углу места;
- аппаратуру цифровой обработки и формирования сигналов;
- блок управления приводами;
- имитационную аппаратуру (имитатор);
- АРМ оператора.

Схема АС приведена на рис. 2. После включения антенна ориентируется в направлении на предполагаемую точку расчетной траектории полета исследуемого объекта. В момент появления исследуемого объекта в предполагаемой зоне захвата происходит прием сигнала телеметрии и сравнение величины сигналов принятыми различными фрагментами антенны. Это позволяет определить направление, в которое должна переместиться антенна для приема сигнала максимального уровня. Такой метод применяется отдельно по азимуту ( $\beta$ ) и углу места ( $\epsilon$ ). После захвата объекта антенна переходит в режим автосопровождения.

Принятые каждым каналом сигналы суммируются с четырех приемных элементов (цилиндрических облучателей) и поступают через МШУ на аппаратуру обработки и формирования, в которой происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой для последующей фильтрации и обработки, а также формирование сигнала управления электроприводами, обеспечивающими автоматическое слежение системы за источником излучения со скоростью до  $15$  %/с.

Формирование луча в заданном направлении осуществляется за счет когерентного (синфазного) сложения сигналов в каналах приема антенной решетки с дальнейшей цифровой обработкой сигналов путем их накопления и усреднения [4]. Коэффициент усиления системы в максимуме ДН составляет не менее  $27$  дБ. Калибровка и проверка АС реализуется с помощью имитатора по закрытому и открытому тракту.



▲ Рис. 2. Схема АС на основе ФАР со встроенным цифровым приемником

Прием и регистрация выполняется с привязкой внутренней шкалы текущего времени к секундным меткам аппаратуры точного времени, спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

### НОВИЗНА И ПРЕИМУЩЕСТВА

Новизна АС, выполненной на основе фазированной антенной решетки дециметрового диапазона с встроенным цифровым приемником, по сравнению с АС, использующими частотное преобразование сигнала, состоит в оцифровке принимаемого сигнала на несущей частоте, что упрощает аналоговую часть приемной системы, а также в использовании цифрового канала приема и обработки сигналов телеметрии для формирования сигналов управления антенной.

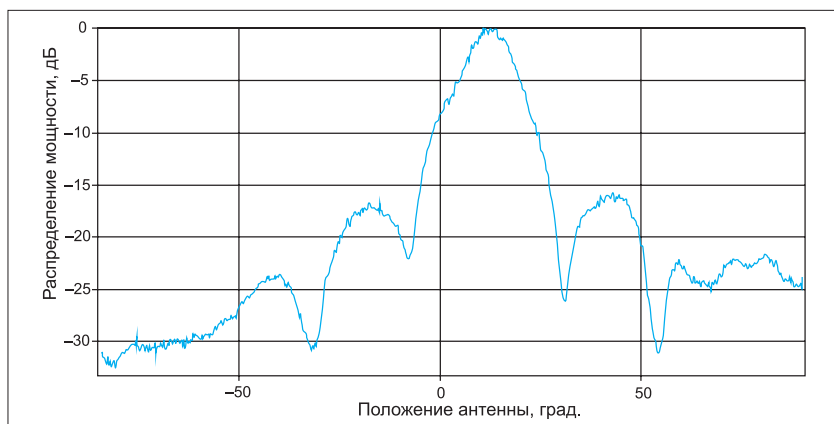
Преимущества новой АС:

- возможность одновременного приема на нескольких частотах;
- повышение качества приема за счет расширения линейного динамического диапазона;

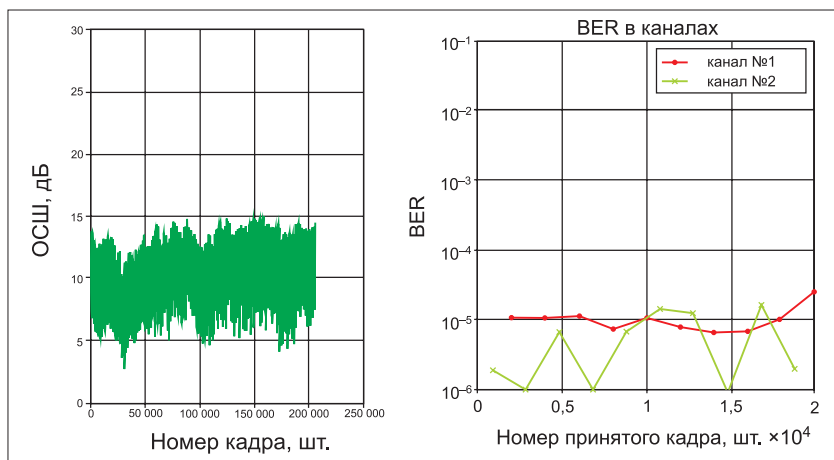
- авто сопровождение по принимаемому сигналу, высокое быстродействие которого определяется цифровым методом формирования ДН;
- помехозащищенность, включая пространственную селекцию путем формирования ДН;
- интеграция управления антенной и приемно-регистрирующими средствами существенно упрощающая настройку и обслуживание.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные экспериментальные исследования АС с движущимся объектом — источником сигнала в дальней зоне ДН (рис. 3) в условиях промышленных помех, создаваемых внешними радиоэлектронными средствами, и воздействия отраженных сигналов при многолучевом распространении — показали устойчивый прием в режимах: программный, авто сопровождение и ручной. Реальная чувствительность приема не хуже  $-124$  дБВт. При отношении сигнал/шум (ОСШ), равному 10, показатель частоты битовых ошибок BER не превышает  $10^{-4}$  (рис. 4), что подтвердило принятые схемотехнические решения



▲ Рис. 3. Диаграмма направленности



▲ Рис. 4. Показатели ОСШ и частоты битовых ошибок BER

и правильность программной реализации процессов демодуляции и декодирования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана техническая возможность применения в качестве антенной системы для измерительных телеметрических комплексов фазированной антенной решетки дециметрового диапазона с встроенным цифровым приемником. Предложенные решения могут быть положены в основу создания автоматизированной антенной системы дистанционного управления с возможностью ее интеграции в измерительный полигонный комплекс, что позволит повысить эффективность информационного обеспечения летных испытаний РКТ. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров А. В. и др. *Современная телеметрия в теории и на практике*. СПб., Наука и техника, 2007.
2. Ненартович Н. Э., Митяшев М. Б. Из практики разработки активных фазированных решеток // *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2014. № 3.
3. Сони Р., Ньюман Э. *Многостандартные/многодиапазонные системы на основе приемников прямого преобразования. Схемотехника и конструирование* // *Беспроводные технологии*. 2009. № 2.
4. Шитиков А. М. *Сравнение методов обработки сигнала при калибровке цифровых приемных ФАР* // *Радиотехника*. 2019. № 4.