

УДК 621.396.96

# Способ реализации приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки в радиолокационной станции разведки огневых позиций

Представлен вариант приемопередающего модуля (ППМ) цифровой активной фазированной антенной решетки (ЦАФАР) применительно к радиолокационным станциям (РЛС) разведки огневых позиций, а также рассмотрены особенности его функционирования.

**С. А. САВЕНКО,**  
главный научный сотрудник НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь,  
д. т. н., профессор

**П. И. БАЛТРУКОВИЧ,**  
доцент кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, к. т. н.

**С. А. ГОРШКОВ,**  
директор ООО «МилитСофт Солюшенс»,  
к. т. н., доцент

**С. Ю. СЕДЫШЕВ,**  
начальник научного отдела ООО «МилитСофт Солюшенс»,  
к. т. н., доцент

**Е. Н. БУЙЛОВ,**  
научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории  
научно-исследовательской части УО «ВАРБ», к. т. н.

**Введение.** Радиолокационная разведка огневых (стартовых) позиций артиллерии заключается в определении прямоугольных координат стреляющей системы по результатам радиолокационного наблюдения снаряда (мины, ракеты) на обнаруженном участке его полета. Непосредственно координаты стреляющей системы находятся методом обратного прогноза (ретроспективы) траектории полета снаряда (ракеты или мины) к точке выстрела. При коррекции огня собственных артиллерийских средств решается задача экстраполяции траектории боеприпаса в ненаблюдаемую точку падения. Для решения подобного типа задач в настоящее время используются артиллерийские радиолокационные комплексы, одним из основных элементов которых является антенная решетка [1].

В настоящее время перспективным вариантом исполнения антенной решетки является использование ЦАФАР [2, 3, 4]. Одним из основных ее элементов являются ППМ. Повышение функциональности ППМ позволяет выполнять различного рода задачи и обеспечить улучшение выходных характеристик ЦАФАР. Для этого в состав ППМ вводят узлы с широким набором функций и минимальными габаритными размерами.

Целью данной статьи является рассмотрение особенностей реализации ППМ ЦАФАР в РЛС разведки огневых позиций. Ее методология основана на теоретическом анализе с использованием методов описания и обобщения.

**Структура приемопередающего модуля в цифровой активной фазированной антенной решетке.** Цифровая активная фазированная антенная решетка – это антенная система, представляющая собой совокупность аналого-цифровых каналов с общим фазовым центром, в которой передача сигнала и формирование диаграммы направленности (ДН) осуществляется в цифровой форме без использования фазораздателей и межканальных аналоговых схем сложения мощности [5]. Современные технологии ЦАФАР своим массовым развитием обязаны интеграции процессоров цифровой обработки сигналов (в виде DSP (цифровой сигнальный процессор) или на программируемых логических интегральных схемах) с аналого-цифровыми (АЦП) и цифро-аналоговыми (ЦАП) преобразователями в рамках одного модуля или даже чипа. Антенная решетка (АР) с цифровой обработкой сигнала в полотно может реализовываться различными способами на частоте принимаемого

сигнала. Выбор будет зависеть от требований, предъявляемых как к внешним характеристикам, так и к элементной базе. Построение каналов ЦАФАР на такой основе позволяет унифицировать процедуры и аппаратные узлы обработки сигналов и упрощает их адаптацию к тому или иному протоколу работы. Архитектура радиоэлектронной аппаратуры может оптимизироваться (по ресурсам и функциональности) под выполняемые задачи.

Применение цифровых схем обработки сигналов в АР открывает новые возможности формирования ДН. Для управления ее формой и положением ЦАФАР в каждый канал обработки вводятся в виде дополнительного цифрового кода весовые коэффициенты: амплитудные и фазовые.

Модуль цифрового диаграммообразования (ЦДО) может формировать ДН из поступающих на него числовых последовательностей, характеризующих фазовые сдвиги. Это выполняется с помощью операции дискретного преобразования Фурье – комплексное умножение и сложение. Вычисление адаптивных коэффициентов и формирование ДН в реальном масштабе времени может обеспечивать цифровой сигнальный процессор (ЦСП) с высокой скоростью вычислений. При увеличении числа лучей, формируемых ЦАФАР, числа модулей в решетке и ширины полосы сигнала ресурсов современных ЦСП может оказаться недостаточно для реализации алгоритма дискретного преобразования Фурье. В таких случаях можно использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье, позволяющий существенно сократить число элементарных операций. Однако при этом необходимо также увеличить память ЦСП [6].

Технология ЦДО резко повышает качество помехозащиты приемных трактов при интенсивном радиопротиводействии. Это объясняется тем, что характеристики цифровых фильтров в антенных каналах практически идентичны. Отличия наблюдаются только в аналоговой части приемных элементов и полотно АР.

Главная функция ППМ заключается в преобразовании аналогового сигнала в цифровой до пространственной и временной обработки, и наоборот, цифрового сигнала в аналоговый в передающей части (рисунок 1).

Структура ППМ ЦАФАР содержит в приемном канале АЦП, а в передающем – ЦАП. Каждый ППМ

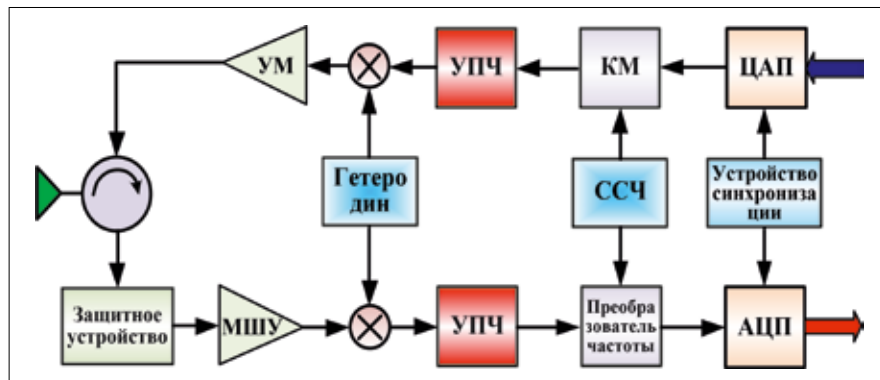


Рисунок 1 – Структурная схема ППМ ЦАФАР

обеспечен сигналом единого времени (устройство синхронизации), осуществляющим тактирование ЦАП (АЦП). При таком варианте построения на входе (выходе) ППМ сигнал передается уже не в аналоговой, а в цифровой форме. Вместо аналоговых сверхвысокочастотных (СВЧ) трактов для передачи цифрового сигнала применяются быстродействующие цифровые шины данных, обладающих большой пропускной способностью (1–10 Гбит/с и более) [5].

При оцифровке сигналов на промежуточной частоте в каждом ППМ необходимо обеспечить высокую межканальную фазовую идентичность сигналов опорного гетеродина.

В качестве устройства управления фазой выходного колебания ППМ используется квадратурный модулятор (КМ) (рисунок 2а), синфазный и квадратурный сигналы на входе которого формируются с помощью встроенных ЦАП [7].

Квадратурный модулятор – устройство балансного типа, фаза и амплитуда выходного СВЧ колебания которого зависит от соотношения амплитуд между сигналами синфазного  $I(t)$  и квадратурного  $Q(t)$  входных каналов. Модулируемое СВЧ колебание поступает на смесители в синфазный канал и квадратурный после фазового сдвига в фазовращателе (ФВ) на девяносто градусов.

Смеситель выполняется на ячейках Гильберта, представляющие собой балансное устройство, выполненное на четырех транзисторах и имеющее дифференциальные входы и выходы [7].

С выхода смесителей сигналы поступают на операционный усилитель (УПЧ) (рисунок 2а), преобразующий дифференциальный сигнал в одиночный. Выходной сигнал квадратурного модулятора определяется выражением:

$$u(t)_{\text{км}} = I(t) \cos(2\pi f_{\text{пр}} t + \varphi_0) + Q(t) \sin(2\pi f_{\text{пр}} t + \varphi_0), (1)$$

где  $f_{\text{пр}}$  – промежуточная частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

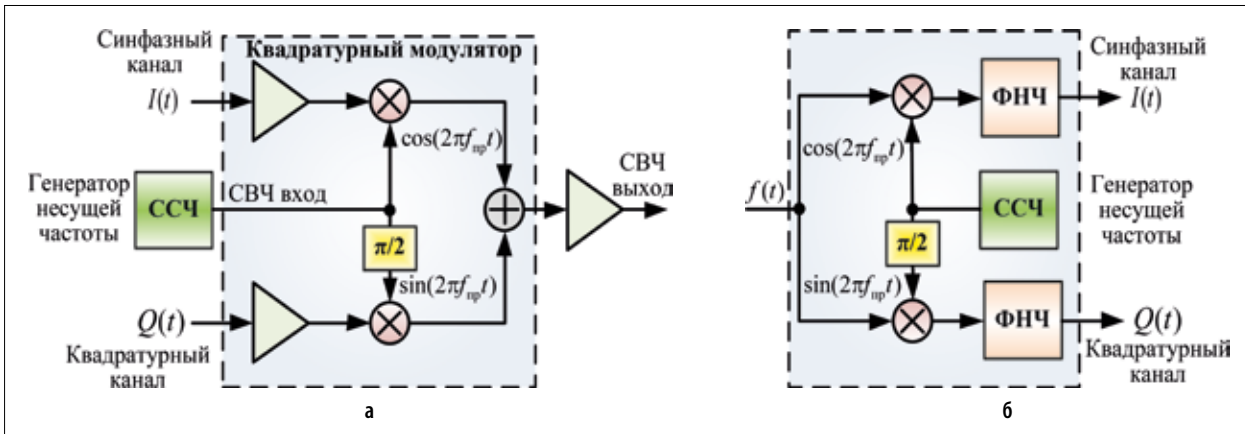


Рисунок 2 – Структурная схема квадратурного модулятора (а) и преобразователя с понижением частоты (б)

Дальнейшая обработка предполагает частотное преобразование (смеситель) в передающем (приемном) тракте для переноса сигнала на несущую (промежуточную) частоту (рисунок 1). Требуемая выходная мощность передающего тракта достигается полупроводниковым СВЧ усилителем мощности (УМ). Развязка между трактами осуществляется с помощью ферритового или полупроводникового циркулятора.

В приемном канале после циркулятора установлено защитное устройство, обеспечивающее его защитное при превышении определенного уровня СВЧ сигнала. Малошумящий усилитель (МШУ) повышает уровень слабых сигналов, наводимых в излучателе без существенного ухудшения отношения сигнал-шум [4, 7].

Квадратурный демодулятор осуществляет понижение несущей частоты до промежуточной (рисунок 2б). После фильтров нижних частот (ФНЧ) (полоса пропускания  $0 < \Delta f_{\text{фнч}} < \Delta f_{\text{пр}}$ ) осуществляется аналого-цифровое преобразование сигнала (рисунок 1).

В состав каждого модуля входит синтезатор сетки частот (ССЧ) с цифровым кольцом фазовой автоподстройки частоты и микроконтроллер, позволяющий управлять характеристиками выходного СВЧ сигнала.

Пример структуры КМ для формирования зондирующего сигнала показана на рисунке 3. Здесь не отображены синхронизатор для тактирования операции умножения видеоимпульса на амплитуду вещественной и мнимой части кодов и генераторы сетки частот, обеспечивающие формирование сигналов на промежуточной и несущей частотах. Варианты кодирования в виде массивов вещественной и мнимой частей кода

могут храниться в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) или генерироваться микроконтроллером при включении аппаратуры. Необходимый вариант кодирования определяется тактической обстановкой, либо может меняться, например, от зондирования к зондированию [8].

Для одновременного управления амплитудным и фазовым распределением ЦАФАР синфазный и квадратурный сигналы должны формироваться в соответствии со следующими выражениями (цифровой фазовращатель):

$$\begin{aligned} I_i(t) &= E_T K_{\alpha_i} \alpha_i(t) \cos(\varphi_i(t) + \varphi_{K_i}), \\ Q_i(t) &= E_T K_{\alpha_i} \alpha_i(t) \sin(\varphi_i(t) + \varphi_{K_i}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varphi_i(t)$  – требуемое значение фазы выходного СВЧ колебания в  $i$ -м ППМ;

$\alpha_i(t)$  – требуемое значение амплитуды выходного СВЧ колебания;  $E_T$  – значение амплитуды выходного напряжения ЦАП;  $K_{\alpha_i}$  и  $\varphi_{K_i}$  – амплитудный и фазовый коэффициенты коррекции соответственно. Каждому значению амплитуды и фазы выходного СВЧ колебания соответствуют свои коэффициенты коррекции, определяемые на стадии испытаний и в ходе проведения штатной

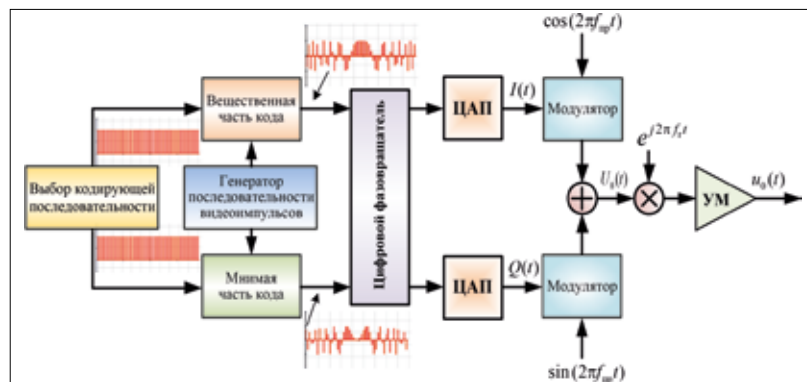


Рисунок 3 – Структура цифро-аналогового формирователя зондирующего сигнала

калибровки передающего тракта модуля ЦАФАР.

Далее на один из входов модуляторов поступают  $I(t)/Q(t)$  сигналы, определяющие вид и свойства модулированного сигнала, а на второе – немодулированные колебания на промежуточной частоте  $f_{пр}$ . В аналоговом тракте передающей системы спектр сигнала переносится на несущую частоту (рисунок 3).

Важными характеристиками аналогового КМ являются амплитудный и фазовый баланс, определяющие дисперсию ошибки в амплитуде и фазе выходного колебания соответственно. Этот баланс определяется идентичностью конструктивного и технологического исполнения элементов информационных каналов – смесителей, операционных усилителей, линий передач, сумматора мощности.

Таким образом, использование ЦАФАР позволит обеспечить гибкое изменение характеристик всей РЛС, повысить точность и скорость формирования ДН АР [5, 6, 9]. При этом сигнал передается в цифровой форме по цифровой шине данных без потери мощности.

**Структура приемо-передающий модуль цифровой активной фазированной антенной решетки с программируемой конфигурацией.** Высокие требования по массогабаритным параметрам, энергетическим и электрическим характеристикам систем с ЦДО приводят к необходимости поиска оптимальной структуры аналого-цифрового ППМ для различных частотных диапазонов, уровней выходной мощности, требований к приемному тракту и т.д. Это реализуется при использовании принципа программной реконфигурации модуля. Изменение его функций и характеристик осуществляется программными методами, а СВЧ часть остается неизменной. Пример реализации такой структуры ППМ изображен на рисунке 4.

Требования к цифровой и СВЧ частям передающего и приемного тракта ППМ ЦАФАР различны. Поэтому их целесообразно размещать на разных печатных платах. Экранирование СВЧ частей позволит уменьшить нежелательное влияние электромагнитных волн на цифровые сигналы управления. Развязка приемного (РПРУ) и передающего (РПУ) тракта осуществляется с помощью циркулятора или коммутатора. На выходе циркулятора расположена ключевая схема, обеспечивающая работу модуля на антенный излучатель ( $RF_{IN/OUT}$ ) (положение 1, рисунок 4) или на эквивалент (положение 2, рисунок 4).

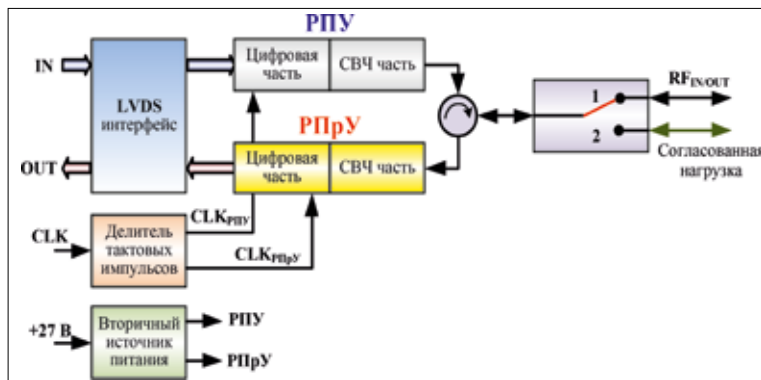


Рисунок 4 – Структурная схема ППМ ЦАФАР с программируемой конфигурацией

Для распределения синхронизирующих сигналов на плате ППМ расположен делитель тактовых импульсов, разделяющий прохождение опорного сигнала в приемный ( $CLK_{РПРУ}$ ) и передающий ( $CLK_{РПУ}$ ) тракты. Входной сигнал делителя  $CLK$  представляет собой сигнал пиксельной частоты.

На сегодняшний день наилучшим решением для систем с высокоскоростными интерфейсами низкого потребления является использование низковольтной дифференциальной передачи сигналов (с английского low-voltage differential signaling (LVDS)) [10]. Дополнительными преимуществами данного интерфейса являются совместимость с источниками питания напряжением 27 В, низкий уровень помех и надежная передача сигнала. Примерами применения данного стандарта являются соединения плат и кабелей в коммутационных переключателях, маршрутизаторах, промышленных камерах, а также в системах управления устройствами различного назначения.

Решение проблемы подачи ( $IN$ ) и снятия данных ( $OUT$ ) для LVDS является интеграция LVDS-приемников и передатчиков непосредственно в состав устройств источников и приемников данных. Так, производитель программируемой логики фирма Xilinx интегрирует в состав FPGA последних семейств определенное количество LVDS-портов. Сочетание в одном корпусе программируемой логики и LVDS-интерфейсов позволяет легко выполнять построение LVDS-каналов требуемой архитектуры, скорости и типа внешнего интерфейса.

Таким образом, анализ существующей элементной базы показал, что такие модули могут иметь существенно меньшие размеры, массу, энергопотребление, чем традиционные ППМ активных фазированных антенных решеток. При этом их точностные характеристики обеспечивают формирование лучей с шириной порядка единиц и долей градуса и соответствующим усилением [9, 10].

**Обобщенная структура цифровой активной фазированной антенной решетки.** В ЦАФАР

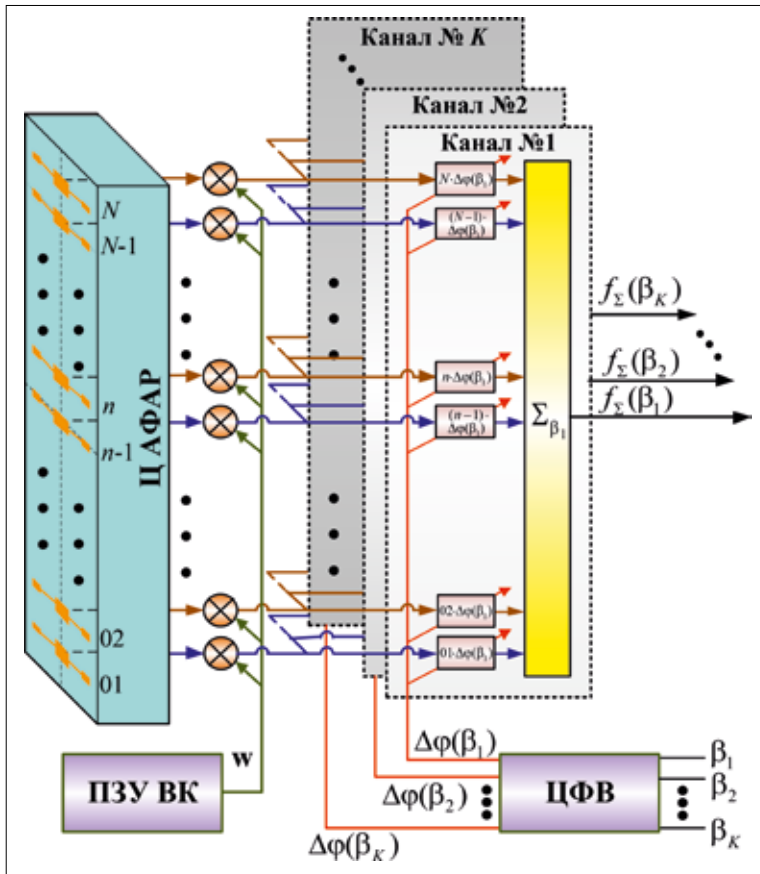


Рисунок 5 – Структурная схема многолучевой ЦАФАР в режиме приема

сигнал с выхода излучателя в полотне антенной решетки проходит аналоговую часть пространственного канала (систему МШУ и защиты приемника) и преобразуется в цифровую форму (в АЦП). После этого осуществляется процесс ЦДО, где в результате вычислений образуется один либо требуемое число лучей, каждый из которых имеет индивидуальные параметры в виде пространственного положения и формы [5, 6, 11].

Многолучевая ЦАФАР обеспечивает параллельный обзор пространства в широком секторе углов с высокой степенью разрешения, одновременное сканирование несколькими независимыми лучами, расширение сектора однолучевого сканирования АР, управление формой ДН антенны. Сигналам, поступающим на АР с различных направлений, соответствует свой канал обработки (рисунок 5). ЦАФАР с такой структурой способна реализовывать методы амплитудного и фазового мгновенного сравнения для измерения угловых координат целей, обнаруженных по суммарному каналу.

Алгоритм цифрового формирования ДН  $k$ -го луча для прямоугольной плоской решетки с излучателями, расположенными в ее узлах, можно представить в виде:

$$f_{\Sigma}(\beta_k) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n S_n(\beta_k) e^{-jn\Delta\phi_{\beta k}}, \quad (3)$$

где  $S_n(\beta_k)$  – цифровой сигнал на выходе  $n$ -го АЦП ППМ и обеспечивающего формирование  $k$ -го луча в направлении  $\beta_k$ ;  $\Delta\phi_{\beta k}$  – набег фазы  $k$ -го луча, рассчитанный в цифровом фазовращателе (ЦФВ);  $w_n$  – весовой коэффициент  $n$ -го ППМ.

Повышение направленности ЦАФАР за счет снижения уровня боковых лепестков позволит повысить помехозащищенность РЛС разведки огневых позиций. Ослабление боковых лепестков ДН при заданной ширине главного лепестка может быть получено с помощью амплитудного распределения по апертуре (ПЗУ весовых коэффициентов  $\mathbf{w}$ , рисунок 5). Это обеспечивает уменьшение спектральной плотности мощности мешающих излучений, пассивных помех и мощных отраженных сигналов от снарядов, принимаемых боковыми лепестками антенны [12, 13].

Для повышения качества работы ЦАФАР, как системы в целом, требуется обеспечить высокую идентичность всех цифровых каналов.

Возникновение погрешностей при сборке и в процессе работы неизбежно. Следует предусмотреть возможность динамической цифровой коррекции амплитудно-фазовых характеристик под заданный эталон при достаточно высоком линейном диапазоне.

В заключение отметим, что ППМ устанавливаются непосредственно в полотно ЦАФАР и сопрягают отдельные элементы антенного полотна с блоками формирования сигнала. Таким образом, габаритные размеры ППМ ЦАФАР ограничиваются возможностью их размещения в полотне АР. Для исключения побочных максимумов излучения ЦАФАР при сканировании фазы шаг решетки не должен значительно превышать половину длины волны излучаемого сигнала, поэтому при разработке ППМ необходимо это учитывать.

**Заключение.** Разработка перспективных РЛС разведки огневых позиций является комплексной задачей, требующей изменения не только методов обработки сигнала, но и в целом структуры АР.

Предложена структура ППМ, позволяющая уменьшить габариты и массу многоэлементной ЦАФАР за счет исключения СВЧ распределительной системы и фазовращателей. Управление

амплитудно-фазовым распределением на передачу обеспечивается с помощью КМ, что снижает потери в СВЧ тракте ППМ.

Рассмотрена ЦАФАР с программно-реконфигурируемой архитектурой, в которой реализованы основные принципы ЦДО. Формирование ДН на прием и на передачу осуществляется в цифровом виде после АЦП и ЦАП соответственно.

Использование ЦДО позволит повысить помехозащищенность РЛС разведки огневых позиций, их динамический диапазон и скорость управления амплитудно-фазовым распределением.

Следует отметить, что отличие ЦАФАР от активных фазированных антенных решеток прежде всего заключается [2, 3, 4, 14]:

- в цифровом управлении фазой зондирующего сигнала перед его цифро-аналоговым преобразованием и последующим усилением в каждом ППМ либо группе ППМ;

- в приеме сигнала каждым ППМ (группой ППМ) с последующей установкой фазы при ЦДО;

- в подаче на каждый ППМ (группу ППМ) совокупности одинаковых дискретных отсчетов гетеродинного сигнала минуя их преобразование к аналоговому виду;

- в возможности использования одного типового ППМ (группы ППМ) при цифровом формировании многолучевой ДН антенны на прием и передачу;

Большинство проблем реализации ЦАФАР решается с развитием современных технологий и элементной базы. Однако вопрос выбора разрядности АЦП при приеме сложных сигналов большой длительности в АР практически не решен. Его трудность заключается в правильном выборе цены младшего разряда и динамического диапазона АЦП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Голик, А. М.** Многоканальные радиолокационные станции разведки огневых позиций / А. М. Голик. – МО РФ, 1997. – Ч. 1. – 53 с.
2. **Воскресенский, Д. И.** Активные фазированные антенные решетки / Д. И. Воскресенский, А. И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
3. Воскресенский, Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. Пособие для вузов / Д. И. Воскресенский, В. И. Степаненко, В. С. Филиппов и др. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.
4. **Добычина, Е. М.** Цифровой приемо-передающий модуль активной фазированной антенной решетки / Е. М. Добычина, Р. Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 209. – С. 117–123.
5. **Воскресенский, Д. И.** Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы / Д. И. Воскресенский. – М.: Радиотехника, 2013. – 208 с.
6. **Воскресенский, Д. И.** Устройство СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. Пособие для вузов / Д. И. Воскресенский и др. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
7. **Голуб, В. С.** Квадратурные модуляторы и демодуляторы в системах радиосвязи / В. С. Голуб // Электроника: НТБ. – 2003. – №3. – С. 28–32.
8. **Мацыкин, С. В.** Использование квадратурных модуляторов в передающем тракте активной фазированной решетке X-диапазона / С. В. Мацыкин, С. Б. Савилькин, А. В. Гурский // Программные продукты, системы и алгоритмы. – 2018. – №2. – С. 47–50.
9. **Малахов, Р. Ю.** Приемопередающий модуль цифровой антенной решетки / Р. Ю. Малахов, Е. М. Добычина // Антенны. – 2014. – № 2 (201). – С. 53 – 57.
10. **Гончаров, Ю.** Интерфейс LVDS и его применение / Ю. Гончаров // Компоненты и технологии. – 2001. – № 4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/interfeys-lvds-i-ego-primenenie/viewer>. – Дата доступа: 01.08.2022.
11. **Евстропов, Г. А., Имморев, И. Я.** Цифровые методы формирования диаграмм направленности приемных антенных решеток / Под ред. Л. Д. Бахраха, Д. И. Воскресенского // Проблемы антенной техники. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.
12. Справочник по радиолокации / М. И. Сколник [и др.]; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – Кн. 1. – 672 с.
13. **Марпл, С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл, под ред. И. С. Рыжака. – М.: Мир., 1990. – 550 с.
14. **Чернова, И. В.** Особенности реализации приемопередающего модуля АФАР / И. В. Чернова, А. С. Тодосева // Т-Comm: Телекоммуникация и транспорт. – 2018. – Т. 12. – № 8. – С. 27–31.

*A version of the transceiver module of a digital active phased antenna array is presented in relation to radar stations for reconnaissance of firing positions, and the features of its operation are also considered.*

Получено 31.10.2022.