

УДК 621.396.96

ЦИФРОВОЙ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Е.М. ДОБЫЧИНА, Р.Ю. МАЛАХОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Татарским Б.Г.

Рассмотрен мировой технический уровень и тенденции развития интеллектуальных антенных систем на борту подвижного носителя. Предложена структура цифрового приемо-передающего модуля с программно-реконфигурируемой архитектурой для бортовой активной фазированной антенной решетки.

Ключевые слова: цифровой приемо-передающий модуль (ППМ), цифровое диаграммообразование, программно-реконфигурируемая архитектура.

Введение

Основным направлением мировых исследований в области антенных систем является поиск путей обеспечения их многофункциональности. Например, одна и та же радиосистема реализует на борту подвижного носителя функции радиосвязи и выполняет задачи радиолокации, при необходимости она же начинает работать как система радиопротиводействия и обеспечивает скрытность своего носителя. Новый подход к синтезу излучающей поверхности открывает возможность построения нового поколения антенных систем – интеллектуальных на основе конформных антенных решеток.

В России существует целевая программа развития вооружения и военной техники, в соответствии с которой предполагается построение различных антенн в виде активных фазированных антенных решеток (АФАР), состоящих из типовых ППМ. Типовой ППМ предполагается унифицировать для применения в антенных системах различного назначения.

В ряде стран за рубежом также идет интенсивная разработка теории и техники конформных антенн. Основой таких систем является АФАР, использующая принцип цифрового диаграммообразования - цифровая антенная решетка (ЦАР) [1; 2]. Проектирование летательных аппаратов (ЛА), в том числе и беспилотных, обеспечивающих скрытный полет, вынуждает осуществлять разработку конформных антенн, которые дают возможность их информационной маскировки. Фирмы, разрабатывающие технологии конформных антенн для средств связи, в их числе Ball Aerospace & Technologies Corp., Lockheed Martin Corporation и Northrop Grumman Corporation, проводят исследования с целью определения возможности приспособить эти антенные решетки к прикладным задачам в области радиолокации и радиоэлектронной борьбы.

Основой построения ЦАР может служить цифровой ППМ (ЦППМ). Известны патенты, в которых предлагается антенная решетка, в состав каждого приемо-передающего модуля которой входит прямой цифровой синтезатор сетки частот (ССЧ) [3; 4]. Недостатком приемного тракта таких систем является необходимость понижения рабочей частоты, что приводит к уменьшению динамического диапазона и увеличению коэффициента шума. Кроме того, известно, что в сигнале на выходе прямого цифрового ССЧ уровень фазовых шумов не соответствует требованиям доплеровской радиолокации, а значит, многофункциональность не реализуется.

В последние годы появились публикации об использовании принципа программно-реконфигурируемой архитектуры (software-defined radio) в АФАР [5; 6]. Недостатком таких систем являются повышенные требования к быстродействию центрального вычислителя. Невозможность реализации такого быстродействия приводит к низкой скорости изменения параметров диаграммы направленности АФАР и, как следствие, невыполнению задач всей радиосистемы.

Проблему можно решить, используя структуру ЦАР, в которой отсутствует разводка СВЧ сигнала, вносящая ошибки в цифровое формирование диаграммы направленности. ССЧ с цифровым кольцом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) входят в состав каждого приемо-передающего модуля и синхронизируются единым генератором тактовых импульсов.

Включение в состав приемо-передающего модуля микроконтроллера позволит в реальном времени изменять параметры выходного сигнала элементов интеллектуальной системы независимо друг от друга. Наличие распределенной системы обработки и формирования сигнала позволит снизить требования к центральному вычислителю и в перспективе существенно повысить быстродействие системы. Такой ЦППМ обеспечит гибкое изменение характеристик всей радиосистемы и повысит точность и скорость формирования диаграммы направленности ЦАР. Объединение принципов цифрового диаграммообразования с программно-реконфигурируемой архитектурой позволит создать новый класс устройств с повышенной степенью интеграции и улучшенными точностными характеристиками. Данные по аналогичным исследованиям за рубежом ограничены в силу их актуальности.

Проблемы создания современных ППМ АФАР

Основа традиционной АФАР – ППМ, упрощенная схема которого изображена на рис. 1. Модуль состоит из излучателя и двух каналов – передающего и приемного. Развязку между каналами обеспечивает циркулятор. В передающем канале на выходе стоит полупроводниковый усилитель мощности СВЧ-диапазона, обеспечивающий среднюю выходную мощность 8-15 Вт. Коэффициент усиления по мощности в этом диапазоне может составлять $K_p=30$ дБ (примерно 3 каскада) при КПД усилителя порядка 25%, тогда мощность на входе ППМ должна составлять примерно $P_{вх}=15$ мВт.

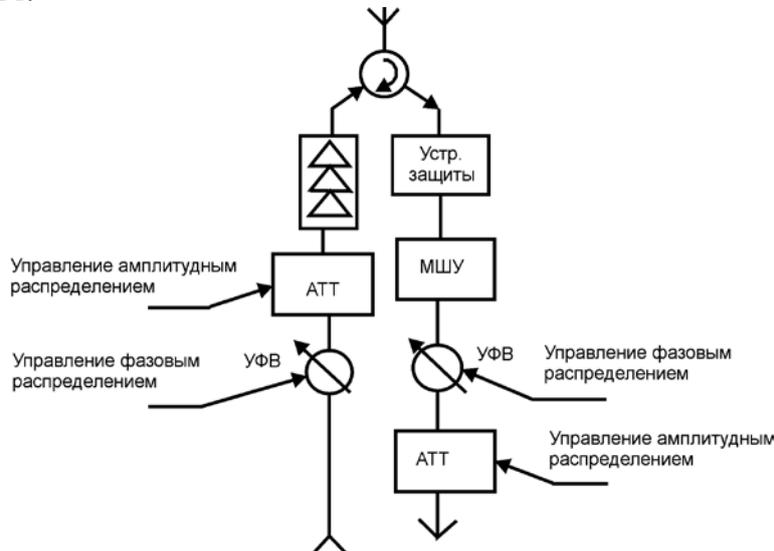


Рис. 1. Базовая структура приемо-передающего модуля АФАР

Аттенюатор (АТТ), управляющий выходной мощностью модуля, а следовательно, амплитудным распределением в апертуре АФАР, может отсутствовать. Управляемый фазовращатель (УФВ) создает требуемый фазовый набег в соответствующем тракте ППМ, а следовательно, управляет фазовым распределением в решетке. Используются дискретные УФВ с дискретом фазы $\Delta\varphi$ от $11,25^\circ$ до 90° и цифровым управлением.

На входе приемного канала стоят устройство защиты и малошумящий усилитель (МШУ). МШУ выполняется на основе микросхемы размером примерно $3 \times 2 \times 1,5$ мм (Monolithic Microwave Integrated Circuit – ММИС) и может иметь коэффициент усиления порядка 17 дБ. Ат-

тенуатор и УФВ в приемном канале аналогичны таким же элементам в передающем канале и выполняют те же функции.

ППМ располагается обычно в специальном корпусе размером около 160×200 мм (ширина×глубина). Высота корпуса будет определяться в основном размером мощного СВЧ-усилителя в передающем канале и может составлять в зависимости от фирмы-изготовителя от 10 до 150 мм (рис. 2) [7].

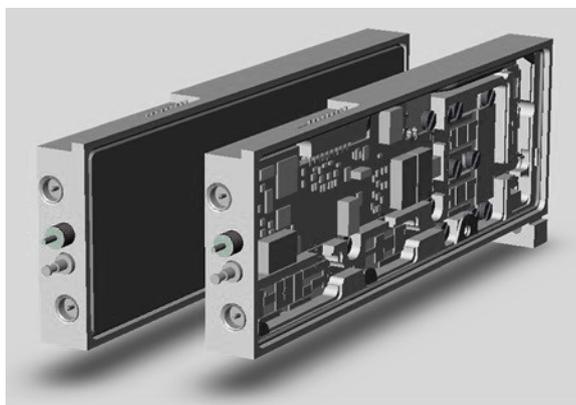


Рис. 2. Широкополосный ППМ бортовой АФАР

Поскольку общее число ППМ в решетке может составлять несколько тысяч, то система подведения СВЧ-сигнала от устройства генерирования и формирования излучаемого сигнала к входам передающих каналов ППМ, снятие и обработка сигнала с выходов приемных каналов ППМ весьма сложны, громоздки и не обеспечивают стабильности амплитудных и фазовых характеристик на выходах модулей. Кроме того, существенной задачей является отвод тепла от активных приборов в условиях компактного размещения модулей.

Может быть реализован простейший способ возбуждения большой АФАР – оптическая пространственная система проходного типа. Проходная антенная решетка имеет не только выходные, но и входные излучатели, а ППМ располагаются между ними. Входные излучатели облучаются рупорными антеннами – по числу секций решетки для формирования разностных диаграмм направленности (ДН). Такая система разводки является достаточно широкополосной. Однако в этом случае АФАР не сможет работать одновременно на прием и передачу, а кроме того, невозможно будет сформировать оптимальные амплитудные распределения для суммарной и разностных ДН.

ЦППМ с программно-реконфигурируемой архитектурой

Одной из главных тенденций повышения функциональности АФАР является использование цифрового диаграммообразования (ЦДО) [1; 2]. Сущность цифрового диаграммообразования заключается в том, что диаграмма направленности (ДН) антенной решетки формируется не аналоговыми устройствами (фазовращателями), а цифровыми, например, квадратурными модуляторами или цифровыми линиями задержки, входящими в состав каждого ППМ. Модулятор вносит в канал дополнительный, управляемый цифровым способом или программируемый, дискретный фазовый сдвиг, создавая необходимое амплитудно-фазовое распределение (АФР) в решетке или корректируя его.

ЦАР строится из ЦППМ, в отличие от ППМ аналоговой АФАР его главная функция – преобразование аналогового сигнала в цифровой на более раннем этапе в приемной части решетки, и наоборот, цифрового сигнала в аналоговый в передающей части. Вместо сложной системы сканирования в ЦАР целесообразно использовать многолучевой режим работы хотя бы в одной плоскости. Главные достоинства этого ЦППМ – замена СВЧ-входа от системы разводки сигнала

ла несущей частоты на вход опорного сигнала, существенно более низкочастотного, а возможно и цифрового; замена традиционных фазовращателей устройствами с цифровыми методами формирования ДН, отсутствие процедуры понижения частоты, добавляющей амплитудные и фазовые ошибки в работу системы, осуществление аналого-цифрового преобразования сигнала непосредственно на несущей частоте (рис. 3).

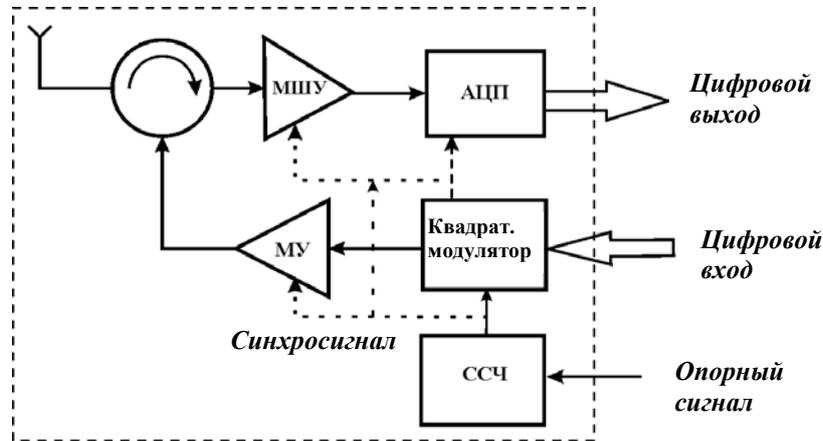


Рис. 3. Цифровой ППМ

Следует сказать о применении аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в технике ЦДО. Основная особенность таких систем – применение АЦП (ЦАП) в каждом приемном и передающем канале каждого модуля. При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением огибающей и тем самым уменьшаются энергетические потери, повышается чувствительность приемной системы, и упрощается конструкция модуля. Среди производителей, успешно решающих проблемы цифрового диаграммообразования в современных системах, прежде всего, нужно отметить фирмы Analog Devices, Texas Instruments и Atmel – крупнейших поставщиков сигнальных процессоров, АЦП и ЦАП. Сигналы, снимаемые с выхода АЦП, суммируются и обрабатываются сигнальным процессором. Таким образом, новейшие технологии реализуются на достаточно распространенной и отнюдь не самой дорогой элементной базе.

Современный уровень технологии АЦП дает возможность проводить аналого-цифровое преобразование сигналов со скоростью до 40 Гигавыборок в секунду – это коммерчески доступные АЦП с 8 – 10-разрядным разрешением, при этом диапазон входных аналоговых сигналов составляет до 13 ГГц.

Дальнейшая обработка может быть разная. Наиболее распространен способ введения в числовые последовательности излучателей фазовых сдвигов с последующим сложением получаемых значений, соответствующих одним и тем же моментам квантования (дискретное преобразование Фурье - ДПФ или быстрое преобразование Фурье - БПФ). Вычисление адаптивных коэффициентов и формирование ДН в реальном масштабе времени должны обеспечить цифровые сигнальные процессоры (DSP).

Высокие требования по массогабаритным параметрам, энергетическим и электрическим характеристикам систем с ЦДО приводят к необходимости поиска оптимальной структуры ЦППМ для различных частотных диапазонов, уровней выходной мощности, требований к приемному тракту и т.д. Все это реализуется при использовании принципа программной реконфигурации модуля, когда изменение его функций или характеристик осуществляется только программными методами, а СВЧ часть остается неизменной. Пример реализации такой структуры ЦППМ изображен на рис. 4, где более детально показано взаимодействие и принцип управления его цифровой частью.

Требования к цифровой и СВЧ частям передающего и приемного тракта ЦППМ различны, поэтому их целесообразно размещать на разных печатных платах. Экранирование СВЧ частей позволит уменьшить нежелательное влияние электромагнитных волн на цифровые сигналы управления. Развязка приемного и передающего тракта осуществляется с помощью циркулятора, выполненного в волноводном или печатном исполнении. На выходе циркулятора расположена ключевая схема, обеспечивающая работу модуля на антенный излучатель или на согласованную нагрузку. Для распределения синхронизирующих сигналов на плате ЦППМ расположен делитель тактовых импульсов, разделяющий опорный сигнал на приемный и передающий тракты.

Управление параметрами модуля осуществляется с помощью встроенного 8-битного или 16-битного микроконтроллера (МК). Он связан с цифровыми устройствами посредством универсального последовательного SPI-интерфейса.

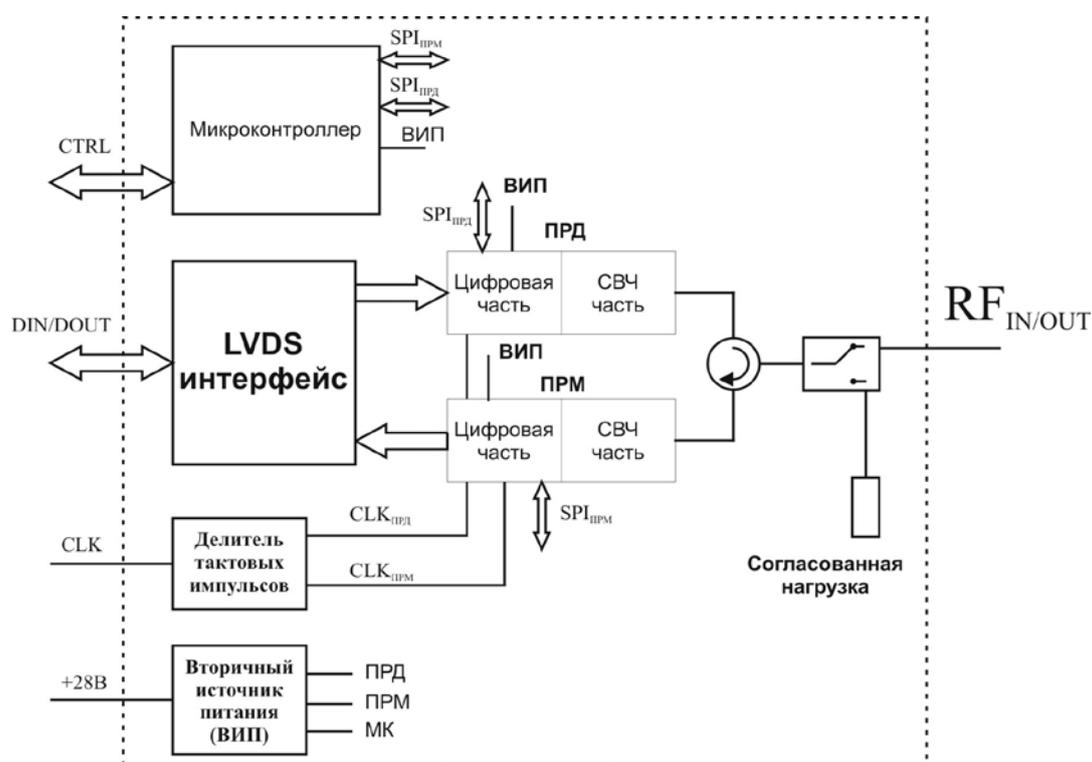


Рис. 4. Реализация программно-реконфигурируемой архитектуры ЦППМ

МК управляет всеми составными частями модуля и, в том числе, процессом изменения частоты на его выходе. Например, каждой частотной литере ЦППМ во внутренней постоянной SRAM-памяти МК соответствуют свои значения целочисленного и дробного коэффициента деления ССЧ, находящегося в цифровой части каждого модуля, а также значение выходного тока ССЧ, определяющего его выходную мощность на конкретной частоте, что позволяет корректировать неравномерность АЧХ передающего тракта. При необходимости более точной настройки можно регулировать выходную мощность ССЧ с помощью встроенного аттенюатора. Каждой частоте в памяти МК соответствуют значения корректирующих амплитуд и фаз выходного сигнала. Память современных МК позволяет хранить до нескольких сотен значений частот. Включение в состав ЦППМ постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) позволяет значительно повысить объем хранимой информации.

В части управления параметрами АЦП в приемном тракте контроллер позволяет изменять уровень постоянного смещения на его дифференциальных входах и включать/выключать внутреннюю схему диттеринга.

Цифровые устройства ЦППМ обладают возможностью программного отключения питания, во время которого сохраняются все текущие значения регистров внутренней памяти. Включение режима малого потребления тока осуществляется с помощью МК по высокому уровню на контакте POWER. Потребление тока в этом режиме обычно не превышает 100 – 200 мА.

Важной задачей МК является осуществление процедуры запуска ЦППМ и контроля параметров, входящих в его состав компонентов, с последующей выдачей квитанции о текущем состоянии модуля в центральную вычислительную машину (ЦВМ).

Выбор интерфейса взаимодействия ЦППМ с ЦВМ осуществляется в первую очередь исходя из объема передаваемых данных. Повышение требований к изменению амплитудно-фазового распределения антенной системы до скоростей, соответствующих частотам обработки 100 – 200 МГц, приводит к необходимости использования высокоскоростных цифровых интерфейсов связи, обеспечивающих низкое потребление источника питания и малые вносимые шумы в передаваемый сигнал. Требуемая скорость передачи данных на интерфейсе ЦППМ - ЦВС определяется следующим выражением

$$F_{DATA} = 2F_{DAC}N_{DAC} + F_{ADC}N_{ADC} + F_{МК}N_{DATA}, \quad (1)$$

где F_{DAC} , F_{ADC} – частота дискретизации ЦАП и АЦП, Гц; N_{DAC} , N_{ADC} – разрядность ЦАП и АЦП; $F_{МК}$ – частота управления микроконтроллером, Гц; N_{DATA} – разрядность управляющего слова.

Полоса пропускания канала цифровой связи должна быть на 10 – 20% больше частоты, рассчитанной по формуле (1). Требуемая скорость передачи данных ЦППМ, аналогичного приведенному на рис. 4, согласно этому выражению должна составлять не менее 2,1 Гбит/с.

В качестве цифрового интерфейса связи можно использовать стандарт ANSI/TIA/EIA-644 (LVDS) – низковольтная дифференциальная передача сигналов. Передача данных в LVDS осуществляется по двум дифференциальным линиям с противоположными по знаку значениями напряжения в каждый момент времени. Прием сигналов LVDS осуществляется путем сравнения напряжения на обеих линиях, что позволяет устранить влияние шумов, вносящих паразитную постоянную составляющую в сигнал, и уменьшить требуемое для передачи напряжение, что в свою очередь снижает энергопотребление интерфейса. Концентрация электромагнитного поля в области между дифференциальными линиями сокращает их влияние на другие элементы ЦППМ.

Анализ существующей элементной базы показал, что такие модули могут иметь существенно меньшие размеры, массу, энергопотребление, чем традиционные ППМ АФАР. При этом их точностные характеристики обеспечивают формирование лучей с шириной порядка единиц и долей градуса и соответствующим усилением.

Заключение

Рассмотрен ЦППМ с программно-реконфигурируемой архитектурой, в нем реализованы основные принципы ЦДО:

- для достижения высокого динамического диапазона в приемном тракте ЦППМ отсутствуют частотные преобразования – аналого-цифровое преобразование осуществляется непосредственно на несущей частоте;
- в состав каждого ЦППМ входит ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ;
- управление амплитудно-фазовым распределением на передачу осуществляется с помощью КМ;
- встроенный в ССЧ аттенюатор позволяет корректировать частотную зависимость выходной мощности ССЧ;
- формирование диаграммы направленности на прием и на передачу осуществляется полностью в цифровом виде после аналого-цифрового/цифро-аналогового преобразования.

Такой модуль с интегрированным излучателем может служить основой построения сложных конформных антенных систем, а также актуальных разреженных, распределенных в пространстве антенных решеток с когерентным накоплением сигнала в сложной помеховой обстановке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Slyusar V.I. etc.** Experimental radar with 64-channel digital antenna array // International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv-Slavske, 2010. P. 95.
2. **Zhuo Zhang etc.** Measurement and performance of digital monopulse radar array antenna // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, 2010. Pp. 983 – 986.
3. Patent US20130004180A1. Digital radio transceiver system and method / Gupta D., Mukhanov O., Jan. 3 2013. P. 23.
4. Patent US005943010A. Direct digital synthesizer driven phased array antenna / Rudish. R., Magil E., Aug. 24 1999. P. 1.
5. **Sha Huan etc.** Software-defined system integrated communications based on active phased array radar // IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE), Beijing, 2011. Pp. 508 – 511.
6. **Garmatyuk D. etc.** Radar and data communication fusion with UWB-OFDM software-defined system, IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2009. ICUBW 2009, Vancouver, 2009. Pp. 454 – 458.
7. [Электронный ресурс]. URL: http://www.mwsystems.ru/goods/transferring_modules.html.

DIGITAL TRANSCEIVER FOR ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAY

Dobychina E.M., Malakhov R.Yu.

World technical level and progress trend of existence on-board intelligent antenna systems was considered. Digital transceiver structure with software-defined structure for on-board active phased antenna array was proposed.

Keywords: digital TR, digital beamforming, software-defined structure.

Сведения об авторах

Добычина Елена Михайловна, окончила МАИ (1983), кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики, антенн и микроволновой техники МАИ, автор более 20 научных работ, область научных интересов – радиофизика.

Малахов Роман Юрьевич, 1989 г.р., окончил МАИ (2011), аспирант МАИ, автор 2 научных работ, область научных интересов – приемо-передающие модули АФАР, математическое моделирование СВЧ-устройств.