

УДК 621.396.91/.96

Ю.А. Светличный

Распределение сигналов синхронизации и данных цифровой антенной решетки на базе волоконно-оптических линий

Рассматривается усовершенствованный метод распределения сигналов синхронизации и данных по полотну многоканальной цифровой антенной решетки (ЦАР) с цифровым диаграммообразованием (ЦДО) в приемных и передающих каналах на базе цифровых волоконно-оптических линий. Передача по оптическим линиям сигналов в цифровой форме исключает влияние искажений оптоэлектронного (электрооптического) преобразования на принимаемый (передаваемый) сигнал, высокая скорость передачи данных обеспечивает возможность построения широкополосных ЦАР. Использование для кодирования информационных потоков самовосстанавливающихся кодов 8b/10b значительно повышает точность синхронизации распределенных модулей цифровой обработки сигналов ЦАР, а сверхмалое затухание и высокая электромагнитная совместимость оптических линий упрощают реализацию ЦАР с геометрическими размерами до 10 м и более. Приведены расчетные соотношения производительности каналов передачи данных ЦАР, представлена подробная функциональная схема ЦАР с ЦДО в приемных и передающих каналах, выполненная по технологии программно-определяемой радиосистемы.

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, цифровой приемопередающий модуль, синхронизация, цифровые оптические линии, кодирование 8b/10b, цифровое диаграммообразование, программно-определяемая радиосистема, ММО РЛС.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-7-12

Цифровые антенные решетки (ЦАР), в основе которых лежит переход от аналоговой формы сигналов к цифровой в непосредственной близости к излучателям посредством аналого-цифровых (АЦП) и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), а оперирование дальнейшими процессами обработки обеспечивается посредством цифровых технологий, – высокоэффективный, развивающийся вариант антенных систем в областях радиолокации, навигации и связи (наземные и бортовые радиолокаторы, радиорелейные линии и системы связи, в том числе типа 5G, спутниковые связные и навигационные системы и др.).

Отечественными и зарубежными научными школами накоплен существенный опыт реализации приемопередающих модулей антенных решеток, в том числе с цифровой обработкой сигналов [1–4]. Совершенствование технических характеристик ЦАР в большинстве случаев достигается увеличением числа цифровых каналов, в пределе – сигналы каждого из каналов фазированной антенной решетки формируются и принимаются с использованием цифровой обработки сигналов с установкой ЦАП и АЦП в каждом из них. Распределенное по полотну антенной решетки устройство ЦОС ЦАР с числом каналов порядка ста и более представляет собой технически сложное, не раскрытое подробно в известной литературе решение [5, 6]. Актуальными являются вопросы компоновки цифровых приемопередающих модулей (ЦППМ) в полотне ЦАР, их межсоединение с учетом информационных потоков и сигналов синхронизации. При этом схемотехническое проектирование многоканальных устройств ЦОС ЦАР должно выполняться совместно с проектированием конструкции с учетом особенностей ЦАР в целом, в том числе: геометрии, компоновки, способов обеспечения условий эксплуатации соот-

ветственно физическим процессам аппаратуры различных конструктивных исполнений [7, 8]. Кроме того, реализация в ЦАР адаптивных алгоритмов требует оценок не только необходимых скоростей передачи информации между узлами решетки, но и оценки абсолютных временных задержек доставки информации от центральной вычислительной машины (ЦВМ) до ЦППМ, оценки погрешностей синхронизации распределенных по полотну ЦАР ЦППМ.

Для реализации распределенного по полотну антенной решетки устройства ЦОС ЦАР с числом каналов порядка ста и более требуется решить задачу разработки метода распределения сигналов синхронизации и данных по полотну многоканальной антенной системы, обеспечивающего достаточную производительность каналов, не имеющего существенных ограничений по длине линий межсоединений, устойчивого к воздействиям электромагнитных наводок относительно известных решений [1, 3]. При разработке метода необходимо учитывать тенденции проектирования перспективных ЦАР на базе технологий реконфигурируемых систем (программно-определяемых радиосистем (ПОР), Software Defined Radio (SDR)) [9–11], позволяющих унифицировать компоненты за счет реализации различных алгоритмов программным способом на типовой аппаратной платформе, упростить наращивание функционала, а также расширить возможности реализации адаптивных алгоритмов, в том числе работающих в режиме реального времени.

Подходы к решению задачи

Предложенная функциональная схема устройства ЦОС многоканальной ЦАР на базе цифровых волоконно-оптических линий и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), реализованная по принципу ПОР с ЦДО в приемных и передающих каналах, приведена на рис. 1.

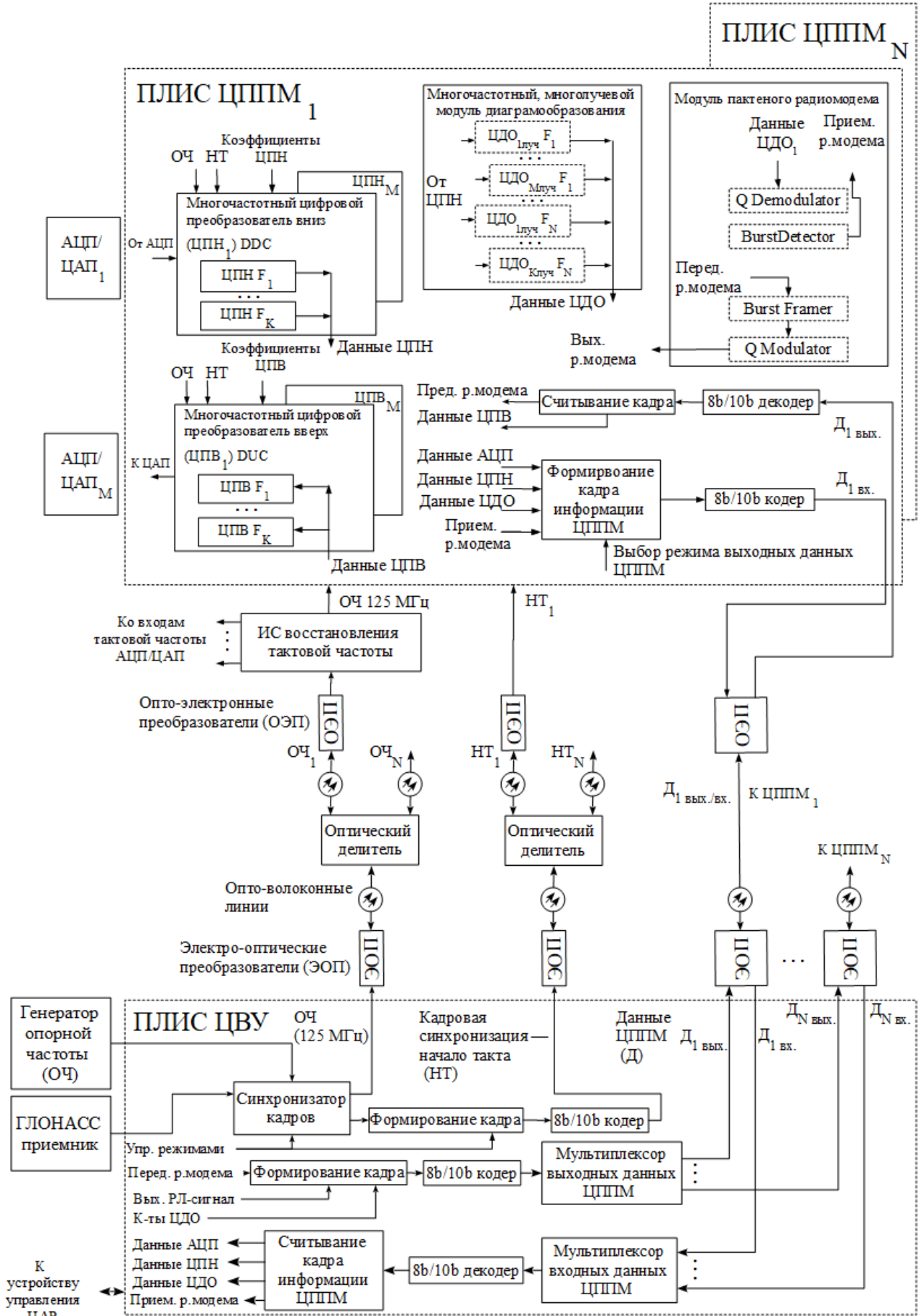


Рис. 1. Функциональная схема устройства ЦОС многоканальной ЦАР

Критически важными параметрами подсистемы синхронизации и передачи данных ЦАР являются фазовые шумы и задержки синхросигналов, пропускная способность каналов передачи данных, устойчивость к воздействиям электромагнитных помех, механических и климатических факторов, массогабаритные показатели. В указанных условиях высокоэффективным техническим решением представляется использование оптических линий [12]. Относительно приведенных в [13, 14] решений аналоговые оптические линии распределения сигналов предложено заменить цифровыми – свободными от влияния характеристик оптоэлектронных (электрооптических) преобразователей за счет использования цифрового сигнала для приемных и передающих каналов ЦАР, а также имеющими существенно меньшую стоимость и габариты.

Цифровые оптические линии могут работать на скоростях до 10 Гбит/с (при текущем технологическом уровне), обеспечивать дуплексный режим за счет частотного разделения сигналов приемника и передатчика по несущим частотам оптического диапазона волн, при необходимости допускают возможность объединения в один физический волоконно-оптический канал нескольких цифровых путем переноса на ортогональные несущие частоты оптического диапазона методом Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), что позволяетратно снизить количество линий в устройстве ЦОС ЦАР в сравнении с проводными каналами.

Кодирование цифровых потоков данных и сигналов кадровой синхронизации оптических каналов самосинхронизирующимся кодом 8b/10b позволяет не только обеспечить необходимое для физической среды отсутствие постоянной составляющей цифрового сигнала, но и существенно повысить точность синхронизации разнесенных модулей за счет корреляционных свойств указанного кода при одновременной привязке к частоте опорного генератора в петле фазовой автоподстройки в сравнении с другими методами, например, использующими аналоговые оптические линии или логические сигналы [13, 14].

Рассмотрим работу схемы, представленную на рис. 1. Модуль синхронизации и передачи данных центрального вычислительного устройства (ЦВУ) выполняет функции задающего генератора синхримпульсов (высокоточного синхронизатора системы единого времени с возможностью работы в многопозиционных станциях) и коммутатора данных цифровых приемопередающих модулей (ЦППМ) [15]. Канал передачи данных ЦВУ-ЦППМ реализован на базе двунаправленной 2,5 (10) Гбит/с волоконно-оптической линии передачи данных цифрового передатчика/приемника; количество линий соответствует количеству ЦППМ ЦАР текущей реализации ЦАР (количеству цифровых подрешеток ЦАР). Каналы синхронизации и управления – однонаправленные и подключаются к ЦППМ с использованием пассивных (или активных – при необходимости) оптических делителей по схеме, аналогичной при-

веденной в [13, 14], с заменой аналоговых оптических линий цифровыми.

Формирование и прием радиосигналов ЦАР реализованы в ЦППМ по принципу ПОР на несущей частоте для частотных диапазонов до «S» включительно, для частотных диапазонов «C» и выше предусмотрена возможность использования аппаратных преобразователей с локальным синтезатором частот гетеродина, размещаемым в ЦППМ и тактируемым опорной частотой (ОЧ). ЦППМ ЦАР строится таким образом, что характеристики чувствительности, избирательности, а также динамического диапазона обеспечиваются в аналоговой части приемного канала, реализуемой на базе малошумящего усилителя (МШУ) с полосовым фильтром, и в цифровой части, реализуемой на базе АЦП и цифрового преобразователя вниз – важнейшего компонента ЦАР (ЦПН, Direct Digital Converter (DDC)), и последующей сигнальной обработки – как правило, ЦДО и согласованная фильтрация [1, 6, 16]. Следует подчеркнуть, что аналоговая часть должна обеспечить минимально возможный коэффициент шума и предварительную защиту от помех, итоговые же характеристики ЦППМ ЦАР формируются именно в цифровой части. Количество ЦПН ЦППМ в предложенной схеме устройства ЦОС ЦАР равно максимально возможному количеству принимаемых одновременно сигналов на разных частотах (принцип ММО). От ЦППМ к ЦВУ в зависимости от алгоритма работы ЦАР могут отправляться данные в полосе АЦП, данные в полосе цифрового радиоприема или данные после ЦДО.

Максимальный объем передаваемой информации ограничивается пропускной способностью оптических цифровых каналов и может быть посчитан по модифицированной относительно представленной в [1] формуле

$$C = (N_{\text{АЦП}} \cdot \sum_{i=1}^a Q_{\text{АЦП}i} + 2 \cdot N_{\text{ЦПН}} \cdot \sum_{i=1}^b Q_{\text{ЦПН}i} + 2 \cdot N_{\text{ЦДО}} \cdot \sum_{i=1}^c Q_{\text{ЦДО}i}) \cdot K_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{АЦП}}$ – разрядность АЦП; $Q_{\text{АЦП}i}$ – количество отсчетов АЦП i -х каналов ЦППМ, передаваемых в ЦВУ; $N_{\text{ЦПН}}$ – разрядность квадратур цифрового преобразователя вниз (ЦПН) I, Q ; $F_{\text{ЦПН}i}$ – полосы ЦПН i -х каналов подрешетки, передаваемых в ЦВУ; $N_{\text{ЦДО}}$ – разрядность квадратур лучей после ЦДО – DBF ($I_{\text{DBF}}, Q_{\text{DBF}}$); $F_{\text{ЦДО}i}$ – полоса i -х лучей ЦДО ЦППМ; $K_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности протокола передачи данных.

Каждое из представленных в (1) слагаемых соответствует виду передаваемой информации: данные АЦП (при необходимости), данные цифрового радиоприема или ЦДО (в зависимости от выбранного алгоритма ЦДО ЦАР и реализуемого в ЦППМ или в ЦВУ).

Поток данных от ЦВУ к ЦАР, состоящей из одного или нескольких ЦППМ, можно определить по формуле

$$C = \left(\frac{N_{\text{ЦППМ}} \cdot N_{\text{кан}} \cdot N_{\text{упр}}}{0,1 \cdot N_{\text{повт}}} \right) \cdot K_{\text{эф}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ЦППМ}}$ – число ЦППМ в ЦАР; $N_{\text{кан}}$ – число каналов ЦППМ; $N_{\text{упр}}$ – число бит для управления фазовращателями и аттенюаторами приемника и передатчика; $T_{\text{повт}}$ – период повторения загрузки коэффициентов; $K_{\text{эфф}}$ – коэффициент эффективности протокола передачи данных.

Время доставки коэффициентов от ЦВМ к ЦППМ можно определить по формуле

$$T_{\Sigma} = T_{\text{ЦВМ}} + T_{\text{код}} + T_{\text{ОК}} + T_{\text{декод}} + T_{\text{интерф}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ЦВМ}}$ – время передачи данных от управляющей ЦВМ до ЦВУ; $T_{\text{код}}$ – время кодирования 8b/10b ЦВУ; $T_{\text{ОК}}$ – время передачи данных по оптическому каналу; $T_{\text{декод}}$ – время декодирования 8b/10b ЦППМ; $T_{\text{интерф}}$ – время записи данных в фазовращатели / аттенюаторы ЦППМ.

Объем передаваемой информации от ЦППМ к ЦВУ, рассчитываемый согласно (1), прямо пропорционален количеству каналов ЦППМ или количеству лучей диаграммообразования. В случае превышения количеством лучей количества ЦПН поток данных ЦППМ-ЦВУ будет меньше при передаче в ЦВУ данных ЦПН (в этом случае ОЭП реализуется в ЦВУ вместо ЦППМ). Дополнительным преимуществом такого алгоритма будет возможность извлечения в ЦВУ информации отдельных каналов ЦППМ, теряемой в случае выполнения диаграммообразования в ЦППМ, что следует учитывать при определении места размещения модуля ЦДО в ПОР.

ЦВУ, рассчитываемый согласно (1), прямо пропорционален количеству каналов ЦППМ или количеству лучей диаграммообразования. В случае превышения количеством лучей количества ЦПН поток данных ЦППМ-ЦВУ будет меньше при передаче в ЦВУ данных ЦПН (в этом случае ЦДО реализуется

в ЦВУ вместо ЦППМ). Дополнительным преимуществом такого алгоритма будет возможность извлечения в ЦВУ информации отдельных каналов ЦППМ, теряемой в случае выполнения диаграммообразования в ЦППМ, что следует учитывать при определении места размещения модуля ЦДО в ПОР.

Максимальные полосы обработки сигналов ЦПН (цифрового радиоприема) для 8-канального ЦППМ при подключении его по 2,5 Гбит/с линии составляют 10 МГц для каждого канала, что много больше в сравнении с каналами LVDS [1, 6], при этом длина линий между отдельными ЦППМ в полотно решетки может составлять до 10 м и, возможно, более, при необходимости. Данные характеристики являются достаточными для обеспечения возможности реализации современных ЦАР.

Результаты

Для проведения экспериментов был изготовлен макет устройства ЦОС ЦАР с ЦППМ различных частотных диапазонов – от метрового до субмиллиметрового. Эксперименты проводились в лабораторных и в полевых условиях. Расстояние между отдельными ЦППМ ЦАР в ряде экспериментов превышало 10 м. Внешний вид экспериментальной аппаратуры ЦОС ЦАР с оптическими цифровыми линиями и ЦДО в приемных и передающих каналах приведен на рис. 2.

Влияния изменений температуры, вибрации, электромагнитных воздействий от собственного излучения станции и соседних радиоэлектронных средств на аппаратуру ЦОС ЦАР с оптическими цифровыми каналами синхронизации и передачи данных в процессе проведения экспериментов не наблюдалось.

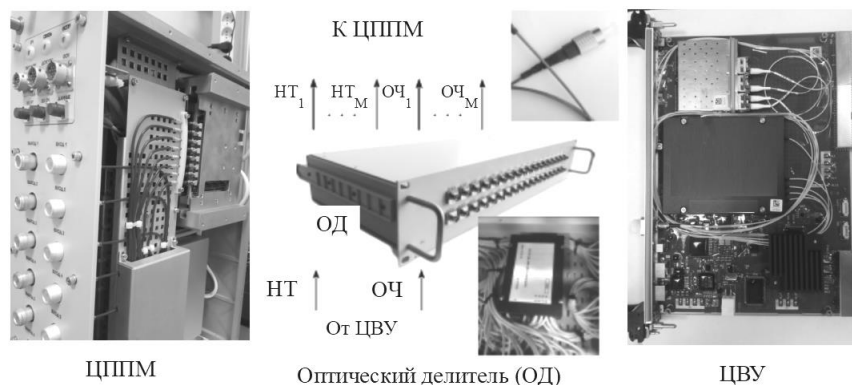


Рис. 2. Макет устройства ЦОС многоканальной ЦАР

Измеренный джиттер кадровой синхронизации разных ЦППМ в решетке не превышает 2 нс, что в 4–5 раз меньше известных технических решений, точность формирования и приема радиосигналов приемного и передающего каналов устройства ЦОС ЦАР в рабочем динамическом диапазоне суммарно не превышает 1 дБ и $0,1^\circ$ в рабочем диапазоне температур и во времени, что является достаточным для большинства систем с ЦАР (характеристики аналоговых устройств ЦОС ЦАР в известной литературе не приводятся).

Абсолютная задержка данных от системы управления ЦАР (ЦВМ) до ЦППМ для оптических цифровых каналов с кодированием 8b/10b не превышает 0,42 мкс, что в 4–5 раз меньше известных технических решений и является важным параметром при реализации адаптивных алгоритмов перспективных ЦАР. При этом время кодирования/декодирования информации кодом 8b/10b на ПЛИС ЦВУ и ПЛИС ЦППМ составляет менее 0,05 мкс, что определяет возможность уменьшения задержки данных от ЦВМ до ЦППМ в последую-

щих реализациях ЦАР при условии сокращения времени обработки информации управляющей ЦВМ ЦАР и времени установки амплитудно-фазовых коэффициентов конечных устройств ЦППМ – аттенуаторов и фазовращателей (аппаратных, при их наличии, или программных).

Выводы

Предложен усовершенствованный метод распределения сигналов синхронизации и данных по полотну многоканальной ЦАР на базе цифровых оптических линий, приведена соответствующая функциональная схема устройства ЦОС многоканальной ЦАР.

В рамках проверки предложенного метода реализовано и проверено на практике устройство ЦОС многоканальной ЦАР, выполненное с использованием технологии ПОР. В результате проведенных экспериментов подтверждена состоятельность предложенных технических решений.

Дополнительно приведены расчетные соотношения для оценки основных характеристик подсистемы распределения сигналов синхронизации и данных ЦАР.

Экспериментально подтверждены следующие результаты: метод распределения сигналов синхронизации и данных по полотну многоканальных ЦАР на базе цифровых оптических каналов с кодированием 8b/10b на ПЛИС обеспечивает скорость передачи, в пять раз большую (не менее 8 Гбит/с), без существенных ограничений по длине (не менее 10 м) в сравнении с линиями LVDS (до 1,2 Гбит/с, до 2 м) при абсолютной задержке от устройства управления (ЦВУ) до цифровой подрешетки (ЦППМ) не более 0,42 нс и джиттере кадровых синхроимпульсов не более 2 нс, что в 4–5 раз лучше соответствующих показателей известных технических решений.

Предложенный метод позволяет усовершенствовать подсистему синхронизации и передачи данных перспективных широкополосных ЦАР с адаптивной обработкой и ЦДО в приемных и передающих каналах, реализовать на практике новую технологию построения аппаратуры ЦОС для линейки цифровых многоканальных ФАР.

Литература

1. Малахов Р.Ю. Модуль бортовой цифровой антенной решетки: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – М., 2015. – 156 с.
2. Тушнов П.А. Технологические аспекты модульного принципа построения СВЧ-трактов приемопередающих модулей АФАР / П.А. Тушнов, В.С. Бердыев // Радиотехника. – 2017. – № 10. – С. 44–55.
3. Чернова И.В. Особенности реализации приемопередающего модуля АФАР / И.В. Чернова, А.С. Тодошева // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12, № 8. – С. 27–31.
4. Акинин В.Е. 8-канальный приёмопередающий модуль X-диапазона с первичной цифровой обработкой сигнала / В.Е. Акинин, О.В. Борисов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 1(248). – С. 57–67.

5. Воскресенский Д.И. Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы / Д.И. Воскресенский, А.И. Канашенков. – М.: Радиотехника, 2013. – 208 с.

6. Добычина Е.М. Цифровые антенные решетки радиоэлектронных бортовых систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.07. – М., 2018. – 294 с.

7. Светличный Ю.А. Особенности подхода к конструированию вычислительных систем цифровых фазированных антенных решеток // Успехи современной радиоэлектроники. – 2018. – № 12. – С. 156–159.

8. Топчиев С.А. Разработка в ПАО «Радиофизика» РЛС с цифровыми АФАР / С.А. Топчиев, М.В. Никитин // Сб. науч. тр. XIII молодежной науч.-техн. конф. «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – Москва, ПАО «Радиофизика», 3 декабря 2015 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.radiofizika.ru/upload/konferentsiya-2015/Топчиев_Никитин_РИНЦ.pdf, свободный (дата обращения: 01.03.2020).

9. Young-Kil Kwag. Modern software defined radar (SDR) technology and its trends // Journal of Electromagnetic engineering and science. – December 2014. – Vol. 14, No. 4. – P. 321–328.

10. Tarik Kazaz. Hardware Accelerated SDR Platform for Adaptive Air Interfaces. ETSI Workshop on Future Radio Technologies: Air Interfaces, France / January 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/archiv/papers/1705/1705.00115.pdf>, свободный (дата обращения: 30.01.2020).

11. Integrated Software-Defined Radio on Zynq® -7000 All Programmable SoC Design Seminar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zedboard.org/sites/default/files/ZYNQ_SDR_2014_slides_v1_0.pdf, свободный (дата обращения: 24.02.2020).

12. Митяшев М.Б. К реализации технологий радиопотоники в АФАР радиолокационных комплексов // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 178.

13. Чиж А.Л. Многоканальная волоконно-оптическая система распределения синхросигнала в активных фазированных антенных решетках / А.Л. Чиж, С.А. Малышев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – Июнь, 2014. – С. 257.

14. Задорожный В.В. Построение распределительной системы многоэлементных АФАР на основе аналоговых волоконно-оптических линий связи / В.В. Задорожный, А.Ю. Ларин, А.С. Трекин // Антенны и техника СВЧ. – 2014. – № 8. – С. 106–109.

15. Светличный Ю.А. Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами / Ю.А. Светличный, П.А. Дегтярев // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 7–12.

16. Tsoeunyane L., Winberg S., Inggs M. Software-Defined Radio FPGA Cores: Building towards a Domain-Specific Language // Hindawi International Journal of Reconfigurable Computing, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/ijrc/2017/3925961/>, свободный (дата обращения: 01.03.2020).

Светличный Юрий Алексеевич

Директор центра исследований и разработок ПАО «НПО «Алмаз» в г. Томске (ООО «ЛЭМЗ-Т») Развитие пр-т, д. 8, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 48-85-27
Эл. почта: svetlichniy_ya@lemz-t.ru

Svetlichniy Y.A.

Fiber-optic Synchronization and Data Transmission Subsystem of Multichannel Phased Array

The article deals with the practical aspects of synchronization and data transferring in multichannel phased array systems, especially in systems with big antenna dimensions.

In multichannel phased array antenna commonly used an optical analog signals distribution scheme for RF and heterodyne signals and wired interfaces for control and digital data. For modern digital antennas the data transferring and synchronization method, based on digital fiber optic channels, was presented. The schemes, constructions, and algorithms of the method are described. The method was realized as SDR system using FPGA with soft-processor core. For data transferring the 8b/10b code is used.

The following result of experiment are discussed: digital optical lines are resistant to signals distortions, can transfer big data massive with minimal delay, have excellent synchronization capabilities at quite low cost.

Keywords: digital phased array, fiber optics, FPGA, SDR system, synchronization, 8b/10b code.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-7-12

References

1. Malahov R.Y. *Modul' bortovoj cifrovoj antennoj resh- etki*: dis. kand. teh. nauk [T/R Module for Mobile Digital Phased Array]: 05.12.07. Moscow, 2015, 156 p. (in Russ.).
2. Tushnov P.A., Berdyev V.S. *Tehnologicheskie aspekty modulnogo principa postroeniya SVCH-traktov priemo- peredayushchih modulei AFAR* [Technological principles of Digital Phased Array T/R Modules Design]. *Radiotechnics*, 2017, no. 10, pp. 44–55 (in Russ.).
3. Chernova I.V., Todosheva A.S. *Osobennosti realizatsii priemo-peredayushchego modulya AFAR* [Specificity of Digital Phased Array T/R Module Design]. *T-Comm – Telecommunication and Transport*, 2018, vol. 12, no. 8, pp. 27–31 (in Russ.).
4. Akinin V.E., Borisov O.V. *8-kanal'nyj priemo- peredayushchij modul' X-diapazona s pervichnoj cifrovoj obrabotkoj signala* [8-channel X-band T/R module with Digital Signal Processing]. *Electronic Technic. Ser. 2. Semiconductors*, 2018, iss. 1(248), pp. 57–67 (in Russ.).
5. Voskresenskij D.I., Kanaschenkov A.I. *Bortovye tsifrovye antennye reshetki i ih elementy: kollektivnaya monografija*. Moscow: Radio Technics, 2013. 208 p. (in Russ.).
6. Dobychina E.M. *Tsifrovye antennye reshetki radioel- ektronnyh bortovyh sistem: dis. dokt. teh. nauk* [Digital Phased Array of Mobile Radioelectronic Systems]: 05.12.07. M., 2018. 294 p. (in Russ.).
7. Svetlichniy Y.A. *Osobennosti podhoda k konstruirovaniyu vychislitel'nyh sistem tsifrovyyh fazirovannyh antennyh reshetok* [Specificity of Digital Phased Array Antenna Design]. *Modern Radioelectronics News*, 2018, no. 12, pp. 156–159 (in Russ.).
8. Topichev S.A., Nikitin M.V. *Razrabotka v PAO «Radiofizika» RLS s tsifrovymi AFAR* [Design of Digital Phased

Array Radar in JSC «Radiofizika». *Sbornik nauchnyh trudov XIII Molodeznoj konferentsii «Radiolokatsiya i svjaz' – perspektivnyje tehnologii»*, Moscow, December, 2015. Available at: <http://www.radiofizika.ru/upload/konferentsiya-2015/Топичев Никитин РИИЦ.pdf>, (Accessed: June 21, 2020).

9. Young-Kil Kwag, *Modern Software Defined Radar (SDR) Technology and Its Trends // Journal of Electromagnetic engineering and science*, December 2014, vol. 14, no. 4, pp. 321–328.

10. Tarik Kazaz. *Hardware Accelerated SDR Platform for Adaptive Air Interfaces*. ETSI Workshop on Future Radio Technologies: Air Interfaces, France // January 2016. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1705/1705.00115.pdf>, (Accessed: January 30, 2020).

11. *Integrated Software-Defined Radio on Zynq® -7000 All Programmable SoC Design Seminar*. Available at: http://zedboard.org/sites/default/files/ZYNQ_SDR_2014_slide_s_v1_0.pdf, (Accessed: February 21, 2020).

12. Mityashev M.B. *K realizatsii tehnologii radiofotoniki v AFAR radiolokacionnyh kompleksov* [Photonic technologies for Active Phased Array Radars]. *SibGUTI News*, 2015, no. 2, P. 178 (in Russ.).

13. Chiz A.L., Malyshev S.A. *Mnogokanalnaja volokonno-opticheskaja sistema raspredeleniya sinhrosignala v aktivnyh fazirovannyh antennyh reshetkah* [Multichannel Fiber Optic System of Synchronization Signals Distribution for Active Phased Array]. *Electronics and Microelectronics*. June, 2014, P. 257 (in Russ.).

14. Zadorozhniy V.V., Larin A.Y., Trekin A.S. *Postroenie raspredelitelnoj sistemy mnogoelementnyh AFAR na osnove analogovyh volokonnoopticheskikh linij svyazi* [Multichannel Active Phased Radar Analog Signals Optical Distribution System]. *Antennas and Microwave Technics*, 2014, no. 8, pp. 106–109 (in Russ.).

15. Svetlichniy Y.A., Degtyarev P.A. *Sinhronizatsiya i peredashcha dannyh v radiotekhnicheskikh sistemah s territorial'no raspredelennymi segmentami* [Synchronization and data transmission in multistatic radar systems] *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 7–12 (in Russ.).

16. Tsoeunyane L., Winberg S., Inngs M. *Software-Defined Radio FPGA Cores: Building towards a Domain-Specific Language // Hindawi International Journal of Reconfigurable Computing*, 2017. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ijrc/2017/3925961/>, (Accessed: March 01, 2020).

Yuriy A. Svetlichniy

JSC NPO «Almaz»

Research and Development Centre «LEMZ-T» LLC,
8, Razvitiya pr., Tomsk, Russia, 634055

Phone: +7 (382-2) 48-85-27

Email: svetlichniy_ya@lemz-t.ru