

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ РАДИОФОТОНИКИ

Б. Р. Гантеррахимов, А. А. Кузнецов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В статье представлено исследование и разработка методов для создания управляемых фазовых сдвигов, которые могут быть использованы в сверхширокополосных активных фазированных антенных решетках (АФАР). В ней подробно рассматривается проблема частотной зависимости фазы, возникающая при использовании фиксированных временных задержек и смоделирована гибкоперестраиваемая фотонная диаграммообразующая схема, основанная на волоконно-брэгговских решетках (ВБР), которая управляется изменением длины волны лазерного излучения. В процессе работы в программной среде OptiSystem было проведено имитационное моделирование четырехканальной распределительной сети, где функции задержки выполняли компоненты для компенсации дисперсии.

Ключевые слова: диаграммообразующие устройства, активная фазированная антенная решетка, волоконная брэгговская решетка, линия задержки, матрица Батлера.

Введение

Современное развитие радиолокационных систем, спутниковой связи и мобильных сетей нового поколения требует создания сверхширокополосных активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые могут быстро и точно сканировать пространство. Традиционные устройства для формирования диаграмм, основанные на классических сверхвысокочастотных (СВЧ) компонентах, таких как волноводы, коаксиальные кабели и микрополосковые матрицы Батлера, уже почти достигли своих физических пределов. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах классические СВЧ-устройства сталкиваются с высокими потерями, сильным взаимным влиянием каналов, большими размерами и весом, а также высокой чувствительностью к внешним электромагнитным помехам [1].

Одним из самых многообещающих способов решения этих задач является внедрение технологий радиофотоники (Radio-over-Fiber). Перенос радиочастотного сигнала в оптический диапазон позволяет использовать оптическое волокно как средство для передачи сигналов [2]. Это обеспечивает практически нулевые потери в тракте, огромную полосу пропускания, устойчивость к электромагнитным помехам и возможность значительной миниатюризации всей распределительной сети АФАР.

При проектировании радиофотонных диаграммообразующих схем инженеры сталкиваются с важной физической особенностью: в оптическом тракте невозможно напрямую сдвинуть фазу радиосигнала так, как это делается в стандартных СВЧ-фазовращателях. Оптические компоненты реализуют так называемую истинную временную задержку сигнала (True Time Delay).

Однако использование схем с фиксированным (статическим) временем задержки на практике оказывается неудобным и неэффективным. Фазовый сдвиг и время задержки связаны друг с другом через рабочую частоту радиосигнала. Если время задержки в канале

жестко зафиксировано, то при изменении рабочей частоты радиосигнала итоговый фазовый сдвиг на выходе будет пропорционально меняться. В многочастотных системах или при перестройке частоты радара это приводит к полной потере работоспособности схемы: фазы «плывут», и антенна теряет способность правильно фокусировать и направлять луч.

Для решения этой задачи нужно разработать гибкую схему диаграммообразования, в которой время задержки можно будет динамически подстраивать под текущую частоту сигнала. В этой работе мы предлагаем использовать волоконно-брегговские решетки (ВБР) в качестве перестраиваемого элемента, так как время задержки в них регулируется просто и надежно — за счет изменения длины волны лазера [3].

Цель данного исследования — создать принципы для разработки перестраиваемого радиофотонного диаграммообразующего устройства для четырехэлементной антенной решетки, которое обеспечит стабильное фазоформирование в широком диапазоне частот.

Кроме того, схемы диаграммообразования находят широкое применение в радиолокации. Они помогают в оптимизации проектирования и улучшении производительности радиотехнических систем. Благодаря использованию диаграммообразующих схем инженеры могут быстрее и эффективнее разрабатывать и совершенствовать радиоэлектронные устройства, что важно для развития современных коммуникационных технологий и связи.

Диаграммообразующие устройства в фазированных антенных решетках

Антенные решетки — ключевые компоненты современных радиотехнических систем, которые широко применяются в телекоммуникациях, радиолокации и спутниковой связи. Для управления диаграммой направленности антенных решеток используется диаграммообразующая схема. Актуальность разработки таких устройств обусловлена растущими требованиями к многолучевым антенным системам СВЧ в отношении их широкополосности, массогабаритных показателей и технологичности сборочных и регулировочных работ [4].

Чтобы обеспечить предъявляемые требования, целесообразно реализовать широкополосные компактные антенные решетки, пригодные для интегрально-групповой технологии микроэлектроники и полосковых микросхем. При этом диаграммообразующая схема должна быть реализована на единой диэлектрической подложке вместе с излучателями антенной решетки без каких-либо соединительных коаксиальных кабелей.

Применение фазированных антенных решеток (ФАР) с диаграммообразующими устройствами на основе линий задержки (ЛЗ) обеспечивает наиболее эффективное выполнение требований к характеристикам антенных систем.

Радиофотонная диаграммообразующая схема на основе ЛЗ должна:

- иметь достаточную полосу пропускания и диапазон временных задержек;
- обеспечивать допустимое полное время перекоммутации и уровень перекрестных помех;
- поддерживать как дискретную, так и непрерывную перестройку луча.

Использование радиофотонных технологий позволяет добиться:

- повышения рабочей полосы частот;
- повышения помехозащищенности;
- повышения стабильности основных параметров;
- снижения потерь в линиях передачи сигналов;
- снижения массогабаритных характеристик.

Схемы диаграммообразующих устройств на основе радиофотоники представляют собой инновационный подход к созданию электронных систем, в которых информация обрабатывается и передается с использованием фотонных сигналов и фотонных компонентов. Они объединяют в себе преимущества оптических и электронных

технологий, позволяя достичь высокой эффективности, пропускной способности и низкой потребляемой мощности [4].

Существует достаточно много решений для реализации радиофотонных ДОУ на ЛЗ, в которых временная задержка реализуется на модификациях брегговских решеток, на дисперсионной волоконной призме, на волокне с компенсацией дисперсии, на голографических решетках, интегрированных кольцевых резонаторах. ДОУ на основе радиофотонных ЛЗ обеспечивают задержки от десятков пикосекунд до единиц наносекунд в полосе пропускания до десятков ГГц.

На рисунке 1 показана схема радиофотонной ДОУ для 16-элементной ФАР на основе переключаемых оптических линий задержки.

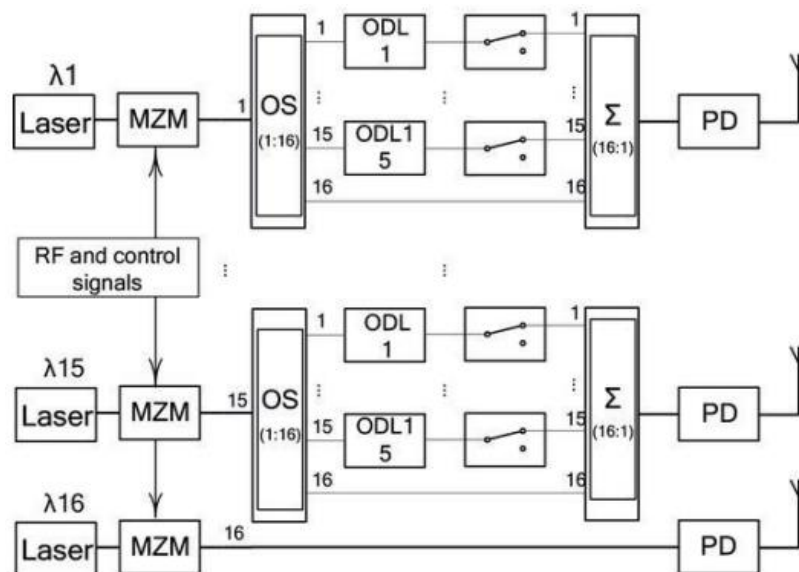


Рис. 1. Структурная схема радиофотонной ДОУ для 16-элементной ФАР на основе переключаемых оптических линий задержки [4]

В этой схеме используются 16 немодулированных настраиваемых лазерных излучателей с различными длинами волн (λ_1 – λ_{16}). Каждый оптический канал модулируется с помощью модулятора Маха-Цандера (MZM) одним и тем же радиочастотным сигналом и разделяется на 16 каналов оптическим разветвителем (OS). Затем сигналы задерживаются в переключаемых оптических линиях задержки (ODL). Задерживаемые оптические сигналы детектируются с помощью фотодетекторов (PD) и подаются на антенные элементы.

Важным недостатком данной схемы является необходимость использования большого количества лазеров и модуляторов, что делает схему нецелесообразной из-за громоздкости и большого энергопотребления даже для такой малоэлементной ФАР. Так же, разница потерь на минимальном и максимальном шаге оптических линий задержки, которая составляет более 30 раз, что приводит к искажениям диаграммы направленности [4].

Исследование базовой измерительной конфигурации

Многочувствительные антенны (МА) представляют устройства, которые могут создавать несколько направленных диаграмм в пространстве, каждая со своим собственным антенным каналом. Обычно они используются в сложных антенных системах, включая фазированные антенные решетки, хотя могут также функционировать отдельно как передающие или приемные устройства. Многочувствительные антенны обладают значительным потенциалом, поскольку обеспечивают одновременное сканирование пространства

в широком угловом секторе с высоким разрешением, позволяют сканировать множественными независимыми лучами и позволяют контролировать изменение направления диаграммы направленности, расширяя сферу рассмотрения для однолучевого сканирования ФАР.

Структурная схема МА, изображенная на рисунке 2, включает в себя излучающую часть, которая может быть выполнена в виде решетки излучателей или раскрыва рупорной антенны. Диаграммообразующая схема является важным компонентом функциональной схемы, предназначенной для создания требуемых амплитудно-фазовых распределений (АФР) поля в излучающей части, с антенными входами в виде линии передачи поперечного сечения с одним типом распространяющейся волны. Когда электромагнитные волны возбуждаются на любом из входов многолучевой антенны, в пространстве формируется соответствующая этому входу диаграмма направленности [5].

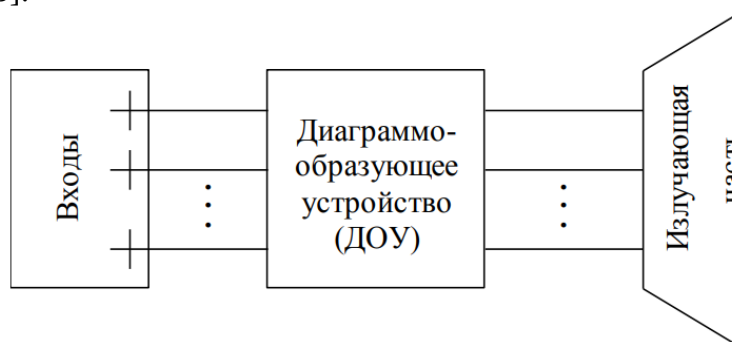


Рис. 2. Структурная схема МА [5]

На рисунке 3 изображено формирование соответствующих диаграмм направленности входам МА.

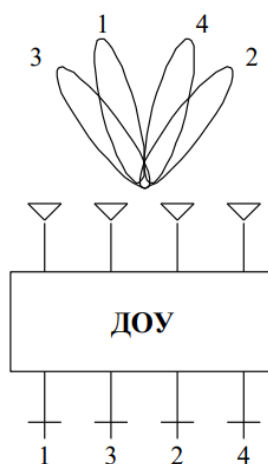


Рис. 3. Формирование соответствующих диаграмм направленности входам МА [5]

Работа МА в режиме приема подразумевает, что часть энергии плоской волны, падающей из направления, соответствующего максимуму одной из ДН, собирается на соответствующем входе антенны. Если при этом на остальных входах МА электромагнитные колебания практически отсутствуют, то говорят, что входы этой МА развязаны.

Существует несколько возможных классификаций антенных устройств, одна из которых основана на различных критериях. Эти критерии можно разделить на две группы.

Первая группа включает общие системные и антенные критерии, такие как функциональное назначение МА в системе, динамика и методы формирования луча.

Вторая группа состоит из критериев, определяющих методы структурного расположения антенных устройств. Например, на основе реализации излучающей части можно выделить два основных класса антенных устройств: апертурные антенны и решетки.

Устройство формирования диаграммы направленности апертурных антенн состоит из комбинации излучателей и зеркал или линз. Излучатели, смещенные от фокуса зеркала или объектива, генерируют диаграммы направленности, отклоненные от нормали к апертуре.

К преимуществам таких многолучевых антенн относятся простота конструкции и возможность формировать диаграмму направленности с помощью небольших боковых лепестков.

Недостатки же таких антенн – низкий уровень пересечения соседних лучей, малое значение коэффициента использования поверхности (КИП), громоздкость, большая масса [5].

Матрица Батлера

Преимущества использования матрицы Батлера в качестве ДОС состоит в простоте аппаратного обеспечения, требует гораздо меньшего количества фазовращателей, чем другие методы, а также может быть реализована в виде микрополоски на недорогой печатной плате.

Для построения четырехлучевой матрицы Батлера разработан трехсекционный 90-градусный гибрид на полосковых линиях с лицевой связью. На рисунке 4 изображена топология полосковых проводников четырехлучевой матрицы Батлера для диапазона частот 4...8 ГГц [6].

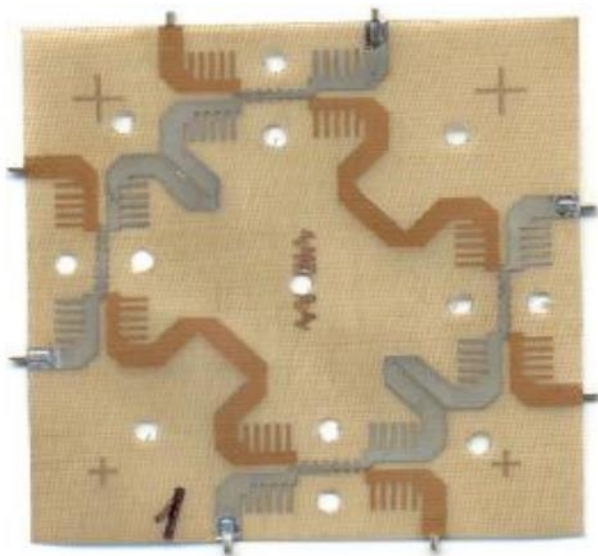


Рис.4. Конфигурация полосковых проводников четырехлучевой матрицы Батлера [6]

Схема четырёхлучевой матрицы Батлера содержит четыре симметричных 3 дБ гибрида, имеющих разницу фаз выходных сигналов 90, и два 45-градусных фазовращателя. Выступы на внешних краях связанных линий улучшают согласование выходов направленных ответвителей и изоляцию между выходами. Количество независимых лучей зависит от количества входов и выходов матрицы.

Восьмилучевая матрица Батлера состоит из двух четырехлучевых матриц, схема которых изображена на рисунке 5.

Гибриды подключены к выходам четырехлучевых матриц, расположенным на противоположных краях корпуса. Четырехлучевые матрицы Батлера расположены в центре параллельно друг другу, а корпуса гибридов расположены перпендикулярно корпусам МБ [6].

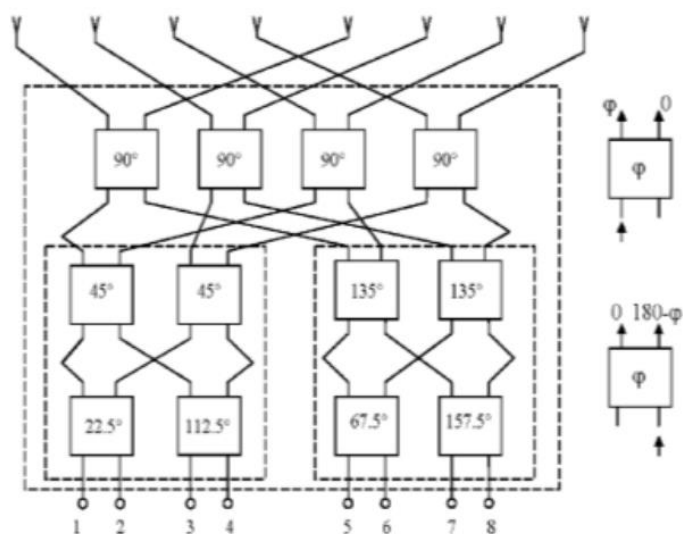


Рис. 5. Блок-схема восьмилучевой матрицы Батлера [6]

Одним из практических воплощений матрицы Батлера восьмого порядка является использование 3-децибельных направленных ответвителей, фиксированных фазовращателей (элементов с фазовым сдвигом) и переходных соединений. Например, направленные ответвители могут быть выполнены в виде шлейфовых ответвителей на линиях передачи, ответвителей Ланге или других типов ответвителей на соответствующих линиях.

Одна из основных задач при реализации матрицы Батлера в оптике — это экспериментальное определение всех её элементов. Это может быть достигнуто путем проведения специальных оптических и механических экспериментов, таких как измерение показателей преломления при приложении механического напряжения и измерение деформации при освещении материала. Полученные значения элементов матрицы Батлера могут быть использованы для расчёта и оптимизации оптических свойств материала в различных оптических устройствах [6].

Линии задержки на основе волоконно-брэгговской решетки

Линии задержки ВБР. Недостатком использования линий задержки с использованием дисперсионных волокон является их большой размер. Например, для достижения времени задержки в 170 пс для двух длин волн, разнесенных на 1 нм, длина SMF составляет 10 км, что является слишком большим значением и делает систему чрезвычайно громоздкой. Для реализации оптической временной задержки небольшого размера одним из решений является использование волоконно-брэгговской решетки. ВБР — это участок оптического волокна, в котором показатель преломления в области сердцевинки изменяется, образуя периодический профиль модуляции показателя, так что одни длины волн передаются, а другие отражаются. Типичные ВБР имеют периоды решетки в несколько сотен нанометров, что позволяет связывать режимы между двумя режимами встречного распространения в сердцевине волокна [3].

Линия задержки может быть реализована с использованием матрицы ВБР. На рисунке 6 показана структура линии задержки с использованием матрицы ВБР, в которой различные временные задержки генерируются путем настройки длины волны оптической несущей на центральную длину волны одного из ВБР. Поскольку брэгговские длины волн ВБР различны, разные длины волн отражаются в разных местах, что приводит к разным временным задержкам. Радиочастотный сигнал, передаваемый оптической волной на λ_3 ,

проходит более длинный путь, чем сигнал, передаваемый оптической волной на других длинах волн, и он будет иметь большую временную задержку. Эта структура была использована для создания линий задержки для фазированных антенных решеток [3].

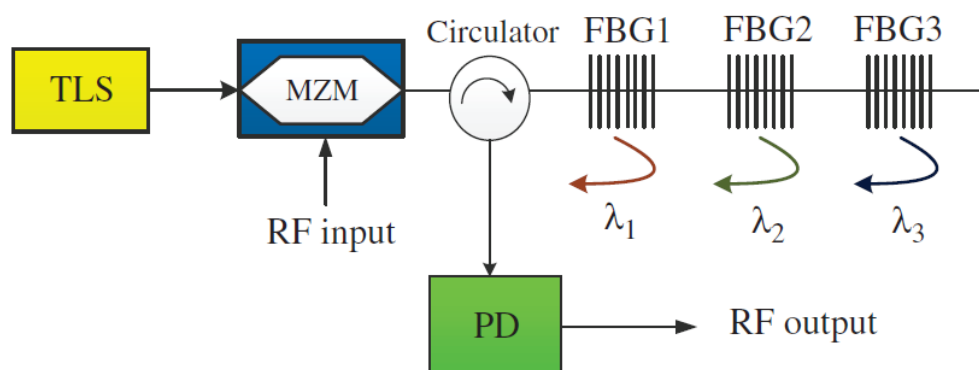


Рис. 6. Настраиваемая структура линии задержки с использованием массива однородных ВБР с различными центральными длинами волн [3]

Разработка диаграммообразующей схемы на основе перестраиваемых оптических элементов задержки

Для обеспечения сканирования в многолучевых антенных решетках обычно используются диаграммообразующие схемы (ДОС), и классическим решением этой задачи является матрица Батлера. Однако при разработке таких схем в традиционном радиочастотном (СВЧ) исполнении возникают определенные проблемы и ограничения, такие как высокие потери, большие размеры волноводных и микрополосковых структур, а также высокая уязвимость к электромагнитным помехам. В качестве эффективного решения этой проблемы в данной работе предлагается реализовать диаграммообразующую схему в оптическом (фотонном) формате. Перенос радиочастотного сигнала в оптический диапазон позволяет значительно уменьшить размеры устройства и обеспечивает его невосприимчивость к внешним электромагнитным помехам.

Оптическая несущая в этой схеме создается с помощью непрерывного лазера (CW Laser), который излучает на частоте 193.1 ТГц. Радиосигнал генерируется гармоническим генератором (Sine Generator), настроенным на 32 ГГц. Для переноса сверхвысокочастотного радиосигнала в оптическую область используется амплитудный модулятор (Amplitude Modulator). Сформированный оптический сигнал направляется на оптический разветвитель (Power Splitter 1x4), который делит мощность на четыре независимых канала. На приемной стороне каждого канала установлены широкополосные PIN-фотодетекторы, которые выполняют прямое оптоэлектронное преобразование, восстанавливая исходный радиосигнал с некоторой задержкой. Выходы фотодетекторов подключены к измерительным осциллографам, что позволяет визуально фиксировать изменения на выходах портов диаграммообразующей схемы.

Ключевой задачей при проектировании оптической диаграммообразующей схемы является реализация элементов, обеспечивающих фазовый сдвиг сигнала.

Самым простым вариантом является реализация схемы через задержку по времени, но данный вариант будет неподходящим так как, если изменить рабочую частоту, радиоволна станет короче или длиннее, за то же самое фиксированное время задержки эта волна совершит уже другое количество колебаний. В результате итоговый сдвиг будет другим, то есть данный вид задержки может работать только на определенной частоте, поэтому, чтобы схема была универсальной, необходима перестраиваемая схема. Для этой задачи были выбраны ВБР, в качестве элемента формирования задержки.

Попытка моделирования решетки, которая будет моделировать фазовую задержку, в программе OptiGrating для данной схемы не представляется возможным, поэтому использован стандартный компонент из библиотеки OptiSystem – это решетка компенсатора дисперсии, единственный элемент, который позволяет смоделировать фазовое изменение сигнала. Эмпирическим путем определена отстройка центральной длины волны решетки от длины волны лазера. Лазер является одним для всех решеток, соответственно, выбираются длины волн решеток для получения требуемой задержки сигнала. На рисунке 7 представлена схема на элементах задержки в виде ВБР.

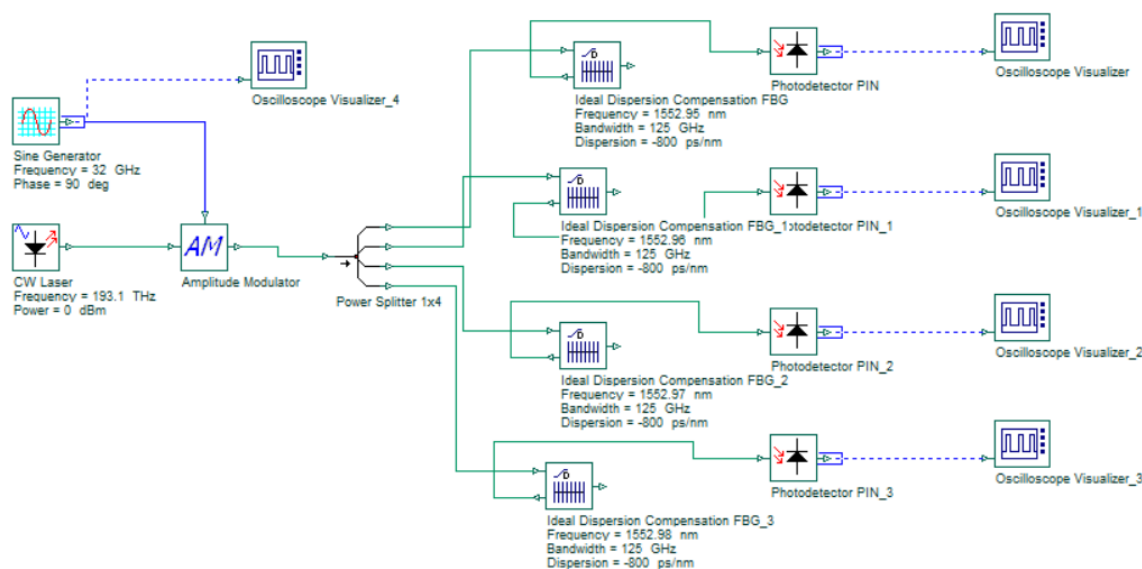


Рис. 7. Диагностическая четырехканальная параллельная схема на ВБР

На рисунке 8 представлены осциллограммы с фазовым сдвигом для каждого из каналов.

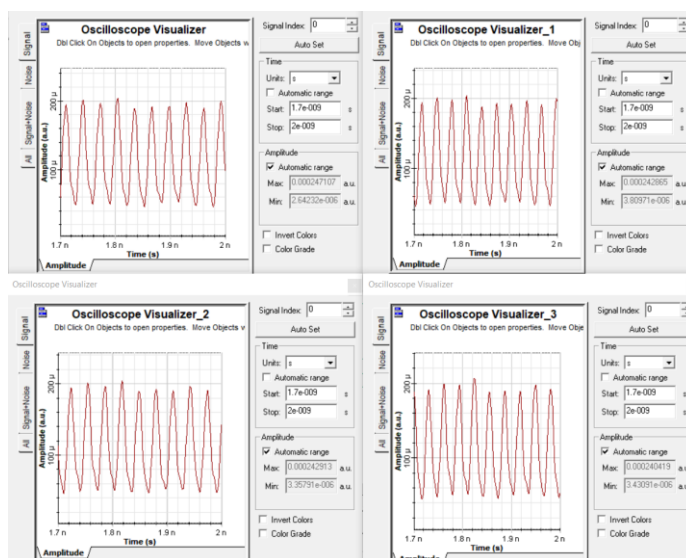


Рис. 8. Осциллограммы на выходе схемы

На заключительном этапе была собрана полная модель фотонной диагностической схемы, состоящая из четырех параллельных каналов, построенных с использованием матрицы Батлера.

Классическая схема матрица Батлера 4x4 представлена на рисунке 9.

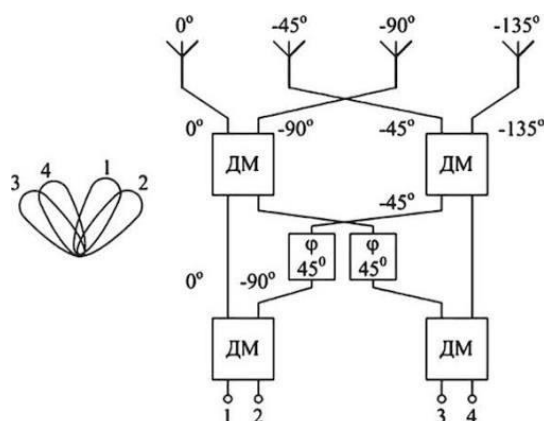


Рис. 9. Схема матрицы Батлера 4x4 [7]

На основе классической схемы матрицы Батлера была собрана перестраиваемая схема на ВБР в программе OptiSystem, представленная на рисунке 10.

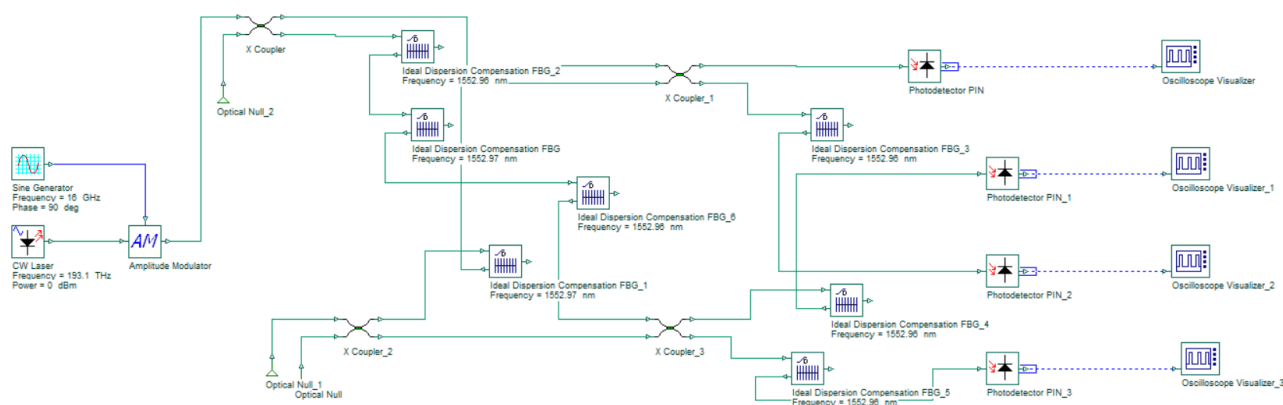


Рис. 10. Диаграмообразующая четырехканальная схема на ВБР с использованием принципов построения матрицы Батлера

На рисунке 11 показаны графики с фазовыми сдвигами, снятые на выходах с осциллографов на каждой линии задержки в системе, собранной на ВБР по схеме Батлера.

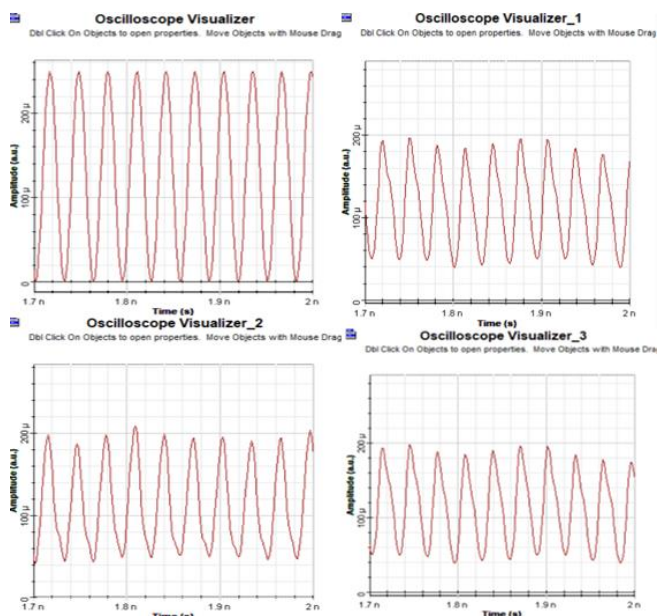


Рис. 11. Результаты моделирования с источником, подключенным к первому входу матрицы

Таким образом были получены результаты проектирования, перспективные для построения распределительных сетей диаграммообразующих схем.

Заключение

В этой статье представлены результаты анализа, разработки и проектирования сверхширокополосных диаграммообразующих устройств АФАР, построенных на основе технологий радиофотоники [8-10]. Предложенная концепция полностью подтвердила свою физическую и математическую обоснованность. Доказано, что статические оптические линии задержки не подходят для многочастотных АФАР из-за зависимости фазы от частоты. Однако использование ВБР помогло обойти это ограничение и создать гибко перестраиваемую схему.

В среде OptiSystem протестирована четырехканальная оптическая распределительная сеть, построенная с использованием принципов построения матрицы Батлера. В качестве функционального эквивалента линии задержки мы успешно применили ВБР в режиме компенсатора дисперсии, что позволило точно смоделировать изменение фазы радиосигнала. Управление фазой было переведено в оптический диапазон – найдены точные значения длин волн лазеров (в нанометрах), которые на выходе формируют необходимую сетку дискретных фазовых задержек.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список литературы

1. Патент 2757538С1. Российская Федерация, МПК H01Q21/00. Диаграммообразующее устройство: № 2020143539: заявл.29.12.2020: опубл.. 18.10.2021/ А. П. Горбачев, Ю. Н. Паршин. – 32 с.
2. Летавин, Д. А. Разработка макета матрицы Батлера для активной фазированной антенной решетки с использованием технологий радиофотоники / Д. А. Летавин – Казань: Уральский федеральный университет, 2023. – 28 с.
3. Shahoei H. Delay Lines / H.Shahoei, Y. Jianping – Ottawa: University of Ottawa, 2014. – Р. 4.
4. Винсент, Дж. Урик-мл. Мир фотоники: Основы микроволновой фотоники / Дж. Урик-мл. Винсент, Д. МакКини. Джейсон, Кейт Дж. Вильямс. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 376 с.
5. Фирсов-Шибяев, Д. О. Диаграммообразующая система оптического типа для многолучевых АФАР / Д. О. Фирсов-Шибяев. — Москва: НИУ «Высшая школа экономики», 2013.— 216 с.
6. Щетинин Н. Н. Матричные схемы батлера в СВЧ-диапазона / Н. Н. Щетинин, Р. Н. Андреев, М. Ю. Чепелев, В. А. Мельник // Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний России. – С. 78-85.
7. A Novel Design Method for Blass Matrix Beam-Forming Networks / F. Casini, R. V. Gatti, L. Marcaccioli, R. Sorrentino. – Perugia: University of Perugia, Dept. of Electronic and Information Engineering, 2007. – P.5
8. Радиотехнические системы : учебник для вузов / под общей редакцией М. Ю. Застела. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2026. — 495 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-06598-5.
9. Основы радиоэлектроники : учебник для среднего профессионального образования / под общей редакцией М. Ю. Застела. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2026. — 495 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-10313-7.

10. Антенно-фидерные СВЧ-устройства: учебное пособие / под редакцией Ю. Е. Седельникова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Казань : КНИТУ-КАИ, 2025. — 244 с. — ISBN 978-5-906668-39-4.

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES FOR CONSTRUCTING ULTRA-WIDEBAND BEAM-FORMING DEVICES OF PHASED ANTENNA ARRAYS USING THE PRINCIPLES OF RADIOPHOTONICS

B. R. Gapterakhimov, A. A. Kuznetsov

Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupokev-KAI
10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. This paper presents the research and development of methods for creating controlled phase shifts that can be used in ultra-wideband active phased array antennas (APAA). It examines in detail the problem of phase frequency dependence arising from the use of fixed time delays and models a tunable photonic beamforming system based on fiber Bragg gratings (FBGs) that controls the laser wavelength. Simulations of a four-channel distribution network were conducted in the OptiSystem software environment, where the delay functions were performed by dispersion compensation components.

Keywords: beamforming devices, active phased array antenna, fiber Bragg grating, delay line, Butler matrix.

Дата представления статьи в редакцию 02.08.2026