

К реализации технологий радиофотоники в АФАР радиолокационных комплексов

М.Б. Митяшев

В статье рассматриваются базовые подходы к построению многофункциональных активных фазированных антенных решёток (АФАР) радиолокационных комплексов, пути повышения их технических и эксплуатационных характеристик на основе технологий радиофотоники. Конкретизируются подсистемы АФАР, где внедрение радиофотоники даёт ощутимый выигрыш. Приводятся примеры практической реализации узлов АФАР с применением технологий радиофотоники.

Ключевые слова: радиолокатор, активная фазированная антенная решётка, радиофотоника, полупроводниковый лазер, волоконно-оптическая линия связи, линия задержки, фотопередатчик, фотоприемник, фазовращатель, модулятор, приёмо-передающий модуль, аналого-цифровой преобразователь.

1. Введение

Развитие средств воздушного нападения требует использования высокопотенциальных радиолокационных комплексов (РЛК), основанных на применении активных фазированных антенных решёток [1]. Наряду с повышением энергетического потенциала за счет совершенствования элементной базы, современные АФАР развиваются в направлении создания антенных решёток с многоканальной пространственной обработкой принимаемых сигналов.

В решении задачи улучшения ТТХ РЛК с АФАР ведущую роль играет применение современных технологий, включая развивающееся направление радиофотоники.

Применение в антенных устройствах с АФАР технологий радиофотоники позволит повысить рабочую полосу частот, стабильность основных параметров, помехозащищённость и улучшить массогабаритные характеристики антенных устройств с приёмо-передающими АФАР, в том числе:

- снижение потерь в линиях передачи сигналов;
- повышение стабильности и повторяемости АФЧХ от канала к каналу в диапазоне рабочих частот и температур;
- повышение характеристик ЭМС / помехозащищённости каналов;
- повышение пропускной способности цифровых каналов передачи информации систем управления и контроля;
- возможность уплотнения сигналов – снижение числа линий передачи распределительных систем АФАР;
- аналого-цифровое преобразование принимаемых СВЧ сигналов на несущей частоте – в перспективе;
- улучшение массо-габаритных характеристик передачи, приема, распределения, съёма сигналов и устройства диаграммообразования АФАР (особенно актуально для мобильных РЛК).

В связи с этим приобретает актуальность разработка перспективных АФАР с использованием технологий распределённых систем возбуждения и приема, разводки и съема сигналов [2], аналого-цифровых преобразователей и устройств диаграммообразования на базе радиофотоники. Предложены оптические схемы, основанные на акустооптических цепях в интегрально-оптическом исполнении [3–5], методах Фурье-оптики [6–8], методах Бреговских волоконных решёток [9, 10].

Необходима разработка элементов, функциональных узлов и составных частей подсистем АФАР на основе оптико-электронных и электронно-оптических преобразователей, фотопередатчиков, фотоприемников, усилителей, линий задержки, волоконно-оптических линий, сумматоров, делителей, разъёмов, удовлетворяющих техническим требованиям, предъявляемым к соответствующим подсистемам АФАР.

2. Концепция построения крупноапертурных АФАР

Наиболее перспективной концепцией построения АФАР является блочно-модульная конструкция, которая дает широкие возможности по управлению формой диаграммы направленности (ДН), созданию многолучевых ДН, обеспечивает гибкость в управлении АФАР на передачу и приём во всех режимах РЛС и позволяет унифицировать базовые сменные блоки и модули по функциональным узлам и используемой элементной базе.

АФАР охватывается сложными распределёнными системами разводки и съёма СВЧ сигналов, сигналов опорных и гетеродинных частот, импульсов синхронизации, сигналов управления и контроля. Антенное устройство содержит устройство диаграммообразования, блок АЦП (в случае аналого-цифрового преобразования принимаемых сигналов на полотне АФАР на выходах подрешёток). Требуется также система юстировки каналов АФАР в диапазоне частот и температур.

Перечисленные системы и устройства АФАР, реализуемые на основе СВЧ микроэлектроники и СВЧ трактов (волноводов, кабелей), могут быть к настоящему времени реализованы на основе технологий радиофотоники для качественного улучшения технических и эксплуатационных характеристик АФАР.

Обобщённая блок-схема приёмо-передающей АФАР с многоканальной пространственно-временной обработкой сигналов приведена на рис. 1. Полотно АФАР функционально разбивается на N подрешёток с суммарным выходом, состоящих из одинаковых групп приёмо-передающих модулей (ППМ). Сигналы с выходов подрешёток поступают в блок пространственно-временной обработки, где формируются диаграммы направленности (ДН) АФАР и осуществляется подавление активных помех. С выходов ДН сигналы поступают в устройство обработки сигналов.

Красным контуром очерчена область применения радиофотоники в АФАР.

На рис. 2а, 2б приведён эскиз несущей металлоконструкции АФАР модульного построения.

Выбор размера подрешётки АФАР представляет собой компромиссную задачу – с одной стороны, число подрешёток должно быть достаточным для качественного цифрового диаграммообразования и обеспечения режимов работы АФАР, с другой стороны, размер подрешётки должен быть достаточным для размещения в ней аппаратуры приёма и преобразования сигналов.

На рис. 3 и 4 приведена компоновка 16-ти канального ППМ и блока подрешётки из 16-ти ППМ-16.

На рис. 5 приведён вариант исполнения мобильного радиолокатора с АФАР диапазона «Х».

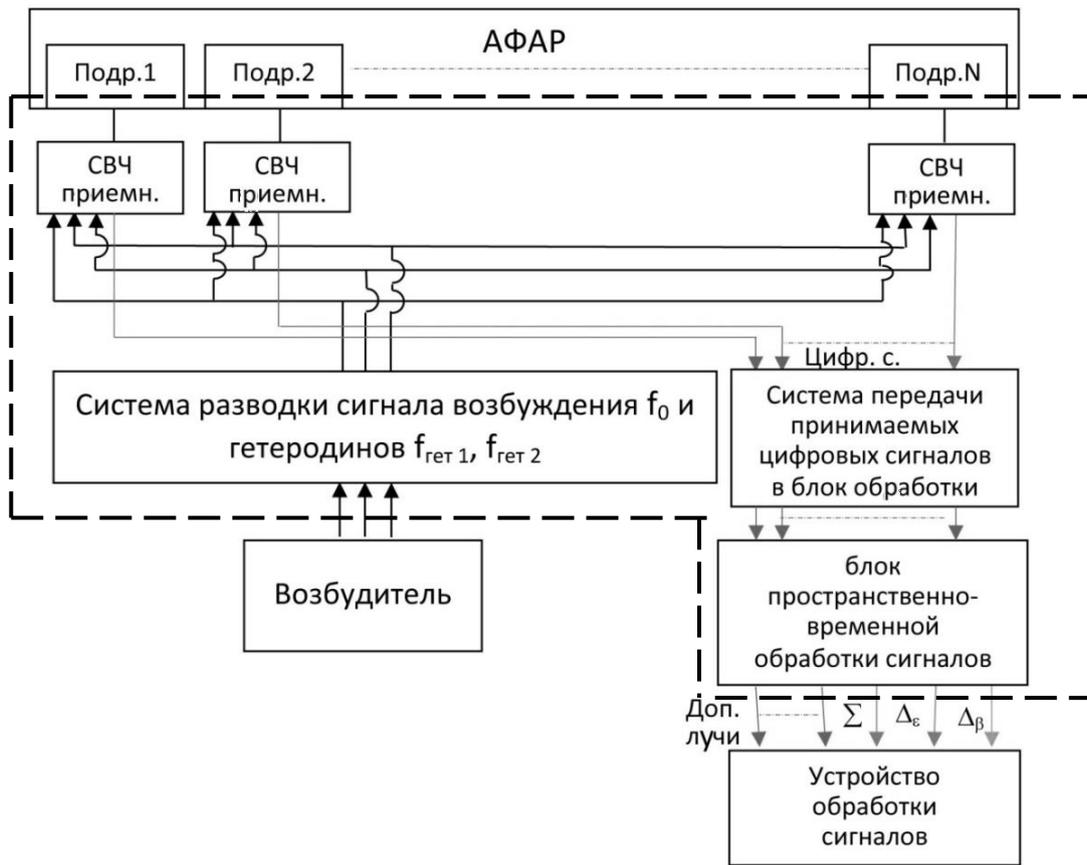


Рис.1. Блок-схема АФАР

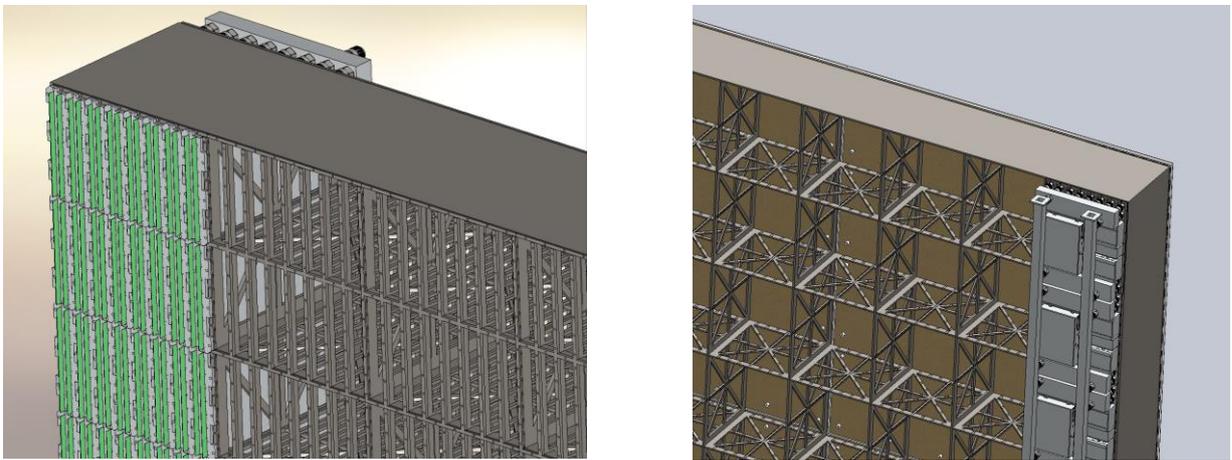


Рис. 2. Фрагмент полотна АФАР
 а) со стороны эфира; б) со стороны обслуживания

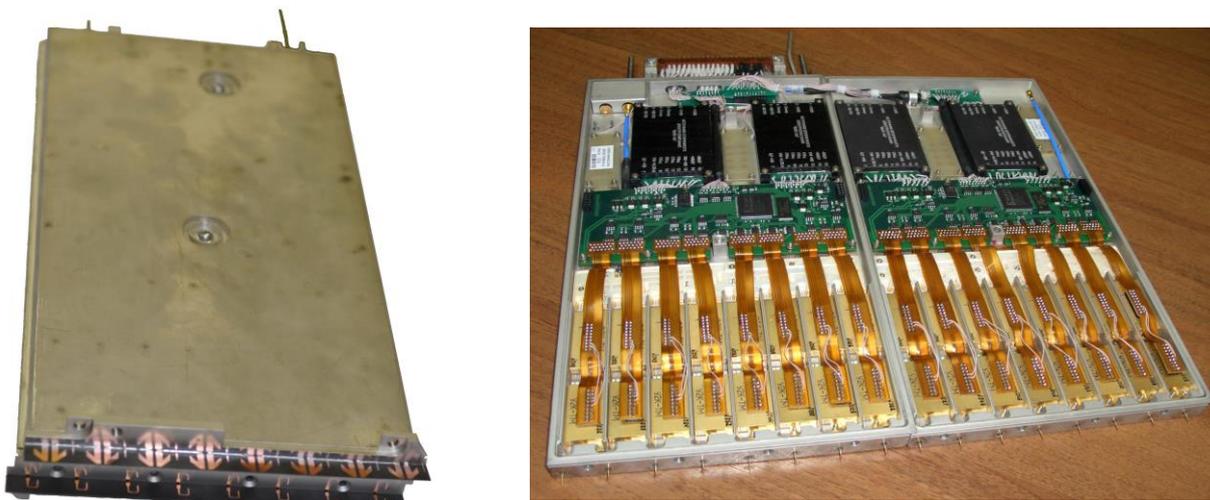


Рис. 3. Приёмо-передающий модуль ППМ-16



Рис. 4. Блок подрешётки

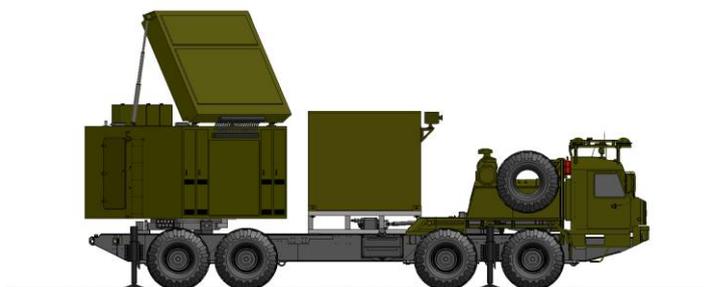


Рис. 5. Пример компоновки мобильного радиолокатора с АФАР

3. Требования к характеристикам АФАР РЛК и узлам радиофотоники

Требования к характеристикам крупноапертурных АФАР РЛК должны обеспечивать сочетание высоких значений потенциала, угловой точности и разрешения целей в сочетании с высокой чувствительностью приёмных каналов РЛС, что влечёт высокие требования к динамическому диапазону входных сигналов, требует высокой точности управления амплитудами и фазами коэффициентов передачи передающих и приёмных каналов АФАР и степени соустирковки каналов в диапазоне рабочих частот и температур на большой площади раскрыва АФАР.

Ниже приведены ориентировочные требования к характеристикам крупноапертурной АФАР РЛК, включающей аппаратуру с применением технологий радиофотоники:

- число приёмо-передающих каналов АФАР..... свыше 10 000;
- число оптических входов/выходов АФАР..... до 128;
- число каналов устройства диаграммообразования..... до 32;
- точность управления амплитудой коэффициентов передачи каналов АФАР..... 0,5 дБ;

- точность управления фазой коэффициентов передачи каналов АФАР.....5°;
- состав систем распределения/съема сигналов и устройства диаграммобразования

АФАР:

- передающие электрооптические модули;
- приёмные оптоэлектронные модули;
- оптические кабели;
- оптические разветвители/сумматоры;
- оптические усилители;
- оптические линии задержки;
- оптические разъёмы;
- оптические фазовращатели;
- гигагерцовые АЦП;
- длина волоконно-оптических кабелей.....до 50 м;
- скорость передачи цифровых сигналов.....до 100 Мбит/с;
- мощность СВЧ сигнала на входе системы возбуждения АФАР.....до 1 Вт;
- мощность СВЧ сигнала на выходе каналов системы возбуждения АФАР...до100 мВт;
- соотношение сигнал/шум приёмных каналов в полосе анализа в полосе ~ 1000 кГц.....не хуже минус 125 дБс/Гц;
- динамический диапазон СВЧ сигналов на входе приёмных оптических каналов (выходах подрешёток).....90 дБ;
- интегральный коэффициент шума приёмных каналов устройства диаграммобразования, приведённый ко входу приемо-передающих каналов АФАР.....не более 3,5 дБ.

Исходя из рассматриваемого построения АФАР, технологии радиофотоники могут вводиться поэтапно – на уровне подрешёток, приемо-передающих модулей и приемо-передающих каналов. В любом варианте ближайшими наиболее подготовленными к практической реализации являются подсистемы распределения и съёма аналоговых СВЧ, а также цифровых локационных, управляющих и контрольных сигналов на основе ВОЛС.

Основными элементами оптической схемы АФАР являются полупроводниковый лазер, одномодовые оптические волокна и кабели, делители оптических сигналов (оптические разветвители), оптические соединители (разъёмные и неразъёмные), оптические усилители, модуляторы, фотоприемники.

Для решения задач построения АФАР на базе технологий радиофотоники необходима разработка следующих устройств:

- высокостабильных одночастотных полупроводниковых лазеров с выходной мощностью от 15 до 100 мВт, на сетку длин волн от 1200 до 2000 нм с одномодовым и поляризованным волокном;
- полупроводниковых лазеров с прямой модуляцией на длины волн 1310 и 1550 нм, выходной мощностью от 10 мВт и полосой частот модуляции до 20 ГГц;
- электронно-оптических модуляторов и модуляторов поглощения с полосой частот до 20 ГГц (100 ГГц) и вносимыми потерями не более 4 дБ;
- аналоговых передающих оптических модулей с полосой до 20 ГГц (100 ГГц) и дифференциальной эффективностью не менее 180 мВт/А;
- аналоговых приёмных оптических модулей с полосой до 20 ГГц (100 ГГц) и квантовым выходом не менее 0.8 А/Вт;
- оптических усилителей с выходной мощностью до 1 Вт;
- малошумящих оптических усилителей с выходной мощностью до 10 мВт;
- оптических дискретных фазовращателей (на коммутируемых линиях задержки), разрядность 6, диапазон регулировки фазы 360°, с компенсацией потерь;
- АЦП с частотой входных сигналов;

- оптических переключателей микромеханических (электронных) с потерями не более 0.5 дБ, ресурсом не менее 10^7 переключений и быстродействием порядка 5 мс (5 нс);
- пассивных элементов волоконно-оптических трактов:
 - миниатюрных оптических соединителей с затуханием не более 0.3 дБ,
 - вращающихся оптических соединителей с затуханием не более 2 дБ,
 - планарных оптических разветвителей и ответвителей,
 - оптических фильтров,
 - оптических изоляторов и циркуляторов,
 - фиксированных линий задержки (задержка до 20 нс),
 - одномодового радиационно стойкого оптического волокна с углеродным покрытием, бортовых и полевых оптических кабелей.

4. Реализация радиопотоники в АФАР

Разработка приборов на основе радиопотоники, включая подсистемы для АФАР, осуществляется ведущими мировыми фирмами: GENERAL ELECTRIC, REYTHEON CO, HUGHES AIRCRAFT CO, THE BOEING CO, THARLES S.A., DAIMLER CHRYSLER AG, ZHOU WEIMIN, HPOR GRUMMAN CO, WALMORE ELECTRONICS LTD.

Ряд российских разработчиков и изготовителей компонентов радиопотоники приведен в табл. 1.

Таблица 1

Компонент фотоники для АФАР	Предприятия
Оптоэлектронный преобразователь (ОЭП)	ООО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» ОАО «НПП «Инжент» ЗАО «НИИ МВ» ОАО «ЦНИИ «Электрон» ОАО «НПП «Восток» ОАО «Московский Завод «Сапфир» ОАО «НПО «Орион» ОАО «НПП «Пульсар» ИФП СО РАН
Электронно-оптический преобразователь (ЭОП)	ООО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» ОАО «Восход»-КРЛЗ ЗАО «НПП «РЕФ-Оптоэлектроника» Институт лазерной физики СО РАН ЗАО «НИИ МВ» ОАО «НИИ «Волга» ИФП СО РАН
Оптическая управляемая линия задержки	ЗАО «НИИ МВ» НИИСИ РАН ЗАО «ЦНИТИ «Техномаш-ВОС» ЗАО «Центр ВОСПИ»
Оптический сумматор	ЗАО «НИИ МВ» НИИСИ РАН
Оптический ответвитель	ЗАО «НИИ МВ» НИИСИ РАН ЗАО «Центр ВОСПИ»
Оптический (фотонный) диаграммоформирователь	ЗАО «НИИ МВ» НИИСИ РАН

Ниже приводятся примеры российских разработок.

Линии задержки

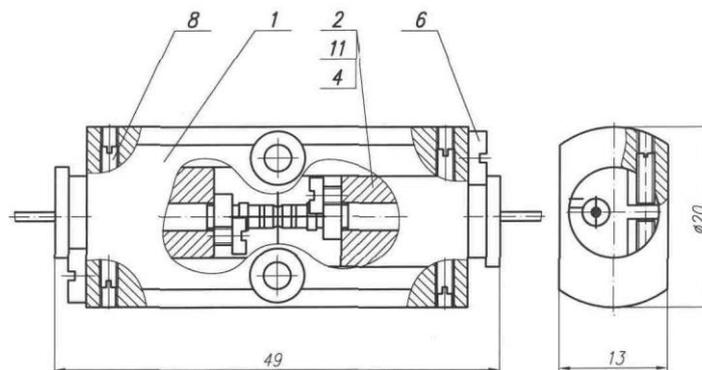
Активные и пассивные волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗА и ВОЛЗ) применяются для построения волоконно-оптических фазовращателей и волоконно-оптических программируемых линий задержки. Для построения функциональных узлов необходимы как регулярные ВОЛЗ и ВОЛЗА, так и нерегулярные.

ВОЛЗ для построения функциональных узлов ФАР и АФАР имеют ряд особенностей.

Особенностью ВОЛЗ для фазовращателей является необходимость обеспечения постоянства шага приращения задержек для регулярных ВОЛЗ.

Перестраиваемая волоконно-оптическая линия задержки может быть построена на базе оптических коллиматоров, построенных с использованием шариковых микролинз. Технология изготовления шариковых микролинз была освоена в ЗАО «ЦНИТИ «Техномаш-ВОС».

Конструкция перестраиваемой ВОЛЗ на коллиматорах из микролинз представлена на рис. 6.

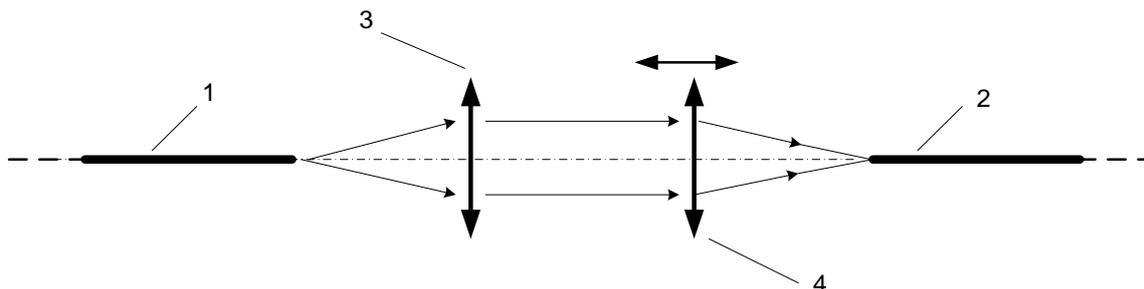


1 – корпус, 2 – держатель, 4 – винт М2Х6, 6 – винт М3Х16,
8 – винты М2Х6, 11 – коллиматор

Рис. 6. Конструкция перестраиваемой ВОЛЗ

Изменение задержки оптических сигналов осуществляется за счет изменения длины оптического пути между составными частями коллиматора.

Принцип регулирования оптического пути поясняется на рис. 7.



1, 2 – отрезки ОВ, 3 – неподвижная микролинза, 4 – подвижная микролинза.

Рис. 7. Схема оптического коллиматора с регулированием оптического пути

Внешний вид перестраиваемой ВОЛЗ представлен на рис. 8.

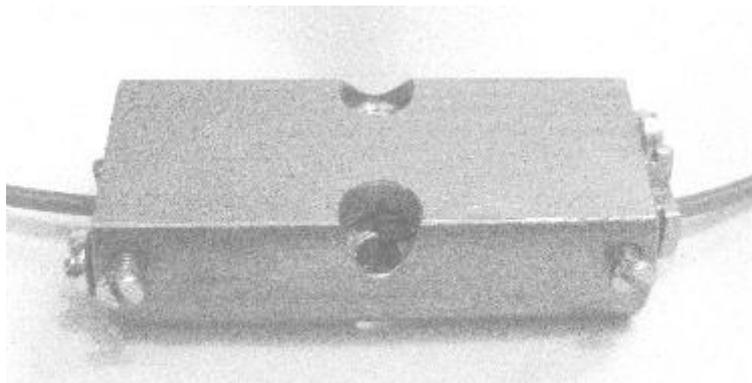


Рис. 8. Внешний вид перестраиваемой ВОЛЗ

Фотоприемники

На рис. 9 представлен Инфракрасный высокочастотный фотодиодный модуль.

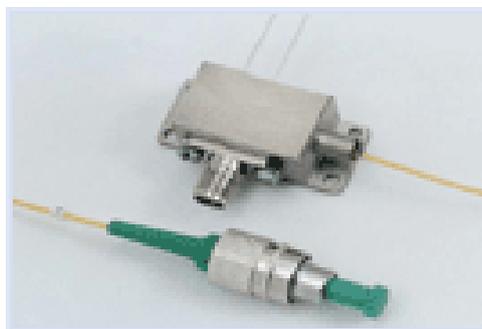


Рис. 9. Инфракрасный высокочастотный фотодиодный модуль ИФПМ 1-10 с рабочим диапазоном оптического излучения 1200 – 1620 нм (изготовитель: ОАО «Научно-производственное предприятие «Инжект», г. Саратов)

Свойства:

- Чрезвычайно низкие шумы обратного отражения.
- Широкая полоса частот.
- Герметичный стандартный корпус типа «Баттерфляй».
- Низкий темновой ток.

Описание:

- Фотоприемный модуль с одномодовым волоконно-оптическим входом ИФПМ 1-10 предназначен для применения в системах волоконно-оптической передачи, измерительном и другом оборудовании широкого применения в качестве преобразователя оптического излучения в электрический сигнал.
- Выход электрического сигнала осуществляется через высокочастотный разъем SMA с волновым сопротивлением 50 Ом. Фотодиод поставляется в стандартном корпусе типа «баттерфляй» с вводом через одномодовое волокно 9/125 мкм и разъем FC/APC.
- Фотодиодный модуль имеет чрезвычайно низкое обратное отражение шумов в волоконно-оптическую линию связи.

Диапазон рабочих длин волн фотоприемника	1300 – 1550	нм
Чувствительность номинальной длины волны		
1300 нм	0.70	А/Вт
1550 нм	0.80	
Спектральный диапазон при чувствительности не менее 0.7 А/Вт	120 0	162 0 нм
Темновой ток при $V_b = 10$ В		2 нА
Уровень обратного отражения входного оптического сигнала		-50 дБ
Емкость фотодиода		0.25 пФ
Диапазон рабочих температур	-20	+55 °С
Диапазон температур хранения	-40	+70 °С
Рабочая полоса частот (-3 дБ. 50 Ом)	0.01	10 ГГц
Выходное сопротивление	40	50 60 Ом
Напряжение смещения	5	5 10 В

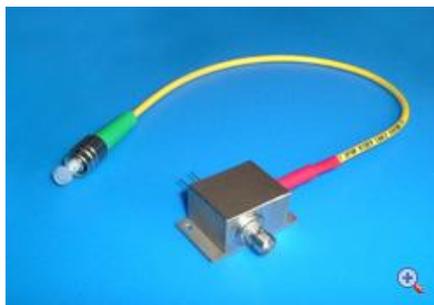


Рис. 10. Широкополосный микроволновый InGaAs PIN фотоприёмник ДФДМШ40-16 (изготовитель: Научно-производственная фирма «ДИЛАЗ», г. Москва)

Особенности:

- Полоса пропускания 0.01–16 ГГц.
- Диапазон спектральной чувствительности 980-1650 нм.
- Низкое обратное отражение.
- Конструкция с вводом излучения через подложку.
- Одномодовое оптоволокно с оптическим разъемом.
- Коаксиальный СВЧ выходной разъем SMA-типа.

Области применения:

- Высокоскоростные цифровые или широкополосные аналоговые волоконно-оптические линии связи.
- Техника антенн.
- Микроволновые линии задержки.
- СВЧ испытательное оборудование.
- Приемные модули с СВЧ предусилителем.

Оптические устройства коммутации

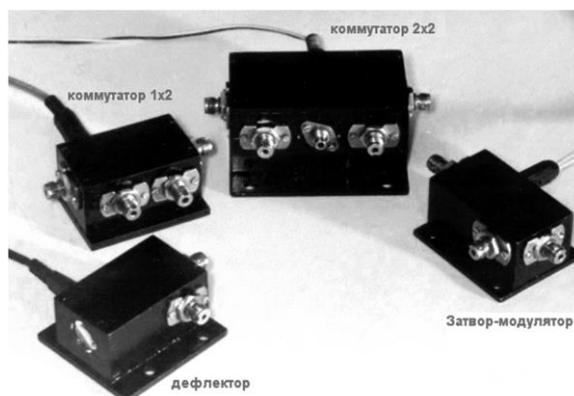


Рис. 11. Устройства коммутации СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов [11]

Передача и распределение сигналов

На рис. 12 показана схема эквифазной 6-ти уровневой коаксиально-полосковой СВЧ разводки АФАР на 128 каналов, формирующая суммарный передающий и моноимпульсные приемные каналы. Разводка весьма сложна по составу и конструкции. Переход на оптическую систему здесь особенно актуален.

На рис. 13–15 иллюстрируется пример разработки системы распределения СВЧ сигнала передающего канала АФАР (ЗАО «Центр ВОСПИ»).

Проблема усугубляется при необходимости разводки по полотну сигналов частот гетеродинов, если выходы приемных каналов подрешёток АФАР («X»-диапазона) являются цифровыми, поскольку современные АЦП, с разрядностью 12 и выше, работают на мегагерцовых частотах.

Конструкция цифровой АФАР радикально упрощается, если оцифровывание принимаемых сигналов производится непосредственно на несущей частоте. Тогда нет необходимости в системах разводки гетеродинных сигналов и съёма принимаемых сигналов основной частоты. Исчезают приёмные ПЧ модули и связанные с ними привносимые паразитные составляющие. Ввиду этого для АФАР сантиметрового диапазона весьма актуальна задача разработки гигагерцовых АЦП с динамическим диапазоном порядка 90 дБ.

Система съёма с антенного полотна и передачи в процессор цифровых сигналов эффективно реализуется с помощью ВОЛС.

Эффективность внедрения технологий радиوفотоники в АФАР РЛК определяется повышением технико-эксплуатационных характеристик АФАР с учетом стоимостных показателей сравнительно с затратами на достижение (если это возможно) аналогичных показателей с помощью традиционных подходов.

К устройствам на основе радиوفотоники для АФАР РЛК предъявляются высокие требования, в то же время их реализация позволит существенно повысить ряд важных технических и эксплуатационных характеристик АФАР.

На российских предприятиях имеется задел по созданию элементов и устройств для построения АФАР на базе радиوفотоники. Развитие данного направления актуально и требует серьезной финансовой и организационной поддержки.

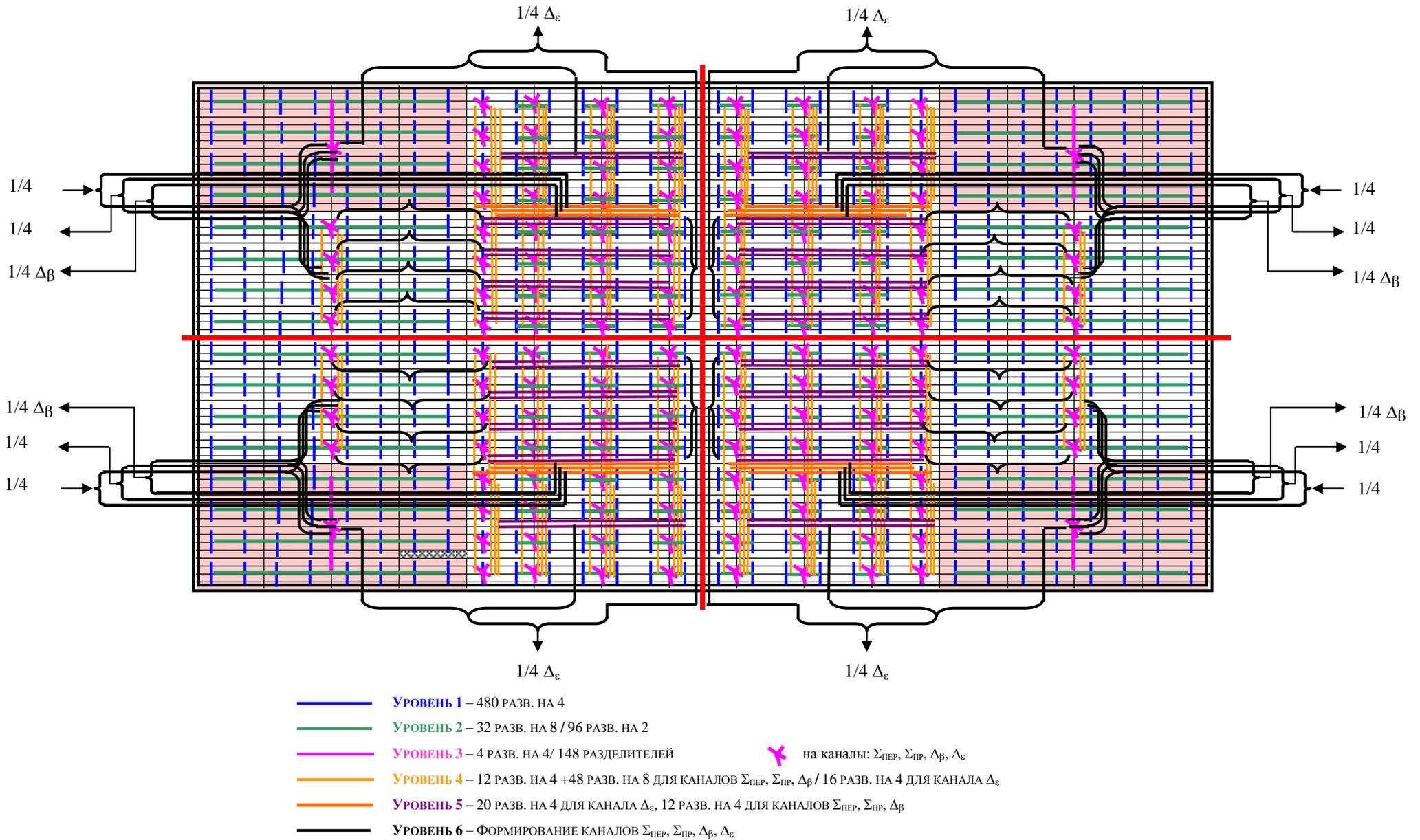


Рис. 12. Схема СВЧ разводки АФАР
 (эту схему, выполненную в цвете, можно посмотреть на сайте журнала)

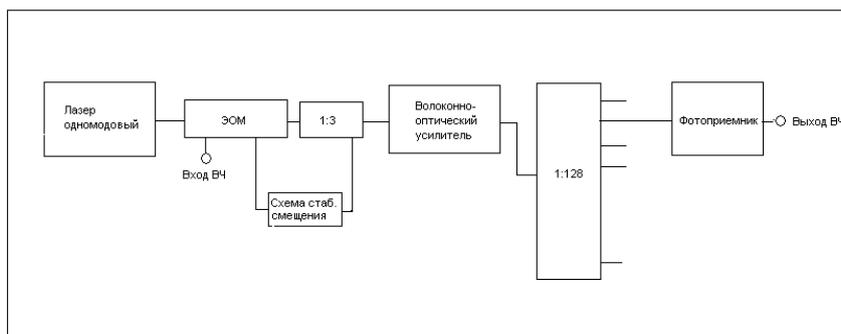


Рис.13. Блок-схема аналоговой линии. ЭОМ – электронно-оптический модулятор, 1:3 – оптический ответвитель 30%, 1:128 – оптический разветвитель на 128 каналов

Используемые модули:

1. Одночастотный лазер А1905LMI $\lambda=1542.52$ нм производства «AlcatelOptronics».
2. Электрооптический модулятор SDLIOAP-MOD9170 производства «SDL, Inc.».
3. Оптический ответвитель 1:3 производства ЗАО «Центр ВОСПИ».
4. Схема стабилизации смещения производства ЗАО «Центр ВОСПИ».
5. Волоконно-оптический усилитель ВΟΥ EAU-800-Cx-RN производства ООО «ИРЭ-Полюс».
6. Оптический разветвитель на 128 каналов производства ЗАО «Центр ВОСПИ».
7. Фотоприемник ДФДМ40-012 производства ООО «Дилаз».



Рис.14. Макетный образец оптического передатчика, включающего одночастотный лазер А1905LMI, электрооптический модулятор SDL IOAP-MOD9170, схему автоматической стабилизации смещения модулятора



Рис.15. Макетный образец оптического разветвителя на 128 каналов (выход на 2 канала)

Литература

1. *Ненартович Н.Э., Митяшев М.Б.* Из практики разработки активных фазированных антенных решёток, Вестник МГТУ МИРЭА, 2014. № 3, Вып. 4, С.173–188.
2. *Бахрах Л. Д., Зайцев Д. Ф.* Экспериментальное исследование макета многоканальной сверхширокополосной фазостабильной волоконно-оптической разводки СВЧ сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2003. Вып. 5. С. 3–6.
3. *Gesell L.H., Feinleib R.F., Lafuse J.I., Turpin T.M.* Acousto-optic control of time delay for array beam steering, SPIE, 1994, vol.2155, P. 194.
4. *Maak P., Frigyes I., Jakab L., Habermayer I., Gyukies M., Richter P.* Realization of true-time delay lines based on acousto optics. IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 20, April 2002, P. 730–739.
5. *Nabeel A. Riza* Acoustic-optic liquid-crystal analog beam former for phased-array antennas. Applied Optics, 1994, vol. 33 (17), P. 3712–3724.
6. *Koepf G.A.* Optical processor for phased-array antenna beam formation, Proc. SPIE, 1984, vol. 477, P. 75–81.
7. *Anderson L.P., Boldissar F., Kunath R.* Antenna beamforming using optical processor. In 1987 AP-S Int. Symp. Dig., June 1987, P. 431–434.
8. *Yoshihiko Konishi, etc.*, “Carrier-to-Noise Ratio and Sidelobe Level in a Two-Laser Mode Optically Controlled Array Antenna Using Fourier Optics” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1992, vol. 40, pp.1459–1465.
9. *Molony A., Edge C., and Bennion I.* Fiber grating time delay element for phased array antennas. Elec. Lett., 1995, vol. 31, P. 1485–1486.
10. *Cruz J.L., etc.* Chirped fiber gratings for phased-array antennas. Electron. Lett., 1997, 33(7), P. 545–546.
11. *Перепелицын Ю.Н.* Устройства обработки оптического сигнала на основе фототоковой доменной неустойчивости. «Микроэлектроника СВЧ-2012», Санкт-Петербург, 2012. С. 3–24.

Статья поступила в редакцию 27.03.2015

Митяшев Михаил Борисович

к.т.н., начальник СКБ ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», с.н.с., доцент кафедры радиолокации, управления и информатики МФТИ (141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Циолковского, 2, кв. 13), тел. 8(985) 252-99-90, e-mail: mityashev.mikhail@yandex.ru

On the implementation of radio-photonic technologies in APAA of radar systems

Michael B. Mityashev

In this paper, basic approaches to development of active phased antenna arrays (APAA) for radar systems and the ways of their technical and exploitation characteristics improvement using radio-photonic technologies are considered. APAA subsystems are specified where radio-photonic technologies give tangible benefits. Examples of APAA radio-photonic elements implementation are illustrated.

Keywords: radar, active phased antenna array, radio-photonic, semiconductor laser, communication fiber-optic line, delay line, photo-transmitter, photo-receiver, phase-shifter, modulator, T/R module, analog-to-digital converter.