

С.И. Иванов, А.П. Лавров, И.И. Саенко

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Диаграммоформирующие схемы для приемных ФАР СВЧ диапазона на основе компонентов аналоговых волоконно-оптических линий

Обсуждаются варианты построения диаграммоформирующих схем для широкополосных ФАР СВЧ диапазона с использованием компонентов аналоговой фотоники и волоконно-оптических линий передачи широкополосных радиосигналов.

Ключевые слова: аналоговая фотоника, фазированная антенная решетка, диаграммоформирование, временные задержки, сканирование

1. Стремительное развитие оптических технологий приводит к расширению областей их применения, например, при решении задач диаграммоформирования в многоэлементных фазированных антенных решетках (ФАР) СВЧ диапазона. Высокие системные требования к современным ФАР: число элементов – десятки, сотни и более, мгновенная полоса рабочих частот – до 10-20 ГГц, параллельность обзора – многолучевость или высокое (микросекундное) быстродействие при обзоре пространства, и связанные с этим трудности использования традиционной элементной базы функциональной электроники заставляют обращаться к альтернативным методам их построения, в частности, с применением элементов аналоговой СВЧ фотоники. С начала обсуждения использования оптических технологий для создания диаграммоформирующих схем (ДФС) для многоэлементных ФАР было предложено множество вариантов построения таких схем. В подавляющем большинстве публикаций исследуются схемы ДФС не с традиционным управлением фазами, а с управлением временными задержками сигналов антенных элементов [1-4]. Этот подход называется TTD beamforming (true time delay) – диаграммоформирование с именно временными задержками. Применение при построении ДФС компонентов аналоговых волоконно-оптических линий предполагает преобразование СВЧ сигналов на оптическую несущую, далее – требуемую их обработку, и затем обратное преобразование в СВЧ сигнал. Построение таких линий передачи осуществляется по принципу IM-DD (Intensity Modulation – Direct Detection): модуляция интенсивности оптического излучения в начале линии и прямое детектирование обработанного излучения фотодиодными приемниками на выходе.

С подходом TTD при его оптических реализациях связывают такие преимущества ДФС, как малые размеры, малый вес, малые потери при широкой мгновенной полосе частот, малую подверженность действиям электромагнитных помех, гибкость при механической компоновке и при изменении некоторых параметров ФАР, отсутствие частотной зависимости положения луча при его сканировании, возможность формирования многолучевых диаграмм с независимым управлением [1-4].

Отметим ряд особенностей построения и функционирования (а также и их основные различия) многочисленных предложенных вариантов оптических ДФС, важных с точки зрения их проектирования, реализации, а также общесистемных требований:

- активная ФАР (работа на передачу и на прием) или только приемная ФАР;
- линейная ФАР или двумерная;
- формирование многолучевой диаграммы направленности ФАР (панорамный обзор) или сканирующей однолучевой диаграммы (последовательный обзор) с заданной скоростью;
- использованием одного общего или многих независимых источников оптического излучения – полупроводниковых лазеров;
- использованием лазеров с фиксированной длиной волны излучения или перестраиваемых;
- принципом формирования набора управляемых временных задержек СВЧ сигнала от разных элементов ФАР для обеспечения многолучевого или сканирующего обзора пространства.

В свою очередь, в предлагаемых формирователях временных задержек используются различные подходы, среди которых можно выделить два основных: 1) изменение длины волноведущей среды – переключение элементов оптических линий задержки (волокна или интегрально-оптические волноводы), 2) использование дисперсионных свойств применяемых элементов при перестройке длины волны оптической несущей или / и набора излучателей с разными длинами волн (волновое мультиплексирование).

Над развитием радиочастотной аналоговой фотоники (АФ, иначе – радиофотоники) и ее применением в радиоэлектронных системах различного назначения работают в лабораториях практически всех промышленно развитых стран. Нами были проанализированы ДФС на основе элементов АФ и волоконно-оптических линий, рассматриваемые в публикациях ведущих исследовательских центров и лабораторий (см., например, [2-8]), и выполнен анализ их достоинств и недостатков в сочетании с анализом характеристик представленных на рынке компонентов [9-10]. Некоторые схемы, выбранные нами в качестве перспективных с учетом возможности их реализации на имеющейся в настоящий момент элементной базе, представлены в данной работе, и акцент сделан на ДФС для приемных ФАР.

2. На рис. 1 представлена схема ДФС для линейной ФАР с призмopodobной структурой формирователя временных задержек [5] на основе системы отражающих брегговских решеток (БР), записанными в волокне в виде гармонической модуляции коэффициента преломления n_E его сердцевины. БР имеют высокий коэффициент отражения на длинах волн $\lambda_R = \Lambda/2n_E$, где Λ – период модуляции показателя преломления. В этой схеме излучение лазера делится оптическим разветвителем $1 \times N$ (N – число излучателей в ФАР) и далее в каждом канале независимо модулируется по интенсивности (элементы ЕОМ) СВЧ сигналами, принимаемыми антенными элементами решетки, и далее поступает в систему выравнивания задержек. Система формирования задержек изображена здесь сверху вниз – в виде «этажей», по числу элементов ФАР. Причем малые задержки формируются в chirпированной БР (chirp – сигнал с линейной частотной модуляцией), а задержки, изменяющиеся при сканировании более крупно, – с помощью

дискретных БР с нарастанием задержек по величине при переходе на нижние этажи. Дискретность структуры БР влечет и дискретность перестройки длины волны лазера, что приводит к дискретному сканированию луча. Количество формируемых лучей определяется количеством отдельных резонансных компонентов, сформированных в каждой из дискретных БР. Минимальный реализуемый шаг приращения задержки определяется минимальным расстоянием между компонентами, т.е. их минимальным размером Δ_{BG} . Реализовать малый шаг изменения задержек при высоком коэффициенте отражения в дискретных БР невозможно, поэтому в канале минимальных задержек и применена чирпированная БР. После формирователя временных задержек излучение поступает на оптический сумматор (Optical coupler) и далее на фотодетектор, который уже выделяет СВЧ огибающую (RF out), соответствующую суммарному СВЧ сигналу, принимаемому всеми элементами ФАР с одного направления, – ее одному лучу. Перестройка частоты лазера приводит к изменению положения плоскости отражения в решетках, к изменению вносимых временных задержек и, соответственно, к изменению положения луча ФАР. Длина волны излучения лазера при его перестройке должна соответствовать резонансным длинам волн в БР.

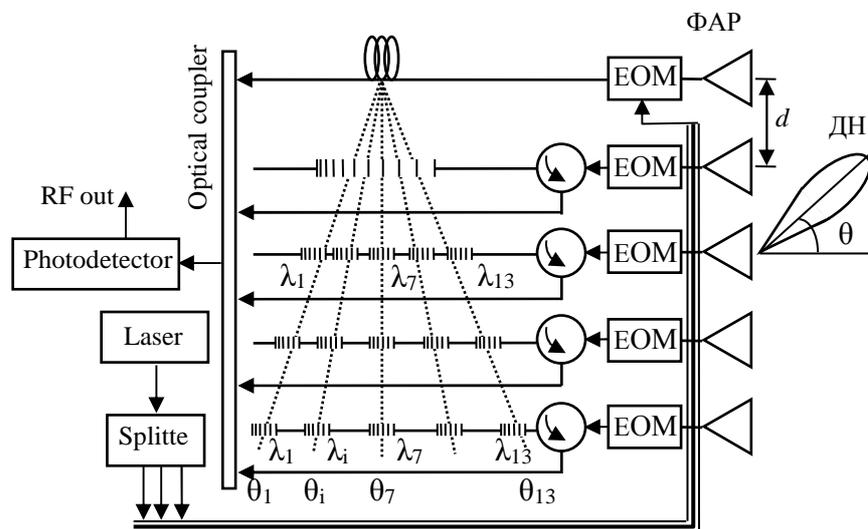


Рисунок 1

В [5] приведены данные экспериментальных исследований элементов такой ДФС (применительно к 5-элементной ФАР): одной чирпированной БР длиной 50 мм и трех дискретных БР длиной до 90 мм, которые содержали по 13 компонент с резонансными длинами волн от 1545 нм до 1560 нм, $\Delta_{BG} = 3$ мм; измерения вносимых брегговскими решетками задержек проводились на частотах до 10 ГГц.

На рис. 2 приведена ДФС, обеспечивающая панорамный обзор – одновременное формирование многих лучей в секторе обзора [6]. Параллельность работы в этой схеме обеспечивается набором из N лазеров (по числу элементов ФАР) с разными, но фиксированными длинами волн ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$), излучение которых модулируется по интенсивности СВЧ сигналами элементов ФАР и далее попадает в сумматор/разветвитель $N \times K$ (“star coupler”) оптических несущих, где K – количество формируемых лучей ФАР. После разветвителя модулированные оптические несущие попадают в каскад

выравнивания временных задержек на основе отражающих БР. Число различных решеток равно числу лучей ФАР. Используются chirпированные (CGU) или дискретные (DGU) БР.

На каждом из K фотодетекторов на выходе происходит сложение N сигналов с разными длинами волн, получившими разные задержки при их отражении от разных участков БР, и их детектирование, т.е. обратный переход к СВЧ сигналам. Таким образом, выходной сигнал, соответствующий отдельному лучу многолучевой диаграммы ФАР, формируется на выходе отдельного фотодетектора. Полученные в [6] оценки показывают, что при ограниченном количестве формируемых лучей ФАР (до 100) верхняя граница полосы частот может составлять более 12 ГГц.

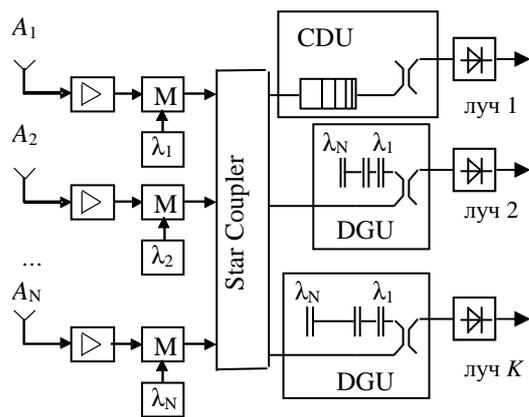


Рисунок 2

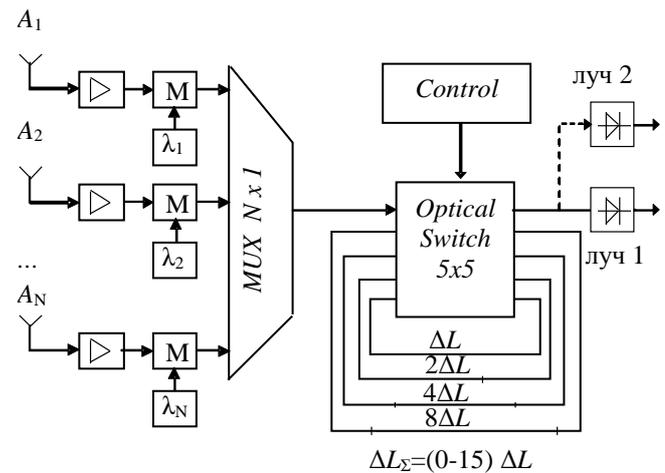


Рисунок 3

В другой ДФС, структурная схема которой приведена на рис. 3, компенсация временных задержек основана на использовании хроматической дисперсии $n(\lambda)$ в материале оптического одномодового волокна, которая проявляется в относительной задержке оптического излучения разных длин волн при их одновременном распространении, при этом величина задержек зависит от длины волокна. Данная схема предложена в [7] и нами видоизменена. Она предназначена для линейной ФАР с N элементами и в ней используется излучение N лазеров с различными (но постоянными), эквидистантно расположенными (шаг $\Delta\lambda$) длинами волн, общая полоса длин волн есть $(N-1)\Delta\lambda$. После модуляции по интенсивности принимаемыми СВЧ сигналами (элементы M) оптические несущие объединяются в единое волокно мультиплексором (элемент MUX $N \times 1$) и поступают в каскад выравнивания временных задержек. Каскад включает в себя один переключатель $n \times n$ (элемент *Optical switch*) и $(n-1)$ отрезков волокна, длины которых изменяются в геометрической прогрессии: $1 \Delta L$, $2 \Delta L$, $4 \Delta L$, ... Управление переключателем (элемент *Control*) позволяет изменять суммарную длину волокна в каскаде с шагом ΔL . Переключение луча по углам может быть произвольным с одинаковым быстродействием. В ДФС используется стандартное одномодовое волокно типа SMF-28 (фирма Corning) с дисперсией D около $17 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$ на длине волны 1550 нм или специальные волокна DCF (dispersion compensating fiber), имеющие значительно большее значение отрицательной дисперсии.

Рассмотрению проблем создания ДФС с применением средств АФ для двумерных (2D) ФАР посвящено значительно меньшее число публикаций, чем для линейных ФАР, при этом рассматриваются главным образом ФАР, работающие на передачу. Из-за большого (сотни, иногда тысячи) числа излучателей ФАР, равного $P \times Q$ (P и Q – число столбцов и строк), для сканирования необходимо иметь большое число различных значений временных задержек. Это число есть $(P \times Q) \times (R_p \times R_q)$, где $(P \times Q)$ – число управляемых линий задержки (ЛЗ), а $(R_p \times R_q)$ – число дискретных значений в каждой ЛЗ, R_p и R_q – это число положений луча ФАР по соответствующей угловой координате – азимут и угол места. Из-за большого итогового числа различных значений временных задержек перспективными представляются ДФС, сочетающие два подхода их формирования: использование и дисперсионных свойств БР, и коммутации коротких отрезков волокон. Нами переработана схема ДФС, представленная в [8], и предложено реализовывать каскад временных задержек в виде двух последовательно включенных ступеней. Первая ступень построена на отрезках волокон с отражательными БР. Это – ступень частотно зависящих задержек. Вторая – на переключении длин коротких волокон, вводимых в тракт распространения оптического излучения. Это – ступень частотно независящих задержек. Определенным недостатком данной схемы (и в целом всех ДФС для 2D ФАР) является большое число переключателей, а также необходимость контроля длин вводимых отрезков волокон и положения отражательных решеток в волокнах с точностью около 0,1 мм.

3. Для приемных ФАР с системной точки зрения важны их статистические (шумовые) характеристики, такие, как выходное отношение сигнал/шум и динамический диапазон. Данные характеристики определяют область применения и конкурентную способность ДФС, но их расчет недостаточно полно отражен в зарубежных и отечественных научных публикациях. Нами разработана методика и проведены расчеты отношения сигнал/шум на выходе некоторых вариантов ДФС для линейной ФАР, работающей в приемном режиме [10]. Подход, используемый в наших расчетах, базируется на рассмотрении математической модели конкретной ДФС (аналогично [11]), отражающей все линейные и нелинейные преобразования сигналов в различных модулях радиочастотной и оптической частей схемы.

Анализ результатов проведенных расчетов основных рабочих характеристик рассматриваемых систем показывает эффективность и перспективность использования выбранных нами схем для реализации ДФС на базе компонентов аналоговой фотоники и волоконно-оптических линий для приемных широкополосных ФАР нового поколения.

Библиографический список

1. Selected papers on photonic control systems for phased array antennas, N.A. Riza - Ed. // Proc. SPIE. – 1997. – V.MS136. – 694 p.
2. Tur M., Yaron L., Rotman R., Raz O. Photonic Technologies for Antenna Beamforming // Proc. OFC.- 2011.- Paper OTnA5.
3. Братчиков А.Н. Волоконно-оптические диаграммообразующие схемы сверхширокополосных фазированных антенных решеток СВЧ- и ММ- диапазонов // Антенны. – 2006, №9. – С. 37.
4. Зайцев Д.Ф. Аналоговая фотоника в антенной технике // Антенны. – 2009, №7. – С. 59-67.

5. Liu Y., Yao J., Yang J. Wideband true-time-delay unit for phased beam forming using discrete-chirped fiber grating prism // *Optics Communications*. – 2002. – (207). – P. 177–187.
6. Minasian R.A., Alameh K.E., Fourikis N. Wavelength-multiplexed photonic beam-former architecture for microwave phased arrays // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 1995. – V.10, N2. – P. 84-88.
7. Ying Yang, Yi Dong, Dawei Liu, Hao He. A 7-bit photonic true-time-delay system based on an 8×8 MOEMS optical switch // *Chinese Optics Letters*. – 2009. – V.7, N.2. – P. 118-120.
8. Jung B.M., Yao J.P. A two-dimensional optical true time-delay beamformer consisting of a fiber Bragg grating prism and switch-based fiber-optic delay lines // *IEEE Photon. Technology Letters*. – 2009. – V. 21, N. 10. – P. 627-629.
9. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. Элементная база аналоговой фотоники: обзор и выбор компонентов для построения диаграммообразующих схем ФАР СВЧ диапазона // Сб. трудов Международной научной конференции "Лазеры. Измерения. Информация". (С.-Петербург, 2013 г.). – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С.92-93.
10. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. Динамический диапазон и отношение сигнал/шум диаграммообразующих систем микроволновых ФАР на базе элементов аналоговой фотоники // Сб. научных трудов III Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. (Москва, 2014 г.). – М.: Изд-во МИФИ, 2014. – С.195-196.
11. Froberg N.M., Ackerman E.I., Cox C. Analysis of Signal to Noise Ratio in Photonic Beamformers // *IEEE Aerospace Conference*, 2006.- Paper 167.