

УДК 681.785.552

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

З. С. Гибалина, В. А. Фадеев

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, Казань 420111, ул. Карла Маркса 10

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2017 г.

Аннотация. Данная исследовательская работа является частью дискуссии о возможности формирования диаграммы направленности на основе оптических принципов. В течение долгого времени наиболее популярным способом формирования диаграммы направленности в фазированных антенных решетках был фазированный сдвиг с использованием аналоговых компонентов. Этот тип фазовращателей имеет несколько недостатков, таких как относительно низкая производительность (скорость) и электромагнитные помехи. Эти недостатки теоретически могут быть решены с помощью внедрения фотонных технологий. Перспектива голограммной дифракционной решетки была описана еще в 1980-х годах, эта область нанотехнологий была значительно развита в предыдущие годы, и теперь мы можем обсудить ее в контексте фазированных антенных решеток. Основная идея содержит возможности данной дифракционной решетки для хранения информации, которая может использоваться для хранения фазовых распределений. Теоретически этот подход может повысить производительность и уменьшить количество элементов в конструкции. Реализация данной нанотехнологии может быть полезна для ограниченного по размерам оборудования, такого как, например, микроспутники. Основная цель данной статьи - представить основные преимущества и недостатки представленной концепции. Основные моменты для предполагаемого моделирования также описаны в данной работе.

Ключевые слова: оптические телекоммуникации, фазовые антенные решетки, дифракционные решетки.

Abstract. This research work is the part of discussion about possibility of the beamforming on the base of optical principles. For a long time the most popular way of the beamforming in phased antenna arrays was a phased shift using analog components. This type of phase shifters has several disadvantages such as relatively low performance and electromagnetic interference. These disadvantages can theoretically be resolved by the implementation of photonic technologies. Works in this branch of research typically describe possibilities of using solutions based on Fiber Grating Prism that is the one of the most promising ways to replace analog phased shifters. However, other possibilities should be also observed. Perspective of diffraction grating were described even in 1980's, this field of nanotechnologies was significantly developed during previous years and now we can discuss it in the context of phased antenna arrays. The main idea contains possibilities of diffraction grating for information storage that can be used for storage of phase distributions. Theoretically, this approach can increase the performance and decrease the number of elements in construction. Implementation of this nanotechnology may be useful for strictly limited equipment such as e.g. micro satellites. The main goal of this paper is to show the main advantages and disadvantages of represented concept. The main points for modeling are also described in this work.

Key words: optical communication, phased antenna arrays, diffraction gratings.

1. Введение

Антенны микроволнового диапазона частот широко используются в различных областях электроники, таких как связь, телевидение, радиолокация, сопровождение движения самолетов и космических систем, а также сбор радиотелеметрии.

Одной из наиболее актуальных проблем антенной отрасли является проектирование и производство антенн с контролируемой диаграммой направленности. В большинстве случаев, необходимым требованием является обеспечение узконаправленного фокуса в сочетании с быстроедействием движения антенного луча в пространстве и широким сектором обзора.

Указанные выше требования лучше всего соответствуют активной антенной решетке с управляемой (в классическом варианте электронными компонентами) диаграммой направленности [1].

Фазовые антенные решетки (ФАР) играют важную роль в современных радиолокационных, гидролокационных и беспроводных системах связи. ФАР используется для повышения точности и скорости определения угловых координат радиосточников в навигационных, радиолокационных и других радиосистемах, где необходимо сузить диаграмму направленности основного лепестка и увеличить скорость сканирования пространства. Сформированная диаграмма направленности зависит от закономерностей отдельных излучателей, их взаимного расположения и числа, а также амплитудного и фазового распределения поля между эмиттерами [1]. Линейная антенная решетка в плоскости антенных элементов (излучателей), расположенных вдоль прямой линии, очень часто используется для формирования управляемой диаграммы направленности. Одним из основных компонентов ФАР является фазовращатель, который определяет контроль диаграммы и производительность системы.

Принцип работы аналоговых фазовращателей основан на физических свойствах ряда материалов, магнитная или диэлектрическая проницаемость которых изменяются под внешним воздействием. Такой материал может быть ферритом или сегнетоэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого зависит от электрического поля.

Активным элементом дискретного фазовращателя является полупроводниковый переключатель, основанный на твердотельном PIN-диоде или транзисторе [2]. Принцип работы подробно описан в [2]. Сигнал переходит к разделителю каналов, а затем к фазовращателям. Фазовращатели управляются одним устройством, которое дает фазовое распределение с шагом $\Delta\varphi$ ($-\pi < \Delta\varphi < \pi$) на фазовращателях. Фазовое распределение зависит от угла основного лепестка диаграммы направленности антенны, а точнее, от того, какой угол образован между антенной линией и фазовым фронтом.

2. Формирования диаграммы направленности фазовых антенных решеток на основе применения голограммных дифракционных решеток

Как это было подчеркнуто в предыдущем разделе, традиционно питающие сети и фазовращатели для фазированных антенных решеток реализуются посредством использования электронных компонентов. Однако возрастающие требования к производительности обнаруживают серьезные ограничения электронных устройств. Например, провода, изготовленные из меди, демонстрируют высокие потери на высоких частотах, что приводит к ограниченной полосе пропускания для сигналов. Кроме того, электронные диаграммообразующие сети имеют относительно большой вес, что ограничивает их использование в бортовых и спутниковых системах. Применение оптических компонентов теоретически позволит достичь таких ключевых преимуществ, как иммунитет к электромагнитным помехам (ЭМП), уменьшение энергетических потерь, миниатюризации размеров и массы. Поэтому данное направление рассматривается как перспективная альтернатива широкополосным антенным решеткам [3].

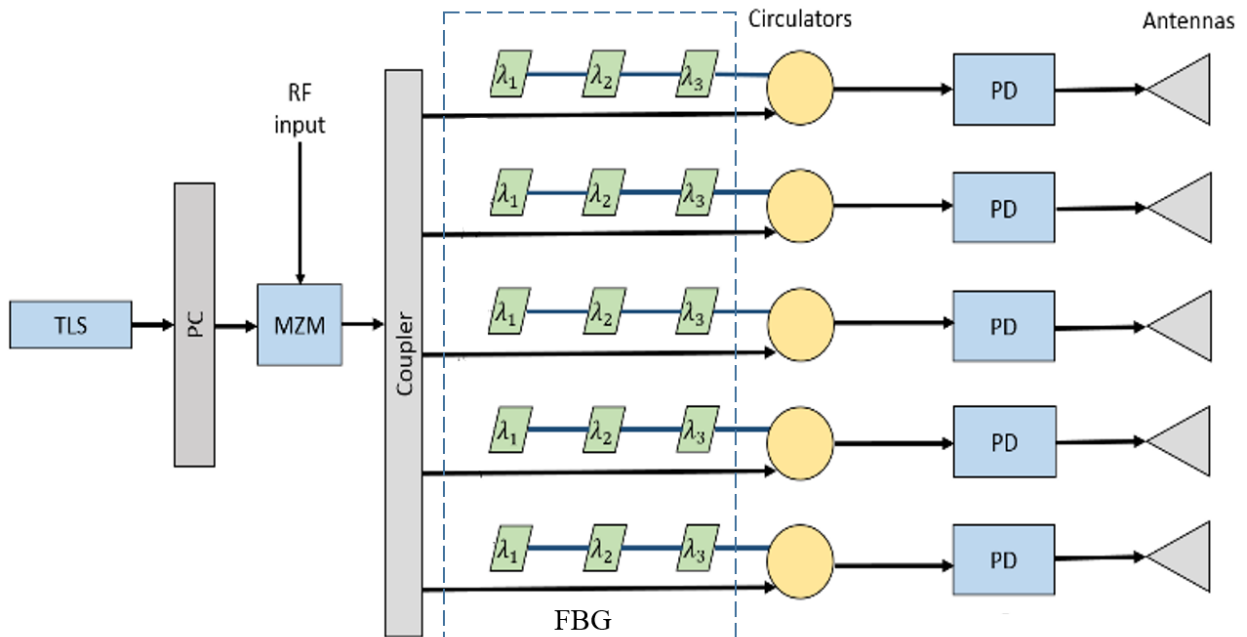


Рис 1. Структурная схема системы формирования диаграммы направленности на основе оптических элементов (фактически, FBG).

Формирование диаграмм направленности на основе фотонных технологий исследовано в ряде областей, таких как передача оптических сигналов в свободном пространстве, волоконной и волноводной оптике. Система формирования диаграмм с фиксированным временем задержки на основе оптики для передачи сигналов в свободном пространстве имеет относительно большой размер и большой вес. На данный момент большинство из представленных в литературе систем реализованы на основе волоконной оптики. Данный подход схематично описан на рис. 1 [3-4].

Преимущество данного устройства заключается в возможности направления луча настраиваемого лазерного источника (TLS) путем простой настройки длины волны [3]. Изначально сигнал подается от TLS на модулятор Маха-Цендера (MZM) через коннектор (PC). Модулятор Маха-Цендера представляет собой оптическое устройство, главным назначением которого является модуляция электрического сигнала входным лучом света. Модуляция может быть направлена на фазу, частоту, амплитуду или поляризацию пучка. Реализация полос модуляции, распространяющихся в гигагерцовом диапазоне, возможна с использованием модуляторов с лазерным управлением [3]. MZM соединен с циркулятором. Циркулятор представляет собой пассивное невозвратное трех- или четырехпортовое устройство, в котором микроволновый или радиочастотный сигнал, поступающий на любой из портов, передается на следующий порт (по порядку вращения). Порт в этом контексте является точкой, где внешний волновод или линия передачи (например, микрополосковая линия или коаксиальный кабель) подключается к устройству. Когда сигнал поступает в циркулятор, он направляется на «линию задержки»: волоконные брэгговские решетки (FBG), которые отражают только желаемую длину волны сигнала. Таким образом, сигнал поступает на фотодетектор (PD), а затем на антенны. Таким образом, сигнал в каждом эмиттере имеет свой собственный фазовый сдвиг. Если мы изменим длину волны в TLS, то изменится и фазовый сдвиг, и угол отклонения луча.

Голографические дифракционные решетки можно рассматривать как еще одну ветвь оптических технологий. Основные перспективы дифракционной решетки были описаны еще в 1980-х годах [5]. Стоит отметить, что данная технология также коррелирует с цифровой голографией [6-7]. Голография представляет собой способ записи и восстановления волнового поля, основанный на регистрации интерференционной картины (интерферограмм). В методе голографии наиболее важна возможность восстановления волнового поля со всеми его амплитудными и фазовыми пространственными распределениями. Эта особенность определяет основное значение голографии с методологической и прикладной точек зрения [8].

Восстановление изображения объекта при записи голограммы является результатом дифракционного разброса восстановленного поля от голограммы до изображения. Данный процесс с достаточной точностью описывается с помощью интегральных преобразований Кирхгофа-Френеля, Френеля или Фурье [8]. Таким образом, если голограмма записана в цифровом виде с использованием соответствующих средств цифровой записи, восстановление комплексной амплитуды волнового поля объекта может быть реализовано цифровой процедурой обработки. Существенное отличие от метода аналоговой цифровой голографии состоит в следующем: процедура дифракционной конвертации записанной цифровой голограммы представляется как матрица дискретных численных значений распределения интенсивности [8]. В нашем случае данная информация является функцией, зависящей от фазового распределения желаемого угла отклонения антенны с фазированной антенной решеткой. Следовательно, мы можем представить данную матрицу следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{k1} & \cdots & \varphi_{kn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где φ – фазовый сдвиг, n – количество элементов антенной решетки, k – номер угла отклонения от главного лепестка диаграммы направленности.

Кроме того, фазовый сдвиг φ должен быть распределен по формуле:

$$\varphi_{lm} = \varphi_{l1} + m \Delta\varphi, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ – шаг фазового сдвига, $l = 1, 2, \dots, k$, $m = 1, 2, \dots, n$.

При проектировании матрицы мы можем учесть специфические параметры конкретного ФАР, которые отражаются в размерности матрицы и в значения ее элементов.

Для моделирования матрица (1) может быть упрощена до следующего представления:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где θ – угол отклонения от главного лепестка диаграммы направленности.

Таким образом, мы можем представить структурную схему системы формирования диаграммы направленности с использованием дифракционной решетки. Сигнал поступает на дифракционную голограмму, в которой заложено распределение фаз. Затем он переходит к ответвителю со своим собственным фазовым сдвигом, затем к фотодетектору, а затем уже к антеннам (рис.2).

Как видно из рисунка 2, система формирования луча на основе дифракционной голограммной решетки имеет ряд преимуществ таких, как уменьшение структурных блоков и, теоретически, возможность миниатюризации размеров.

Что касается возможности моделирования, то голограмма может быть описана в матричном виде дискретных численных значений, поэтому возможен процесс моделирования в таких средах, как, например, MatLab. Алгоритм работы может быть продемонстрирован следующим образом: к примеру, у нас есть матрица, которая содержит распределение фаз по желаемому углу основного лепестка диаграммы направленности. Когда мы выбираем нужный угол в качестве входного параметра, программа выбирает необходимые данные, а затем использует данную информацию для последующего моделирования.

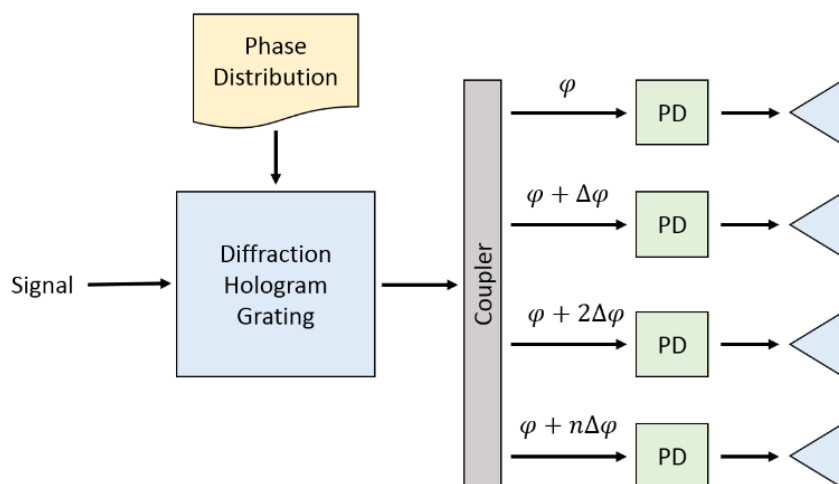


Рис.2. Структурная схема системы формирования диаграммы направленности с использованием голограммной дифракционной решетки.

3. Заключение

В ходе исследования были рассмотрены два основных метода формирования диаграммы направленности фазированных решеток: на базе электронных и оптических компонентов. Основным преимуществом электронного формирования является относительно небольшая стоимость оборудования. Однако такие системы имеют существенные недостатки: большая корреляция между каналами и задержка переключения [9]. Оптические решения являются перспективным способом улучшения возможностей ФАР. Кроме того, следует учитывать не только технологии на основе FBG.

Следует отметить, что концепция, в которой структура ФАР с голограммной дифракционной решеткой адаптирована к оптическому (лазерному) каналу связи также должна быть рассмотрена в последующих работах. Данная реализация, теоретически, может иметь ряд положительных эффектов, таких как миниатюризация и экономное использование энергетических ресурсов.

Литература

1. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л. "Антенно-фидерные устройства." Изд. 2-е, доп. и переработ. М., "Сов. радио", 1974 – с. 399-418.

2. Ведник О.В., Фазированная антенная решетка – глаза радиотехнической системы // Соросовский образовательный журнал, №2, 1997
3. J. Yao, A Tutorial on Microwave Photonics, IEEE photonics society newsletter, 06/2012
4. H. Zmuda, R.A. Soref, P. Payson, S. Johns, E.N. Toughlian, Photonic beamformer for phased array antennas using a fiber grating prism, IEEE photonics technology letters, vol. 9, no. 2, february 1997
5. T. K. Gaylord, M.G. Moharam, Analysis and applications of optical diffraction by gratings, IEEE, 1985
6. B. R. Brown, A. W. Lohmann, Computer-generated binary holograms, IBM Journal of Research and Development, vol. 13, issue 2, March 1969
7. M. Shahabadi, K. Schuyemann, H.-G. Unger, A high-efficiency millimeter-wave holographic power splitter/combiner, IEEE, 1997
8. V. Kildishev, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, Planar photonics with metasurfaces, science vol. 339, 15 march 2013
9. В.П. Рябухо, О.А. Перепелицына, Л.А. Максимова, Цифровая Фурье-голография, учебное пособие, Саратов, 2014
10. H. Shams, M. J. Fice, L. Gonzalez-Guerrero, C. C. Renaud, Frederic van Dijk, A. J. Seeds, Sub-THz Wireless Over Fiber for Frequency Band 220–280 GHz, journal of lightwave technology, vol. 34, no. 20, october 15, 2016
11. G. H. Roeloffzen, A. Meijerink, L. Zhuang, D. A. I. Marpaung, R.G. Heideman, A. Leinse, M. Hoekman, W. van Etten, Integrated photonic beamformer employing continuously tunable ring resonator-based delays in CMOS-compatible LPCVD waveguide technology, ESA-ESTEC Presentation – November 21 2008
12. J. Yao, Microwave Photonics, Journal Of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 3, February 1, 2009
13. Greg Kriehn, Paulo E, X. Silveira, Kelvin H. Wagner, Andrew Kiruluta, Sam Weaver, All optical BEAMTAP beamforming system, 2000 Optical Society of America

14. Meijerink, C.G.H Roeloffzen, L. Zhuang, D. Marpaung, R.G. Heideman, A. Borreman, Wim van Etten, Optical beam forming for phased-array antennas, Fotonica Magazine, February 2007
15. X. Yi, Photonic Beamforming Based on Programmable Phase Shifters With Amplitude and Phase Control, IEEE Photonics Technology Letters, 06/ 2011
16. P. J. Matthews, Practical photonic beamforming, Microwave Photonics, 1999

Ссылка на статью:

З. С. Гибалина, В. А. Фадеев. Концепция формирования диаграммы направленности фазовых антенных решеток на основе применения голограммных дифракционных решеток. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/2/text.pdf>