

## АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ ДЛЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

**А.М.ПАШАЕВ, А.Р.ГАСАНОВ, ДЖ.Г.ДЖАФАРОВ**

*Институт Физики НАН Азербайджана  
AZ 1143, Баку, пр. Г. Джавида 33*

Рассматривается возможность реализации фазовращателей для фазированных антенных решеток на основе использования особенностей фотоупругого эффекта и эффекта оптического гетеродинамирования. Предлагается структурно-электрическая схема акустооптического фазовращателя и анализируется принцип его действия.

### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Актуальность работ, направленных на увеличение точности измерения угловых координат сверхудаленных объектов, predetermined характером задач, решаемых современными радиосистемами. Методы и средства формирования сканируемого в пространстве электромагнитного пучка с малой апертурой являются объектами значительных материальных вложений. При этом решаются следующие задачи: большая излучаемая мощность, быстрый (безынерционный) обзор пространства. В контексте применимости для решения указанных задач антенные решетки (АР) считаются наилучшими [1,2].

Высокая электрическая прочность АР позволяет увеличить излучаемую мощность.

Элементами АР могут быть как слабонаправленные излучатели (щелевые вибраторы, волноводы, диэлектрические стержни, спирали и т. д.), так и остро-направленные антенны (рупорные, зеркальные и др.).

Пространственное угловое разрешение (минимальный угол между двумя различными точками пространства) ограничивается апертурой основного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны [3]. В этом контексте АР обладают высокими потенциальными возможностями. Разрабатываются и внедряются новые типы АР гражданского и военного назначения. При этом большое внимание уделяется вопросу сканирования главного лепестка в пространстве. Широко применяются как электромеханическое, так и электронное сканирование ДН антенны в пространстве.

При электромеханическом сканировании, выполняемым поворотом всей антенны, максимальная скорость движения луча в пространстве ограничена и при современных скоростях летательных аппаратов оказывается недостаточной.

Многоэлементная структура АР указывает на другие возможные пути управления ДН АР. Изменения параметров (частот или фаз) токов, питающих отдельные элементы АР, сопровождаются изменением направления максимального излучения.

Разрабатываются и внедряются АР с частотным сканированием и фазированные антенные решетки (ФАР).

В цепи питания каждого излучателя ФАР должно находиться устройство, обеспечивающее требуемый фазовый сдвиг, - фазовращатель.

В зависимости от характера функциональной зависимости фаз питающих токов от управляющего воздействия различают аналоговые и дискретные фазовращатели. Фазовый сдвиг в аналоговых фазовращателях является непрерывной функцией управляющего воздействия (напряжения или тока). В дискретных фазовращателях фазовый сдвиг задается двоичным кодом.

Для реализации современных аналоговых фазовращателей используют материал, магнитная или диэлектрическая проницаемость которого изменяется под внешним воздействием. Таким материалом может служить феррит или сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость которых зависит от напряженности электрического поля.

Дискретность задания фаз хорошо вписывается в структуру команд управляющей ЭВМ, хотя и порождает некоторые ошибки в задании координат луча антенны, а также приводит к незначительному увеличению уровня боковых лепестков ДН антенны. Однако, при большом числе элементов ФАР возникшие таким путем погрешности усредняются и выходят на уровень, которым в некоторых случаях можно пренебречь.

В диапазонах КВ и УКВ нашли применение в качестве устройств фазирования управляемые линии задержки - коммутируемые отрезки линии с волной  $T$  длиной порядка половины раскрыва ФАР. Такие фазовращатели обеспечивают работу в широком диапазоне частот. Известны СВЧ - фазовращатели, использующие сегнетоэлектрики и газоразрядную плазму, но не нашедшие практического использования из-за низкой температурной стабильности и других неудовлетворительных характеристик.

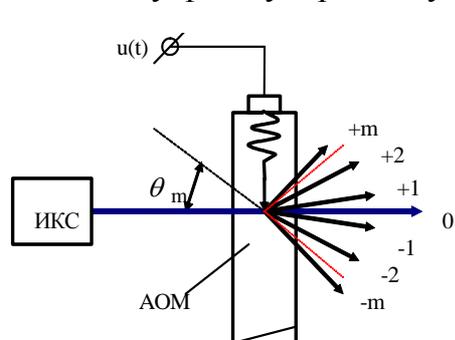
Необходимые фазовые сдвиги питающих элементов АР токов можно получить, также используя особенности фотоупругого эффекта.

Целью настоящей работы является исследование возможности синтеза фазовращателей на основе использования особенностей фотоупругого эффекта.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ФОТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА

На основе фотоупругого эффекта создаются акустооптические устройства, пригодные для аналоговой обработки сигналов в реальном масштабе времени [4].

Основным узлом любого акустооптического устройства является акустооптический модулятор (АОМ), представляющий собой фотоупругую среду (ФУС), к одной грани которой прикреплен электроакустический преобразователь (ЭАП), преобразующий входной радиочастотный сигнал в упругую волну (УВ), распространяющуюся в ФУС со скоростью, примерно, в  $10^5$  раз меньшей скорости распространения электромагнитной волны. При возбуждении УВ в ФУС возникают динамические изменения показателя преломления (плотности среды). Эти изменения приводят к образованию фазовой решетки, шаг которой равен длине УВ, а амплитуда пропорциональна как амплитуде акустической волны, так и фотоупругой постоянной среды. При выполнении определенных условий, падающие на эту фазовую решетку оптические волны дифрагируют.



В процессе акустооптического взаимодействия частота света в продифрагировавшем порядке оказывается сдвинутой благодаря эффекту Доплера, на величину, равную частоте воздействия на электрическом входе [5].

**Рис.1.**

Схема дифракции света на ультразвуке (дифракция Рамана-Ната).

В этом легко убедиться путем следующих рассуждений. Световая волна в задней фокальной плоскости АОМ может быть представлена в виде совокупности плоских световых волн (Рис.1), направления распространения которых определяются соотношением:

$$\sin \theta_m = \pm m \lambda / \Lambda, \quad (1)$$

где  $m$ -номер дифракционного порядка,  $\lambda$  - длина волны света,  $\Lambda$  - длина упругой волны.

Световая волна в дифракционном порядке с частотой  $\omega_d$  распространяется в свободном пространстве со скоростью  $C_0$  под углом  $\theta$  (Рис.2). В момент времени  $t$  на расстоянии  $r$  от точки акустооптического взаимодействия фаза поля описывается соотношением

$$\varphi(r, t) = \omega t + k r, \quad (2)$$

где  $\omega$  - частота света;  $k = \omega / C_0$  - волновое число света. В этих условиях частота света в дифракционном порядке равна:

$$\omega_d = \partial \varphi(r, t) / \partial t = \omega + k \cdot \partial r / \partial t, \quad (3)$$

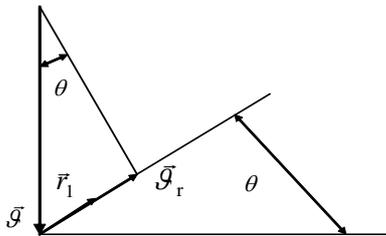
где  $\partial r / \partial t$  составляющая скорости упругой волны в направлении распространения дифракционного порядка. Согласно Рис.2,

$$\partial r / \partial t = \mathcal{G} \cdot \sin \theta. \quad (4)$$

При этом  $m$ -й дифракционный порядок распространяется под углом  $\theta_m$ , определяемым соотношением (1). Учитывая (1) и (4) в (3), имеем

$$\omega_d = \omega + k \mathcal{G} (\pm m \lambda / \Lambda) = \omega + (\pm m k F \lambda) = \omega + (\pm m \Omega), \quad (5)$$

т.е. частота продифрагировавшего в  $m$ -й порядок пучка света изменяется на величину  $\pm m \Omega$ . Для дифракционного порядка  $m=+1$   $\omega_d = \omega + \Omega$ .



**Рис.2.**

К пояснению эффекта Доплера

### 3. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ ГЕТЕРОДИННОГО ТИПА

Используя особенности фотоупругого эффекта, а также эффект оптического гетеродинирования, можно восстановить входной радиочастотный сигнал. Устройства, работа которых базируется на этом принципе, называют акустооптическими процессорами гетеродинного типа.

Заметим, что понятие гетеродинирование (от греч. heteros - иной, другой и dynamis - сила) связано с разработкой супергетеродинных приемников, в которых спектр принимаемого сигнала переносится в область рабочих частот тракта основного усиления при помощи маломощного автогенератора - гетеродина. Этот процесс называют гетеродинированием и осуществляют посредством нелинейных элементов. Несмотря на то, что указанный процесс достаточно легко осуществляется в диапазоне радиочастот, его реализация в оптическом диапазоне связана с некоторыми трудностями. После появления лазеров - источников когерентного света (ИКС) оптическое гетеродинирование стало использоваться для решения многих радиофизических задач.

Оптическое гетеродинирование основано на нелинейности фотодетектора по отношению к полю излучения [6]. Если сумма двух гармонических сигналов подвергается нелинейному преобразованию (в частности, квадратичному), то в результате появляются гармоники как с суммарными, так и с разностными частотами. Детектирование оптического сигнала есть не что иное, как квадратичное преобразование поля излучения. Поэтому естественно ожидать, что при одновременном

детектировании двух оптических сигналов с различными частотами на выходе фотодетектора возникает электрический сигнал на разностной частоте.

Эффект оптического гетеродинарования поддерживается при выполнении ряда специфических требований. К ним относятся: 1- временная и пространственная когерентность сигнального и гетеродинного пучков света, 2- согласованность волновых фронтов сигнального и гетеродинного пучков (совпадение формы фронтов и направления распространения), т.е. пространственного расположения их волновых фронтов.

В АОП гетеродинного типа опорное поле формируют зеркально-линзовым (Рис.3) или дифракционным (Рис.4) способами из падающего света или из его непродифрагировавшей части. В обоих случаях должны выполняться выше приведенные требования. Основными недостатками АОП с зеркально-линзовым формированием гетеродинного пучка являются, во-первых, высокие требования к точности выполнения его отдельных узлов, небольшие технологические дефекты, оптические неоднородности, aberrации и т.д. линз и зеркал могут привести к нарушениям работы процессора, во-вторых, оптическая мощность для гетеродинной подсветки отбирается от падающего на АОМ пучка и не участвует в дифракции.

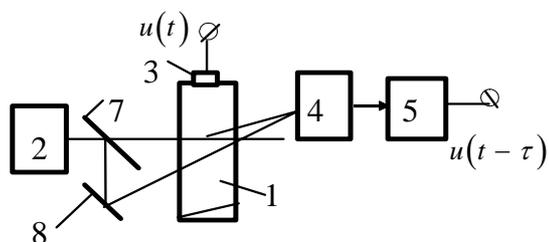


Рис.3.

АОП с зеркально-линзовым формированием гетеродинного пучка: 1-АОМ, 2- ИКС, 3-ЭАП, 4-ФП, 5-ПУ, 7, 8 - полупрозрачное и непрозрачное зеркала.

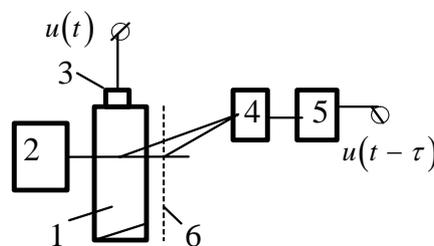


Рис.4.

АОП с дифракционным формированием гетеродинного пучка: 1-АОМ, 2- ИКС, 3- ЭАП, 4 –ФП, 5- ПУ, 6- ДР.

От последнего недостатка свободен АОП с дифракционным формированием гетеродинного пучка (Рис.4.), где в акустооптическом взаимодействии участвует весь оптический пучок, а гетеродинное поле формируют из немодулированной части света введением дифракционной решетки (ДР) - 6. Обработываемый сигнал  $u(t)$  с частотой  $\Omega$  вводится в АОМ - 1 с помощью соответствующего ЭАП 3. При взаимодействии акустического сигнала в ФУС с лазерным пучком, проходящим сквозь этот ФУС, часть света дифрагирует в пространстве подобно тому, как это происходит при падении света на обычную ДР. Амплитуда световых колебаний в первом дифракционном максимуме пропорциональна комплексной огибающей сигнала  $u(t)$ , а частота, вследствие доплеровского эффекта, сдвинута на величину  $\Omega$ . Недифрагированная часть света дифрагирует на ДР - 6. Появившийся при этом первый дифракционный порядок используется в качестве гетеродинного пучка. Выходной сигнал процессора с точностью до постоянного множителя соответствует задержанному на время  $\tau = h/\vartheta$  входному сигналу. Требования к качеству выполнения узлов процессора с дифракционным формированием гетеродинного пучка света относительно невысокие, что является основным их достоинством. К достоинствам рассмотренного процессора относится также его компактность.

Предположим, что обрабатываемый радиосигнал имеет следующий вид

$$u(t) = U_0 \cos \Omega t, \quad (6)$$

где  $U_0$  и  $\Omega$  - амплитуда и частота радиосигнала.

Радиосигнал (6) подается на ЭАП - 3 АОМ - 1 и возбуждает в фотоупругой среде УВ модулирующий световой пучок  $e(t) = E \exp j\omega t$ .

Фотоприемник (ФП) 4 размещают в области формирования максимума плюс первого дифракционного порядка, где распределение света описывается соотношением:

$$E_s(t, x) = \exp[j(\omega + \Omega)t - K \cdot x \cdot \sin \theta_s]. \quad (7)$$

Непродифрагировавшая на ультразвуке часть светового пучка, дифрагируя на ДР - 6, образует дифракционные порядки, один из которых, распространяющийся под углом, определяемым соотношением  $\sin \theta_L = \omega_x \cdot \lambda / (2\pi)$ , где  $\omega_x$  - пространственная частота ДР, используется в качестве гетеродинной подсветки.

Гетеродинное поле описывается соотношением

$$E_L(t, x) = \exp \{ j[\omega t - K(x_0 + x) \cdot \sin \theta_L] \}. \quad (8)$$

В результате оптического гетеродинирования на выходе ФП - 4 формируется следующий сигнал

$$u'_{\text{вых}}(t) = c \int_{-0,5d}^{0,5d} |\dot{E}_s + \dot{E}_L|^2 dx = c \int_{-0,5d}^{0,5d} [\dot{E}_s^2 + \dot{E}_L^2] dx + c \int_{-0,5d}^{0,5d} [\dot{E}_s \cdot \dot{E}_L^* + \dot{E}_s^* \cdot \dot{E}_L] dx, \quad (9)$$

где  $d$  - апертура падающего светового пучка,  $c$  - постоянный множитель. Полосовой усилитель - 8 выделяет высокочастотную часть сигнала (9):

$$u_{\text{вых}}(t) = c' \cdot \cos[\Omega(t - x_0/\vartheta)]. \quad (10)$$

Следовательно, выходной сигнал полосового усилителя - 8 с точностью до постоянного сомножителя соответствует задержанному на время  $x_0/\vartheta$  входному сигналу.

Как правило, в АОП гетеродинного типа разность частот гетеродинируемых полей не превышает единиц ГГц.

Рассогласование волновых фронтов гетеродинируемых полей приводит к резкому снижению напряжения на выходе АОП гетеродинного типа. Зависимость выходного напряжения процессора от угла рассогласования  $\Delta\theta$  между сигнальным и гетеродинным пучками выражается формулой:

$$U(\Delta\theta) = \text{sinc}[(\pi d/\lambda) \sin \Delta\theta], \quad (11)$$

где  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ . Из последнего соотношения выводится [5] формула для определения полосы пропускания АОП гетеродинного типа:

$$2 \cdot \Delta f \approx 2,792 \cdot \vartheta / (\pi d). \quad (12)$$

#### 4. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Вышеприведенный теоретический анализ позволяет заключить, что особенности фотоупругого эффекта и эффекта оптического гетеродинирования можно использовать для формирования радиочастотного сигнала с требуемой начальной фазой т.е. реализовать фазовращатель для ФАР.

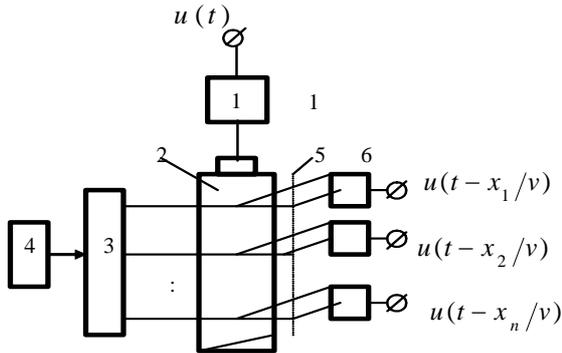
Практическая реализация фазовращателя сводится к построению многоотводной акустооптической линии задержки гетеродинного типа (Рис.5).

В этом устройстве радиосигнал  $u(t)$  усиливается усилителем высокой частоты (УВЧ) 1, поступает на электрический вход АОМ - 2 и возбуждает в нем упругие волны, соответствующей частоты. Формирующий каскад - 3 расщепляет излучение лазера - 4 на  $n$  пучков и направляет их в апертуру АОМ - 2 под углом, определяемым из соотношения

$$\sin \theta_B = 0,5 \cdot \Omega / \omega , \quad (13)$$

где  $\Omega$  - частота радиосигнала  $u(t)$ .

Пересекающие апертуру АОМ  $n$  световых пучков, дифрагируя на упругих волнах, образуют  $n$  сигнальных пучков. Непродифрагировавшие на упругих волнах части световых пучков, дифрагируя на дифракционной решетке 5, образуют  $n$  гетеродинных пучков света. Сигнальные и гетеродинные пучки света гетеродинируют на соответствующих ФП - 6.



**Рис.5.**

Структурная схема акустооптического ФВ: 1-УВЧ, 2-АОМ, 3-формирующий каскад, 4-ИКС, 5-дифракционная решетка, 6-ФПУ.

В соответствии с (10), напряжения на выходах ФП определяются следующим образом:

$$u_{\text{вых.}n}(t) = c' \cdot \cos \left[ \Omega \left( t - x_{0n} / \vartheta \right) \right] . \quad (14)$$

Другими словами, выходной сигнал  $n$ -го ФП, с точностью до постоянного множителя, соответствует задержанному на время  $x_{\text{он}} / \vartheta$  входному сигналу, т.е

$$u_{\text{вых.}n}(t) = u \left( t - x_{\text{он}} / \vartheta \right) . \quad (15)$$

При этом сдвиг фаз между соседними каналами составляет

$$\Delta \psi = \Omega [x_{\text{он}} - x_{\text{он}(n-1)}] / \vartheta , \quad (16)$$

Расстояние от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия регулируется плавно. Точность установки требуемого временного сдвига определяется точностью регулирующих механизмов.

Возможность построения многоотводной линии задержки с 8-ю отводами была проверена экспериментально. В качестве фотоупругой среды был использован ТФ-7 ( $\vartheta = 3,5 \text{ km} / \text{c} . ; n = 1,728$ ), а в качестве ЭАП –  $\text{LiNbO}_3$ . Центральная частота АОМ составила 32МГц, ширина полосы пропускания каждого канала - 2,2МГц. Временной сдвиг между соседними отводами составил  $2 \mu\text{c}$ .

Заметим, что разработанная экспериментальная установка позволяла ус- танавливать временной сдвиг с точностью до долей градуса.

## 5. ВЫВОДЫ

Для повышения точности и быстродействия определения угловых координат источников радиоизлучения в навигации, радиолокации и других радиосистемах необходимо сузить основной лепесток ДН антенны и увеличить скорость обзора пространства. Наилучшие результаты обеспечиваются применением ФАР, одним из основных узлов которого является фазовращатель.

Предложенный акустооптический аналого-дискретный фазовращатель превосходит современные фазовращатели аналогового и дискретного типов по таким по-

казателям, как диапазон плавной регулировки фаз питающих токов, простота регулирования, широкополосность.

Полоса частот современных АОМ, работающих на частотах до единиц ГГц, составляет 40÷60% от центральной частоты.

Таким образом, правильное сочетание особенностей фотоупругого эффекта, эффекта оптического гетеродинамирования и методов электронного управления фаз питающих токов позволяет создать эффективные фазовращатели для ФАР КВ и УКВ диапазонов.

1. Д.И.Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев, *Антенны и устройства СВЧ, изд-во МАИ*, (1999) 525.
2. G.W. Fitzsimmons, *Microwave Journal*, **37** №1 (1994) 114.
3. А.М.Пашаев., А.Р.Гасанов, Дж.Г.Джафаров, *Azerbaijan National Academy of Sciences, Transactions, series of physical-mathematical and technical sciences, physics and astronomy*, **XXIV** №2 (2004) 44.
4. Дж.Н.ЛИ, Э.Вандерлугт, *ТИИЭР*, **77** № 10 (1989) 158.
5. А.М.Пашаев, А.Р.Гасанов, *Радиотехника*, №8 (1996 ) 28.
6. В.В.Протопопов, Н.Д.Устинов, *Лазерное гетеродинамирование*. - М.: Наука, Главная редакция физико-математич. Литературы, (1985) 288.

#### **ANTENNA QƏFƏSLƏRİ ÜÇÜN AKUSTOOPTİK FAZA ÇEVİRİCİLƏRİ**

**A.M. PAŞAYEV, A.R.HƏSƏNOV, C.Q.CƏFƏROV**

Fotoelastik effektin və optiki heterodinləmənin xüsusiyyətlərindən istifadə etməklə fəzlaşdırılmış antenna qəfəsləri üçün faza çevricilərinin reallaşdırılması imkanları araşdırılır. Akustooptik faza çevricisinin struktur-elektrik sxemi təklif olunur və onun iş prinsipi analiz edilir.

#### **ACOUSTO-OPTICAL PHASE SHIFTERS FOR THE LATTICES AERIAL**

**A.M.PASHAYEV, A.R.HASANOV, C.Q.CAFAROV**

The opportunity of realization of phase shifters on the basis of use of features of photo elastic effect and effect optical heterodyning for the Phase-Array Antenna was considered. The structural - electrical circuit of the acousto-optic phase shifter was offered and analyzes a principle of his action.

Редактор: Э.Гусейнов