

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.376.52

Н. С. ВЕРНИГОРОВ, А. С. ЗАДОРИН, А. В. ПУГОВКИН
(Томск)

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ЮНГА

Введение. Реализация функциональных возможностей акустооптических (АО) устройств в значительной мере связана с проблемой считывания двумерного или одномерного светового поля на выходе оптического процессора. На практике для этих целей широко используются многоэлементные фотоприемники (ФП). Требуемая точность считывания достигается за счет обеспечения соответствующих плотности и числа элементов ФП [1], но их повышение ограничено, во-первых, существующей элементной базой фотоприемной техники и, во-вторых, усложнением электронного блока ФП.

Таким образом, возникает задача повышения точностных характеристик АО-процессора (АОП) при заданных плотности и числе светочувствительных элементов ФП.

Ниже рассматривается один из способов ее решения, заключающийся в том, что повышение точности измерений достигается за счет создания тонкой структуры регистрируемого светового поля, возникающей при интерференции двух пучков, и периодического смещения указанной интерференционной картины во времени относительно ограниченного числа светочувствительных элементов. В этом случае отдельными элементами ФП регистрируются не дискретные отсчеты интенсивности поля в точках их расположения, а более детальная информация о профиле интерференционной картины в окрестности этих точек, содержащаяся во временной зависимости фототока. Обработка этих временных сигналов и позволяет повысить точность измерений.

Для сканирования интерференционной картины, образующейся в дифрагированных световых пучках, в один из каналов интерферометра вводится перестраиваемый фазовращатель, изменяющий разность фаз между каналами по закону:

$$\varphi = \Omega_0 t + \varphi_0. \quad (1)$$

Если монохроматические интерферирующие пучки идентичны, в фокальной плоскости линзы с фокусом F распределение интенсивности светового поля можно записать в виде [2]

$$I(\omega_r, t) = F^2(\omega_r) \cos^2[(1/2)(\omega_r d + \Omega_0 t + \varphi_0)], \quad (2)$$

где $\omega_r = 2\pi r/\lambda F$ — пространственная частота в направлении координаты r , соединяющей центры интерферирующих пучков, находящихся на расстоянии d друг от друга; λ — длина волны света; $F(\omega_r)$ — пространственный спектр отдельного пучка.

Отсюда видно, что линейное изменение φ во времени приводит к непрерывному сдвигу интерференционной картины и гармоническим колебаниям интенсивности (биениям) поля в точке ω_r с частотой Ω_0 и па-

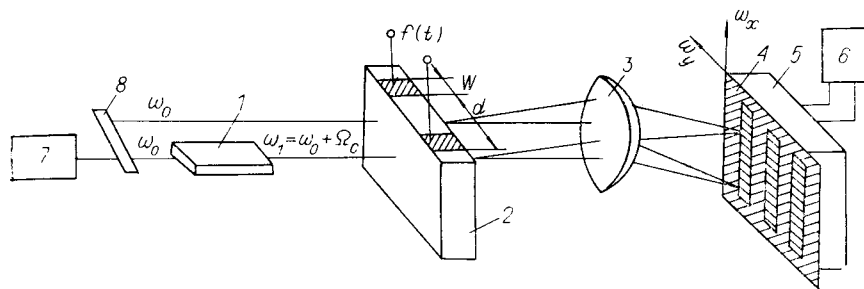


Рис. 1

чальной фазой, зависящей от пространственной частоты ω_r :

$$\psi = \varphi_0 + \omega_r d. \quad (3)$$

Для заданной точки ($\omega_r = \text{const}$) профиль интерференционной картины в окрестности $(\omega_r - (\pi/d)) - (\omega_r + (\pi/d))$ будет содержаться во временной зависимости $I(t)$. Положение максимумов функции $I(\omega_r)$ может быть определено путем измерения фазы $(\psi - \varphi_0)$ биений электрического сигнала на выходе фотоприемника. Ниже будут рассмотрены некоторые типы АОИ с перестраиваемым интерферометром Юнга.

1. Акустооптический фазометр-частотомер (АОФЧ). Процессор данного типа предназначен для панорамного измерения частоты и разности фаз φ_0 двух радиосигналов.

Функциональная схема АОФЧ приведена на рис. 1 и близка к описанной в [3]. Здесь излучение монохроматического источника 7 делится на два пучка, частоты которых с помощью устройства 1 смещаются соответственно на $\pm\Omega$, после этого пучки направляются на двухканальный АОМ 2. В выходной плоскости линзы 3 формируется нестационарная интерференционная картина, которая через пространственный фильтр 4 засвечивает линейку фотоприемников 5. С опорного и сигнальных элементов фотоприемника сигналы биений частоты Ω_0 подаются на фазометр 6.

Операция частотного сдвига в падающих световых пучках может быть осуществлена различными способами. В одном из них применяем АОМ, работающий в режиме дифракции Рамапа — Ната. При воздействии на него монохроматического сигнала с частотой Ω_M дифракционные пучки первого и минус первого порядков имеют сдвиг по частоте $\pm\Omega_M$ соответственно. В этом случае $\Omega_0 = 2\Omega_M$.

На низких частотах Ω_0 операцию сдвига частоты оптической несущей удобнее осуществить с помощью электрооптического модулятора ЭОМ [4]. Для этого к ЭОМ подводится пилообразное управляющее напряжение, смещающее фазу проходящего через модулятор светового пучка по линейному закону в пределах $0-360^\circ$ с требуемой частотой сдвига Ω_0 .

Рассмотренный алгоритм АОФЧ позволяет исключить случайные оптические фазовые сдвиги, возникающие в каналах интерферометра, так как они будут вноситься и в измерительный, и в опорный каналы. Кроме того, АОФЧ обладает панорамными по частоте свойствами. При изменении частоты исследуемых радиосигналов дифрагировавшие световые лучи перемещаются вдоль координаты ω_x и сигналы биений снимаются с других элементов линейки фотоприемников. При воздействии на вход устройства одновременно нескольких пар радиосигналов различных частот сигналы биений присутствуют на выходах разных элементов, причем номер элемента фотоприемника определяет частоту сигнала.

Для аналитического описания АОФЧ применим уравнение обобщенного АО-анализатора спектра [5]. Отклик точечного безынерционного фотодетектора при монохроматических входных сигналах описывается вы-

ражением

$$e_{cp}(t) \sim |F(\omega_x)|^2 |F(\omega_y)|^2 [U_{1m}^2 + U_{2m}^2 + 2U_{1m}U_{2m} \cos(\Omega_0 t + \omega_y d + \varphi_0)], \quad (4)$$

где U_{1m}, U_{2m} — величины, характеризующие амплитудную неоднородность каналов; ω_x, ω_y — пространственные частоты по осям x и y соответственно, причем в данном случае $\omega_x = \omega_y$.

Для недифрагировавших световых лучей отклик фотодетектора является опорным сигналом относительно (4) и находится как

$$e_{cp.оп}(t) \sim |F(\omega_x)|^2 |F(\omega_y)|^2 [E_{1m}^2 + E_{2m}^2 + 2E_{1m}E_{2m} \cos(\Omega_0 t + \omega_y d)], \quad (5)$$

где E_{1m}, E_{2m} — амплитуды недифрагировавших световых волн в каналах АО-модулятора.

Из (4) следует, что независимо от частоты входных сигналов отклик фотодетектора в АО-процессоре представляет собой биения частоты $\Omega_0 = \omega_1 - \omega_2$, содержащие начальный фазовый сдвиг, равный φ_0 .

Измеряя разность фаз сигналов биений опорного и информационного каналов фазометром, работающим на фиксированной частоте Ω_0 , определяем фазовые соотношения в исследуемых сигналах.

Поскольку выражения (4), (5) получены в предположении точечного фотодетектора, рассмотрим влияние его размера по оси y . Для этого проинтегрируем (1) по координате y в пределах $y_{F0} \pm \delta y_F/2$, где y_{F0} — координата центра фотодетектора по оси y ; δy_F — размер фотодетектора по оси y .

Расчеты показывают, что при $\lambda = 0,63$ мкм, $F = 50$ см, $d = 2$ мм, $W = 1$ мм размер фотодетектора, при котором амплитуда биений максимальна, есть $\delta y_F = 78,75$ мкм и ФП регистрирует лишь незначительную часть энергии интерференционной картины.

Поместим в выходной плоскости линзы \mathcal{Z} (см. рис. 1) маску \mathcal{A} с набором отверстий с периодом P , числом периодов N и размером отверстия $y' = \delta y_F$. В этом случае ограничения на размер фотодетектора по оси y не столь жестки. Полагая, что функция $F(\omega_y)$ медленно меняется в пределах δy_F , отклик фотодетектора найдем как

$$e_{cp}(t) \sim \sum_{n=0}^{N/2} \left\{ \frac{\sin \frac{\pi W (n+1)}{2d}}{\frac{\pi W (n+1)}{2d}} \right\}^2 \left[1 + \cos \left(\Omega_0 t + \frac{2\pi d}{\lambda F} y_{F0} + \Delta\varphi \right) \right], \quad (6)$$

где W — размер преобразователя АОМ по оси y .

Расчеты по (6) показывают, что при вышеприведенных параметрах оптической схемы АО-интерферометра увеличение амплитуды выходного сигнала фотодетектора составляет 5,6 дБ по сравнению с сигналом одиночного фотодетектора размером δy_F .

Точность измерения фазовых характеристик входного сигнала в основном определяется точностью измерения разности фаз сигнала биений фотодетекторов фазометром \mathcal{B} (см. рис. 1).

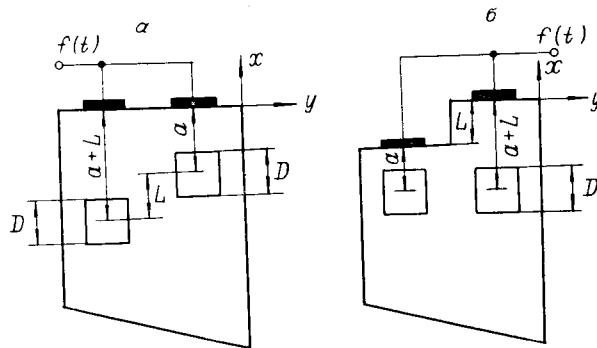


Рис. 2

2. Акустооптические интерферометры - частотомеры (АОЧ). АО-интерферометры могут быть использованы для улучшения характеристик АО-приемников-частотомеров. Для этого оба входа устройства (см. рис. 1) соединены между собой, а в один из каналов интерферометра введем акустическую линию задержки длиной L , примеры

выполнения которой в сочетании с АОМ показаны на рис. 2, а, б. Достоинством такого частотомера является то, что он сохраняет разрешающую способность по частоте одноканального АО-устройства, а за счет измерения разности фаз между каналами $\Delta\varphi = \Omega_c L/v$ позволяет существенно повысить точность определения несущей частоты. Можно сказать, что частотомер имеет две шкалы измерения: грубую по пространственной частоте ω_x и точную по частоте ω_y . Точность измерения частоты

$$\delta f_{\min} = (v/2\pi L) \delta(\Delta\varphi) \quad (7)$$

определится временем задержки τ_0 и погрешностью измерения разности фаз $\delta(\Delta\varphi)$. Для того чтобы измерения частоты по грубой и точной шкалам были согласованы, необходимо, чтобы при изменении частоты на величину, равную разрешающей способности АО-приемника по частоте $\delta f_0 = v/D$, разность фаз изменялась на 2π . Отсюда

$$L = D. \quad (8)$$

Другой разновидностью АОЧ является процессор с одноканальным АОМ и перестраиваемым интерферометром, каналы которого лежат один под другим в плоскости дифракции (рис. 3). Компоненты 1—7 на рис. 3 имеют то же функциональное назначение, что и в рассмотренных ранее схемах АОП. Перестройка интерферометра устройством сдвига частоты 1 приводит к сканированию интерференционной картины вдоль оси ω_x , т. е. вдоль грубой шкалы частот АОП. Эта координата в данном случае и есть ω_x . Оценка основных характеристик АОЧ (масштаб точной шкалы, точность и зона однозначности на точной шкале) может быть проведена на основе выражения (3), если в нем положить $\varphi_0 = \Omega d/v$, $\omega_x d = -\Omega_{x0} d/v$, где $\Omega_{x0} = \omega_{x0}/v$ — координата центра фотоприемника, приведенная к круговой временной частоте, а знак «—» обусловлен брэгговским характером дифракции [5]. Поскольку $f_{x0} = \Omega_{x0}/2\pi$ определяет «грубый» отсчет частоты, то ее уточнение связано с измерением фазы $\psi = [2\pi(f - f_{x0})d]/v$ и точная поправка будет

$$\Delta f_T = f - f_{x0} = \psi v/2\pi d. \quad (9)$$

Точность измерения частоты δf_T по этой шкале определяется точностью измерения фазы $\delta\psi$:

$$\delta f_T = \delta\psi v/2\pi d. \quad (10)$$

Наконец, зона однозначного измерения АОЧ, т. е. согласование грубой и точной шкал, находится из условия $\psi_{\max} = 2\pi$: $(\Delta f_T)_{\max} = v/d$. Поскольку максимальное значение отсчета по точной шкале должно равняться разрешающей способности АОЧ по грубой шкале $\delta f_{гр} = v/D$, где D — размер оптической апертуры каждого из каналов интерферометра, получим условие согласования шкал

$$d = D. \quad (11)$$

Измерение ψ производится фазометром 5, на входы которого, как и в рассмотренном выше АОФЧ, подаются сигналы биений, выделенные элементами ФП, засвеченными дифрагировавшими пучками, и биения от основных световых пучков, выделенные опорным элементом ФП.

3. Экспериментальные результаты. 1. Исследование описанного в п. 2 АО-фазометра-частотомера проводилось на установке, основой которой являлась схема на рис. 1. В качестве источника света 7 использовался лазер ЛГ 52-2, луч которого разделялся пластинкой 8 на два пуч-

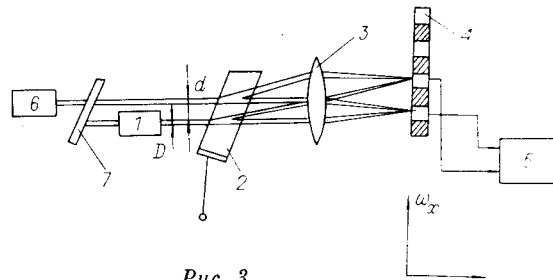
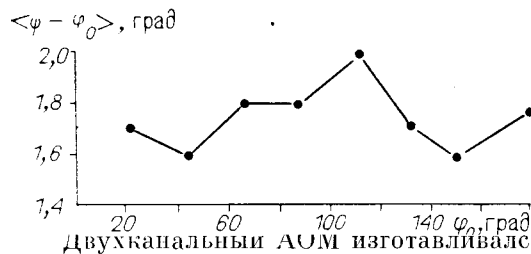


Рис. 3



двухканальный АОМ изготавливался также из LiNbO_3 лития λ -среза и возбуждался продольной звуковой волной. Эффективность дифракции в диапазоне 200—400 МГц составляла $\sim 5\%$ на 1 Вт СВЧ-мощности.

Экспериментально измерялась зависимость относительной разности фаз ψ в опорном и измерительном каналах от величины фазового сдвига φ_0 между входными сигналами, устанавливаемого с помощью коаксиального фазовращателя. В качестве ФП применялись $p-i-n$ -диоды, подключаемые к видеоусилителю с полосой частот 10 МГц. Измерение разности фаз ψ осуществлялось фазометром Ф2-16 с погрешностью $\delta\varphi \sim 5^\circ$. На рис. 4 представлена полученная в результате опыта зависимость среднеквадратичного отклонения ψ от φ_0 , снятая на частоте 370 МГц. Отсюда видно, что отклонение ψ от φ_0 лежало в пределах погрешности $\delta\varphi$.

2. Исследование АО-интерферометра-частотомера проводилось по схеме рис. 2 в коротковолновом и длинноволновом участках дециметрового диапазона. Луч лазера ЛГ-52-2 предварительно коллимировался до размера $D = 6,3$ мм. Затем относительный фазовый сдвиг двух половин пучка изменялся по линейному закону с помощью описанного выше электрооптического фазовращателя с частотой $\Omega_0 = 300$ кГц.

Рассматриваемый макет АОЧ был собран из тех же элементов, что и описанный ранее макет АОФЧ. Лишь для экспериментов на частотах $\sim 2,5$ ГГц использовался специальный АОМ со звукопроводом из ниобата лития $Y-120^\circ$ -среза, который возбуждался медленной сдвиговой акустической волной, обладающей высокой дифракционной активностью для широкополосного аномального ЛОВ. Модулятор управлялся генератором ГЗ-10А, частота которого контролировалась частотомером ЧЗ-34А, и работал в диапазоне (2,1—2,6) ГГц при эффективности дифракции $\sim 3\%$.

Целью экспериментов являлась проверка частотной зависимости (9), определяющей шкалу точного отсчета АОЧ. В результате измерений зависимости сдвига фазы ψ как функции Δf_T , снятых на частоте 320 МГц при апертуре 2,5 мм, а также на частоте 2,51 ГГц при апертуре 1,5 мм, установлено, что отклонение указанных зависимостей от (9) не превышало погрешности измерений сдвига фаз $\delta\varphi = 5^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков С. В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов.— Л.: Наука, 1978.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1970.
3. Бокон Л. А., Краковский В. А., Пуговкин А. В. Измерение взаимной спектральной плотности мощности при помощи акустооптических процессоров // Радиотехника и электроника.— 1982.— XXVIII, № 6.
4. А. с. 1334093 СССР. Акустооптический фазометр-частотомер/Н. С. Верингоров, А. С. Задорин, С. В. Лукинский.— Оpubл. в БИ, 1987, № 32.

5. Пуговкин А. В. К теории брэгговских анализаторов спектра // Акустооптические методы и техника обработки информации.—Л.: ЛИАП, 1980.— Вып. 142.
6. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах.—М.: Сов. радио, 1973.

Поступила в редакцию 6 января 1989 г.

УДК 681.332(088.8) : 535.345.6

Е. Г. СТОЛОВ

(Ленинград)

СИНТЕЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Одна из важнейших задач технической кибернетики — разработка новых методов решения сложных нелинейных уравнений, возникающих при синтезе многокомпонентных систем с заданными физическими свойствами.

Анализ накопленных к настоящему времени данных позволяет заключить, что одним из наиболее перспективных направлений решения этой проблемы является поиск решений на сетке с последующей оптимизацией, так как такой метод универсален, не требует пулевого приближения, применим для любых видов функционала качества.

Для успешной реализации этого метода необходима разработка теории, обеспечивающей максимальное быстродействие при проверке точек, принадлежащих области изменения неизвестных, на соответствие уравнению.

Для разработки такой теории были проанализированы, с одной стороны, общие свойства реальных сложных физических систем, а с другой — возможности современных ЭВМ, являющихся пока единственным инструментом при решении громоздких задач обработки информации.

Кроме того, была учтена специфика рассматриваемой задачи: проверка в единицу времени как можно большего числа различных физических систем на наличие у них требуемых свойств.

Одна из важных особенностей реальных физических систем заключается в возможности их представления в виде нескольких более простых подсистем и описания конкретных свойств всей системы в целом с помощью нескольких «интегральных параметров», характеризующих каждую из подсистем. Термин «интегральные параметры» употреблен в том смысле, что они полностью характеризуют физические свойства подсистемы при определенных взаимодействиях и не содержат явно информации о конструктивном выполнении каждой подсистемы.

Например, пусть имеется система, состоящая из большого числа электрических зарядов, и нужно рассчитать действие такой системы на пробный заряд, расположенный в некоторой области пространства. Данную задачу можно решить, рассчитав поле каждого заряда системы в области расположения пробного заряда и сложив векторно все эти поля с целью нахождения результирующего поля. Другой путь, положенный в основу развитой теории, заключается в разбиении всей системы зарядов на несколько подсистем, определении напряженности поля, создаваемого каждой подсистемой, и сложении напряженностей полей подсистем, причем в последнем случае затраты времени на расчет одного варианта значительно меньше, чем в предыдущем. Напряженность электрического поля, создаваемого подсистемой, является «интегральным параметром», описывающим ее существенные в рамках решаемой задачи свойства, т. е. она характеризует взаимодействие подсистемы с другими зарядами и в то же время не содержит сведений о числе зарядов, входящих в подсистему, их величинах и расположении.