

Н. С. ВЕРНИГОРОВ, А. В. ПУГОВКИН, М. Г. СЕДУНОВ, Л. Я. СЕРЕБРЕННИКОВ

(Томск)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Интерес к оптическим методам обработки больших потоков информации обусловлен высокой информационной емкостью светового поля, высокой скоростью распространения оптических сигналов и простотой осуществления ряда интегральных операций над двумерными массивами информации. На практике, однако, возможности этих методов ограничиваются скоростью ввода и вывода информации. Эти ограничения частично преодолеваются при использовании в качестве динамического транспаранта в оптической системе (ОС) акустооптического модулятора (АОМ). Его применение дает возможность проводить спектральный анализ, пространственную фильтрацию, корреляционный анализ высокочастотной радиосигнальной информации, которая на выходе ОС представлена распределением интенсивности света вдоль оси, параллельной направлению распространения акустического сигнала в АОМ.

Функциональные возможности ОС значительно расширяются при использовании второй пространственной координаты. Если построить ОС по схеме интерферометра Юнга, а в качестве щелей использовать два АОМ [1], то в случае подачи на входы, например, двух радиосигналов одинаковой частоты на выходе ОС по оси, перпендикулярной направлению распространения акустических сигналов, возникает интерференционная картина (рис. 1), постоянная пространственная частота которой

$$\Omega_{\text{п}} = 2\pi d/\lambda F \quad (1)$$

обусловлена расстоянием d между отдельными АОМ, длиной волны света λ и фокусным расстоянием F ОС. Положение максимумов в интерферограмме зависит от разности хода лучей, которая однозначно связана с разностью фаз радиосигналов, возбуждающих АО-модуляторы, причем изменение разности фаз радиосигналов на величину 2π рад соответствует сдвигу максимумов интерферограммы на период.

Ниже представлена автоматизированная система обработки интерферограмм для измерения пространственного положения и относительной разности фаз радиосигналов с погрешностью $\sim 1\%$.

Рассмотренные ранее [2, 3] автоматические системы обработки интерферограмм достаточно сложны и не позволяют проводить экспресс-обработку получаемых результатов [2] либо не обеспечивают высокой точности измерений [3].

Функциональная схема и принцип работы системы. Рассмотрим функциональную схему (рис. 2) до ввода в ЭВМ системы и ее работу. Интерференционная картина 1, сформированная оптической системой 2, проецируется на мишень видикона стандартной телевизионной камеры «Волна-801» 3. С помощью ТВ-камеры пространственное распределение интенсивности интерферограммы преобразуется во временное с частотой электрического сигнала

$$f_{\text{вс}} = V_{\text{р}}\Omega_{\text{п}}/2\pi, \quad (2)$$

где $V_{\text{р}} = l/\tau$ — скорость развертки по строке видикона; τ — время развертки одной строки без синхроимпульсов; l — геометрический размер строки видикона.

Видеосигнал (рис. 3) с камеры 3 подается на аналоговый ключ 4, который закрыт на время строчного синхроимпульса (ССИ). С ключа 4 сигнал поступает на предварительный усилитель 5 и дальше на контур ударного возбуждения (КУВ) 6, настроенный на частоту $f_{\text{вс}}$. При этом

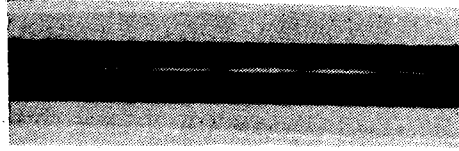


Рис. 1.

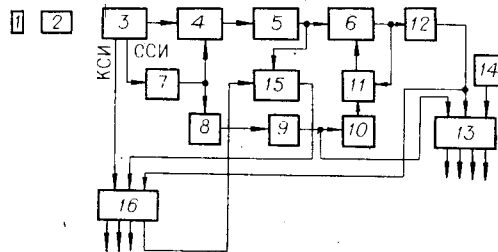


Рис. 2.

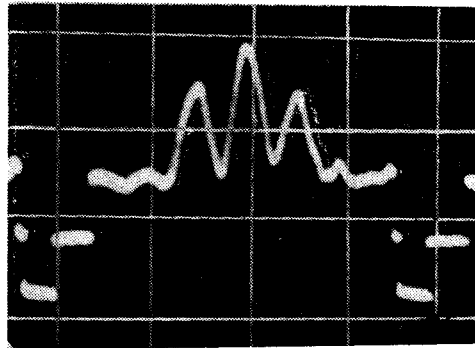


Рис. 3.

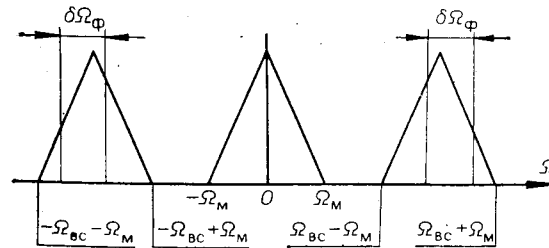


Рис. 4.

выходной электрический сигнал контура имеет вид радиоимпульса, заполненного затухающими синусоидальными колебаниями частотой $f_{вс}$.

При изменении местоположения максимумов и минимумов в интерферограмме относительно начала строки видикона происходит сдвиг начальной фазы колебаний в электрическом сигнале. Для регистрации фазы сигнала использован способ выделения моментов времени перехода колебаний через нуль в отклике КУВ. Дальнейший алгоритм обработки сигнала контура основан на слежении за местоположением в строке четвертого перехода через нуль.

Схемы 7—9 формируют импульсы длительностью соответственно $3T_{\phi}$ и T_{ϕ} , где T_{ϕ} — период колебаний контура. По окончании четвертого периода схема 10 дает импульс гашения, закорачивая КУВ для приведения в исходное состояние через аналоговый ключ 11. Сигнал КУВ

ограничивается усилителем 12 и подается на устройство определения момента перехода через нуль 13 относительно начала импульса T_ϕ (14 — тактовый генератор частотой 10 МГц). В блоках 15 и 16 происходит предварительное уточнение положения максимума интенсивности интерферограммы по кадру (на блок 16 поступают, в частности, кадровые синхроимпульсы — КСИ). Эта информация касается несущей частоты исходных радиосигналов на входе системы и в дальнейшем здесь не используется.

Для достижения достаточно высокой точности определения фазы и, следовательно, измерения минимальных смещений в интерферограмме необходимо, чтобы пространственная частота Ω_n была минимальна. Этот параметр в системе выбирался таким, чтобы на мишени видикона содержалось пять периодов интерференционной картины, что соответствовало временной частоте 100 кГц.

Анализ погрешностей измерения фазы выходного ТВ-сигнала. Точность измерения фазового сдвига определяется рядом факторов: погрешностью квантования, температурной нестабильностью временных интервалов $3T_\phi$ и T_ϕ , искажением начальной фазы колебаний и нелинейностью строчной развертки. Оценим эти составляющие погрешности.

Погрешность квантования радиоимпульсного фазометра. В нашем случае она является одной из определяющих и при выбранных частотах $f_\phi = 100$ кГц и $f_r = 10$ МГц погрешность измерения разности фаз не может быть менее $3,6^\circ$.

Температурная нестабильность временных интервалов $3T_\phi$ и T_ϕ . Эта составляющая погрешности обусловлена ТКЕ применяемых в формирователях 8 и 9 (см. рис. 2) конденсаторов. Измерения длительности этих импульсов в интервале температур $20-40^\circ\text{C}$ показали, что их изменение составляет 50 нс и соответствует погрешности измерения разности фаз $1,8^\circ$. За счет схемного решения эту нестабильность можно значительно уменьшить.

Искажение начальной фазы колебаний в контуре. Для его учета найдем вид сигнала на выходе КУВ. Учтем при этом, что выходной фотоэлектрический сигнал фотоприемников, на фотокатоде которого распределение интенсивности света соответствует интерферограмме в интерферометре Юнга с узкими прямоугольными щелями, имеет вид [4]

$$e(t) = e_m \left(\frac{\sin \Omega_M t}{\Omega_M t} \right)^2 [E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\Omega_{bc} t + \Delta\phi)], \quad (3)$$

где второй множитель определяется распределением света в апертуре щели; $\Omega_{bc} = 2\pi f_{bc}$; $\Omega_M = W\Omega_{bc}/2d$; W — ширина щелей интерферометра; t — время.

Найдем отклик фильтра на сигнал (3) в предположении, что фильтр выделяет лишь боковые высокочастотные составляющие спектра, причем его частотная характеристика является прямоугольной с центральной частотой Ω_ϕ и полосой $\delta\Omega_\phi$ (рис. 4):

$$E(\Omega) = e_m \{ (E_1^2 + E_2^2) \pi \Lambda_{\Omega_M}(\Omega) + 2E_1 E_2 \pi/2 [\Lambda_{\Omega_M}(\Omega + \Omega_{bc}) e^{i\Delta\phi} + \Lambda_{\Omega_M}(\Omega - \Omega_{bc}) e^{-i\Delta\phi}] \}, \quad (4)$$

где

$$\Lambda_{\Omega_M} = \begin{cases} \frac{1}{\Omega_M} \left(1 - \frac{|\Omega|}{\Omega_M} \right), & |\Omega| \leq \Omega_M; \\ 0, & |\Omega| > \Omega_M. \end{cases}$$

С учетом этого для выходного сигнала со спектром, равным произведению частотной характеристики фильтра и функции $E(\Omega)$, можно получить следующее выражение:

$$e_\phi(t) = \frac{2e_{\phi m}}{b} \left[(b-a) \sin a \psi \cos(\psi - \Delta\phi) + cd \sin(\psi - \Delta\phi) + \frac{2 \cos(c\psi/2) - d - 1}{\psi} \cos(\psi - \Delta\phi) \right]. \quad (5)$$

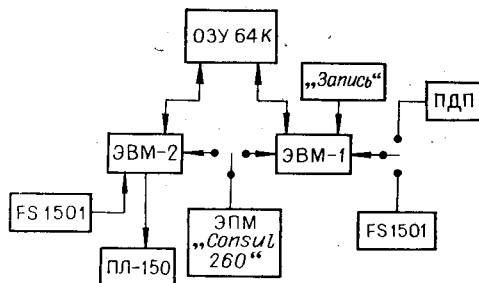


Рис. 5.

Здесь

$$\psi = \Omega_{\phi} t; \quad a = \delta \Omega_{\phi} / 2 \Omega_{\phi}; \quad b = \Omega_{\text{м}} / \Omega_{\phi}; \quad c = (\Omega_{\text{вс}} - \Omega_{\phi}) / \Omega_{\phi}; \quad d = \cos \delta \Omega_{\phi} t / 2.$$

Длительность отклика фильтра будет определяться добротностью контура. При точной настройке фильтра на частоту видеосигнала ($c = 0$) фильтр полностью устраняет влияние огибающей сигнала (3).

Для нахождения моментов перехода колебаний через нуль приравняем (5) к нулю:

$$Z(\psi) = \text{tg}(\psi - \Delta\phi) = \frac{(a - b) \sin a\psi + \frac{d + 1 - 2 \cos(c\psi/2)}{\psi}}{cd}. \quad (6)$$

Решение этого уравнения позволяет найти зависимость фазы выходного сигнала ψ от входного сигнала $\Delta\phi$.

Приведем результаты расчета максимального изменения $(\psi - \Delta\phi)$ для разных точек перехода через нуль при $d = 1$, $c = 0,02$, $\Delta\phi = 2\pi$, $a = 0,05$:

Номер нуля	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta(\psi - \Delta\phi)$, град	8	5,8	4,3	3	1,7	1,2	0,4	1,2	1,7	3

Погрешность измерения минимальна в области 4—10 переходов через нуль. При правильно выбранных моментах переходов через нуль погрешность за счет фазовой характеристики фильтра не будет превышать 1—3°. В нашем случае выбран четвертый переход через нуль, так как количество переходов в интерферограмме ограничено четырьмя периодами.

Нелинейность строчной развертки. Этот фактор приведет к нелинейным искажениям $f_{\text{вс}}$. Расчет по методике [5] показал, что для данной камеры такие искажения составляют 0,17%. Полагая, что это равнозначно расстройке $f_{\text{вс}}$ относительно f_{ϕ} , погрешность измерения на четвертом переходе через нуль $\Delta(\psi - \Delta\phi) = 0,6^\circ$.

Экспериментальные результаты. Описываемая выше система использовалась для фазовых измерений в акустооптическом фазометре-частотомере, построенном по схеме интерферометра Юнга с размерами акустооптических модуляторов (щелей) $W = 1$ мм и расстоянием между ними $d = 2$ мм. Обработка сигнала с устройства, приведенного на рис. 2, проводилась на вычислительном комплексе, структурная схема которого представлена на рис. 5. Нами применялись микроЭВМ «Электроника НЦ-ОЗД». ЭВМ-1 производит прием информации со схемы предварительной обработки (ПДП), определяет положение максимума интенсивности по строке и по кадру и осуществляет передачу этих значений в ОЗУ.

Для увеличения скорости ввода в ЭВМ-1 использовался канал прямого доступа к памяти контроллера перфоленточных устройств через адаптер прямого доступа. Синхронизация ввода по каналу прямого доступа осуществлялась кадровыми и строчными синхроимпульсами ТВ-камеры. Считывание информации происходит за время одного полукадра ($T = 20$ мс), а время второго полукадра используется для обработки. ЭВМ-2 осуществляет прием значения от ЭВМ-1 через ОЗУ, расчет среднего значения $\Delta\phi$ и дисперсии $\sigma_{\Delta\phi}$ в интервале 10—100 кадров, производит распечатку информации.

На рис. 6 показана зависимость ошибки измерения $\Delta\phi$ системой в случае усреднения по 60 кадрам (кривая 1). При этом $f_{\phi} = 104, 166$ кГц, $\Delta f_{\phi} = 18$ кГц, $f_{\text{вс}} = 112$ кГц. Для сравнения здесь же приведен график погрешности, вносимой контуром в начальную фазу согласно (6) при указанных параметрах контура и видеосигнала.

Результаты эксперимента показывают, что при выбранных параметрах $f_{вс}$ и f_{ϕ} заметный вклад в погрешность измерения вносит фазовая характеристика контура, что подтверждается качественным совпадением хода экспериментальной и расчетной зависимостей. Рас-

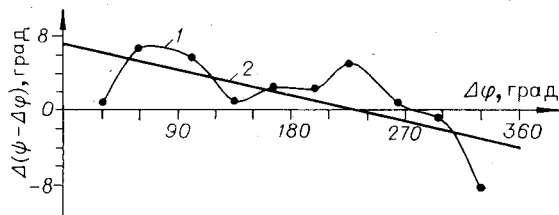


Рис. 6.

хождение результатов объясняется суммарным эффектом всех основных источников погрешностей измерения при экспериментальных исследованиях. Максимальная погрешность измерения $\Delta\phi = 7,2^\circ$, что позволяет измерять смещение интерферограммы с точностью 20 мкм. Для достижения более высокой точности необходимо точное согласование пространственной частоты с центральной частотой контура. Дальнейшее снижение погрешности измерения фазы можно обеспечить путем увеличения частоты тактового генератора.

Данная система может быть применена для экспресс-обработки оптических интерферограмм, например, для измерения смещения оптических спектров, профилей показателей преломления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боков Л. А., Краковский В. А., Пуговкин А. В. Измерение взаимной спектральной плотности мощности при помощи акустооптических процессоров.— Радиотехника и электроника, 1982, т. XXVII, № 6, с. 1197—1202.
2. Душин Л. А. и др. Двухградационная автоматическая обработка оптических интерферограмм плазмы на ЭВМ.— Автометрия, 1974, № 1, с. 50—53.
3. Душин Л. А. и др. Автоматическая система для первичной обработки оптических интерферограмм плазмы.— Автометрия, 1974, № 1, с. 89—91.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1970.
5. Полоник В. С. Телевизионные автоматические устройства.— М.: Связь, 1974.

Поступила в редакцию 12 января 1984 г.

УДК 535.317.1

А. А. ЛАПИДЕС
(Москва)

КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА НАПРАВЛЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАПИСИ СИГНАЛА В ФОРМЕ ТЕНЕВЫХ ГРАФИКОВ

В [1] предложен и исследован метод анализа направленности акустических полей. Метод основан на когерентно-оптическом анализе пространственного спектра плотностной записи сигналов антенны микрофонов. Основной недостаток плотностной записи состоит в том, что при химической обработке пленки должны соблюдаться жесткие условия, нарушение которых приводит к появлению нелинейных искажений [2].

По этой причине вместо плотностной записи в ряде применений используют запись сигнала в силуэтной форме (фонограммы [2], когерентный спектральный анализ сигналов [3—8], анализ широкополосных сигналов по методу свернутого спектра [9—11], синтез голограмм [12], синтез одномерных пространственных фильтров [13]). Запись сигналов в силуэтной форме может быть выполнена как на фотопленке [3—6, 8], так