

Н. А. БУХАРИН, Н. А. ЕСЕПКИНА, Б. А. КОТОВ,
Ю. А. КОТОВ, А. В. МИХАЙЛОВ
(Ленинград)

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ КОРРЕЛЯТОР С ИНТЕГРИРОВАНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

1. Существует ряд задач, для решения которых необходимо обрабатывать сигналы большой длительности (~ 100 мс и более), например задачи корреляционной обработки сигналов пульсаров [1], радиointерферометров [1, 2] и т. д. Для таких задач большой интерес представляют акустооптические корреляционные устройства, в которых интегрирование осуществляется не по пространственным координатам, а во времени [2—4]. В этом случае на выходе устройства одновременно формируется совокупность значений корреляционной функции в некотором диапазоне сдвигов входных сигналов.

Интегрирование во времени наиболее эффективно можно проводить с помощью фотоприемников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-элементов). Однако время интегрирования в известных акустооптических корреляторах с использованием ПЗС-элементов ограничивается сотнями миллисекунд [4]. На практике же встречаются задачи, требующие значительно большего времени интегрирования. Так, при корреляционной обработке сигналов радиointерферометров в режиме сопровождения источника излучения это время может составлять минуты и даже часы. В таких случаях к ПЗС-элементам необходимо добавлять буферную память, в качестве которой можно использовать память ЭВМ. Последняя, помимо хранения данных, может управлять работой устройства в целом и при необходимости проводить обработку выходных сигналов.

Акустооптические устройства на основе приборов с зарядовой связью и ЭВМ являются, по существу, гибридными оптико-цифровыми системами. Данная статья посвящена исследованию одного из вариантов таких систем.

2. Разработан и экспериментально исследован акустооптический коррелятор, интегрирование в котором осуществлялось с помощью линейки приборов с зарядовой связью и ЭВМ «Электроника-100». Работа оптической системы с ЭВМ обеспечивалась с помощью специально разработанного интерфейса [5].

Блок-схема устройства для получения авто- и кросс-корреляционных функций сигналов приведена на рис. 1. При вычислении автокорреляционных функций входных сигналов на входы акустооптических модуляторов АОМ₁ и АОМ₂ поступает сигнал от высокочастотного генератора, настроенного на частоту F_0 , равную средней частоте полосы пропускания модуляторов. Амплитуда этого сигнала

$$A = V + aU(t),$$

где $U(t)$ — обрабатываемый сигнал; V — амплитуда сигнала, поступающего на вход модуля в случае, когда $U(t) = 0$; a — масштабный коэффициент.

АОМ₁ расположен в точке фокусировки луча оптического квантового генератора, в результате чего взаимодействие света со звуком происходит в малой области. Поэтому можно считать, что интенсивность дифрагированного света зависит только от времени:

$$I_1 = K_1[V_1 + a_1U(t)]$$

(K_1 — коэффициент пропорциональности [4]).

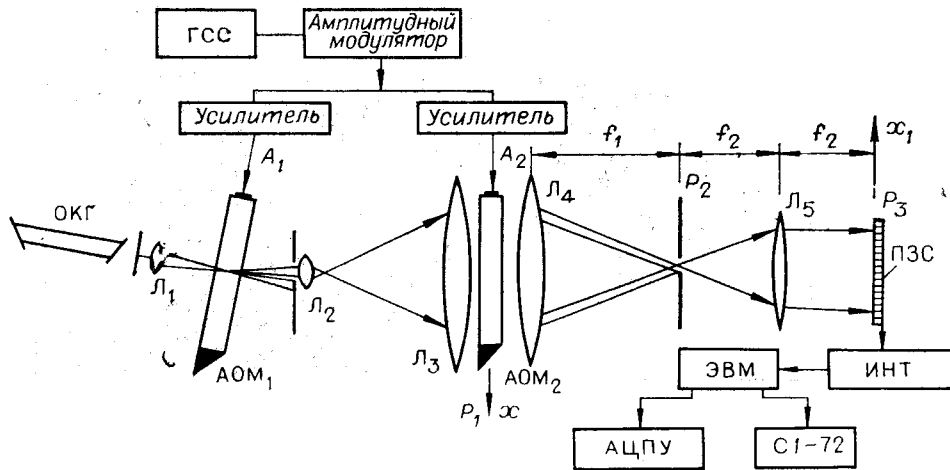


Рис. 1.

Линзы L_2 и L_3 коллимируют дифрагированный пучок, который затем освещает АОМ₂. Интенсивность света в дифракционном порядке этого модулятора

$$I = K_1 K_2 [V_1 + a_1 U(t)] [V_2 + a_2 U(t - x/s)].$$

Здесь s — скорость звука в модуляторе.

Система линз L_4 и L_5 формирует изображение ультразвукового модулятора АОМ₂ в плоскости P_3 , причем $x_1 = x(f_2/f_1)$. В плоскости P_2 с помощью специального фильтра фильтруется нулевой порядок дифракции.

Сигнал на выходе отдельных ПЗС-элементов, установленных в выходной плоскости устройства, пропорционален интегралу по времени от падающей на них интенсивности света. Таким образом, на выходе устройства формируется сигнал

$$\Phi(x_1) = K \int_0^T [V_1 + a_1 U(t)] [V_2 + a_2 U(t - x_1 f_1 / s f_2)] dt,$$

где T — время интегрирования; K — постоянная величина, пропорциональная $K_1 K_2$ и зависящая от коэффициента преобразования светового сигнала электрической линейкой ПЗС.

Если сигнал $U(t)$ такой, что его среднее значение на промежутке интегрирования равно нулю, т. е.

$$\frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt = 0,$$

то выходным сигналом будет

$$\Phi(x_1) = K V_1 V_2 T + K a_1 a_2 \int_0^T U(t) U(t - x_1 f_1 / s f_2) dt.$$

Следовательно, сигнал с каждого элемента ПЗС-линейки (номер элемента соответствует координате x_1) пропорционален значению корреляционной функции при смещении, равном $x_1 f_1 / s f_2$. Если на модуляторы подавать разные сигналы U_1 и U_2 , то сигнал $\Phi(x_1)$ будет пропорционален кросс-корреляционной функции.

Линейка ПЗС-элементов, начиная с момента времени $t = 0$, работает в режиме накопления электрического заряда. В момент времени $t = T$

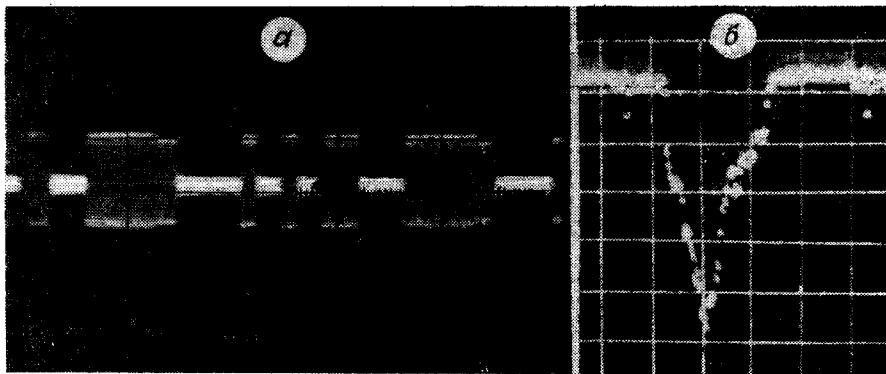


Рис. 2.

на линейку поступает управляющий сигнал с ЭВМ и накопленные в элементарные заряды сбрасываются в сдвиговые регистры [5]. После этого начинается новый такт накопления, за время которого заряды из сдвиговых регистров последовательно преобразуются в напряжения и выводятся.

3. В разработанном корреляторе сигналы с выхода ПЗС-линейки через устройство сопряжения (интерфейс) поступали в ЭВМ «Электроника-100». Время накопления зарядов могло изменяться от единиц микросекунд до 100 мс. При обработке сигналов с длительностью, превышающей время накопления в линейке ПЗС, использовалась дополнительная память ЭВМ. В этом случае каждому элементу ПЗС-линейки соответствует своя ячейка памяти ЭВМ, в которой суммируются результаты отдельных циклов накопления в ПЗС. Длительность реализованных нами циклов накопления составляла 10 мс, а полное время интегрирования с использованием памяти ЭВМ достигало 1—1,3 с. Сигналы ПЗС-элементов после интегрирования в течение 10 мс поступали на осциллограф, а сигналы из ячеек памяти ЭВМ выводились на цифронечающее устройство.

В устройстве применялись акустооптические модуляторы со звукопроводами из дистиллированной воды, время памяти в которых равнялось 15 мкс. Модуляторы работали на центральной частоте ~ 30 МГц с полосой ~ 3 МГц. ПЗС-линейка состояла из 100 элементов размером $1 \text{ мм} \times 20 \text{ мкм}$, расположенных с шагом 25 мкм. Соотношение между f_1 и f_2 такое, что каждому отдельному ПЗС-элементу во временном масштабе соответствовало 0,32 мкс, т. е. при $x_1 = 25 \text{ мкм}$ $f_1/f_2 = 19,2$, $x_1 f_1 / s f_2 = 0,32 \text{ мкс}$.

Приведем полученные результаты экспериментов. На рис. 2, а показан входной сигнал, состоящий из отдельных импульсов, длительностью 3,8 мкс. Полная длительность обрабатываемого сигнала определялась временем интегрирования. На рис. 2, б дан выходной сигнал ПЗС-линейки в случае интегрирования в течение 10 мкс. Каждое отдельное пятно на фотографии соответствует своему элементу линейки, а вертикальное отклонение пятна пропорционально величине сигнала, накопленного на элементе. Как видно из рис. 2, б, ширина корреляционного максимума $\sim 3,9$ мкс. Коэффициент сжатия, полученный в этом случае, равнялся 2500, что хорошо согласуется с расчетным значением ~ 2600 ($\Delta FT = 2,6 \cdot 10^3$).

На рис. 3, а представлена автокорреляционная функция шумового сигнала с полосой 1,5 МГц и длительностью выборки 10 мс, а на рис. 3, б — с такой же полосой и длительностью 1,28 с. График на

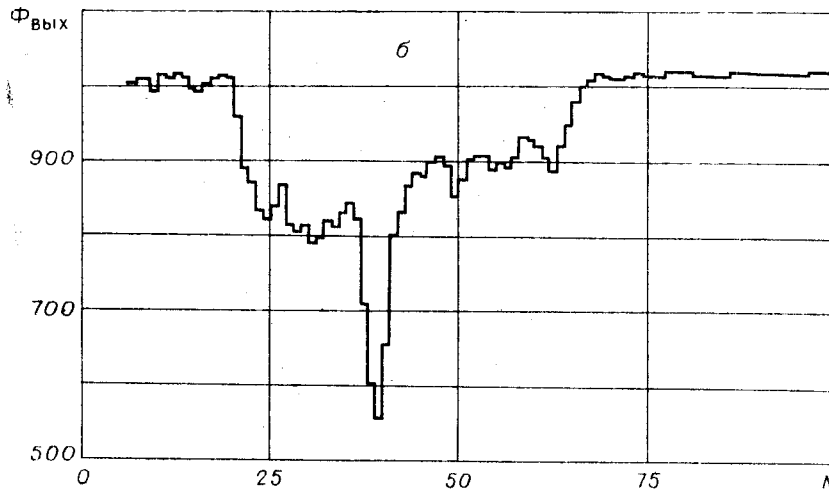
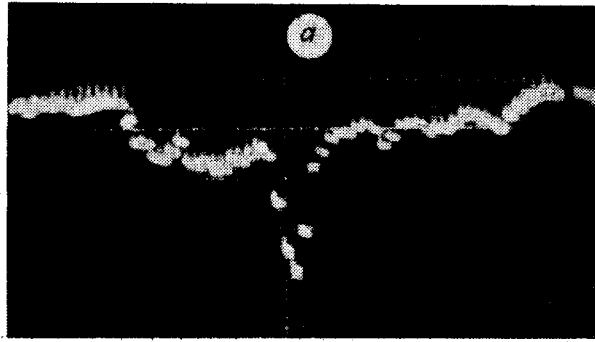


Рис. 3.

рис. 3, б построен по результатам, выведенным на цифропечатающее устройство из ячеек памяти ЭВМ. Каждая ступенька соотносится с одним элементом линейки. Как видно из рисунка, ширина корреляционного максимума соответствует 0,64 мкс, т. е. полученный коэффициент сжатия шумового сигнала $\sim 2 \cdot 10^6$.

Из приведенных результатов следует, что разработанный акустооптический коррелятор с интегрированием во времени позволяет обрабатывать сигналы с большим произведением полосы на длительность ($\sim 10^6$). Длительность обрабатываемых сигналов может быть увеличена за счет накопления данных в памяти ЭВМ.

В заключение авторы выражают признательность А. М. Мартынову за полезные обсуждения, С. В. Прусс-Жуковскому за изготовление акустооптических модуляторов и А. Р. Булыгину за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. М.: Мир, 1976.
2. Есенина Н. А. и др. Использование акустооптических корреляционных устройств для обработки сигналов интерферометров.— Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, вып. 3.
3. Мартынов А. М. Способ стробоскопической записи радиосигналов. (Автор. свид-во № 462136.) — БИ, 1975, № 8.

4. Sprague R. A., Koliopoulos C. L. Time Integrating Acoustooptic Correlator.— Appl. Opt., 1976, vol. 15, N 1.
5. Есенкина Н. А. и др. Гибридная оптико-цифровая система для спектрального анализа радиосигналов.— Автометрия, 1978, № 3.

*Поступила в редакцию 28 марта 1978 г.;
окончательный вариант — 15 мая 1979 г.*

УДК 535.42.681.3

В. И. ГОРОДЕЦКАЯ, Т. П. КОСОБУРД, Ф. А. МАРКУС
(Горький)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ СТРУКТУР В ОБЛАСТИ ДИФРАКЦИИ ФРЕНЕЛЯ

Задача о дифракции света на периодических структурах рассматривалась в ряде работ [1—7]. Достаточно общая постановка этой задачи может быть сформулирована следующим образом. На пути параллельного пучка когерентного света (с длиной волны λ), распространяющегося вдоль оси z , расположен перпендикулярно волновому вектору транспарант длиной $2D$, содержащий запись сигнала с периодом Λ , изменяющего амплитуду или фазу проходящего света. Следует определить распределение интенсивности света в плоскости за транспарантом.

Впервые это распределение наблюдал Тальбот в 1836 г., а объяснил Рэлей в 1881 г., показав, что периодические амплитудные структуры саморепродуцируются в пространстве с периодом $2L = 2\Lambda^2/\lambda$. В последующих работах экспериментально и теоретически исследовались дифракционные картины в плоскостях полного восстановления (изображения Фурье) и промежутках между ними (изображения Френеля). Наиболее подробно рассматривалась дифракция на неограниченных структурах [1—4]. Учет ограничения их размеров проводился в работах [6, 7] с помощью ЭВМ. Так, в [7] для некоторых частных случаев было рассчитано число исходных элементов N , необходимых для получения хорошего качества изображений Фурье и Френеля. В данной статье сделаны теоретические оценки величины N для сигналов произвольного вида. Изучение этого вопроса основано на подходе В. А. Зверева [5].

Комплексная амплитуда плоской волны $E_0 \exp(ikz)$, падающей на транспарант, модулируется им и в плоскости $z = 0$ характеризуется функцией $E(x', 0)$. На произвольном расстоянии z распределение поля можно представить в виде [5]

$$E(x, z) = \int_{-D}^D H(x - x', z) E(x', 0) dx'. \quad (1)$$

Здесь $H(x, z)$ — импульсная характеристика свободного пространства [5], которая в зоне Френеля определяется приближенным выражением

$$\begin{aligned} H(x - x', z) &= \sqrt{k/2\pi iz} \exp ikz \exp [ik(x - x')^2/2z] = \\ &= C(z) \exp [ik(x - x')^2/2z]. \end{aligned} \quad (2)$$

Запись $H(x, z)$ в виде (2) накладывает ограничения на z , но мы не будем на этом останавливаться, так как конечность длины просвечиваемой