

06.3; 07; 08

© 1990

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ ПРИ КОЛЛИНЕАРНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

В.Ю. Раковский, А.С. Щербаков

В оптической вычислительной технике активно ведется разработка оптических цифровых алгебраических процессоров на основе алгоритма дискретной свертки, в которых широко используются акустооптические устройства [1-3]. Двоичное представление данных в таких процессорах снижает требования, налагаемые динамическим диапазоном аналоговых систем, позволяя тем самым повысить точность производимых вычислений. В соответствии с алгоритмом цифрового перемножения двоичных чисел на основе дискретной свертки акустооптические цифровые процессоры (АОЦП) имеют в своей основе конвольверы с пространственным или временным интегрированием и послепроцессорную электронику, преобразующую результат в смешанном коде в стандартный двоичный код, обзор которых дан в [4].

В данной работе сообщается о проведенных теоретическом и экспериментальном исследованиях возможности построения АОЦП путем реализации дискретной свертки на основе иного физического явления — коллинеарного взаимодействия акустических волн, кодируемых двоичными последовательностями [5, 6].

Принцип действия акустооптических устройств, применяющих акустическую нелинейность, основан на рассеянии падающего на звукопровод света на результирующей упругой волне, генерируемой двумя исходными упругими волнами при выполнении законов сохранения энергии и импульса:

$$f_1 + f_2 = f_3, \quad \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3, \quad (1)$$

где f_i и \vec{k}_i — частота и волновой вектор i -й волны, $i=1, 2, 3$. Решения системы уравнений движения упругих волн различных поляризацій при трехчастотном коллинеарном взаимодействии для амплитуды генерируемой волны в приближении слабой связи между волнами представляют собой интегралы типа корреляции или свертки [7, 8]. Из этого следует, что модулируя взаимодействующие акустические волны прямоугольными импульсами, кодирующими двоичные числа, можно ожидать результирующий сигнал в виде дискретной свертки входных двоичных последовательностей.

Рассмотрение типов коллинеарных взаимодействий с точки зрения эффективностей нелинейного преобразования и акустооптической дифракции на результирующей волне позволяет выбрать для построения

АОЩ кристалл парателлурита (TeO_2) в направлении $[110]$ с использованием сонаправленного взаимодействия поперечной и продольной волн $S_+(f_1) + L_+(f_3) \rightarrow S_-(f_2)$. Генерация встречной поперечной волны характеризуется для этого процесса аномально высоким значением параметра нелинейности $\Gamma=102$ [8], а коэффициент акустооптического качества для дифракции на сдвиговой волне имеет значение $M_2=793$ [9], превосходящее возможности других материалов. Условия фазового синхронизма для рассматриваемого процесса имеют, исходя из (1), вид:

$$f_2 = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} f_1 = \frac{\alpha-1}{2\alpha} f_3, \quad \alpha = \frac{V_L}{V_S}, \quad (2)$$

где V_L и V_S - скорости продольной и поперечной упругих волн, $V_L = 4.21 \cdot 10^5$ см/с, $V_S = 0.616 \cdot 10^5$ см/с [9], $\alpha = 6.83$. Представляя амплитуды исходных взаимодействующих волн в виде функций $f(t - \frac{x}{V_S})$, $g(t - \frac{x}{V_L})$, равных нулю везде, кроме промежутка времени, меньшего временной апертуры звукопровода, и полагая точное выполнение условий (2), получим для считываемой световым пучком при абсциссе $x_0=0$ амплитуды генерируемой волны $S_-(f_2)$ корреляционный интеграл вида:

$$a_2(t) = \frac{\pi^2 f_1 f_3 \Gamma}{2 V_L} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) g(\gamma\tau + (1-\gamma)t) d\tau, \quad \gamma = \frac{\alpha+1}{2\alpha}. \quad (3)$$

Для реализации дискретной свертки двоичных последовательностей нужно обратить во времени сигнал, кодирующий волну S_+ , обеспечить взаимодействие каждой пары битов двоичных чисел и производить считывание результирующего сигнала вблизи источника исходных акустических волн ($x_0=0$) для использования всей длины звукопровода.

Поскольку движение акустических сигналов в материале звукопровода происходит с различными скоростями, для получения сигнала дискретной свертки в виде треугольных импульсов с кратными амплитудами необходимо специальное кодирование двоичных последовательностей (рис. 1):

$$\tau_1 = \frac{2}{\alpha+1} \tau, \quad \tau_2 = \frac{\alpha+1}{2} \tau, \quad \tau = V_L \tau_L = V_S \tau_S, \quad (4)$$

где τ_L и τ_S - длительности импульсов одного разряда двоичных чисел для продольной и сдвиговой волн соответственно. Рис. 1 иллюстрирует процесс образования сигнала дискретной свертки на примере $11 \times 11 = 121$ в системе координат, сопутствующей волне S_+ . В двоичном потоке, кодирующем волну L_+ , и сигнале дискретной свертки, представляющей собой результат умножения в смешанном коде, младшие разряды следуют раньше старших, для волны S_+

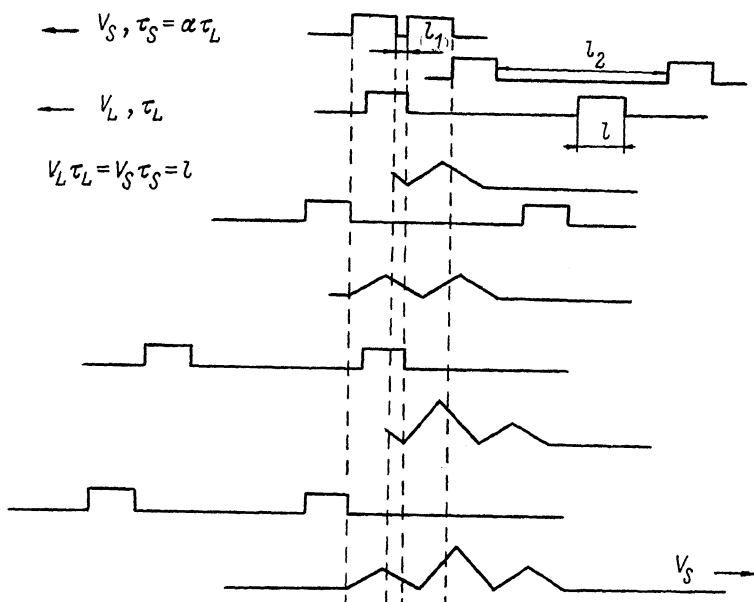


Рис. 1. Образование акустического сигнала дискретной свертки, процесс $S_+ + L_+ \rightarrow S_-$.

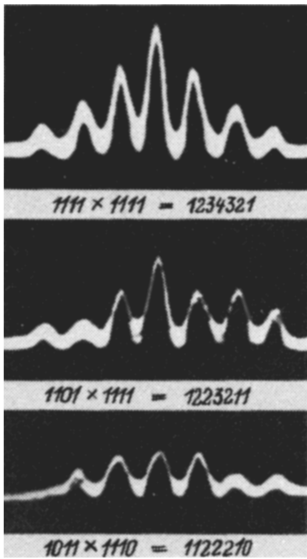
расположение разрядов инверсное. Максимальные разрядности обрабатываемых информационных потоков N_1, N_2 определяются необходимостью взаимодействия каждой пары битов, откуда получаем:

$$N_1 = \frac{\alpha + 1}{\alpha + 3} \frac{\Delta t}{\tau_S}, \quad N_2 = \frac{2(\alpha - 1)}{\alpha + 3} \frac{D}{V_S \tau_S} - \frac{2\alpha}{\alpha + 3} \frac{\Delta t}{\tau_S}, \quad 0 < \Delta t < \frac{D(\alpha - 1)}{\alpha V_S}, \quad (5)$$

где D - длина звукопровода, Δt - временная задержка ввода в звукопровод второго двоичного сигнала.

При проведении экспериментальных исследований неразведенный световой пучок от когерентного источника ($\lambda = 0.63$ мкм) модулировался акустическим сигналом дискретной свертки и считывался фотоприемником. Несущие частоты составляли, в соответствии с соотношениями (2), $f_1 = 35$ МГц, $f_3 = 61$ МГц, что обуславливало незначительное влияние акустического затухания. Упругие волны указанных частот возбуждались единым пьезопреобразователем из 17° yx-среза кристалла $LiNbO_3$, имеющего приблизительно одинаковые коэффициенты электромеханической связи для продольной и поперечной волн, скорости которых для этого среза составляют $7.22 \cdot 10^5$ см/с и $4.13 \cdot 10^5$ см/с [10]. При фиксированной толщине преобразователя (для указанных частот 60 мкм) такие значения скоростей дают отношение частот полуволнового резонанса попереч-

Рис. 2. Сигналы дискретной свертки двоичных последовательностей на выходе фотоприемника.



ной и продольной волн $\frac{f_s}{f_L} \approx 0.57$, позволяя наилучшим образом возбуждать в звукопроводе волны, удовлетворяющие условию синхронизма для выбранного типа взаимодействия. В экспериментах использовался монокристалл TeO_2 , вырезанный в направлении $[110]$ с точностью не хуже $1'$, с длиной звукопровода 50 мм; свет распространялся вблизи направления $[001]$; размеры ламели пьезопреобразователя составили $7 \times 2 \text{ мм}^2$. Использование сонаправленного взаимодействия позволило применить поглотитель на противоположном торце кристалла, обеспечивая уровень отраженных сигналов на продольных и сдвиговых волнах не более 30 дБ.

Световой пучок направлялся под углом

Брегга, соответствующем разностной частоте $f_2 = f_3 - f_1 = 26 \text{ МГц}$ вблизи пьезопреобразователя, считывая сигнал дискретной свертки, модулирующий генерируемую сдвиговую волну, которая движется по направлению к источнику исходных упругих волн. На рис. 2 представлены осциллограммы сигналов дискретной свертки некоторых двоичных последовательностей. Длительности импульсов, кодирующих биты исходных информационных потоков, составляли $\tau_3 \approx 7 \text{ мкс}$, $\tau_2 \approx 1 \text{ мкс}$, длительность треугольного импульса дискретной свертки — около 12 мкс.

Исследуемый макет, как следует из (5), потенциально способен обрабатывать за времена порядка 100 мкс 32-разрядные двоичные числа при длительности кодирующих биты импульсов $\tau_3 = 700 \text{ нс}$, $\tau_2 = 100 \text{ нс}$, оставаясь в диапазоне несущих частот до 100 МГц, что эквивалентно скорости обработки информации 10^7 бит/с . Особенностью применения нелинейных акустических явлений для реализации дискретной свертки в сравнении с традиционными АОЦП является более простая функциональная схема устройства с меньшим числом оптических элементов вследствие перехода от широкоапертурных коллимированных световых потоков к неразведенным пучкам. Как и другие АОЦП, устройства на основе акустической нелинейности могут быть эффективно использованы для цифровой оптической обработки данных, представленных электрическими сигналами. При этом, по-видимому, за счет формирования сигнала дискретной свертки фоновой системой возрастает динамический диапазон устройства,

позволяя повысить точность проводимых вычислений и возможности по параллельному выполнению операций.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G u i l f o y l e P.S. // Opt. Eng. 1984. V. 23. N 1. P. 20-25.
- [2] G o u t z o u l i s A.P. // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 22. P. 4095-4099.
- [3] Раковский В.Ю., Щербачков А.С. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 9. С. 178-180.
- [4] Кулаков С.В., Кулаков В.С., Пресленев Л.Н., Тигин Д.В. // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 12. С. 30-40.
- [5] Петрунькин В.Ю., Раковский В.Ю., Щербачков А.С. А.с. 1485236 // БИ. 1989. № 21.
- [6] Беришев И.Э., Петрунькин В.Ю., Раковский В.Ю., Щербачков А.С. А.с. 1487032 // БИ. 1989. № 22.
- [7] B r i d o u x E., R o u v a e n J.M., B r u n e e l C., T o r g u e t R. // Journ. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 6. P. 2384-2389.
- [8] Ильченко Л.Н., Обозненко Ю.Л., Смирнов Е.Н., Юрченко А.В. Сб.: Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев.: Вища школа, 1984. В. 15. С. 134-139.
- [9] Утида Н., Нидзэки Н. // ТИИЭР. 1973. Т. 61. № 8. С. 21-43.
- [10] Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. Шаскольской М.П. М.: Наука, 1982. 632 с.

Ленинградский
политехнический
институт им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию
19 сентября 1989 г.