

УДК 535 317

КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ДВОИЧНОМ КОДЕ

Д. А. Дементьев, В. Д. Свет

Рассмотрены особенности многоканальной записи и когерентной оптической обработки сигналов, представленных в двоичном коде. Показано, что данный метод записи позволяет реализовать высокий динамический диапазон при использовании бинарных модуляторов света, но с меньшей дифракционной эффективностью по сравнению с плотностью записью.

Известно, что точность вычислений, осуществляемых когерентными оптическими процессорами, является невысокой и уступает точности цифровых устройств [1]. Одной из основных причин этого является ограничение входного динамического диапазона пространственно-временными модуляторами света (ПВМС), с помощью которых анализируемые сигналы вводятся в оптический процессор. Практически все известные на сегодняшний день типы модуляторов (фотоупленка, термопластики, магнитооптические и электрооптические кристаллы) имеют входной динамический диапазон, лежащий в пределах 20 ÷ 35 дБ.

Методы повышения входного динамического диапазона в настоящее время развиваются по двум основным направлениям: улучшения характеристик ПВМС и применения различных способов кодирования входной информации.

В настоящей работе предлагается метод записи и когерентной оптической обработки сигналов, представленных в двоичном коде. Применение двоичного представления привлекательно прежде всего тем, что для записи сигналов требуются только два уровня прозрачности, что резко снижает требования к характеристикам ПВМС. Практическая возможность такой записи обусловлена тем, что существуют много типов модуляторов света с высоким пространственным разрешением, достигающим несколько сотен линий на мм (структуры МДП-ЖК, термопластики, лазерная запись, основанная на испарении металлического слоя). Для многих практических задач по обработке сигналов такая высокая разрешающая способность оказывается избыточной и этим можно воспользоваться для повышения входного динамического диапазона.

При представлении сигналов в двоичном коде исходный двумерный сигнал $a(x, y)$ записывается в виде

$$b(x_m, y_n) = B + Ca(x_m, y_n) = \sum_{i=0}^{R-1} S_i^{nm} 2^i, \quad (1)$$

где R — число двоичных разрядов, $S_i^{nm} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$, B, C — постоянные коэффициенты, определяемые из условия $[B + Ca(x, y)] \geq 0$.

При записи временных сигналов по многим каналам $y_n = nY/N$, Y — размер модулятора по пространственной координате y , N — число каналов, n — текущий номер канала, $x_m = mv\tau$, v — скорость записи или ввода сигналов, τ — интервал временной дискретизации.

Вид оптической записи сигнала в двоичном коде с одного канала при $R=3$ показан на рис. 1. Числа S_i^{nm} записываются в виде квадратных апертур с размерами $\varepsilon \times \varepsilon$. При $S_i = 1$ коэффициент пропускания

апертуры $T_i = 1$, при $S_i = 0$, $T_i = 0$. Разряды числа располагаются симметрично относительно центра горизонтального растра подобно тому, как это делается при двухсторонней силуэтной записи [2]. Очевидно, что при таком способе записи ширина строки, которую занимает один канал, равна $2R\epsilon$.

Для того, чтобы дальше обрабатывать такой сигнал без искажений в когерентном оптическом процессоре, т. е. как аналоговый сигнал, необходимо коэффициент пропускания апертуры каждого разряда умножить на величину 2^i . Это можно реализовать с помощью дополнительного транспаранта (рис. 2), совмещаемого с модулятором (рис. 1). Транспарант состоит из полос шириной ϵ , параллельных оси x . Коэффициент пропускания полосы, соответствующей i -му разряду, равен $T_0(2^i/2^{R-1})$. Суммарный коэффициент пропускания модулятора, совмещенного с таким транспарантом, можно записать в виде

$$T(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^{R-1} \frac{T_0 S_l^{nm} 2^l}{2^{R-1}} \left[\text{rect} \left(\frac{y - (2(R-i) - 1)(\epsilon/2) - nl}{\epsilon} \right) + \right. \\ \left. + \text{rect} \left(\frac{y + (2(R-i) - 1)(\epsilon/2) - nl}{\epsilon} \right) \text{rect} \left(\frac{x - m\epsilon}{\epsilon} \right) \right], \quad (2)$$

где

$$\text{rect} \left(\frac{x}{c} \right) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq \frac{c}{2} \\ 0 & \text{при } |x| > \frac{c}{2} \end{cases}$$

l — расстояние между строками растра.

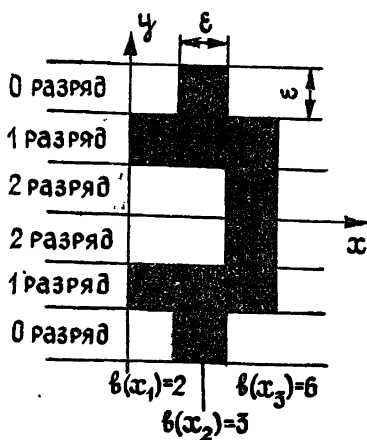


Рис. 1.

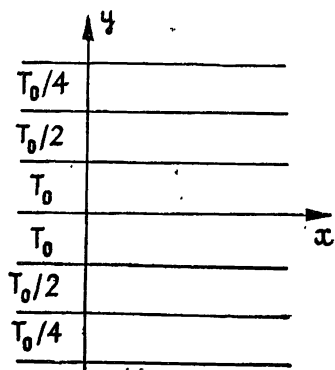


Рис. 2.

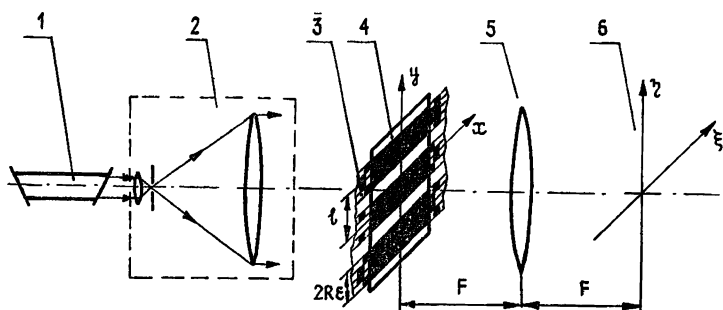


Рис. 3. Оптическая схема фурье-процессора:
1 — лазер, 2 — расширитель светового пучка, 3 — модулятор,
4 — дополнительный транспарант, 5 — фурье-линза, 6 — выходная плоскость процессора.

Если теперь поместить оба транспаранта с суммарным коэффициентом пропускания $T(x, y)$ во входную плоскость оптического фурье-процессора (рис. 3), то распределение амплитуд света $F(\omega_x, \omega_y)$ в плоскости пространственных частот вдоль оси ω_x будет таким же, как при дискретной записи, основанной на модуляции коэффициента пропускания. Поэтому для простоты расчетов примем, что записываемый сигнал не зависит от координаты x , и будем анализировать результаты одномерного преобразования Фурье вдоль оси y в виде

$$F(\omega) = C \frac{T_0 E_0}{2^{R-1}} 2\epsilon \operatorname{sinc} \left(\frac{\omega \epsilon}{2} \right) \sum_{n=1}^N \sum_{l=0}^{R-1} S_l^n 2^l \cos \left\{ [2(R-i) - 1] \frac{\omega \epsilon}{2} \right\} e^{-jn\omega l} =$$

$$= C' \operatorname{sinc} \left(\frac{\omega \epsilon}{2} \right) \sum_{n=1}^N b'_n(\omega) \exp(-jn\omega l), \quad (3)$$

где E_0 — амплитуда падающего на транспаранты света, C, C' — постоянные коэффициенты, $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$,

$$b'_n(\omega) = \sum_{l=0}^{R-1} S_l^n 2^l \cos \left\{ [2(R-i) - 1] \frac{\omega \epsilon}{2} \right\}.$$

Пространственная частота ω связана с координатой ξ в выходной плоскости соотношением $\omega = (2\pi/\lambda)(\xi/F)$, где F — фокусное расстояние фурье-линзы, λ — длина волны света.

Так как запись функции $b(y)$ осуществляется дискретно в точках $y = nl$, то в плоскости пространственных частот возникнут спектры высоких порядков дифракции. При дальнейшем анализе результатов обработки можно ограничиться спектром нулевого порядка $|\omega| \leq \pi/l$. Для того, чтобы соседние строки раstra не пересекались, необходимо, чтобы $l \geq 2R\epsilon$. Если воспользоваться приближением

$$\cos \left\{ [2(R-i) - 1] \frac{\omega \epsilon}{2} \right\} \approx 1 \quad \text{при} \quad |\omega| \leq \frac{\pi}{l}, \quad l > 2R\epsilon, \quad (4)$$

то распределение амплитуд света $F(\omega)$ будет таким же, как при записи сигналов, основанной на модуляции коэффициента пропускания.

Приближение (4) выполняется точно только при $\omega = 0$. При анализе спектра функции в точке $\omega \neq 0$ наличие множителя $\cos \{ [2(R-i) - 1] \omega \epsilon / 2 \}$ в уравнении (3) приводит к уменьшению амплитуд записываемых сигналов:

$$\Delta b_n(\omega) = b(y_n) - b'(y_n) = \sum_{l=0}^{R-1} S_l^n 2^l \left(1 - \cos \left\{ [2(R-i) - 1] \frac{\omega \epsilon}{2} \right\} \right). \quad (5)$$

Заметим, что искажающее действие функции $\operatorname{sinc}(\omega \epsilon / 2)$ в уравнении (3) можно компенсировать, либо поместив в плоскости пространственных частот транспарант с обратным коэффициентом пропускания, т. е. $\sim [\operatorname{sinc}(\omega \epsilon / 2)]^{-1}$, либо при дальнейшей электронной обработке оптического изображения. Полностью компенсировать искажение амплитуды ($\Delta b_n(\omega)$) при помощи транспаранта в плоскости пространственных частот нельзя, так как $\Delta b_n(\omega)$ нелинейно зависит от мгновенной амплитуды сигнала (набора S_l^n), поэтому для случайного входного сигнала величины $\Delta b_n(\omega)$ следует рассматривать как дополнительный шум записи.

Разлагая в выражении (5) функцию $\cos\{[2(R-i)-1]\omega\epsilon/2\}$ по параметру $\omega\epsilon$ при $|\omega| \leq \pi/l$, $l > 2R\epsilon$, получим

$$\Delta b_n(\omega) \approx \frac{\omega^2 \epsilon^2}{8} \sum_{i=0}^{R-1} S_i^n 2^i [2(R-i)-1]^2. \quad (6)$$

Из (6) видно, что величина $\Delta b_n(\omega)$ достигает максимального значения при записи максимальной амплитуды сигнала, т. е. $S_i^n = 1$.

Для дальнейших оценок будем рассматривать семиразрядный двоичный код $R=7$. При этом $\Delta b(\omega) = 235\omega^2\epsilon^2$. Ошибку $\Delta b_n(\omega)$ можно несколько уменьшить, если в плоскости пространственных частот поместить транспарант с коэффициентом пропускания $T(\omega) \sim \sim (1+15\omega^2\epsilon^2)$ (эту компенсацию можно выполнить и в электронном тракте). В этом случае $\Delta b(\omega) = 136\omega^2\epsilon^2$. Величина $\Delta b(\omega)$ растет с увеличением пространственной частоты ω и достигает максимального значения при $|\omega| = \pi/l$:

$$[\Delta b(\omega)]_{\max} = 136\pi^2\epsilon^2/l^2.$$

При увеличении расстояния l между строками раstra величина $[\Delta b(\omega)]_{\max}$ уменьшается. Определим такое l_0 , при котором эта величина становится меньше интервала квантования,

$$[\Delta b(\omega)]_{\max} \leq 1.$$

При этом $l_0 = 36\epsilon$. Если расстояние между строками раstra $l \geq l_0$, то шумы записи определяются только квантованием сигнала и входной динамический диапазон равен

$$D = 20 \lg P = 20 \lg \left(\sum_{i=0}^{R-1} 2^i \right).$$

При $R=7$ $P=128$ и $D=42$ дБ. Если, например, запись сигналов производится по $N=50$ параллельным каналам и размер записывающей апертуры равен $\epsilon=15$ мкм, то полная ширина транспаранта составит $Y=Nl_0=27$ мм.

При оптической обработке сигналов, представленных в двоичном коде, часть энергии лазерного излучения поглощается в дополнительном транспаранте. Мощность света, прошедшего через модулятор с записью максимального сигнала $S_i^n = 1$ и дополнительный транспарант, равна

$$W_1 = \frac{2R\epsilon}{l} \frac{W_0}{R} \sum_{i=0}^{R-1} \left(\frac{T_0 2^i}{2^{R-1}} \right)^2 \approx \frac{8\epsilon T_0^2}{3l} W_0,$$

где W_0 — мощность падающего света. При $l=l_0=36\epsilon$ и $T_0 \sim 1$ $W_1 = W_0/15$. Поэтому дифракционная эффективность при записи сигналов в двоичном коде оказывается в 15 раз меньшей, чем при записи, основанной на модуляции коэффициента пропускания.

Таким образом, рассмотренный метод записи и оптической обработки сигналов, представленных в двоичном коде, позволяет, используя бинарные модуляторы света, реализовать требуемый динамический диапазон, который трудно достичь при обычной записи, использующей модуляцию коэффициента пропускания, и осуществить параллельную многоканальную обработку, однако дифракционная эффективность такого способа записи оказывается более низкой, чем при плотностной записи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудмен Дж. У. — ТИИЭР, 1977, 65, № 1, с. 37.
2. Felstead E. B. — Appl. Opt., 1971, 10, № 11, p. 2468.

COHERENT OPTICAL PROCESSING OF SIGNALS REPRESENTED IN BINARY CODE

D. A. Dementjev, V. D. Svet

Peculiarities of multi-channel recording and coherent optical processing of signals, represented in binary code, are discussed. This method of recording allows one to realize high dynamic range but with small diffraction efficiency as compared with optical density modulation recording.

ИНСТРУКЦИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ РЕФЕРАТОВ

1. В реферате кратко излагается основное содержание статьи. Реферат должен дать читателю представление о характере освещаемой работы, оригинальности постановки вопроса, методике проведения исследования и его основных результатах.

2. Реферату должно предшествовать библиографическое описание в следующем виде: название статьи, фамилия и инициалы автора, название журнала, где помещается статья. Текст реферата начинается непосредственно с изложения существа работы без повторения заголовка. Форма изложения материала не обязательно должна повторять форму изложения оригинальной статьи.

3. Если оригинал содержит большое количество цифровых данных, их следует обобщить и систематизировать.

4. Средний объем реферата 1,5—2 страницы машинописного текста, отпечатанного через два интервала на белой писчей бумаге обычного формата (30×21) в двух экземплярах с полем 4 см с левой стороны.

5. Таблицы, схемы, графики и пр. могут быть включены в том случае, если они отражают основное содержание работы или сокращают текст реферата. Сообщение о наличии в реферируемой работе таблиц, схем, графиков, фотографий, карт, рисунков необходимо давать в конце реферата. Например, табл. 2, илл. 10.

6. Формулы приводятся только в том случае, если они необходимы для понимания статьи. Громоздкие математические выражения помещать не следует. Формулы следует вписывать четко, не изменяя принятых в оригинале обозначений величин. Формулы и буквенные обозначения вписываются черными чернилами во второй экземпляр. Вписывание формул и буквенных обозначений, а также исправление замеченных опечаток в первом экземпляре не делается.

7. В конце реферата в квадратных скобках указывается название учреждения или предприятия, в котором автор реферируемой работы (если эти данные приводятся в статье) провел работу. Подпись автора и дату написания реферата следует ставить в левом нижнем углу на обоих экземплярах реферата.
