

С. В. СОКОЛОВ, В. В. КАМЕНСКИЙ

## ОПТИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Предложен оптический пространственно-частотный аналого-цифровой преобразователь, принцип действия которого основан на последовательном преобразовании частоты входного оптического сигнала. Преобразователь предназначен для перевода в позиционный двоичный код как электрических, так и оптических аналоговых сигналов.

**Ключевые слова:** устройства обработки информации, оптический аналого-цифровой преобразователь, оптический объединитель, оптический Y-разветвитель.

В настоящее время разработано большое количество различных по быстродействию и точности электронных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [1—3]. Общими их недостатками являются низкое быстродействие, уменьшающееся с ростом разрядности АЦП, и большая сложность.

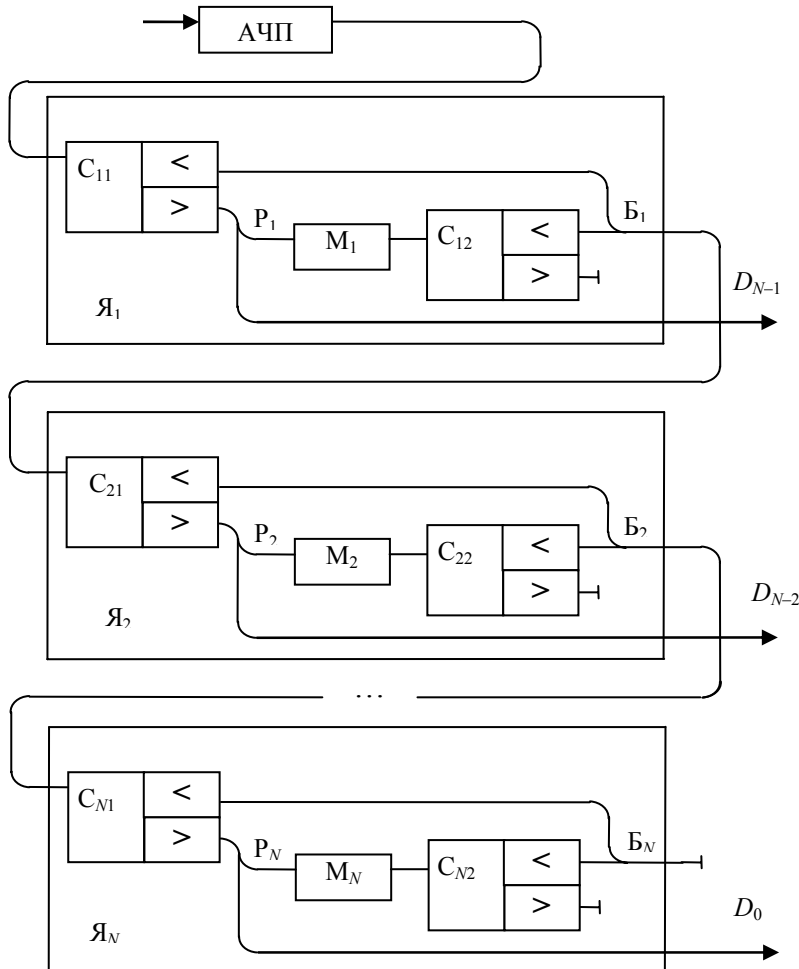
Использование оптических технологий при разработке различного вида АЦП позволяет существенно повысить их быстродействие. Тем не менее известные электрооптические АЦП [2, 3] по-прежнему характеризуются недостаточным быстродействием для использования в конечном каскаде электронных элементов (фотодетектора, усилителя, компаратора) с суммарным временем срабатывания более  $10^{-6}$  с.

В настоящей статье представлен АЦП, имеющий достаточно простую и технологичную структуру и позволяющий осуществлять преобразование в позиционный двоичный код как электрических, так и оптических аналоговых сигналов с быстродействием, потенциально возможным для оптических устройств обработки информации.

Работа устройства основана на преобразовании интенсивности (или амплитуды) аналогового оптического или электрического входного сигнала в оптический сигнал с пространственной частотой, пропорциональной интенсивности входного сигнала, с последующим ее нелинейным преобразованием и многократной пространственно-частотной фильтрацией, что обеспечивает формирование на выходе АЦП оптического двоичного кода, соответствующего аналоговому входному сигналу.

Оптический пространственно-частотный АЦП, функциональная схема которого показана на рисунке, состоит из оптического амплитудно-частотного преобразователя АЧП, оптических пространственно-частотных селекторов  $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{M1}, C_{N2}$ ; оптических Y-разветвителей  $P_1, \dots, P_N$ ; оптических пространственных амплитудных модуляторов  $M_1, \dots, M_N$ ; оптических объединителей  $B_1, \dots, B_N$ .

Входом АЦП является вход оптического амплитудно-частотного преобразователя. Селекторы  $C_{k1}$ ,  $C_{k2}$ , Y-разветвитель  $P_k$ , модулятор  $M_k$  и объединитель  $B_k$  образуют  $k$ -ю разрядную ячейку ( $Я_k$ ) АЦП,  $k = 1, \dots, N$ . Разрядная ячейка  $Я_N$  соответствует младшему разряду АЦП  $D_0$ , а ячейка  $Я_1$  — старшему разряду  $D_{N-1}$ . Информационные выходы всех разрядных ячеек образуют соответствующие выходы  $D_{N-1}, \dots, D_0$  устройства.



На выходе оптического АЧП формируется фронт стоячей оптической монохроматической волны, пространственная частота которой пропорциональна интенсивности  $I$  сигнала на его входе. АЦП может быть выполнен в виде или параметрического генератора частоты, или оптического резонатора с оптически прозрачным периметром и управляемой оптической длиной, или оптического мультиплексора, на вход которого подается набор фронтов стоячих монохроматических волн с заданными частотами [4].

Селекторы  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ , ...,  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  могут быть выполнены в виде или дихроичного элемента (призмы, фильтра, зеркала и т.д.), или дифракционной решетки, или призматического элемента и т.п. Функцией селекторов является пространственное разделение оптических сигналов по частоте: если пространственная частота сигнала меньше заданной (для селектора данной разрядной ячейки), то входной сигнал селектора пройдет на его первый выход „<“, если больше или равна — то на второй выход „>“.

Модуляторы  $M_1, \dots, M_N$  могут быть выполнены в виде транспаранта с постоянной функцией пропускания (гармонической с соответствующей заданной частотой).

Оптические Y-разветвители  $P_1, \dots, P_N$  и второе оптическое ответвление каждого объединителя  $B_1, \dots, B_N$  являются активными оптическими волноводами с коэффициентом усиления 2 (во избежание затухания информационных сигналов в тракте АЦП).

Рассмотрим принцип работы аналогово-цифрового преобразователя на примере трех-разрядного АЦП (поясняя отдельные значения параметров для общего случая  $N$  разрядов).

Пусть на вход АЦП подан сигнал интенсивностью  $I$ , формирующий на выходе оптического АЧП фронт стоячей оптической монохроматической волны с пространственной частотой  $\omega_0$ , относительное значение которой  $\omega_1$  — относительно нижней границы возможного оптического диапазона частот  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ :  $\omega_0 = \omega_1 + \omega_{\min}$  — соответствует 5 (при этом диапазон изменения  $\omega_1 = KI$ , где  $K$  — коэффициент пропорциональности, равный  $7(2^N - 1)$ ).

Иными словами, на выходе оптического АЧП формируется плоский оптический монохроматический поток с распределением амплитуды в направлении оси  $Ox$ , перпендикулярной его распространению:

$$A(x) = A \cos(\omega_0 x),$$

где  $A$  — постоянная известная величина.

Данный поток поступает на вход первой разрядной ячейки  $Я_1$  (на вход селектора  $C_{11}$ ), частота пространственного разделения оптических сигналов которого равна

$$\Omega_{p1} = \Omega_1 + \omega_{\min},$$

где  $\Omega_1 = 2^{N-1} = 4$ .

Так как относительная частота входного сигнала  $\omega_1 = 5$  превышает частоту селектора  $C_{11}$ , то сигнал формируется на его втором выходе „ $\rangle$ “. Этот сигнал поступает как на информационный выход разрядной ячейки  $Я_1$ , т.е. на выход старшего  $D_{N-1}$ -го разряда АЦП, где формирует информационную „1“ (оптический сигнал амплитудой  $A$ ), так и на вход модулятора  $M_1$  с функцией пропускания по оси  $Ox$ :  $f_1(x) = \cos(\Omega_1 x)$ .

Таким образом, на выходе модулятора  $M_1$  будет сформирован оптический сигнал с распределением амплитуды по оси  $Ox$ , равным

$$A_1(x) = A \cos(\omega_0 x) \cos(\Omega_1 x) = A / 2 (\cos(\omega_0 x + \Omega_1 x) + \cos(\omega_0 x - \Omega_1 x)).$$

Данный двухчастотный оптический сигнал — с относительными частотами  $\omega_2 = \omega_1 - \Omega_1 = 1$  и  $\omega_3 = \omega_1 + \Omega_1 = 9$  — поступает на вход селектора  $C_{12}$ , где происходит его разделение: оптический сигнал с частотой  $\omega_3$  проходит на его второй „поглощающий“ выход „ $\rangle$ “, а сигнал с частотой  $\omega_2$  — на его первый выход „ $\langle$ “, и далее через объединитель  $B_1$  на выход разрядной ячейки  $Я_1$  и на вход селектора  $C_{21}$  разрядной ячейки  $Я_2$ .

Для селектора  $C_{21}$  частота пространственного разделения оптических сигналов

$$\Omega_{p2} = \Omega_2 + \omega_{\min},$$

где  $\Omega_2 = 2^{N-2} = 2$ .

Так как относительная частота входного сигнала  $\omega_2 = 1$  меньше частоты селектора  $C_{21}$ , то сигнал формируется на его первом выходе „ $\langle$ “. Этот оптический сигнал через объединитель  $B_2$  пройдет на выход разрядной ячейки  $Я_2$  и на вход селектора  $C_{31}$  разрядной ячейки  $Я_3$ . На его втором выходе „ $\rangle$ “ при этом сигнал отсутствует, и, следовательно, на выходе второго разряда  $D_{N-2}$  АЦП формируется информационный „0“.

Для селектора  $C_{31}$  разрядной ячейки  $Я_3$  частота пространственного разделения оптических сигналов равна

$$\Omega_{p3} = \Omega_3 + \omega_{\min},$$

где  $\Omega_3 = 2^{N-3} = 1$ .

Следовательно, оптический сигнал на его входе с относительной частотой  $\omega_2 = 1$  пройдет на его второй выход „ $\rangle$ “ и далее непосредственно на выход младшего разряда АЦП, где

будет сформирована информационная „1“ (оптический сигнал амплитудой  $A$ ). При этом можно дополнительно отметить, что аналогичным образом на выходе модулятора  $M_3$  разрядной ячейки  $Y_3$  (с функцией пропускания по оси  $Ox$   $f_3(x) = \cos(\Omega_3 x)$ ) будет сформирован двухчастотный оптический сигнал с распределением амплитуды по оси  $Ox$ , равным

$$A_3(x) = A \cos((\omega_2 + \omega_{\min})x) \cos(\Omega_3 x) = A / 2 (\cos((\omega_2 + \omega_{\min})x + \Omega_3 x) + \cos((\omega_2 + \omega_{\min})x - \Omega_3 x)),$$

и с относительными частотами  $\omega_3 = \omega_2 + \omega_{\min} - \Omega_3 = 0$  и  $\omega_4 = \omega_2 + \omega_{\min} + \Omega_3 = 2$ . Разделение этого сигнала происходит в селекторе  $C_{32}$ : сигнал с частотой  $\omega_4$  пройдет на его второй „поглощающий“ выход „ $\rangle$ “, а сигнал с частотой  $\omega_3$  (на границе используемого диапазона) — на его первый выход „ $\langle$ “, который в данной разрядной ячейке  $Y_3$  также является „поглощающим“. Очевидно, что данные сигналы не влияют на формирование кода АЦП: наличие модулятора  $M_3$  и селектора  $C_{32}$  в данной ( $N$ -й) разрядной ячейке  $Y_3$  ( $Y_N$ ) обусловлено как требованиями к унификации конструкции ячейки, так и потенциальной возможностью дальнейшего расширения разрядности АЦП.

Таким образом, на выходе АЦП формируется, практически в реальном масштабе времени, двоичный код  $\{D_0, \dots, D_{N-1}\} = 101$ , соответствующий входному аналоговому сигналу интенсивностью  $I = 5$ .

По существу, быстродействие рассмотренного АЦП определяется лишь временем амплитудно-частотного преобразования в оптическом АЧП (не более  $10^{-10}$  с) и практически не зависит от разрядности АЦП, что позволяет применять предложенную схему в устройствах, требующих обработки информации в реальном масштабе времени. Возможность технической реализации всех функциональных элементов преобразователя в интегральном исполнении обуславливает актуальность его использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982. 512 с.
2. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
3. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. М.: Высшая школа, 1988. 181 с.
4. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. СПб: Питер, 2003. 270 с.

#### Сведения об авторах

- Сергей Викторович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru
- Владислав Валерьевич Каменский** — канд. техн. наук, доцент; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: kam-vladislav@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
автоматики и телемеханики  
на железнодорожном транспорте

Поступила в редакцию  
14.09.11 г.