

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван-Трис Г. Теория обнаружения оценок и модуляции: Пер. с англ. под ред. В. И. Тихонова.— М.: Сов. радио, 1972, т. 1.
2. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех.— М.: Радио и связь, 1981.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1977.
4. Бюргер М. Структура кристаллов и векторное пространство.— М.: ИЛ, 1961.
5. Хэмминг Р. Численные методы.— М.: Наука, 1968.
6. Кон-Сфетку С., Смит М., Микольс С., Генри Д. Цифровой метод анализа одного класса многокомпонентных сигналов.— ТИИЭР, 1975, т. 63, № 10, с. 104—113.
7. Серебрянников М. Г., Первозванский А. А. Выявление скрытых периодичностей.— М.: Наука, 1965.
8. Солдатов Е. А., Илюхин В. В., Кузьмин Э. А., Белов Н. В. Новый алгебраический подход к разделению одномерной функции на сумму экспонент.— ДАН СССР, 1979, т. 248, № 5, с. 1116—1119.
9. Солдатов Е. А., Илюхин В. В., Кузьмин Э. А., Белов Н. В. К определению коэффициентов характеристического уровня в задаче разделения искаженной шумами функции на сумму экспонент.— ДАН СССР, 1979, т. 248, № 6, с. 1341—1343.
10. Pisarenko V. F. The retrieval of harmonics from a covariance function.— Geophys. J. Royal Astronom. Soc., 1973, vol. 33, p. 347—366.
11. Pisarenko V. F. On the estimation of spectra by means of nonlinear of the covariance matrix.— Geophys. J. Royal Astronom. Soc., 1972, vol. 28, p. 511—531.
12. Кей С. М., Марпл С. Л. Современные методы спектрального анализа.— ТИИЭР, 1981, т. 69, № 11, с. 5—52.
13. Кендалл М. Д., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды.— М.: Наука, 1976.
14. Солдатов Е. А., Илюхин В. В., Кузьмин Э. А., Белов Н. В. Разложение произвольного трехмерного контура на составляющие.— ДАН СССР, 1978, т. 241, № 4, с. 832—833.
15. Солдатов Е. А., Илюхин В. В., Кузьмин Э. А., Белов Н. В. Разделение многомерного контура на составляющие.— ДАН СССР, 1978, т. 242, № 1, с. 97—98.
16. Кумаресан Р., Тафтс Д. У. Метод пространственно-временного оценивания двумерных сигналов.— ТИИЭР, 1981, т. 69, № 11, с. 164—166.
17. Маклелан Дж. Х. Многомерный спектральный анализ.— ТИИЭР, 1982, т. 70, № 9, с. 139—152.

Поступила в редакцию 17 июля 1983 г.

УДК 681.325

С. С. КАРИНСКИЙ, В. А. ШУЛЬГИН

(Воронеж)

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ И ЦИФРОАНАЛОГОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОДА ГРЕЯ

Создание интегральных схем АЦП и ЦАП для кодирования и декодирования аналоговых сигналов с частотами 10 МГц и более в настоящее время рассматривается в технике как качественное изменение в составе элементной базы радиотехнических устройств и в методах их реализации [1]. Проблема увеличения производительности АЦП и ЦАП актуальна в различных областях, важнейшие из которых — телевидение, радиолокация, ядерная техника, цифровая осциллография.

Преобразование аналогового сигнала в код Грея в ряде случаев осуществляется устройством, содержащим набор последовательно включенных каскадов. Единичная дистанция кода Грея, простота его перевода в позиционный код и относительно небольшой объем схемы АЦП определяют достоинства упомянутой структуры преобразователя [2].

В данном сообщении проанализирован известный способ реализации преобразования аналогового сигнала в код Грея, основанный на последовательном использовании операции свертки динамического диапазона

[3], и описан алгоритм цифроаналогового преобразования, в котором, применяя обратные свертке операции, удается сократить время формирования аналогового сигнала по сравнению с преобразователем известной структуры [2]: дешифратор — ЦАП позиционного кода.

Последовательный алгоритм преобразования аналогового сигнала в код Грея реализуется в виде каскадного соединения эквивалентных блоков, каждый из которых выполняет следующие операции:

$$a_i = |a_{i-1} - 2^{n-i}|, \quad (1)$$

$$\alpha_i = \text{sgn}(2^{n-i} - a_{i-1}), \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

$\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ — цифровой эквивалент величины a_0 в коде Грея.

Самые общие выводы о потенциальных возможностях, заложенных в структуре каскадного преобразователя в код Грея с асинхронной логикой работы [3], можно сделать, записав последовательность выполняемых операций (1) и (2) в виде алгоритма согласно методике, изложенной в работе [2]:

$$\left(X \frac{1}{2} \Pi_1^1 \Sigma \right) \Pi_n^n \otimes \Pi_{n-1}^{n-1} \otimes \dots \Pi_1^1 \otimes, \quad (3)$$

$\begin{matrix} C \\ R_1 \end{matrix} \quad \begin{matrix} C \\ R_2 \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} C \\ R_n \end{matrix}$

X — оператор включения входной аналоговой величины (из (1) и (3) следует, что X соответствует a_{i-1} при $i=1$); Π_i^i — оператор образования эталонной величины в терминах обобщенной теории шкал (в данном случае формируется ряд двоично-взвешенных величин); Σ — оператор суммирования; \otimes — оператор вычисления модуля разности двух аналоговых величин; C — оператор сравнения аналоговых величин (для получения кода Грея логический сигнал в старшем разряде преобразователя инвертирован); R_i — оператор фиксации логического сигнала по результату сравнения.

Характерная особенность алгоритма (3) состоит в том, что операция \otimes выполняется независимо от результата сравнения аналоговых величин компаратором (операции CR_i). Это наряду с упрощением структуры преобразователя сравнительно с преобразователем поразрядного взвешивания позиционного кода (отсутствует перестройка логики работы каскада в зависимости от уровня преобразуемого сигнала) позволяет реализовать повышенное быстродействие. Наблюдается распараллеливание операций CR_i , отмеченное в написании алгоритма.

Учитывая, что операция \otimes в схемотехнике реализуется как операция двухполупериодного выпрямления токовых сигналов (см., например, [4]), представляется целесообразным осуществлять инвертирование с помощью схемы «токового зеркала» [5]. Последнее позволяет исключить, используемые для межкаскадного согласования преобразователя «напряжение — ток», «ток — напряжение» [4], ограниченная полоса рабочих частот которых обусловлена необходимостью обеспечения высокой линейности преобразования. Соответствующий (упрощенный) вариант построения каскада АЦП в код Грея показан на рис. 1. Схема представляет собой параллельно включенные инвертор и повторитель тока в виде последовательно соединенных инверторов [6]. Как видно из рисунка, в данную схему хорошо вписывается компаратор тока, построенный на основе усилителя Джильберта [5]. «Токовое зеркало» имеет полосу частот входящих в него транзисторов порядка f_T . Учитывая, что существуют модификации этих схем с линейностью амплитудной характеристики, температурной стабильностью коэффициента передачи и возможностью его изменения в некоторых пределах [5], удовлетворяющих требованиям к преобразователю на 7 разрядов [7], можно сделать вывод о целесообразности построения

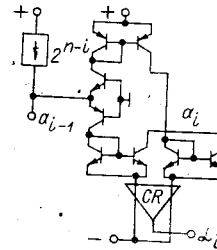


Рис. 1.

ния на базе токовых схем быстродействующих АЦП, реализующих алгоритм (3).

Представление о динамических характеристиках рассмотренного преобразователя можно получить, оценив в малосигнальном режиме полосу частот некоторого числа последовательно включенных каскадов на основе известного соотношения [5]

$$\Delta f = f_T (\sqrt[N]{2} - 1)^{1/2} / \sqrt{K}, \quad (4)$$

где N — число ступеней, K — усиление одной ступени, f_T — граничная частота усиления по току транзисторов. Для 5-разрядного АЦП, построенного на транзисторах с $f_T \approx 500$ МГц (ИС серий 393 и 398), $\Delta f \approx 100$ МГц.

Перейдем теперь к рассмотрению обратной задачи — к исследованию возможных вариантов осуществления цифроаналогового преобразования параллельного кода Грея. Структура преобразователя (дешифратор — ЦАП позиционного кода) предусматривает выполнение следующих логических операций [2]:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \alpha_1, \\ \beta_2 &= \alpha_1 \oplus \alpha_2, \\ &\dots \\ \beta_{n-1} &= \alpha_1 \oplus \alpha_2 \oplus \dots \oplus \alpha_{n-1}, \\ \beta_n &= \alpha_1 \oplus \alpha_2 \oplus \dots \oplus \alpha_n, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ — код Грея, $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ — позиционный двоичный код.

Очевидно, что для построения параллельного дешифратора требуется значительный объем аппаратуры, а рекуррентное соотношение, следующее из (5) и имеющее простую реализацию, предусматривает последовательный характер выполнения операций, ограничивающий быстродействие. Возможен иной путь решения данной задачи (применение аналоговой обработки весовых сигналов), заключающийся в выполнении операций, обратных операциям свертки динамического диапазона при кодировании [8]. Для определения структуры ЦАП кода Грея запишем аналитические выражения для обратного преобразования. Учитывая, что при аналого-цифровом преобразовании результаты операций a_i принадлежат непрерывному ряду значений, а результаты цифроаналогового — дискретному (обозначим последние через b_i), в соответствии с (1) и (2) получим

$$b_{i-1} = \begin{cases} b_i + 2^{n-i}, & \alpha_i = 1; \\ |b_i - 2^{n-i}|, & \alpha_i = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Положив $b_n = 2^{-1}$, поскольку этой величине соответствует максимально возможная погрешность округления аналогового сигнала при кодировании, и учитывая смещение динамического диапазона входного сигнала X , вводимое при кодировании в соответствии с (3), аналитическую запись преобразования представим в виде

$$\begin{aligned} b_n &= 2^{-1}; \\ b_{n-1} &= \begin{cases} b_n + 2^0, & \alpha_n = 0; \\ |b_n - 2^0|, & \alpha_n = 1; \end{cases} \\ &\dots \\ b_1 &= \begin{cases} b_2 + 2^{n-2}, & \alpha_2 = 0; \\ |b_2 - 2^{n-2}|, & \alpha_2 = 1; \end{cases} \\ b_0 &= \begin{cases} b_1 + 2^{n-1}, & \alpha_1 = 1; \\ |b_1 - 2^{n-1}|, & \alpha_1 = 0; \end{cases} \\ X &= b_0 - 2^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

В данном выражении в отличие от (2) величины $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ являются заданными.

Из (7) следует, что структура ЦАП предусматривает наличие функционального блока свертки аналоговых сигналов, техни-

ческая реализация, динамические и точностные параметры которого рассмотрены при описании АЦП. На рис. 2 приведена блок-схема ЦАП кода Грея, в таблице — примеры, иллюстрирующие его работу.

Согласно (3) и (7) к времени аналоговой обработки в ЦАП добавляется время срабатывания одного ключа (все ключи работают одновременно), а к аналогичной по длительности аналоговой обработке в АЦП — время срабатывания одного компаратора. Быстродействующие ключи наиболее просто реализуются в виде ключей тока. Учитывая также, что суммирование в токовых схемах есть простое соединение источников, можно сделать вывод о том, что при относительно невысокой сложности токовый ЦАП кода Грея обладает большим быстродействием, чем представленный выше АЦП.

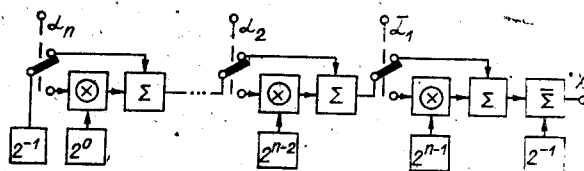


Рис. 2.

Десятичный код	Код Грея, $\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4$	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0	X
5	0 1 1 1	0,5	0,5—1	0,5—2	1,5—4	2,5—8	5,5—0,5
13	1 0 1 1	0,5	0,5—1	0,5—2	1,5+4	5,5+8	13,5—0,5

Рассмотренные варианты построения узлов АЦП и ЦАП удовлетворяют требованиям гибридно-пленочной технологии, что позволяет создавать компактные устройства с высоким быстродействием. Следует отметить, что достижимые рабочие частоты преобразователей находятся в области предельных рабочих частот серий ИС ЭСЛ-логики, имеющих малую степень интеграции. Соответствующая сложность и большое энергопотребление параллельного дешифратора свидетельствуют о целесообразности реализации ЦАП кода Грея на основе устройств амплитудной свертки сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернсфорд Р. Параллельные АЦП и быстродействующие ЦАП для цифровой обработки сигналов. — Электроника, 1982, т. 55, № 9, с. 47—48.
2. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. — М.: Энергия, 1975.
3. Юань Ч. К. Быстродействующий преобразователь аналоговой величины в код Грея. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 10, с. 102.
4. Бахтияров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П. Аналого-цифровые преобразователи. — М.: Сов. радио, 1980.
5. Джильберт Б. Новый метод широкополосного усиления. — Зарубеж. радиоэлектроника, 1969, № 11, с. 89—112.
6. Шульгин В. А. Аналого-цифровой преобразователь. (Автор. свид-во № 750726). — БИ, 1980, № 27.
7. Бреденкамп Г. П. Прецизионный умножитель-делитель тока. — ТИИЭР, 1972, т. 60, № 12, с. 102.
8. Шульгин В. А. Преобразователь циклического кода в аналоговый сигнал. (Автор. свид-во № 869016). — БИ, 1981, № 36.

Поступила в редакцию 6 апреля 1983 г.;
окончательный вариант — 17 августа 1983 г.