

Снижение влияния технологических вариаций и помех на искажения сигнала в быстродействующих встраиваемых АЦП для систем на кристалле

А.Г. Сibaгатуллин

Учреждение Российской академии наук
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, ArtSib@ippm.ru

Аннотация — Разработана новая методика проектирования встроенных АЦП, включающая: оценку разброса параметров элементов, поведенческое моделирование основных блоков, уменьшение ошибок преобразования, использование блока коррекции напряжения смещения нуля компараторов, исправление ошибок в термометрическом коде.

Ключевые слова — Быстродействующие АЦП, встраиваемые АЦП, системы на кристалле, повышение помехоустойчивости.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие быстродействующих универсальных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) идёт по пути использования новых специализированных технологий. Наиболее быстродействующие АЦП реализуются на основе БиКМОП-процесса со слоями SiGe. Однако эти маршруты являются труднодоступными и дорогостоящими. Современные системы на кристалле (СнК) для обработки видеосигналов и радиолокации требуют повышения частоты аналого-цифрового преобразования. Методы проектирования встраиваемых быстродействующих АЦП в настоящее время развиты недостаточно. Быстродействие встраиваемых аналоговых блоков определяется не размерами МОП-транзисторов, а помехами и искажениями сигналов. Для снижения искажений сигналов необходим комплексный подход, состоящий в использовании как аналоговых, так и цифровых схем коррекции на всех этапах преобразования сигнала.

Работа направлена на повышение быстродействия и снижение искажений сигналов в КМОП АЦП, входящих в состав сложных аналого-цифровых СнК. С уменьшением размеров элементов БИС повышаются их быстродействие, уровень перекрёстных помех и технологический разброс параметров. Напряжение питания при этом снижается. Повышение быстродействия аналоговых блоков достигается не только снижением размеров транзисторов, но и устойчивостью к помехам и технологическому разбросу параметров

элементов. Повышение помехоустойчивости в интегральных микросхемах требует комплексных решений, затрагивающих все этапы проектирования.

Основной целью работы является разработка средств подавления шумов и искажений в КМОП АЦП для специализированных СнК.

II. ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

В результате анализа определены основные проблемы, возникающие при разработке интегрированных быстродействующих АЦП:

- необходимость количественной оценки уровня помех и искажений в сложнофункциональных (СФ) блоках АЦП;
- временная нестабильность тактовых частот и динамические помехи;
- учёт и компенсация технологического разброса;
- эффекты взаимного влияния элементов и блоков, инжекция электронов в подложку;
- шумы в системе и статистические ошибки преобразования;
- оптимизация быстродействия и энергосбережения;
- обеспечение требований СнК со встроенным АЦП.

Для решения поставленных проблем представлен следующий комплекс мер и технических решений.

А. Количественная оценка помех и искажений в СФ-блоках АЦП

Для учёта и компенсации помех и искажений необходимо определить их количественно для конкретных технологических маршрутов. В связи с этим произведена оценка реального разброса параметров в тестовых кристаллах и его влияния на искажения, вносимые в аналого-цифровое преобразование. В частности, измерено влияние разброса параметров на напряжение смещения нуля компараторов и предварительных усилителей в аналоговой части АЦП. Для измерений был изготовлен тестовый кристалл с массивом предварительных усилителей и компараторов,

аналогичным 5-разрядному АЦП прямого преобразования с термометрическим выходным кодом. В тестовом кристалле использованы компараторы на основе транзисторов с минимальной длиной затвора и коэффициентом Пелгрма для вариаций порогового напряжения, равным 8 мВ·мкм. Из полученных передаточных характеристик, построенных на основе

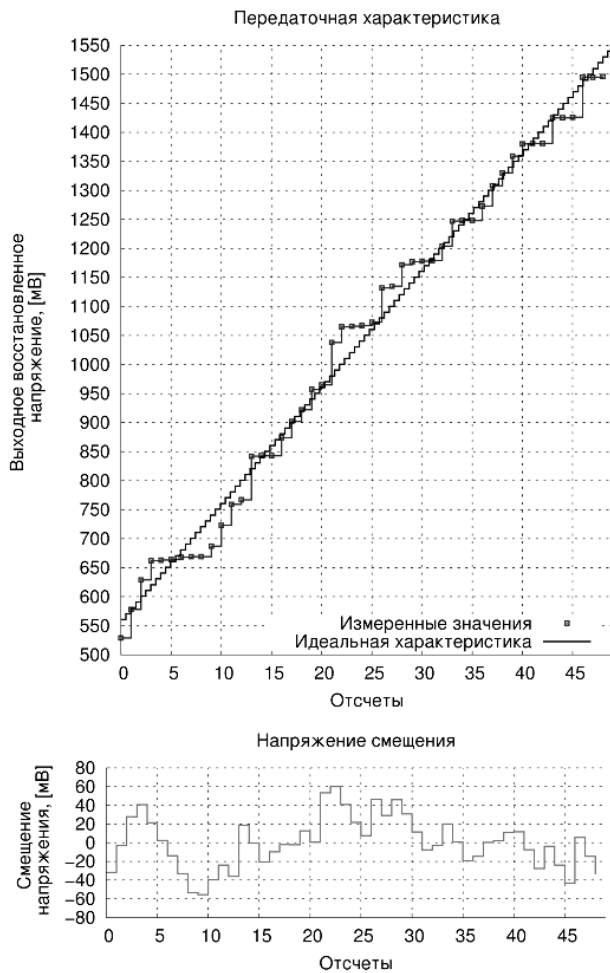


Рис. 1. Передаточные характеристики исследованных образцов и измеренные напряжения смещения на компараторах

выходного термометрического кода (рис. 1), было выявлено, что величина абсолютного максимального смещения напряжения от заданного значения достигает 60 мВ. Средняя величина смещения равна нулю, т. е. систематические отклонения отсутствуют.

Также были промоделированы искажения сигнала в процессе преобразования входного сигнала в присутствии такого разброса параметров. Оценки разброса параметров являются основой для подготовки спецификаций для средств коррекции искажений сигналов. На основе этих данных выбраны методы коррекции на каждом этапе преобразования, описанные далее. Для оценки влияния напряжения смещения нуля разработаны поведенческие модели аналоговых блоков и

произведено моделирование со случайными величинами напряжения смещения в заданном диапазоне значений.

Б. Временная нестабильность и динамические помехи

Кроме технологического разброса параметров элементов, значительные искажения вносят динамические помехи и временная нестабильность компараторов АЦП. Для минимизации влияния такого вида помех предложен ряд схемотехнических и конструктивных решений. Например, для снижения импульсных помех в цепях электропитания предложен усовершен-

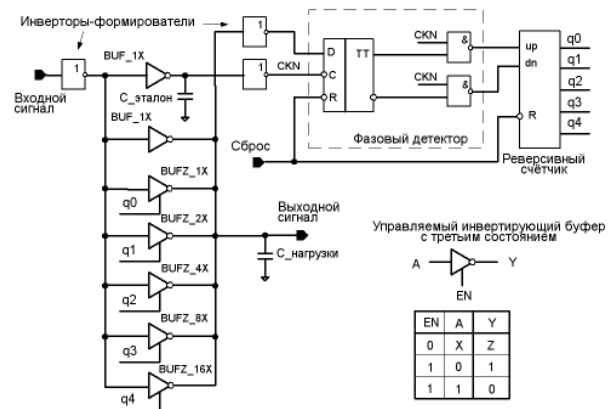


Рис. 2. Электрическая схема реализации адаптивного драйвера для уменьшения временной нестабильности тактовой частоты

ствованный вариант вторичного источника электропитания с компенсацией импульсных помех. Исследовано влияние разброса задержек в цепях синхронизации. Известное распределение тактового сигнала по СФ-блоку АЦП в виде N-дерева дополнено использованием адаптивных драйверов. Принцип действия адаптивного драйвера состоит в том, чтобы формировать одинаковые фронты сигналов между блоками вне зависимости от ёмкости нагрузки. Именно фронты сигналов определяют задержки, при условии корректной реализации системы металлизированных связей. Предложена электрическая схема реализации адаптивных драйверов (рис. 2).

Произведено моделирование и представлены количественные оценки повышения качества преобразования. При уменьшении разброса задержек вдвое, достигается увеличение отношения сигнал/шум не менее чем на 6 дБ, что соответствует дополнительному эффективному разряду преобразования.

В. Учёт и компенсация технологического разброса

Методы компенсации технологического разброса параметров элементов напрямую зависят от выбранного технологического процесса. Выбор технологического процесса с наименьшими размерами обеспечивает наибольшее быстроедействие, однако связанное с

этим уменьшение напряжения питания создаёт дополнительные сложности при реализации аналоговых блоков. В связи с этим предложен новый способ автокалибровки напряжения смещения нуля компараторов. Традиционные конструктивные способы уменьшения технологического разброса снижают быстродействие. Поэтому разработан метод, основанный на компенсации напряжения смещения нуля через коррекцию токов в нагрузках дифференциального каскада компаратора при равных потенциалах на его входах [1, 2].

Данный метод автокалибровки обладает рядом существенных достоинств. Главным из них является возможность использования транзисторов с минимальными технологически доступными размерами и высоким быстродействием. Это позволяет применять его при проектировании быстродействующих СФ-блоков АЦП в составе СнК и достичь значительно большего быстродействия, чем для компаратора с таким же напряжением смещения нуля за счет применения транзисторов с «большими» размерами. Благодаря обратной связи с цифрового выхода компаратора (рис. 3), калибровке подвергаются все части схемы при действующих помехах. Описываемый принцип калибровки основан на нахождении такого отношения корректирующих токов I_9 и I_{10} , чтобы независимо от попарного неравенства токов во входных транзисторах I_1 и I_2 и выходных токах входного каскада I_7 и I_8 переключение выхода компаратора в логический ноль или единицу было равновероятным. По своему действию это эквивалентно приложению ко входу компаратора существующего напряжения смещения, но с противоположным знаком. По сигналу *Старт* корректирующий ток в одном плече устанавливается в макси-

мальное значение, а в другом плече — равным нулю. Если после снятия сигнала *Старт* сигнал *Выход* компаратора находится в состоянии логического нуля, то вырабатывается сигнал *Ошибка* и процесс калибровки прекращается. Иначе значение корректирующего кода увеличивается на единицу, и процесс продолжается, пока сигнал *Выход* компаратора не переключится в состояние логического нуля. Процесс автокалибровки представлен на рис. 4. Для моделирования этого процесса было намеренно внесено смещение нуля посредством неравенства размеров транзисторов входной дифференциальной пары компаратора. Калибровка завершилась при достижении внутренним счётчиком значения, равного 10, при котором достигается компенсация начального смещения нуля, и сигнал *Выход* компаратора переключается в логическую единицу, а сигнал *Калибровка* — в логический ноль, сообщая тем самым о готовности к переходу в штатный режим функционирования.

При использовании компараторов с автокалибровкой в АЦП существенным является тот факт, что каждый компаратор калибруется для своего входного опорного напряжения при действующих помехах. Недостатком же использования этого метода является наличие некоторого интервала времени, в течение которого АЦП не может производить преобразование сигнала. Во время работы АЦП автокалибровку можно производить периодически по требованию управляющего устройства. Данный способ автокалибровки запатентован.

Для КМОП-технологического процесса с нормами 0,18 мкм, при построении 8-разрядного АЦП, было достигнуто расчётное значение частоты преобразования 600 МГц.

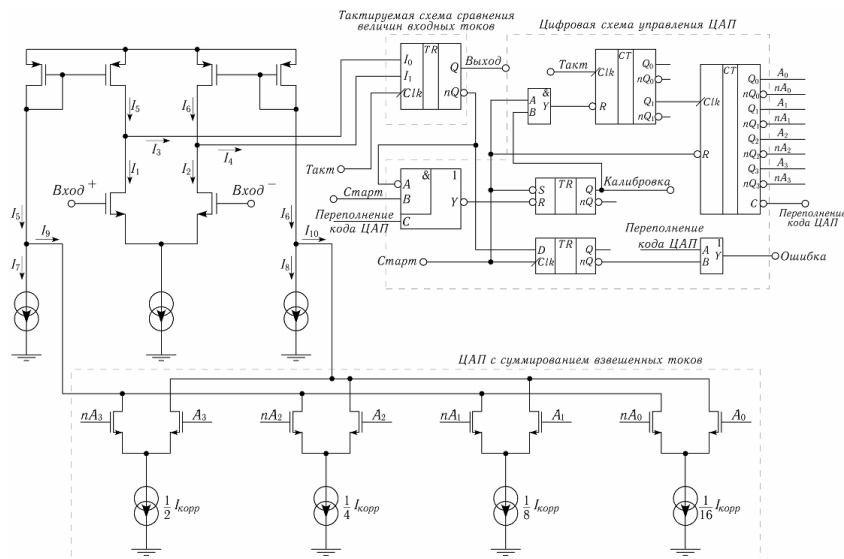


Рис. 3. Электрическая схема компаратора с автокалибровкой напряжения смещения нуля

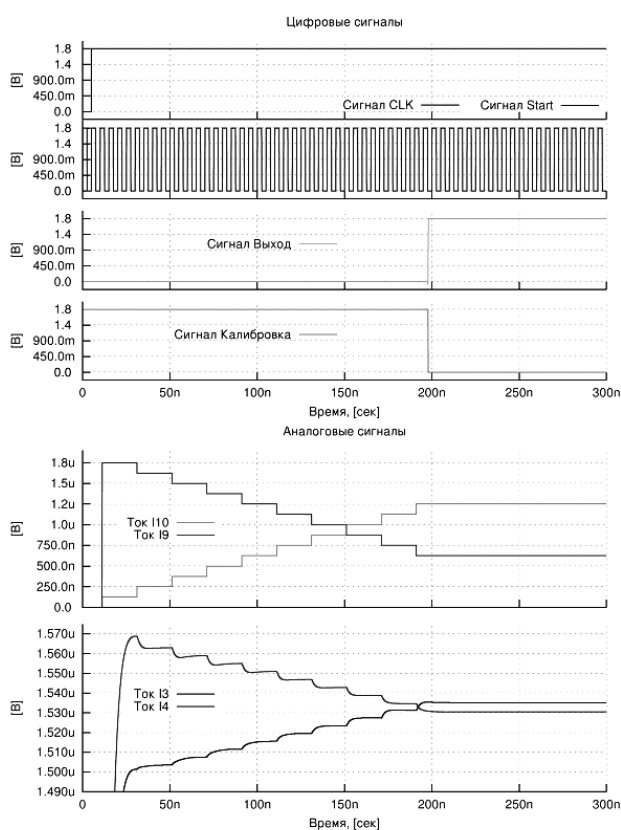


Рис. 4. Результаты моделирования процесса автокалибровки напряжения смещения нуля компаратора

Значение отношения сигнал/шум составило 45 дБ, что соответствует эффективному количеству разрядов, равному 7,2. Максимальное значение дифференциальной нелинейности равно 0,6, а значение интегральной нелинейности — 1,0 младшего значащего разряда.

Г. Эффекты взаимного влияния и инжекция электронов в подложку

Совместное размещение на кристалле быстродействующих аналоговых и цифровых СФ-блоков в рамках СнК приводит к значительному ухудшению характеристик аналоговых блоков за счёт влияния, оказываемого со стороны цифровых. Кроме того, различные перекрёстные помехи и помехи по цепям питания также негативно воздействуют на аналоговые блоки. Для минимизации помех представлен комплекс новых и ранее известных технических приёмов [3]. Предложены методы экранирования критических аналоговых блоков от соседних блоков и источников помех, а также от внешних воздействий, например, в виде светового потока к фоточувствительным элементам. Распространение инжектированных электронов в подложке достигает 1 мм, что визуально наблюдается в матрицах цветных фотоприёмников. Разработаны методики дополнительного экранирования от инжекции

электронов в подложку с использованием скрытых p^+ -слоёв с глубоким залеганием. Данные слои требуют модификации технологических параметров имплантационного процесса для получения эффективного профиля концентраций примесей.

Для решения проблемы инжекции в подложку больших токов в выходных каскадах предложено новое решение для реализации. Оно состоит в разделении выходных каскадов на несколько секций и последовательном их переключении с заданной задержкой. Кроме того, необходимым условием является исключение ситуаций одновременно открытых n - и p -канальных транзисторов.

Д. Шумы и статистические ошибки преобразования

В системе всегда присутствуют статистические ошибки преобразования, связанные с системными шумами и метастабильностью компараторов. В АЦП прямого преобразования компараторы могут находиться в метастабильном состоянии. Вероятность этого особенно велика, когда разница между опорным напряжением и напряжением на входе близка к нулю. Кроме того, метастабильность компараторов и их напряжение смещения нуля могут вызывать появление запрещённых состояний или так называемых «пузырьков» в термометрическом коде. «Пузырьки» делают точку перехода трудноопределяемой, так как таких точек может быть несколько. Более того, если существует несколько точек перехода, то на выходе блока преобразования термометрического кода в двоичный могут возникнуть ошибки, приводящие к большим искажениям и появлению пропуска кодов.

В технологических процессах с минимальными размерами элементов 0,25 мкм, 0,18 мкм и менее разброс параметров элементов является преобладающим механизмом появления «пузырьков» в термометрическом коде. Для исправления таких ошибок существует ряд схемотехнических решений. Зачастую они предназначены для исправления «пузырьков» и одновременного выделения приоритетной единицы для определения единственной строки в приоритетном шифраторе, реализованном аналогично ПЗУ. Основным недостатком при таком подходе является то, что рассматриваются либо только один «пузырёк» в термометрическом коде, либо преобразование проводится лишь для выделения приоритетной единицы. В обоих случаях появление нескольких неверных разрядов термометрического кода приводит к значительному искажению выходного кода АЦП. С целью улучшения характеристик преобразования разработан усовершенствованный блок коррекции ошибок в термометрическом коде и выделения приоритетной логической единицы [4, 5]. Ключевой особенностью этого блока является алгоритм коррекции 2-го порядка. Другими словами, он корректно обрабатывает ситуацию невер-

ного одновременного срабатывания четырёх компараторов в ожидаемой области границы термометрического кода, что для 8-разрядного АЦП со входным диапазоном в 2 В составляет смещение около 30 мВ. С учётом всех предшествующих средств коррекции выявлено, что на данном этапе такой величины коррекции достаточно. Процесс преобразования кода разделён на три этапа (рис. 5):

- 1) преобразование, реализующее исправление «пузырьков» в виде одного или двух логических нулей (преобразование кода А в В);
- 2) последующее преобразование, реализующее исправление «пузырьков» в виде логических единиц (преобразование кода В в С);
- 3) выделение в исправленном коде приоритетной единицы для активизации только одной строки в приоритетном шифраторе (преобразование кода С в D).

Таким образом, предложен новый алгоритм поочередного исправления ошибок разных типов. На рис. 5 представлен корректируемый фрагмент массива компараторов на всех этапах преобразования. Сплошны-

ми линиями отмечены ожидаемые точки перехода от логических единиц к логическим нулям в термометрическом коде. В квадратики выделены ошибки, вызванные «пузырьками» в термометрическом коде на каждом этапе коррекции. Алгоритм реализован в виде цифрового автомата.

Е. Оптимизация быстродействия и энергосбережения

Для повышения быстродействия в простом СФ-блоке АЦП прямого преобразования необходимо значительное уменьшение элементов и, как следствие, переход на более совершенные технологические процессы. Это не всегда возможно либо требует значительного увеличения энергопотребления. Поэтому во многих случаях используют известную архитектуру АЦП с временным чередованием каналов. Применение такой архитектуры позволяет использовать энергоэффективные блоки АЦП среднего быстродействия для достижения общего высокого быстродействия.

При реализации АЦП такого типа важнейшей проблемой являются различия в параметрах базовых каналов АЦП. Сведение выходных кодов базовых каналов осуществляется с помощью специализированного цифрового блока. Несовпадение коэффициентов усиления и смещения передаточных характеристик базовых блоков и разброс моментов выборки аналогового сигнала приводят к значительному уменьшению отношения сигнал/шум всего АЦП.

Для этого предложен новый алгоритм калибровки каналов [6]. Алгоритм включает выбор эталонного канала, дальнейшую калибровку каждого из каналов и сведение их выходных кодов в цифровом блоке. Алгоритм выбора эталонного канала основан на нахождении минимального отклонения от усреднённого значения кодов всех каналов. Алгоритм выбора эталонного канала и сведения кодов реализован в виде цифрового автомата в составе СФ-блока АЦП. Использование такого подхода обеспечивает значительное увеличение частоты преобразования при умеренном росте потребления. Его эффективность подтверждается измерениями тестовых образцов. Измерения показали, что токопотребление разработанного 10-разрядного АЦП с временным чередованием четырёх каналов с частотой преобразования 120 МГц составляет менее 45 мкА, в то время как для 8-разрядного АЦП без использования чередования превышает 100 мкА.

Ж. Обеспечение требований СнК

СФ-блоки АЦП в подавляющем большинстве случаев используются в специализированных СнК с конкретными областями применения. Решающей при разработке СФ-блока АЦП является область применения СнК. Требования со стороны СнК определяют

Значение кода средних четырёх разрядов																
DA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
До преобразования																
A _{j+4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A _{j+3}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
A _{j+2}	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
A _{j+1}	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
A _j	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
A _{j-1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
После первого преобразования																
B _{j+4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B _{j+3}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B _{j+2}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B _{j+1}	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
B _j	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
B _{j-1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
После второго преобразования																
C _{j+4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C _{j+3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
C _{j+2}	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
C _{j+1}	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
C _j	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
C _{j-1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
После третьего преобразования																
D _{j+4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D _{j+3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
D _{j+2}	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D _{j+1}	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D _j	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
D _{j-1}	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 5. Трёхступенчатый алгоритм коррекции ошибок термометрического кода

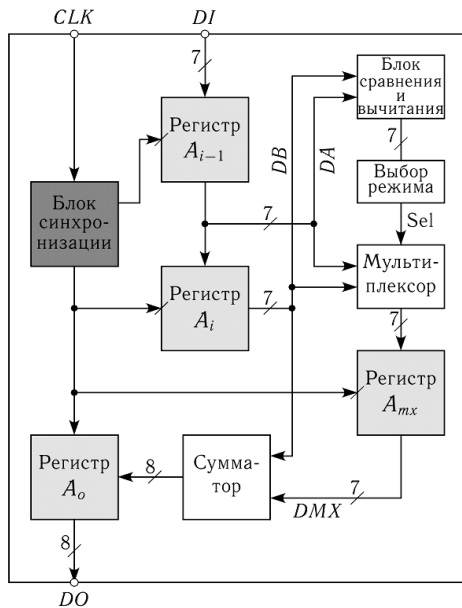


Рис. 6. Блок-схема цифрового эквалайзера повышения контрастности и линейности цветowych переходов при аналого-цифровом преобразовании видеосигнала

характеристики АЦП. Возможность использования известных свойств входного аналогового сигнала делает доступной дополнительную цифровую постобработку. Одной из важных областей применения таких СнК является обработка видеосигналов. При разработке АЦП для таких СнК необходимо учитывать спектральные характеристики видеосигнала. Известно, что контраст границ цветowych переходов характеризуется высокочастотными спектральными составляющими входного сигнала. Цветопередача определяется плавностью межцветowych переходов и представляется во входном сигнале низкочастотными составляющими.

Для радиосистем аналоговый сигнал представляет собой суперпозицию синусоид на промежуточной частоте с различными видами модуляции. Решающим для точности преобразования такого сигнала является линейность передаточной характеристики. Усиление и смещение характеристики имеют второстепенное значение. При реализации АЦП для таких систем возможно использование интерполяции с исключением выбросов сигнала.

Для систем обработки видеосигнала представлен пример реализации нового алгоритма повышения контрастности и линейности цветowych переходов при аналого-цифровом преобразовании (рис. 6). Он основан на спектральных характеристиках видеосигнала, поступающего на вход DI . Разработана схема цифрового эквалайзера на основе этого алгоритма, выделяющая верхние частоты с обычным разрешением, а нижние частоты — с высоким разрешением и линейностью [5, 7]. Граница фильтрации частот определяется в блоке выбора режима. Улучшение линейности

и увеличение числа эффективных разрядов достигаются интерполяцией кодов последовательных отсчётов.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена оценка реального разброса параметров в тестовых кристаллах. На её основе разработаны поведенческие модели основных блоков для моделирования влияния приведённых ко входу ошибок. Сформулированы требования к средствам цифровой коррекции искажений сигналов. Предложен новый алгоритм поочередного исправления ошибок разных типов в термометрическом коде. Алгоритм реализован в виде цифрового автомата. Разработан способ уменьшения ошибок преобразования, основанный на коррекции напряжения смещения нуля компараторов. Коррекция смещения нуля компараторов позволяет использовать быстродействующие транзисторы с минимальными размерами и большим технологическим разбросом параметров. Также предложен новый алгоритм автоматического выбора эталонного канала с минимальными искажениями сигналов для известной методики повышения быстродействия АЦП, основанной на временном чередовании нескольких каналов среднего быстродействия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Способ калибровки напряжения смещения нуля компаратора аналого-цифрового преобразователя и устройство для его осуществления / А. А. Зайцев, А. Г. Сибгатуллин, Н. М. Горшкова, Я. С. Губин // Патент РФ №2301427 опубликованный в бюллетене 17 от 20.06.2007.
- [2] Зайцев А. А., Сибгатуллин А. Г. Сверхбыстродействующий АЦП для высокоскоростных телекоммуникационных систем // Электросвязь. - 2006. - № 4. С. 33-35.
- [3] Агрич Ю. В. Прецизионный интегральный поликремниевый резистор и способ его изготовления // Патент РФ № 2110871, 16.07.1996.
- [4] Сибгатуллин А. Г., Лунькова О. О. Быстродействующий 8-разрядный КМОП АЦП с частотой выборки 100 МГц с аналоговой интерполяцией и цифровым сглаживанием // Научная сессия МИФИ - 2006. - М.: МИФИ, 2006. С. 139-140.
- [5] Сибгатуллин А. Г., Губин Я. С. Аналоговый интерфейс для систем отображения информации на основе ЖК панелей // Электросвязь. - 2006. - № 4. С. 36-38.
- [6] Сибгатуллин А. Г., Тимошенко М. С., Сибгатуллина О. О. Метод цифровой постобработки выходных сигналов АЦП в составе микросхем обработки данных // Всероссийская межвузовская НПК «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике - 2009». - М.: МИЭТ, 2009. С. 96.
- [7] Аналого-цифровой преобразователь для цифрового телевидения / Д. Ю. Адамов, Ю. Ф. Адамов, А. Г. Сибгатуллин, М. Г. Тугбаев // Электросвязь. - 2008. - № 8. С. 36-38.