Методы высокочастотной коррекции аналоговых секций в сверхбыстродействующих параллельных АЦП с дифференциальным входом

Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, Н.В. Бутырлагин

Донской государственный технический университет, prokopenko@sssu.ru

Аннотация Рассматриваются схемотехнические ппиемы коррекции амплитудно-частотной характеристики входных аналоговых секций (АС) сверхбыстродействующих АЦП, базирующиеся на создании специальных условий для существенного расширения их частотного диапазона. Получены аналитические соотношения для пяти структурных схем АС, позволяющие рассчитать элементы частотной коррекции в зависимости от численных значений емкости паразитных конденсаторов, приведенных ко входам компараторов АЦП.

Ключевые слова — АЦП с дифференциальным входом, параллельные АЦП, коррекция частотных характеристик, собственная и взаимная компенсация, паразитные емкости, SiGe техпроцесс.

I. Введение

В современных информационно-измерительных используют сверхбыстродействующие системах аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [1,2,3] с различными идеями распараллеливания [4], интерполяции [5] или ∆-преобразования [6] обрабатываемых СВЧ сигналов. Ширина полосы полной мощности fp серийных микросхем данного (EV8AQ160, класса EV8QA165, ADC08D1500, МАХ108) достигает значений 0,9-3 ГГц. К классу быстродействующих ΑЦΠ наиболее относятся параллельные АЦП с дифференциальным входом [1], для которых f_p=6-8 ГГц [1,2]. На более высоких частотах в таких АЦП возникают существенные преобразования, обусловленные погрешности влиянием паразитных емкостей С_{0i} на подложку активных И пассивных компонентов входных аналоговых секций (АС), а также входными емкостями компараторов [1]. Применение SiGe технологий не существенного выигрыша дает по частотному диапазону Дальнейшее [7] повышение быстродействия АЦП данного класса одна из проблем современной микроэлектроники, решение которой позволит осуществить обработку более быстроизменяющихся сигналов, например в радарах [1], приемниках с цифровой промежуточной частотой [5] и т.п.

Цель настоящей статьи – обобщение и сравнение основных свойств, предлагаемых в [8-16] методов компенсации влияния паразитных емкостей, приведенных ко входам компараторов, на амплитудночастотную характеристику АС АЦП, в которых предусмотрено дополнительное распараллеливание аналоговых секций [1, 7].

II. Параллельные АЦП с нелинейным распределением сопротивлений эталонных резисторов

Среди сверхбыстродействующих параллельных АЦП особого внимания заслуживает архитектура [2], в которой организованно распараллеливание аналоговых секций для каждого из компараторов K_i относительно друг друга и разделение источников опорного тока (ИОТ) $(I_1, I_2, ..., I_n)$ и эталонных резисторов $(R_1, R_2, ..., R_n)$ (рис. 1).



Рис. 1. Структура двух аналоговых секций параллельного АЦП с дифференциальным входом [2]

Схема АЦП (рис. 1) содержит N идентичных секций, где показаны выходные транзисторы источников опорного тока ИОТ1-ИОТ4, имеющие емкость на подложку (C_n) и емкость коллектор-база (C_{κ}). Таким образом, эквивалентные паразитные емкости C_{01} и C_{02} в схеме определяются выходной емкостью транзисторов источников опорного тока

(ИОТ) и входными емкостями компараторов напряжений K_i .

Практически верхняя граничная частота (по уровню -1 дБ, $f_{-1dB,max}$) АЦП с архитектурой рис. 1 при его реализации по SiGe технологиям не превышает 8-11 ГГц [7], в то время как быстродействие SiGe компаратора K1 позволяет работать до частот в несколько десятков гигагерц. Рациональное распределение номиналов резисторов R_i уменьшает их геометрические размеры и, следовательно, паразитные емкости, а также позволяет выбрать токи I_i по каждому из каналов в соответствии с необходимым падением напряжения [2,7].

В аналоговой секции рис. 1 [2] может быть реализован простой способ увеличения полосы частот $f_{.1dB,max}$ и повышения быстродействия АЦП, который связан с уменьшением площади резисторов R_i входной аналоговой секции. При этом возможно ступенчатое наращивание опорных сопротивлений резисторов R_i и токов I_i через них. В простейшем случае с ростом порядкового номера канала применим линейный закон изменения сопротивлений резисторов с идентичными источниками токов [7].

Наиболее интересен вариант применения квадратичного закона распределения номиналов резисторов (рис. 2б) и источников тока (рис. 2а), что дает повышение $f_{-IdB,max}$ аналоговой секции, так как приводит к уменьшению паразитных емкостей, увеличению полосы частот ($f_{-IdB,max}$), а также уменьшению разброса граничных частот ($\Delta f_{-IdB,max}$) по каждому из каналов входной аналоговой секции.



Рис. 2. Квадратичное распределение сопротивлений резисторов (б) и опорных токов (а) входной аналоговой секции АЦП

Переменная A определяет закон распределения номиналов резисторов R_i и токов I_i . При A=1реализуется линейное распределение номиналов R_i с одинаковыми источниками тока. При A=2обеспечивается квадратичное распределение токов и сопротивлений (рис. 2).





Рис. 3. Зависимость полосы частот ($f_{-1dB,max}$) и $\Delta f_{-1dB,max}$ от коэффициента распределения номиналов резисторов и источников тока А

Для исследований был использован SiGe входной блок АЦП с 64 параллельными каналами. На рис. 3 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) коэффициента передачи АС от дифференциального входа АЦП ко входам одного из компараторов аналоговых секций АЦП, а также зависимость $\Delta f_{-ldB.max} = \varphi(A)$.

С использованием описанной выше архитектуры АЦП (даже при ее реализации на транзисторах с $f_{\rm T}$ =200 SGB25H1, IHP, ГГц техпроцесса Германия) предельный частотный диапазон преобразования входных аналоговых сигналов в цифру ограничен [7]. Дальнейшее увеличение быстродействия ΑЦΠ рассматриваемого подкласса связано, прежде всего, с уменьшением емкостей на подложку (С_п) и емкостей коллектор-база (Ск), а также паразитных емкостей резисторов и компараторов, что не всегда реализуемо.

В этой связи представляет интерес поиск других схемотехнических приемов расширения частотного диапазона аналоговых секций АЦП, базирующихся, например, на эффектах собственной и взаимной компенсации паразитных емкостей [14,15,16].

III. ПЕРВЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВОЙ СЕКЦИИ АЦП

На рис. 4 показан метод коррекции АЧХ каждой из входных аналоговых секций АЦП [9], основанный на введении корректирующего конденсатора $C_{\kappa l}$ и эмиттерного повторителя VT3.



Рис. 4. Фрагмент входной аналоговой секции параллельного АЦП [9]

В линейном режиме для схемы рис. 4 можно записать следующее уравнение для комплекса напряжения на неинвертирующем входе компаратора K1:

$$\dot{U}_{\rm Bbix}^{(+)} = \dot{U}_{\rm Bx,1} \frac{K_0}{1 + j\omega\tau_{1,2} \left(1 - \dot{K}_y \dot{K}_i \frac{C_{\rm k1}}{C_{01}}\right)}, \qquad (1)$$

где \dot{K}_i - комплекс коэффициента передачи по току неинвертирующего повторителя тока на транзисторе VT1; \dot{K}_y - комплекс коэффициента передачи по напряжению эмиттерного повторителя напряжения (VT3), $\tau_{1,2} \approx C_{01}R_1$.

Если обеспечить $\dot{K}_y = 1$, $\dot{K}_i = 1$, то, как следует из (1), условием существенного уменьшения влияния эквивалентной паразитной емкости C_{01} на амплитудночастотную характеристику AC будет равенство

$$\frac{C_{\kappa 1}}{C_{01}}K_{\rm y}K_{\rm i} = 1.$$
 (2)

Таким образом, в схеме рис. 4 создаются потенциальные условия для существенного расширения диапазона рабочих частот.

Исследованный АЦП на SiGe транзисторах (IHP, Германия) содержит 128 секций (рис. 4) и 64 компаратора. Токовые выходы компараторов K_i подключаются к логическому блоку АЦП (кодеру), формирующему (в результате обработки состояний компараторов) токовый цифровой эквивалент входного синусоидального сигнала [17].

На рис. 5 приведена ЛАЧХ коэффициента передачи по напряжению от дифференциального входа АЦП ко входам компаратора №2 аналоговой секции рис. 4 при разных значениях емкостей корректирующих конденсаторов $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2} = C_{\kappa} = C_{var} = 0 \div 15 \, \text{ф}\Phi.$



Рис. 5. ЛАЧХ коэффициента передачи АС ко входам компаратора №2

Из графиков рис. 5 следует, что диапазон рабочих частот аналоговой секции АЦП при C_{κ} =15 фФ расширяется с 8 ГГц до 30 ГГц.

IV. Второй метод снижения частотной погрешности коэффициента передачи аналоговой секции АЦП

В предлагаемом ниже варианте коррекции АЧХ входной аналоговой секции АЦП [10] (рис. 6) за счет введения корректирующих конденсаторов $C_{\kappa 1}$ и $C_{\kappa 2}$ диапазон рабочих частот АС расширяется в 5-6 раз.



Рис. 6. Фрагмент аналоговой секции АЦП с повышенным быстродействием [10]

Коэффициент передачи левого фрагмента схемы рис. 6, определяется формулой:

$$K_{\rm n}(j\omega) = K_0 \frac{1 + j\omega K_i \tau_{c\kappa} K_0^{-1}}{1 + j\omega \tau_{c0}}, \qquad (3)$$

где $\tau_{c\kappa} = R_{12}C_{\kappa}$, $\tau_{c0} = R_{12}C_0$, R_{01} - эквивалентное сопротивление на входе компаратора K1, $\alpha_1 \approx 1$ - коэффициент передачи по току эмиттера VT1,

$$R_{12} = \frac{R_1 R_{01}}{R_1 + R_{01}}, \ K_0 = \frac{R_{01}}{R_{01} + R_1}$$

Из уравнения (3) можно получить условие независимости полосы пропускания AC от численных значений R1 и R_{01} :

$$C_{\kappa 1} = \frac{C_{01}}{\alpha_i} K_0 = \frac{C_{01}}{\alpha_i} \frac{1}{1 + R_1 / R_{01}}.$$
 (4)

Из (4) следует, что в аналоговой секции рис. 6 условие настройки схемы на реализацию

максимального диапазона рабочих частот зависит от численных значений R1 и R_{01} .

На рис. 7 приведена логарифмическая амплитудночастотная характеристика коэффициента передачи по напряжению от дифференциального входа исследованного АЦП (техпроцесс SG25H1) ко входам компаратора №2 аналоговой секции рис. 6 при разных значениях емкостей корректирующих конденсаторов $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2} = C_{\kappa} = C_{var} = 0 \div 25 \, \phi\Phi.$



Рис. 7. ЛАЧХ коэффициента передачи по напряжению со входа АЦП ко входам компаратора №2 аналоговой секции

Из графиков рис. 7 следует, что диапазон рабочих частот рассматриваемой аналоговой секции при $C_{\kappa}=0,25$ пФ расширяется с 11 ГГц до 75 ГГц. Недостаток данного метода коррекции – жесткие требования к выходным сопротивлениям источников сигнала.

V. Третий метод снижения частотной погрешности коэффициента передачи аналоговой секции АЦП

В схеме рис. 8 [11] также решается задача расширения предельного частотного диапазона обрабатываемых сигналов АЦП путем снижения погрешности передачи входных дифференциальных напряжений к входам компаратора К1.



Рис. 8. Фрагмент входной аналоговой секции параллельного АЦП [11]

За счет введения входных эмиттерных повторителей VT1, VT2 и конденсаторов $C_{\kappa l}$, $C_{\kappa 2}$ диапазон рабочих частот аналоговой секции АЦП расширяется в 5-6 раз. Коэффициент передачи AC (рис. 8) по напряжению $K_n(P)$ в операторной форме (на примере левого фрагмента) определяется формулой:

$$K_{\rm n}(P) = \frac{K_0 + K_y \tau_{\rm cx} P}{1 + P(\tau_{\rm cx} + \tau_{\rm c0})} , \qquad (5)$$

где $\tau_{c\kappa} = R_{12}C_{\kappa 1}$, $\tau_{c0} = R_{12}C_{01}$, $K_0 = R_{01}/(R_{01}+R_1)$ -коэффициент передачи на низких частотах, $R_{12} = R_1R_{01}/(R_1+R_{01})$; $K_y \approx 1$ -коэффициент передачи входного эмиттерного повторителя на транзисторе VT1.

Уравнение (5) можно представить в следующем виде:

$$K_{\pi}(P) = K_0 \frac{1 + \frac{K_y}{K_0} \tau_{c\kappa} P}{1 + (\tau_{c\kappa} + \tau_{c0})P} = \frac{U_{\text{Barr.1}}(P)}{U_{\text{Br.1}}(P)}.$$
 (6)

Условие частотной независимости коэффициента передачи AC, т.е. когда $K_{\mu}(p) = K_0$, можно получить из (6):

$$\frac{K_y}{K_0}\tau_{c\kappa} = \tau_{c\kappa} + \tau_{c0} \,. \tag{7}$$

После преобразований из (7) можно найти, что емкости цепей коррекции $C_{\kappa}=C_{\kappa 1}=C_{\kappa 2}$ должны удовлетворять равенству:

$$C_{\kappa} = \frac{C_{01}}{K_{y} \left(1 + \frac{R_{1}}{R_{01}} \right) - 1} \,. \tag{8}$$

На рис. 9 приведена ЛАЧХ коэффициента передачи по напряжению от дифференциального входа исследованного АЦП (SiGe технология SG25H1 IHP, Германия) ко входам одного из компараторов аналоговой секции рис. 8 в среде Cadence при разных значениях емкостей корректирующих конденсаторов: $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2} = C_{\kappa} = C_{var} = 0 \div 300 \ \varphi \Phi.$



Рис. 9. ЛАЧХ коэффициента передачи со входа АЦП ко входам компаратора аналоговой секции

Из графиков рис. 9 следует, что диапазон рабочих частот рассмотренной аналоговой секции АЦП при $C_{\kappa}=0,3$ пФ расширяется с 3÷10 ГГц до 51 ГГц.

VI. ЧЕТВЕРТЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВОЙ СЕКЦИИ АЦП

Основная особенность представленной на рис. 10 аналоговой секции АЦП [12] – использование инвертирующих токовых зеркал ПТ1, ПТ2, применяемых в качестве источников опорного тока (ИОТ), для компенсации эквивалентной паразитной емкости C_{0i} на входах компаратора К1.



Рис. 10. Фрагмент входной аналоговой секции параллельного АЦП [12]

Условие расширения частотного диапазона входной аналоговой секции при идентичных и противофазных входных напряжениях $U_{\text{вx}}^{(+)} = U_{\text{вx}}^{(-)}$ может быть представлено в виде:

$$C_{\kappa 2} = \frac{C_{01}}{K_i}, \quad C_{\kappa 1} = \frac{C_{02}}{K_i},$$
 (9)

где $K_i \approx 1 - коэффициент усиления по току ПТ1, ПТ2.$

Результаты компьютерного моделирования схемы рис. 10 показывают (рис. 11), что диапазон рабочих частот в предлагаемой AC существенно расширяется.



Рис. 11. ЛАЧХ коэффициента передачи аналоговой секции рис.10

VII. Пятый метод снижения частотной погрешности коэффициента передачи аналоговой секции АЦП

Практическая реализация схемы рис. 12 [13] возможна в том случае, если источники опорного тока ИОТ1, ИОТ2 имеют неинвертирующие входы, относительно которых их коэффициенты передачи по току (K_i) больше единицы. В ряде случаев такое требование легко реализуется.



Рис. 12. Метод компенсации паразитной емкости С₀₁ (С₀₂) аналоговой секции АЦП [13]

При $K_i > 1$ условие компенсации отрицательного влияния на ЛАЧХ паразитной емкости C_{01} (C_{02}) может быть представлено в виде

$$C_{\kappa 1} = \frac{C_{01}}{K_i - 1}, \ C_{\kappa 2} = \frac{C_{02}}{K_i - 1}.$$
 (10)

Компьютерное моделирование аналоговой секции рис. 12 (техпроцесс SGB25H1) показывает (рис. 13), что данное схемотехническое решение позволяет в несколько раз увеличить диапазон рабочих частот АЦП.



Рис. 13. ЛАЧХ аналоговой секции АЦП рис. 12 ($K_i = 2$)

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нелинейное распределение сопротивлений резисторов эталонных опорных И токов сверхбыстродействующего AΠΠ c распараллеливанием аналоговых секций (AC) уменьшает влияние паразитных емкостей на их верхнюю граничную частоту.

Введение в АЦП рассмотренных выше специальных схем коррекции АЧХ коэффициента передачи АС позволяет расширить диапазон рабочих частот до 30-70 ГГц, который зависит не только от свойств выбранной цепи коррекции, но и от паразитных емкостей эталонных резисторов.

Предельный частотный диапазон исследованных SiGe AЦП ограничен быстродействием компараторов, которые при токовых выходах достаточно устойчиво работают до частот 20-40 ГГц, а также логической схемой кодера, формирующего цифровой эквивалент входного сигнала. При этом под устойчивой работой компаратора следует понимать его способность обеспечить на высоких частотах необходимые уровни выходных токов, которые воспринимаются кодером АЦП.

Для обработки состояния выходов компараторов рассмотренных сверхбыстродействующих АЦП целесообразно использовать в качестве кодеров цифровые логические элементы с токовыми входами и выходами, имеющими ряд преимуществ в сравнении с традиционной потенциальной цифровой логикой [17].

Поддержка

Статья подготовлена по проекту № 8.374.2014/К Госзадания Минобрнауки РФ на 2014-2016 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- Y.Borokhovych. 4-bit, 16 GS/s ADC with new Parallel Reference Network / Y.Borokhovych, H. Gustat, C.Scheytt // COMCAS 2009 – 2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. Tel Aviv, Israel.
- [2] Patent. DE102009002062A1 Analog-Digital-Umsetzer mit breitbandigem Eingangsnetzwerk Y. Borokhovych, J.C. Scheytt 07.10.2010.
- [3] Razavi B. Principles of Data Conversion System Design // IEEE Press. New York. 1995.
- [4] A.Glascott-Jones, N. Chantier, F. Bore, M. Wingender, E. Bouin. A Quad 1.25GSps 8 bit ADC with 3.2GHz input bandwidth and its use in communication systems // Proceedings of The International IEEE Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (IEEE COMCAS 2013). Israel. October 21-23, 2013
- [5] Мерзликин С. Сверхбыстродействующие АЦП: особенности архитектуры / Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1/28. С. 30-33.
- [6] B. Kumar Thandri, J. Silva-Martinez. A 63 dB SNR, 75mW Bandpass RF ΣΔ ADC at 950 MHz Using 3.8-GHz Clock in 0.25-µm SiGe BiCMOS Technology // IEEE Journal of solid-state circuits. February 2007. Vol. 42. № 2. P. 269-279.

- [7] Серебряков А.И., Борохович Е.Б. Метод повышения быстродействия параллельных АЦП // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: Материалы научно-технической конференции. М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2012. С. 150-155..
- [8] Быстродействующий аттенюатор для входных цепей аналого-цифровых интерфейсов: заявка на патент РФ; МПК Н03Н 7/24, A61B, G01R 31/02, H01P 1/22, H03K 5/08, H03L 5/00, G05F 3/00, H01H 47/00, H03G 3/20 / Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Суворов В.В., Пахомов И.В. - № 2013109816/08; заявл. 05.03.13 (522).
- [9] Сверхбыстродействующий параллельный аналогоцифровой преобразователь с дифференциальным входом: заявка на патент РФ, МПК8 Н03М 1/36. / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С., Бутырлагин Н.В. – № 2013119662/08; заявл. 26.04.2013 (543).
- [10] Сверхбыстродействующий параллельный дифференциальный аналого-цифровой преобразователь: заявка на патент РФ, МПК8 Н03М 1/36. / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С., Бутырлагин Н.В. – № 2013116177/08; заявл. 09.04.2013 (530).
- [11] Сверхбыстродействующий параллельный аналогоцифровой преобразователь с дифференциальным входом: заявка на патент РФ, МПК8 Н03М 1/36. / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С., Бутырлагин Н.В. – № 2013120247/08; заявл. 30.04.2013 (542).
- [12] Сверхбыстродействующий параллельный аналогоцифровой преобразователь с дифференциальным входом: решение о выдаче патента РФ от 06.12.2013, МПК8 Н03М 1/36 / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Бутырлагин Н.В., Пахомов И.В. – № 2013120163/08; заявл. 30.04.2013 (532).
- [13] Дифференциальный аттенюатор с расширенным диапазоном рабочих частот: заявка на патент РФ, МПК8 Н03Н 7/24, А61В, G01R 31/02, H01P 1/22, H03K 5/08, H03L 5/00, G05F 3/00, H01H 47/00, H03G 3/20. / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Пахомов И.В., Бутырлагин Н.В. – № 2013127824/08; заявл. 18.06.2013 (550).
- [14] Krutchinsky S.G., Prokopenko N.N., Kovbasjuk N.V. Methods of compensation of parasitic parameters of transistors in analogue integrated circuits // 2st IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communication. Moscau, Russia. June 2004.
- [15] Methods of Compensation for Fundamental Components of Transistor Output Capacitance in Analog Integrated Circuits / Prokopenko N.N., Krutchinsky S.G., Budyakov A.S., Savchenko J.M., Kovbasjuk N.V. // Proceeding of the Third International Conference on Circuits and Systems for Communications ICCSC06 / Politehnica University, Bucharest, Romania. July 6-7, 2006. P. 44-49.
- [16] Krutchinsky S.G., Prokopenko N.N., Starchenko E.I. Circuit Engineering Principles of Substrate Parasitic Capacitance Influence Compensation // Proceeding of the Third International Conference on Circuits and Systems for Communications ICCSC06. Politehnica University. Bucharest, Romania. July 6-7, 2006. P. 155-158.
- [17] Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. Логические элементы с входными и выходными токовыми координатами // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: Материалы научно-технической конференции. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2012. С. 106-110.