

2004, том 40, № 1

УДК 681.142.621; 681.325.

**В. Н. Вьюхин, Ю. А. Попов**

*(Новосибирск)*

**АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ**

Разработана компьютерная модель цифровой измерительной системы с параллельными каналами, позволяющая определить суммарную ошибку восстановленного сигнала при наличии погрешностей в индивидуальных каналах. Анализируется влияние погрешностей статической характеристики каналов (смещения нуля и масштаба) и динамической погрешности, возникающей вследствие ошибок синхронизации каналов. Результаты анализа представляются во временной и частотной областях.

Применение параллельных каналов дает определенные преимущества измерительным системам. Например, распараллеливание процесса измерения в регистраторах широкополосных сигналов на  $N$  каналов позволяет в  $N$  раз повысить частоту дискретизации по отношению к тактовой частоте одного канала [1]. Эта задача актуальна еще и потому, что, как правило, полоса частот аналоговых и аналого-цифровых элементов тракта выше допустимой частоты дискретизации.

Блок-схема системы с параллельными каналами представлена на рис. 1. Каждый из  $N$  измерительных каналов содержит аналоговые элементы – устройства предобработки сигнала и АЦП. Блок синхронизации стробирует АЦП в каждом канале с фазовым сдвигом  $T/N$ , где  $T$  – период дискретизации одного канала. Потоки информации от всех каналов объединяются в сумматоре, в качестве которого может служить память (для регистратора) либо устройство цифровой обработки с параллельными каналами. Особенностью предлагаемого метода являются специфические погрешности выходного сигнала, обусловленные наличием индивидуальных погрешностей в каждом канале. Исследование этих погрешностей и есть предмет данной работы. Решение такой задачи дает возможность осуществлять коррекцию названных погрешностей по результатам измерения образцового сигнала.

Аналитическое определение суммарной погрешности в общем случае весьма затруднительно. В [2] приводятся расчетные соотношения для частного случая (число каналов 2, анализируется только динамическая погрешность). Поэтому для решения задачи в общем виде была разработана компьютерная модель измерительной системы с параллельными каналами. Вход-

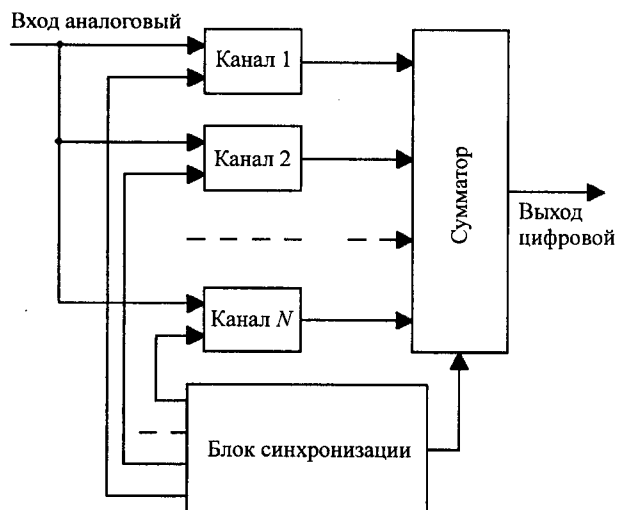


Рис. 1

ными параметрами модели являются индивидуальные погрешности каналов: статические (ошибки смещения нуля и масштаба) и динамические, обусловленные погрешностями фазировки каналов. Результат работы моделирующей программы представляется в виде графиков спектра амплитуд и ошибки восстановленного сигнала, а также численных значений средней и среднеквадратичной ошибок по всей длине реализации. Число моделируемых каналов от 2 до 5, длина реализации  $n = 128$  отсчетов. Входной сигнал задавался в виде

$$U_k = 2(1 - m_k) \sin(2\pi i p / n + 2\pi b_k p / n) + d_k, \quad (1)$$

где  $d_k$ ,  $m_k$ ,  $b_k$  – погрешности смещения нуля, масштаба и фазы для  $k$ -го канала соответственно;  $i$  от 0 до  $n - 1$ ;  $p$  – число периодов входного сигнала на длину реализации,  $p = 10$ , если не указано иное. В связи с тем, что имеет место когерентная выборка, оконная техника при вычислении спектра не применялась. Коэффициент 2 в (1) нормализует входной сигнал к 0 дБ (двустороннее преобразование Фурье). Анализ проводится отдельно для каждой из трех названных погрешностей. В работе приняты следующие обозначения:  $F_1$  – входная частота дискретизации,  $F_2$  – выходная частота дискретизации,  $F_3$  – частота входного сигнала.

**1. Влияние ошибок смещения нуля.** Ошибки смещения нуля в каналах искажают выходной сигнал и приводят к появлению в спектре составляющих с частотами  $jF_1$ ,  $j = 1$  для  $N = 2, 3$  и  $j = 1, 2$  для  $N = 4, 5$ . Таким образом, в спектре выходного сигнала появляется компонента с частотой дискретизации каналов и ее гармоники в пределах половины выходной частоты дискретизации. Уровень паразитных компонент в спектре зависит от величины и соотношения ошибок в каналах. В частном случае, когда смещение нуля определяется одним каналом (например, в двухканальной системе), сигнал ошибки представляет импульсную последовательность (со скважностью  $1/N$  и амплитудой, равной смещению нуля), спектральный состав которой может быть легко определен аналитически. На рис. 2, а, б приведены графики соответственно ошибки выходного сигнала (разность между идеальным и реаль-

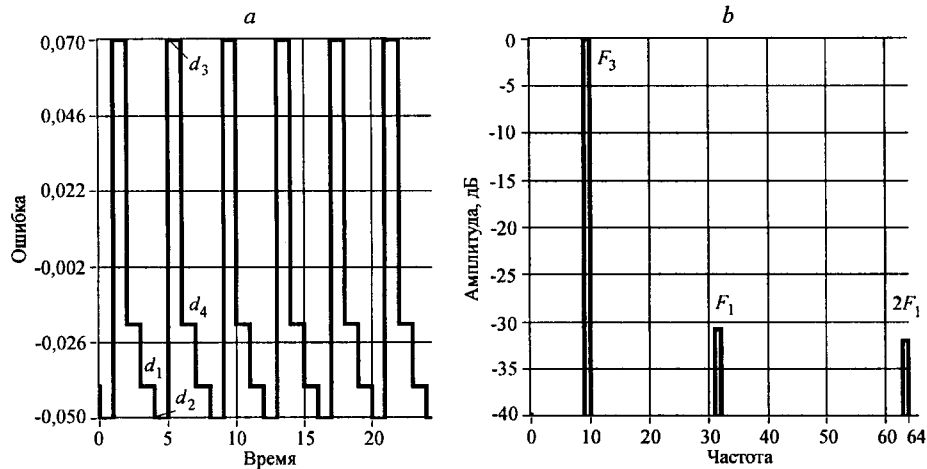


Рис. 2

ным сигналами) и спектра выходного сигнала при числе каналов  $N = 4$  и ошибках в каналах:  $d_1 = 0,04$ ,  $d_2 = 0,05$ ,  $d_3 = -0,07$ ,  $d_4 = 0,02$ . Из рис. 2 видно, что уровень паразитных компонент с частотами  $F_1$  и  $2F_1$  равен  $-30,5$  и  $-32$  дБ соответственно, средний квадрат ошибки  $0,047$ , постоянная составляющая  $0,01$ .

**2. Влияние ошибок масштаба.** Масштабные погрешности каналов вызывают амплитудную модуляцию выходного сигнала с частотой входного, что приводит к появлению в спектре составляющих с частотами  $jF_1 \pm F_3$ ; значение  $j$ , как в разд. 1. Сигнал ошибки в общем случае представляет сложную импульсную последовательность, модулированную входной частотой. В частном случае одного канала с ошибкой погрешность представляет последовательность импульсов, модулированную входным сигналом с частотой  $F_1$ , скважностью  $1/N$  и амплитудой, равной ошибке масштаба. Уровень паразитных спектральных компонент с частотами  $jF_1 \pm F_3$  определяется из соотношения для спектра амплитудно-модулированного колебания [3]:

$$|a_j| = \frac{m_k}{\pi j |\sin(\pi j/N)|} \quad (2)$$

В действительности соотношение (2) дает заниженную оценку, так как не учитывает эффект наложения высших гармоник (выше половины частоты дискретизации) на составляющие в рабочей полосе.

На рис. 3, *a, b* приведены графики ошибки и спектра выходного сигнала при следующих условиях:  $N = 4$ , ошибки масштаба в каналах  $m_1 = -0,05$ ,  $m_2 = 0,05$ ,  $m_3 = 0,03$ ,  $m_4 = 0,04$ . При заданных условиях уровень паразитных компонент с частотами  $(F_1 \pm F_3)$  составляет  $-33,5$  дБ, с частотами  $(2F_1 \pm F_3)$   $-31,5$  дБ, средний квадрат ошибки  $0,061$ . Для наглядности на рис. 4 представлен график ошибки выходного сигнала при тех же условиях, но число периодов на реализацию равно 1; отображаются все 128 точек.

**3. Влияние фазовых ошибок.** Источником фазовых ошибок являются цепи формирования сигналов синхронизации измерительных каналов. При  $N$  каналах необходимо сформировать  $N$  синхросигналов со сдвигом по фазе

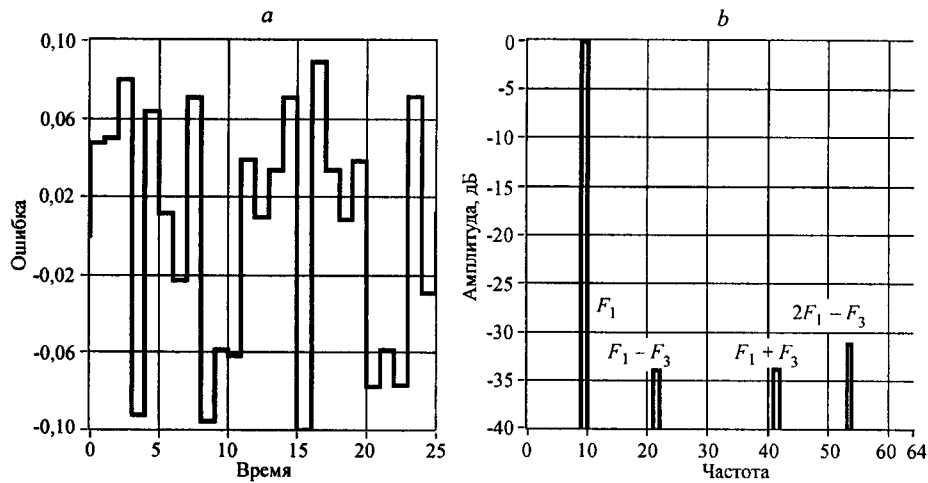


Рис. 3

на  $T/N$ . Конкретная реализация фазосдвигающих цепей может быть различной в зависимости от диапазона частот, но в любом случае погрешности формирования фазы будут существенно влиять на результирующую погрешность. В модели эта составляющая погрешности задается в виде отдельного коэффициента  $b_k$  (1) в диапазоне от нуля до единицы, что соответствует погрешности формирования фазы сигнала синхронизации от нуля до  $T/N$ . В отличие от предыдущих эта составляющая погрешности имеет динамический характер и эквивалентна апертурной ошибке  $\delta_a$  измерения (ошибке дискретизации по времени), максимальное амплитудное значение которой определяется соотношением

$$\delta_a = V_m F t_a, \quad (3)$$

где  $V_m$  и  $F$  – амплитуда и частота входного сигнала соответственно;  $t_a$  – апертурное время, соответствующее указанной ранее ошибке фазы.

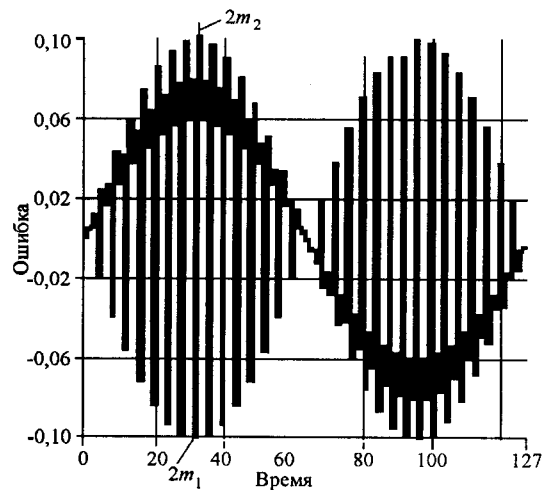


Рис. 4

Фазовые ошибки в каналах приводят к появлению в спектре выходного сигнала составляющих с частотами  $jF_1 \pm F_3$ . Ошибка представляет импульсную последовательность, модулированную по амплитуде входной частотой. Качественно сигнал ошибки будет таким же, как при масштабных ошибках в разд. 2. Отличие состоит в том, что фазовые ошибки приводят к динамическим погрешностям выходного сигнала, а масштабные имеют статический характер. Кроме того, погрешности составляющих при гармоническом входном сигнале сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ . Последнее следует из того факта, что масштабная погрешность максимальна при максимуме сигнала, а динамическая погрешность максимальна в точке максимума производной сигнала. На модели определялись погрешности при следующих условиях:  $N = 4$ , нормализованная частота входного сигнала 0,195, фазовые ошибки в каналах 0,1, -0,1, 0,08. При этих условиях уровень спектральных компонент ошибки с частотами  $(F_1 + F_3)$  и  $(2F_1 \pm F_3)$  равен -32 и -23 дБ соответственно, средний квадрат ошибки 0,07. В реальных условиях будут присутствовать все названные ошибки в каналах и результирующая погрешность на выходе измерительной системы будет определяться их векторной суммой.

Таким образом, в результате выполнения данной работы получены качественные и частные количественные характеристики погрешности измерения в системах с параллельными каналами в зависимости от ошибок в отдельных каналах. В спектре выходного сигнала появляются компоненты с исходной частотой дискретизации и ее комбинации с входным сигналом. Дальнейшие исследования на модели позволят выявить общие количественные соотношения между отдельными составляющими погрешности в каждом канале и их результирующим вкладом на выходе многоканальной системы, что даст возможность решать задачи программной коррекции ошибок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеев Д. В., Квашнин А. Н., Хильченко А. Д. Регистраторы однократных импульсных сигналов ADC824 // ПТЭ. 1999. № 3. С. 81.
2. Janik J-M., Bloyet D., Guoyot B. Measurement of timing jitter contribution in a dynamic test setup for setup A/D converters // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 2001. 50, N 3. P. 786.
3. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1962.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
E-mail: VVN@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию  
21 мая 2003 г.*