

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.142.621 : 681.3

В. Н. Вьюхин

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
АППАРАТУРЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Описываются устройства, обеспечивающие ввод широкополосных сигналов в цифровой процессор когерентной обработки. Для формирования отметок времени дискретизации сигнала разработан генератор задержки с аналоговым интерполятором, обеспечивающий шаг задержки 125 пс. Дискретизация и квантование сигнала осуществляются одноразрядным преобразователем с УВХ на входе, обеспечивающим полосу 0,8 ГГц и динамический диапазон 60 дБ.

Решение задачи цифровой обработки сигналов в полосе до 1 ГГц и динамическом диапазоне 60 дБ не обеспечивается существующими методами и устройствами и требует проведения исследований и разработки новых измерительных устройств преобразования входного сигнала в код для дальнейшей обработки цифровыми методами.

Модель исследуемого сигнала представляет аддитивную смесь слабого (микровольты) полезного сигнала, широкополосного белого шума и мощной помехи в виде случайных логических уровней ЭСЛ или ТТЛ. Полоса полезного сигнала и шума — до 1 ГГц, динамический диапазон, который должен обеспечивать измерительный блок, определяется соотношением логической помехи и шума и составляет 60 дБ.

В рассматриваемой модели полезный сигнал синхронен с тактовой частотой и может быть выделен из шума методом когерентного накопления. Суть метода заключается в цифровом накоплении большого числа выборок сигнала в фиксированных точках тактового интервала. Измерительный тракт должен включать временной и амплитудный каналы. Временной канал формирует высокостабильные отметки времени стробирования в амплитудном канале и запускается тактовым сигналом. Амплитудный канал осуществляет дискретизацию и квантование сигнала.

Полоса частот измерительного тракта определяется полосой амплитудного канала и стабильностью моментов стробирования за время накопления. Шумы и нестабильности генератора задержки «размывают» момент времени, в который осуществляется накопление сигнала. Это «размытие» эквивалентно интегрированию сигнала за интервал, равный нестабильности отметки времени, и, следовательно, ограничивает полосу устройства. Выражение для АЧХ интегратора записывается следующим образом:

$$[K(\omega)] = \frac{\sin \pi f \Delta t}{\pi f \Delta t}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  — интервал интегрирования. По уровню 3 дБ полоса частот из (1)  $\Delta f_n = 1/2\Delta t$ .

Общая полоса измерительного тракта определяется как полоса последовательно соединенных линейных звеньев: амплитудного и временного. Оценить приближенно общую полосу можно следующим образом. Известно [1], что время установления многокаскадного усилителя определяется геометрическим суммированием времен отдельных каскадов. По аналогии полоса анализируемого устройства определяется выражением

$$\Delta f = (\sqrt{(1/\Delta f_a)^2 + (2\Delta t)^2})^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Delta f_a$  — полоса амплитудного канала.

Для обеспечения полосы частот  $0,5 + 1$  ГГц шумы и нестабильность временного канала должны быть  $< 0,5$  нс, что требует разработки специальных схем формирования задержки с малым шагом.

В [2] описан генератор задержки, обеспечивающий шаг задержки 1 нс с помощью цифровых линий задержки, что является пределом этого метода. Разработан аналоговый интерполятор, который включается последовательно с генератором [2] и обеспечивает шаг задержки 125 пс.

Блок-схема интерполятора приведена на рис. 1 и включает генератор «пилы», 6-разрядный ЦАП и компаратор 597СА4. Генератор «пилы» выполнен на основе транзисторной зарядно-разрядной цепи, включающей генератор зарядного тока (ГТ1) с током  $I_0$  и генератор разрядного тока (ГТ2) с током  $3I_0$ . Дiode (Д) фиксирует исходный уровень напряжения на конденсаторе. Экспериментальные измерения показали, что шаг задержки составляет  $125 \pm 50$  пс. Температурный и временной дрейфы не превышают шага. Максимальная частота запуска при задержке 16 нс составляет 30 МГц. До частот запуска 25 МГц отсутствует зависимость задержки от частоты. Измерения проведены измерителем интервалов НР5370А.

В амплитудном канале динамический диапазон 60 дБ при полосе до 1 ГГц может быть обеспечен стробоскопическим преобразователем с последующей оцифровкой АЦП. Однако стробоскопические преобразователи могут работать только с периодическим сигналом и не могут быть использованы для измерения случайных сигналов. Современные АЦП реального времени с полосой до 1 ГГц и тактовыми частотами до 100 МГц не могут обеспечить требуемый динамический диапазон  $10 + 12$  разрядов.

В связи с тем, что динамический диапазон определяется в основном логической помехой, существует возможность решения задачи с помощью одноразрядного преобразователя для получения цифровых статистических характеристик сигнала. В качестве преобразователя можно использовать компаратор, на второй вход которого подается смещение, равное логическому уровню.

Были проведены экспериментальные исследования по определению полосы пропускания и динамического диапазона компаратора 597СА4. Схема тестовой цепи приведена на рис. 2. На один из входов компаратора поступает синусоидальный сигнал от генератора. Уровень сигнала при измерении полосы частот на большом сигнале устанавливается  $-10$  дБ/В. При измерении пороговой чувствительности уровень регулируется, начиная с  $-80$  дБ/В. На второй

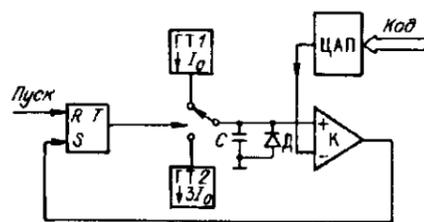


Рис. 1

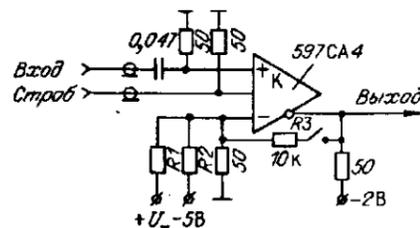


Рис. 2

$f$ , МГц	$\Delta U_{\text{н}}$ , В	П, -дБ/В	$f$ , МГц	$\Delta U_{\text{н}}$ , В	П, -дБ/В
100	12,5	72	600	4	55
200	12,5	70	700	4	50
300	10,5	66	800	3	48
400	10	62	900	2	46
500	9	60	1000	1	44

вход компаратора через резистор  $R1$  подается регулируемый уровень  $U_{\text{н}}$ , а через  $R2$  — постоянное смещение. Значение  $R1 = 680 \text{ Ом}$  при измерении полосы и  $R1 = 50 \text{ кОм}$  при измерении чувствительности. Выход компаратора наблюдается осциллографом. В эксперименте измеряется диапазон изменения  $\Delta U_{\text{н}}$ , при котором на выходе

компаратора существует переменная составляющая. Частоты строба и сигнала асинхронны, поэтому на выходе компаратора существует случайная последовательность нулей и единиц в диапазоне  $U_{\text{н}}^- < U_{\text{н}} < U_{\text{н}}^+$ ,  $U_{\text{н}}^+ - U_{\text{н}}^- = \Delta U_{\text{н}}$ .

Чувствительность компаратора зависит от режима работы. В обычном включении с отрицательным стробом компаратор работает в режиме слежения—хранения и вблизи баланса возбуждается. Возбуждение можно устранить введением гистерезиса (резистор  $R3$  на рис. 2) или не устранять. Чувствительность компаратора в этом режиме будет определяться либо шириной зоны возбуждения, либо гистерезисом и составит  $3 + 4 \text{ мВ}$ .

Более предпочтителен режим работы с положительным стробом. При длительности строба  $10 \text{ нс}$  компаратор успевает отследить сигнал, но не возбуждается при малом рассогласовании, поэтому чувствительность составляет  $1 \text{ мВ}$ .

В таблице приведены значения  $\Delta U_{\text{н}}$ , являющиеся отсчетами АЧХ компаратора как линейного звена, и значения пороговой чувствительности (П). Пороговая чувствительность определялась по явному увеличению ширины переходной зоны относительно исходного значения при  $U_{\text{н}} = -90 \text{ дБ/В}$ .

Из полученных данных следует, что полоса компаратора по уровню спада АЧХ на  $3 \text{ дБ}$  составляет  $500 \text{ МГц}$  и в этой полосе чувствительность не хуже  $-60 \text{ дБ/В}$ . Таким образом, схема с одним компаратором может обеспечить анализ сигналов в полосе  $0,5 \text{ ГГц}$  с динамическим диапазоном  $60 \text{ дБ}$ .

Для расширения полосы необходимо на входе устройства установить широкополосный УВХ, осуществляющий операцию дискретизации. На рис. 3 приведена упрощенная схема разработанного УВХ ( $T1, T2$  — КТ391,  $T3$  — АП324,  $D1-D4$  — АД539,  $D9, D10$  — КД514,  $M$  — 1500ЛМ102). Входной сигнал поступает непосредственно на диодный ключ без буферного каскада, что характерно для стробоскопических преобразователей. Однако в отличие от последних в схеме УВХ рис. 3 имеет место полный заряд конденсатора памяти за время строба выборки. Отметим, что в обычных стробоскопических преобразователях конденсатор за время строба перезаряжается на сотые доли действующего перепада, за счет чего и достигается широкая полоса.

Диодный мостовой ключ  $D1-D4$  на арсенид-галлиевых импульсных диодах переключается переключателем тока  $T1, T2$ . Для уменьшения

емкости, подключаемой к входу, в переключателе используются пассивные нагрузки  $R1$  и  $R2$ . Выходной буферный каскад выполнен на арсенид-галлиевом полевом транзисторе  $T3$  для минимизации емкости и повышения КБВ входа, диоды  $D9, D10$  уменьшают смещение нуля УВХ, создаваемое буферным каскадом.

Длительность строба УВХ  $(2 + 3) \text{ нс}$ , ток открытого ключа  $I_3 = 10 \text{ мА}$ . Постоянная времени зарядной цепи

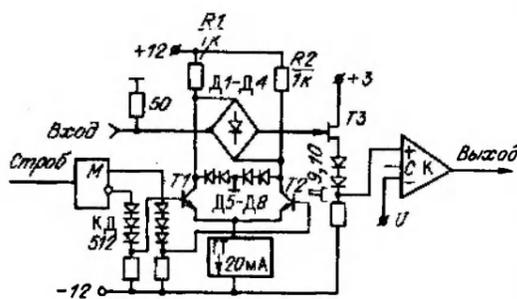


Рис. 3

$$\tau_3 = (r_i + r_d)C_n, \quad (3)$$

где  $r_i = 50$  Ом — сопротивление источника сигнала,  $r_d \approx 15$  Ом — сопротивление открытого ключа,  $C_n$  — нагрузочная емкость, включающая емкости диодов ключа, повторителя ТЗ и монтажную емкость. Значение  $C_n \leq 2$  пФ, что дает  $\tau_3 = 130$  пс, скорость заряда на большом сигнале  $V = I_3/C_n = 5$  В/нс. Расчетные параметры  $\tau_3$  и  $I_3$  обеспечивают полосу пропускания УВХ 1 ГГц.

При заперении ключа на высокоомный вход буферного каскада проникает помеха («пьедестал»), значение которой в описываемой схеме УВХ зависит от уровня входного сигнала. Этот эффект обусловлен противофазным изменением амплитуды импульсов на управляющей диагонали моста при изменении входного сигнала и приводит к тому, что коэффициент передачи ключа УВХ уменьшается до значения

$$K_1 = 1 - 2C_n/C_n, \quad (4)$$

где  $C_n$  — проходная емкость диода ключа.

С учетом того, что коэффициент передачи буферного каскада  $K \approx 0,8$ , общий коэффициент передачи УВХ составляет примерно 0,5.

Экспериментально определялись полоса частот, уровень шумов и диапазон тактовых частот одностороннего преобразователя по схеме рис. 3. Полоса частот и уровень шумов определялись по ширине амплитудной гистограммы, получаемой путем автоматического сканирования порогового напряжения компаратора и накопления массивов данных с выхода компаратора при каждом уровне порога. Ширина полосы по спаду АЧХ 3 и 6 дБ составила 800 и 1000 МГц соответственно. Ширина гистограммы в отсутствие сигнала 2 + 3 мВ, что дает средний квадрат шума 0,4 + 0,5 мВ и соответственно динамический диапазон > 60 дБ. Превалирующим в схеме является шум компаратора, равный его пороговой чувствительности. Диапазон тактовых частот, в котором устройство правильно функционирует, 50 МГц. Недостаточная полоса устройства обусловлена паразитными параметрами дискретного монтажа.

Полученные в данной работе результаты позволяют создать измерительный канал аппаратуры цифровой обработки сигналов в полосе 0,5—1 ГГц и динамическом диапазоне 60 дБ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства. — М.: Связь, 1966.
2. Вьюхин В. Н. Генератор задержки // ПТЭ. — 1991. — № 1.

*Поступило в редакцию 6 октября 1993 г.*