

ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ОСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОДНОКРАТНЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Наиболее жесткие требования к преобразователям временных интервалов предъявляются при лазерной локации [1]. Это связано с широким диапазоном измеряемых величин, с необходимостью обеспечить малые абсолютную и относительную погрешности измерения.

При преобразовании однократных временных интервалов (ОВИ) в цифровой эквивалент, как и при любом преобразовании аналоговой величины в дискретную, возникают погрешности, обусловленные округлением значения преобразуемой величины до ближайшего целого значения образцовой величины.

В работе [2] описан цифровой хронометр, в котором используется метод параллельного усреднения (осреднения). В таком преобразователе происходит неявное квантование отрезков времени, являющихся погрешностями квантования и длительностями стартового и стопового импульсов, разностно-периодной мерой (РПМ). Последняя представляет собой разность периодов повторения основной частоты f_0 и дополнительной f_1 , т.е. $\Delta T = T_0 - T_1$. Импульсы, имеющие период повторения T_1 , образованы путем задержки на n параллельных линиях задержки стартовых (стоповых) импульсов.

При совпадении импульсов потоков f_0 и f_1 формируются пакеты совпадений в стартовых и стоповых каналах измерений. Огибающие таких пакетов являются импульсами, имеющими низкую частоту следования. Длительности стартового и стопового импульсов трансформируются в длительности соответствующих пакетов совпадений.

Уравнение преобразования для метода параллельного усреднения можно записать в виде

$$t_x = [(N_0 + N_1 / 2) + Nn / 2 - (N'_0 + N'_1 / 2)] \Delta T,$$

где N_0 — количество нулей, соответствующих несовпавшим стартовому импульсу и второму импульсу потока T_0 и (или) совпавшим импульсам с амплитудой, недостаточной для срабатывания элементов схемы, т.е. засчитанных как нули; N_1 — число единиц, соответствующих совпавшим стартовому импульсу и второму импульсу последовательности периода T_0 ; N — число целых периодов повторения T_0 , попавших в измеряемый интервал t_x . Величины N'_0 и N'_1 определены аналогично N_0 и N_1 для стоповых каналов.

Проанализируем погрешности, которые характерны для разработанного метода преобразования ОВИ и оказывают наибольшее влияние на результат.

Рассмотренный метод преобразования ОВИ обеспечивает повышение точности за счет уменьшения шага квантования до величины, являющейся РПМ. Снижаемая погрешность относится к методическим, так как она обусловлена дискретной формой представления результатов преобразования аналоговой величины. Аналоговый характер преобразуемого интервала времени t_x и конечное значение РПМ $\Delta T = T_0 - T_1$ приводят к возникновению временной неопределенности. Максимальное значение последней в реальном масштабе времени $\Delta T = f_p / f_0 f_1$, где f_p — разностная частота, при условии, что частоты следования импульсов, участвующих в процессе преобразования, абсолютно стабильны и зарегистрированы все импульсы пакета совпадений. РПМ для данного метода — это величина ΔT времени задержки стартового (стопового) импульса первой линии задержки.

Оценим влияние случайных электрических флуктуаций, действующих в узлах преобразователя, на точность описанного метода преобразования. Основными дестабилизирующими факторами являются термодинамические шумы и нестабильности частот следования f_0 и f_1 .

В качестве источников питания используются гальванические источники постоянного тока. Поэтому при оценке инструментальных погрешностей влияние пульсаций питающих напряжений исключено из рассмотрения.

Влияние теплового шума при разностно-периодном квантовании проявляется в изменении числа импульсов пакета совпадений, которые вызываются изменением амплитуды порога срабатывания схем совпадений. Ширина полосы временной неопределенности $\delta T_{ш}$ зависит от крутизны огибающей пакета совпадений и действующего значения теплового шума $U_{ш}$. Значение $U_{ш}$ определяется уравнением Найквиста.

Неопределенность пакета совпадений из-за теплового шума в виде количества импульсов

$$\delta N_{ш} = \frac{2\sqrt{k\theta\delta f r}}{K_n} \frac{f_1^2}{f_p} \quad (1)$$

Здесь k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; θ — абсолютная температура; δf — полоса частот, к которой принадлежит напряжение, $\delta f \approx 1/\tau$, где τ — средняя длительность импульсов на выходе схем совпадения; r — входное сопротивление схемы совпадения; K_n — крутизна фронта импульса; f_1 — частота появления импульсов на выходах линий задержки; f_p — разностная

частота, $f_p = |f_0 - f_1|$, где f_0 — частота следования квантовых импульсов.

Изменение числа периодов частоты f_1 , обусловленное ее кратковременной нестабильностью,

$$\delta N_\alpha = \frac{\alpha 2 \tau f_0^2 f_1}{f_p^2}, \quad (2)$$

где α — кратковременная нестабильность частоты f_0 .

Количественную оценку полученных выражений для $\delta N_{\text{ш}}$ и δN_α проведем с учетом реально достижимых технических параметров сигналов для ИМС серии 500. Значение $r = 50$ Ом. Зададимся частотой следования импульсов $f_0 \approx f_1 = 10^5$ Гц, ее кратковременная нестабильность $\alpha = 10^{-7}$. Длительность импульсов $\tau_0 = \tau_i = \tau = 5 \cdot 10^{-11}$ с. Если принять, что абсолютная температура $\theta = 300$ К, выражения (1) и (2) примут вид

$$\delta N_{\text{ш}} = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{f_p}; \quad \delta N_\alpha = \frac{1}{f_p^2}.$$

Анализ полученных выражений показывает, что изменение числа импульсов, обусловленное тепловыми шумами и кратковременной нестабильностью частот, различным образом зависит от разностной частоты. Для соблюдения оптимальности преобразования применим принцип выравнивания частных погрешностей. Для этого найдем значение f_p , при котором $\delta N_{\text{ш}} = \delta N_\alpha$, т.е. $f_p = 2,5 \cdot 10^4$ Гц. При таком значении разностной частоты изменение числа пакета совпадений $\delta N_{\text{ш}} = \delta N_\alpha = 1,6 \cdot 10^{-8}$. Временное выражение этих флуктуаций составит $\delta T_\alpha = \delta T_{\text{ш}} = 1,01 \cdot 10^{-13}$ с.

При использовании калиброванных линий задержки на коаксиальном кабеле калибровка автономных линий задержки может быть выполнена с высокой степенью точности, соответствующей абсолютной погрешности 10^{-14} с для временных задержек наносекундного диапазона.

Снижение погрешности преобразования может быть достигнуто путем снижения разностной частоты, но при этом инструментальная погрешность возрастет.

Список литературы: 1. Беспалько В.А. Прецизионное измерение времени в лазерной дальнометрии // Измерение. Контроль. Автоматизация. 1991. № 2. С. 34 — 43. 2. А.с. 1693588 СССР, МКИ G 04 F 10/04. Цифровой хронометр / О.И. Кадацкая, А.И. Каменюка, Е.Л. Канарейкина (СССР) // Открытия. Изобретения. 1991. № 43. С. 17.

Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 26.02.99