УДК 621.7.058.68

О.И. КАДАЦКАЯ, канд. техн. наук

ПОГРЕШНОСТИ НОНИУСНОГО МЕТОДА ПАКЕТНОГО СОВПАДЕНИЯ

Определение пространственного положения объекта требует применения высокоточных преобразователей время-код, имеющих широкий динамический диапазон и высокую точность измерения [1].

Измеритель коротких интервалов времени, использующий нониусный метод совпадение импульсов пакетами, рассмотрен в [2].

Уравнение нониусного метода пакетного совпадения имеет вид:

$$t_x = t_u + t_1 + t_2 = N * T_0 + T_0 * \frac{n_{10}}{N_{p1}} + T_0 \frac{n_{02}}{N_{p2}} \, , \tag{1}$$

где N – количество импульсов, соответствующее измеряемому временному интервалу, укладывающемуся в целое число периодов T_0; T_0 – период импульсов генератора основной частоты f_0; n_{10} – число импульсов частоты f_1 от стартового импульса до середины пакета совпадений в стартовом канале (число импульсов стартового пакета); n_{02} – число импульсов частоты f_2 от стопового импульса до середины пакета совпадений в стоповом канале (число импульсов стопового пакета); N_{p1}, N_{p2} – количество импульсов, соответствующее периодам разностных частот в стартовом и стоповом каналах преобразования соответственно.

Рассмотрим механизм возникновения общей погрешности совпадения импульсов пакетами, которая состоит из методической и инструментальной погрешностей. Преобразование однократных временных интервалов в цифровой эквивалент путём фиксации на оси времени центров пакетов совпадения сопровождается возникновением погрешностей, обусловленных квантованием РПМ (разностно-периодной мерой) δt_{10} и δt_{02}. Эту погрешность следует отнести к методической, так как она возникает при замене аналоговых величин t_1 и t_2 соответствующими им дискретными. Максимальное значение такой погрешности в реальном масштабе времени составляет

$$\delta t = \delta t_{10} = \frac{f_{p1}}{f_0 f_1} \, ,$$

то есть методическая погрешность на высокой частоте равна $\delta t_M = \delta t_{10}$ или δt_{02}.

Пусть $f_0 \approx f_1 \approx f_2 = f$, $\delta t_{10} = \delta t_{02} = \delta t$, тогда $f_{p1} = f_{p2}$. На разностной частоте f_p при постоянном коэффициенте трансформации эквивалентом периода повторения T_1 импульсов является период разностной частоты $T_P = f_P^{-1}$, а эквивалентом разностно-периодного шага квантования δt-некоторая величина δT_p. Тогда справедливо соотношение

$$\frac{\delta t}{T_1} = \frac{\delta T_p}{T_p} \, . \tag{2}$$

С учётом значения δt и $T_0 \approx T_1 = T_2$ эквивалент кванта на разностной частоте

$$\delta T_p = \frac{T_p}{T_1} \cdot \delta t = T_1 \, .$$

Максимальная методическая погрешность на разностной (низкой) частоте, выраженная через количество периодов частоты f_0, составляет

$$\delta N_M = \frac{\delta T_p}{T_p} = \frac{T_1}{T_p} = T_0 \cdot \delta t \cdot f_0 \cdot f_1 = 1, \qquad (3)$$

то есть равна одному периоду повторения импульсов последовательности, на которой исследуется преобразуемый интервал времени.

Произведем анализ и количественную оценку инструментальных погрешностей нониусного метода с использованием РПМ. Основными дестабилизирующими факторами в рассматриваемом преобразовании являются термодинамические шумы, пульсации напряжения питания, нестабильности частот f_0, f_1 и f_2. Влияние пульсаций можно устранить путем применения гальванических источников для питания формирователей импульсов, схем совпадения, и остается рассмотреть степень влияния на точность преобразования t_u термодинамических шумов и нестабильностей частот f_0, f_1 и f_2.

Влияние шумовых процессов проявляется в возникновении временной неопределённости на границах пакетов импульсов совпадений. На огибающей пакета такая неопределённость будет пропорциональна коэффициенту трансформации, равному f_1/f_{p1} или f_2/f_{p2}. Рассмотрим для определённости f_1/f_{p1}. Значение $T_ш$ определяется уравнением Найквиста

$$\delta T_ш = \frac{U_ш}{K_u} \cdot \frac{f_1}{f_p} = \frac{\sqrt{4\kappa\theta\delta f r}}{K_u} \cdot \frac{f_1}{f_p},$$

где $\kappa = 1.38 \cdot 10^{-23}$ дж/град, постоянная Больцмана;

θ-абсолютная температура;

$\delta f \approx 1/\tau$ - полоса частот, к которой принадлежит тепловой шум;

r - входное сопротивление схемы совпадения;

τ - средняя длительность импульсов на выходе схем совпадения.

Если крутизна фронта импульса совпадения K_u известна, то неопределенность момента пересечения этого фронта уровнем срабатывания схемы совпадения за счет термодинамического шума $\delta t_ш = U_ш/K_u$. На огибающей пакета совпадений подобная неопределенность пропорциональна f_1/f_P, т.е.

$$\delta T_ш = \frac{U_ш}{Ku} \cdot \frac{f_1}{f_P}.$$

Считая рассматриваемые шумовые отклонения некоррелированными в начале и конце пакета, выразим $\delta T_ш$ в виде числа импульсов стартового канала

$$\delta N_ш = \sqrt{2} \cdot \delta T_ш \cdot f_1 = \frac{2\sqrt{\kappa\theta\delta f r}}{K_u} \cdot \frac{f^2{}_1}{f_p}. \qquad (4)$$

Считая, что $f_1 \approx f_2$, для стопового канала расчёт числа импульсов пакета за счёт шумовых явлений аналогичен.

Для анализа инструментальной погрешности из-за нестабильности частоты рассмотрим влияние кратковременной нестабильности ГУВ на результат преобразования.

Результат преобразования t_1 и t_2, вычисленный по формуле (1), содержит погрешности от нестабильностей частот f_0, f_1, f_2. Протяженность пакета в стартовом канале $T_{n1}=N_{n1}\cdot T_1$, в стоповом - $T_{n2}=N_{n2}\cdot T_2$.

Погрешность величины T_n от нестабильности частоты ГУВ, равной α, равна $\delta T_n=T_n\cdot\alpha$. Здесь нестабильность α является суммарной нестабильностью частот f_0 и f_1 (или f_2 *и* f_0) в стартовом (стоповом) каналах,

$$\alpha=\sqrt{\alpha_1{}^2+\alpha_0{}^2}\ .$$

Так как нестабильность ГУВ выше, нежели нестабильность ГОЧ, то α можно оценивать по значению нестабильности ГУВ1(ГУВ2). Пусть нестабильности ГУВ1 и ГУВ2 равны, т.е. $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$, частоты $f_0\approx f_1\approx f_2=f$. Пакет импульсов совпадения изменится за счёт суммарной кратковременной нестабильности $\alpha_\Sigma=\sqrt{2}\alpha$ частот f_0, f_1 и f_2 на величину интервала времени

$$\delta T_n=T_n\cdot\alpha_\Sigma\ . \tag{5}$$

Количество импульсов в пакете при этом будет изменяться на величину

$$\delta N_\alpha=\frac{\delta T_n}{T_1}=\alpha_\Sigma\cdot\frac{T_n}{T_1}\ . \tag{6}$$

Количество периодов частоты f_1 за промежуток времени, равный периоду разностной частоты, равен

$$N_p=T_p\cdot f_1 \tag{7}$$

Нестабильность периодов импульсов генераторов равна $\delta T_\alpha=\alpha_\Sigma/f$, и это приводит к деформации временного отрезка между импульсами, участвующими в процессе совпадения. На отрезке времени, равном периоду разностной частоты T_p, погрешность преобразования, обусловленная нестабильностью частот, может быть найдена из выражения

$$\delta t_\alpha=N_p\cdot\delta T_\alpha=\frac{\alpha_\Sigma}{f_p}\ .$$

Количество импульсов в пакете изменится на величину

$$\delta N_\alpha=\frac{\delta t_\alpha}{\delta t}=\frac{\alpha_\Sigma\cdot f^2}{f_p{}^2}\ . \tag{8}$$

Подставляя в полученное выражение значения соответствующих величин, можно определить количество импульсов, на которое пакет импульсов совпадения может удлинится (уменьшится) из-за влияния нестабильностей частот генераторов.

Суммарная погрешность величин t_1,(t_2), выраженная в изменении числа импульсов пакета, запишется в виде

$$\delta N=\sqrt{(\delta N_M)^2+(\delta N_Ш)^2+(\delta N_\alpha)^2}\ . \tag{9}$$

Конечно, в процессе преобразования количество импульсов в пакетах совпадений от реализации к реализации может быть неодинаковым. Следовательно, погрешности величин t_1 и t_2, выраженные через погрешности кодов δN, могут быть определены следующим образом:

$$\delta t_1=\left(\frac{n_{10}+\sqrt{2}\cdot\delta N}{N_{p1}+\delta N}-\frac{n_{10}}{N_{p1}}\right)T_0\ ,$$

$$\delta t_2=\left(\frac{n_{02}+\sqrt{2}\cdot\delta N}{N_{p2}+\delta N}-\frac{n_{02}}{N_{p2}}\right)T_0\ . \qquad (10)$$

Полагая в среднем $n_{10}\approx 0,5\cdot N_{p1}$ и $n_{02}\approx 0,5\cdot N_{p2}$ и имея в виду, что $\delta N<<N_p$, после несложных преобразований выражений (10) получим:

$$\delta t_1=T_0\cdot\frac{\left(0,5\cdot N_{p1}+\sqrt{2}\cdot\delta N\right)\cdot N_{p1}-0,5\cdot N_{p1}\left(N_{p1}+\delta N\right)}{\left(N_{p1}+\delta N\right)N_{p1}}\cong\frac{\delta N}{N_{p1}}\cdot T_0, \qquad (11)$$

$$\delta t_2\approx\frac{\delta N}{N_{p2}}\cdot T_0. \qquad (12)$$

Импульсы в процессе образования пакета перекрываются с шагом δt_{10} и δt_{02}. При равенстве длительностей импульсов последовательностей частоты f_0, f_1 и f_2, $\delta t_{10}=\delta t_{02}=\delta t$ длины пакетов в стартовом и стоповом каналах будут примерно одинаковы, то есть $N_n=\dfrac{2\tau}{\delta t}$.

Таблица 1

$\delta t_{10}, \delta t_{02}$, с	δf, Гц	f_0, Гц	δT_n, с	N_p	$\delta N_ш$	δN_α	δN	$\delta t_1, \delta t_2$, с
10^{-11}	10^8	10^6	$2\cdot10^{-8}$	10^5	$2\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-2}$	~1	10^{-11}
10^{-13}	10^8	10^7	$2\cdot10^{-7}$	10^6	2,57	2	3,4	$3,4\cdot10^{-13}$
10^{-14}	10^8	10^7	$2\cdot10^{-6}$	10^7	25,7	20	32,5	$0,3\cdot10^{-14}$
10^{-11}	10^9	10^6	$2\cdot10^{-9}$	10^5	$0,75\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-3}$	1	10^{-11}
10^{-13}	10^9	10^7	$2\cdot10^{-8}$	10^6	0,75	0,2	1,26	$1,2\cdot10^{-13}$
10^{-14}	10^9	10^7	$2\cdot10^{-9}$	10^7	7,5	$2\cdot10^{-2}$	7,5	$7,5\cdot10^{-14}$

В табл. 1 приведены результаты вычислений погрешностей δt_1 и δt_2 величин t_1 и t_2 соответственно для различных значений полосы частот δf при $r=50$ *Ом*, $K_u=10^8$ *В/с*, $\alpha=10^{-5}$, $\Theta=300K$. Анализ таблицы 1 позволяет подтвердить вывод о том, что погрешности квантования измеряемой величины t_x имеют порядок величины не больший, чем значения разностно-периодных квантов δt_{10}, δt_{02}.

Список литературы: 1. *Обнаружение движущихся объектов* / П.А. Бакут, Ю.В. Жулина, Н.А. Иванчук; Под ред. П.А. Бакута. М.: Сов. радио, 1980. 288с. 2. А.с. 1550472 СССР, МКИ G 04 F 10/04. Измеритель коротких временных интервалов / О.И.Кадацкая, В.Е.Тырса (СССР) // Открытия. Изобретения. 1999. №10. С.15.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 30.01.2002