

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 681.3

С. А. Смагин**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО
НОНИУСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ «ВРЕМЯ–КОД»
С ОПЕРАТИВНОЙ КАЛИБРОВКОЙ****S. A. Smagin****MODELING OF MULTICHANNEL VERNIER METER
«TIME CODE» WORK WITH OPERATIONAL CALIBRATION**

А н н о т а ц и я. Описана модель многоканального нониусного измерителя (МНИ) временных интервалов «время–код» с оперативной калибровкой, учитывающая особенности работы узлов измерителя, которые приводят к снижению точности результатов измерений. Предложен метод компенсации инструментальной погрешности МНИ с использованием алгоритма сингулярно-спектрального анализа «Гусеница».

A b s t r a c t. A model of multichannel Vernier meter of «time code» time intervals with the operational calibration is described in this article. The model takes into account features of working nodes of the meter that decreases accuracy of measurement results. It is proposed the method of compensation instrumental error using the algorithm of the singularspectralanalysis «Caterpillar»

К л ю ч е в ы е с л о в а: «Гусеница», многоканальный нониусный измеритель, джиттер, инструментальная погрешность.

K e y w o r d s: caterpillar, multi Vernier meter, jitter, instrumentaleerror.

Одной из причин возникновения ошибок в системах цифровой передачи данных являются временные искажения (джиттер) передаваемого сигнала, которые заключаются в смещении (сдвиге) временного положения сигнала относительно середины окна детектирования. Причиной таких искажений являются интерференционные искажения и шумы [1].

Для контроля джиттера цифровых систем передачи могут быть использованы скоростные многоканальные нониусные измерители временных интервалов [2, 3], основными достоинствами которых являются высокая точность и быстродействие при низкой стоимости. Однако собственные нестабильности нониусных и опорных генераторов могут существенно исказить результат измерений. Для компенсации инструментальной ошибки было предложено использовать калибровочный тракт [4]. Как было показано в работе [5], собственный джиттер измерителя имеет сложную структуру и состоит из квазидетерминированной и чисто случайной компонент. Для повышения точности измерителя необходимо выделить из калибровочного сигнала квазидетерминированную компоненту и выполнить корректировку полезного сигнала на квазидетерминированную компоненту.

Рассмотрим организацию калибровочных измерений для преобразователя с двумя нониусными каналами преобразования (НКП). Упрощенная схема такого устройства представлена на рис. 1.

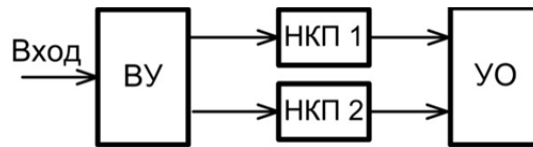


Рис. 1. Структура традиционного нониусного АЦП ВИ для измерения одиночных временных интервалов

В этом преобразователе калибровочные и рабочие преобразования разделяются во времени. Порядок выполнения рабочих и калибровочных преобразований для случая измерения последовательности смежных временных интервалов (ВИ) приведено на рис. 2.

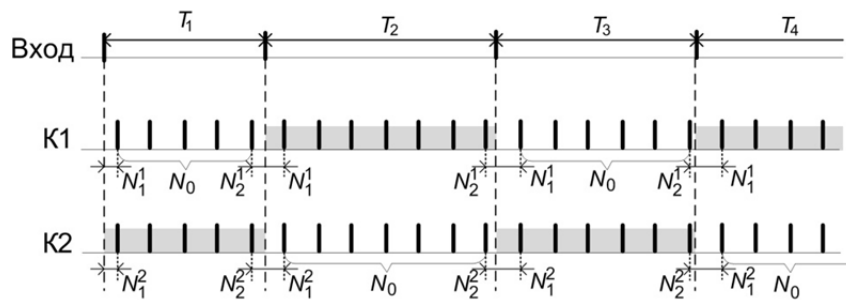


Рис. 2. Совмещение калибровки и рабочего преобразования

Первый импульс, задающий начальную границу измеряемого ВИ T_1 , запускает первый (K1) и второй (K2) каналы преобразования, при этом результат работы канала K1 используется для рабочего преобразования, а K2 – для калибровочного. Второй импульс, отмечающий конечную границу T_1 , одновременно запускает канал K2 на измерение, а K1 – на калибровку. На рис. 2 калибровка успевает завершиться до прихода в канал очередного импульса, что справедливо при минимальном значении мгновенного периода $\min(T_i) > T_{ng} * K$, где T_{ng} – период нониусного генератора; K – коэффициент интерполяции.

В результате работы измерителя будут получены два массива данных:

- 1) массив полезных измерений;
- 2) массив калибровочных измерений.

Рассмотрим модель работы нониусного генератора в пакете MathCAD [6].

Пусть нестабильности параметров каналов нониусного измерителя описываются следующими параметрами:

Канал 1. Пусть периодическая нестабильность периода нониусного генератора: $\gamma_{nn1_i} = 0,001 \cos\left(\frac{2\pi i}{100}\right)$, а случайная задержка запуска нониусного генератора: $\delta H_{1_i} = rnorm(kol + 1, 0.1, 0.051)$. Тогда мгновенный период может быть представлен как $T_{ng1_i} = T_{ng_i}(1 - \gamma_{nn1_i})$

Канал 2. Пусть нестабильность периода нониусного генератора содержит как гармоническую составляющую, так и линейный тренд – $\gamma_{nn2_i} = 0.0025 * \cos\left(\frac{2\pi i}{150} + 0.0001\right) - \frac{0,02 * i}{1000}$. Случайная задержка запуска канала: $\delta H_{2_i} = rnorm(kol + 1, 0.16, 0.001)$.

Период работы второго канала $T_{ng2_i} = T_{ng_i}(1 - \gamma_{nn2_i})$.

Форма мгновенного периода нониусных генераторов представлена на рис. 3.

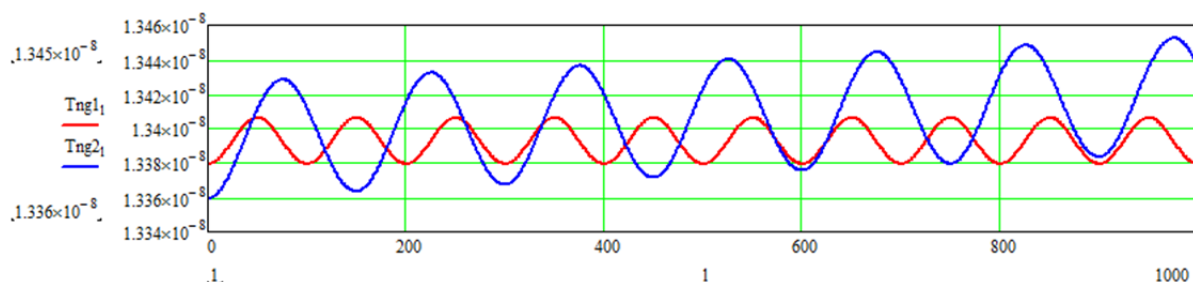


Рис. 3. Периоды работы каналов нониусного измерителя

На вход НИ подается импульсная последовательность, мгновенный периода промодулирован двумя гармоническими составляющими, как показано на рис. 4:

$$Tvh_i = Tnom(1 - \gamma nh_i - \gamma hv_i),$$

где

$$Tnom = 1,1 \cdot 10^{-6}; \quad \gamma vh = \gamma hv + \gamma vhn; \quad \gamma vhn_i = Avhn \cdot \sin(2i\pi 0,1); \quad \gamma hv_i = Avhn \cdot \sin(2i\pi 0,01).$$

График входного сигнала представлен на рис. 4.

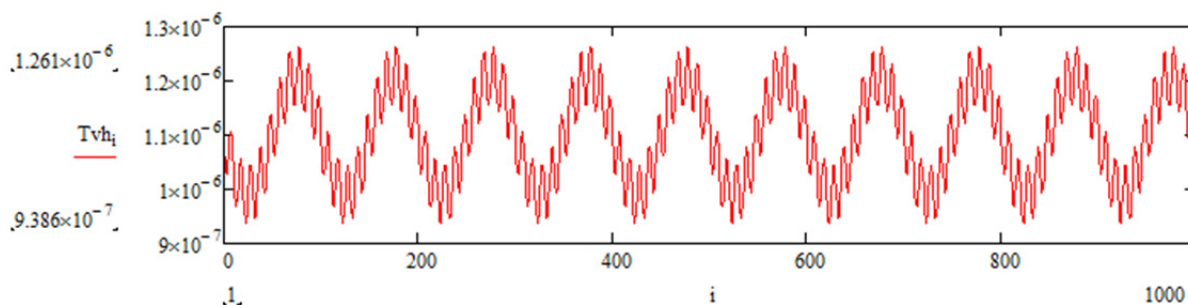


Рис. 4. График входного сигнала

Работа НИ в режиме рабочего измерения реализована в виде процедуры kanal в среде MathCAD (рис. 5). На вход данной процедуры подаются исходный сигнал и параметры, определяющие работу канала.

```

kanal(N0, φ, δH1, kol, γn, γo) :=
  for i ∈ 1..kol - 1
    φri ← φi + δH1i · (1 - γoi) - floor[φi + δH1i · (1 - γoi)]
  for i ∈ 1..kol - 1
    N0i ← N0i + floor(φi + δH1i)
    N0i ← N0i - floor(φi-1 + δH1i-1)
    N1i ← ceil[ (1 - φri-1) / ( (K+1)/K · (1 + γni) · (1 - γoi) - 1 ) ]
    N2i ← floor[ φri / ( (K+1)/K · (1 + γni) · (1 - γoi) - 1 ) ]
  for i ∈ 1..kol - 1
    Mi,0 ← N0i
    Mi,1 ← N1i
    Mi,2 ← N2i
  M
  
```

Рис. 5. Код процедуры kanal

На выходе процедуры kanal мы получаем три массива данных:

- 1) набор кодов N0;
- 2) набор кодов N1 – число тактов работы нониусного измерителя в канале n от момента прихода информационного импульса до начала следующего такта опорного генератора;

3) набор кодов $N2$ – число тактов работы нониусного измерителя в канале n от момента завершения такта ОГ до завершения импульса входного сигнала.

Формирование калибровочного сигнала выполняется по процедуре $N0_kalibr$, представленной на рис. 6.

```

 $N0\_kalibr(\phi, \delta H_1, \delta H_2, kol, \gamma o, N0) :=$ 
   $flag \leftarrow 0$ 
  for  $i \in 1..kol - 1$ 
     $\phi 1_i \leftarrow \phi_i + \delta H_{1_i} \cdot (1 - \gamma o_i) - floor[\phi_i + \delta H_{1_i} \cdot (1 - \gamma o_i)]$ 
     $\phi 11_i \leftarrow \phi_i + \delta H_{2_i} \cdot (1 - \gamma o_i) - floor[\phi_i + \delta H_{2_i} \cdot (1 - \gamma o_i)]$ 
  for  $i \in 1..kol - 1$ 
     $N0_{-i} \leftarrow floor[\phi_{i-1} + \delta H_{2_{i-1}} \cdot (1 - \gamma o_{i-1})] - floor[\phi_{i-1} + \delta H_{1_{i-1}} \cdot (1 - \gamma o_{i-1})]$ 
     $N_i \leftarrow N0_i - floor(\phi_{i-1} + \delta H_{1_{i-1}}) + floor(\phi_i + \delta H_{2_i})$  if  $flag = 0$ 
     $N_i \leftarrow N0_i - floor(\phi_{i-1} + \delta H_{2_{i-1}}) + floor(\phi_i + \delta H_{1_i})$  if  $flag = 1$ 
     $flag \leftarrow flag \oplus 1$ 
  for  $i \in 1..kol - 1$ 
     $M_{i,0} \leftarrow N0_{-i}$ 
     $M_{i,1} \leftarrow N_i$ 
  M

```

$N := N0_kalibr(\phi, \delta H_1, \delta H_2, kol, \gamma o, N0)$

$N0_{k_m} := N_{m,0} \quad N1_{k_m} := a1_{m,1} \quad N2_{k_m} := a2_{m,1}$

$L_{k_m} := K \cdot N0_{k_m} + N1_{k_m} - N2_{k_m}$

Рис. 6. Формирование калибровочного сигнала

В результате работы нониусного измерителя в режиме калибровки формируется калибровочный сигнал Lk_i , который содержит информацию о внутреннем джиттере измерителя (рис. 7). Как видно из рисунка, калибровочный сигнал носит случайный характер.

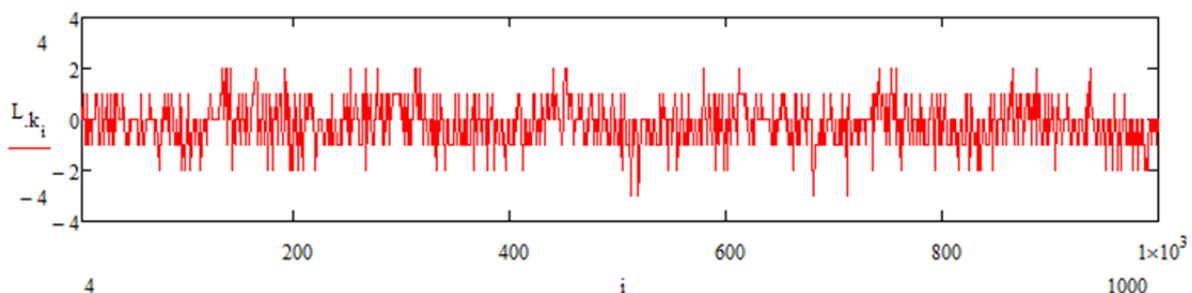


Рис. 7. Калибровочные измерения

Для выделения квазидетерминированной составляющей инструментальной погрешности используется алгоритм сингулярно-спектрального анализа «Гусеница». Суть метода «Гусеница» состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры (отсюда и название «Гусеница»), исследовании полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения) и восстановлении (аппроксимации) ряда по выбранным главным компонентам [7, 8].

Таким образом, результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты.

Полученное разложение служит основой прогнозирования как самого ряда, так и его отдельных составляющих.

На рис. 8 показаны существенные компоненты, на основании которых выполняется восстановление квазидетерминированной компоненты джиттера. Komp0 – медленноменяющийся тренд; komp1 , komp2 – периодические компоненты; Gus – итоговая квазидетерминированная компонента.

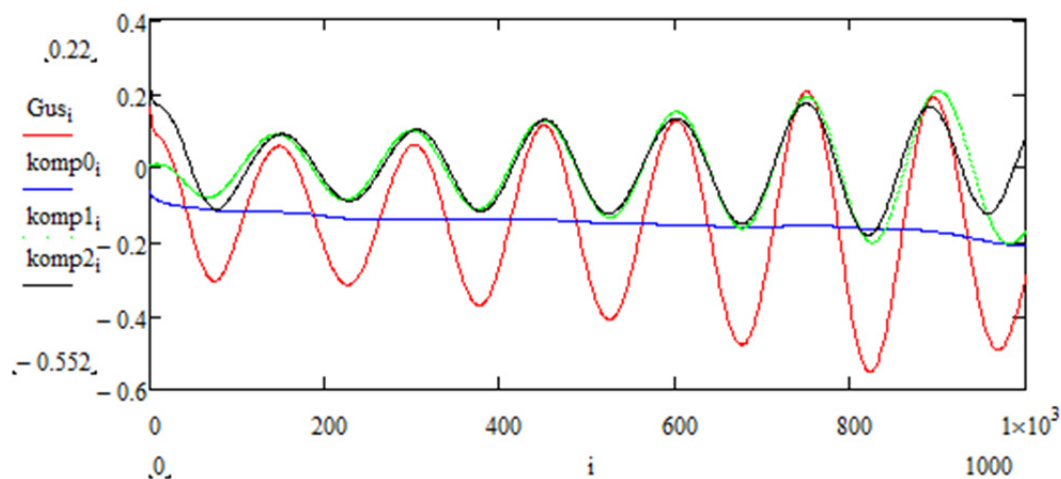


Рис. 8. Калибровочные измерения

На рис. 9 представлен график ошибки работы НИ. Под ошибкой понимается отклонение измеренного сигнала от исходного.

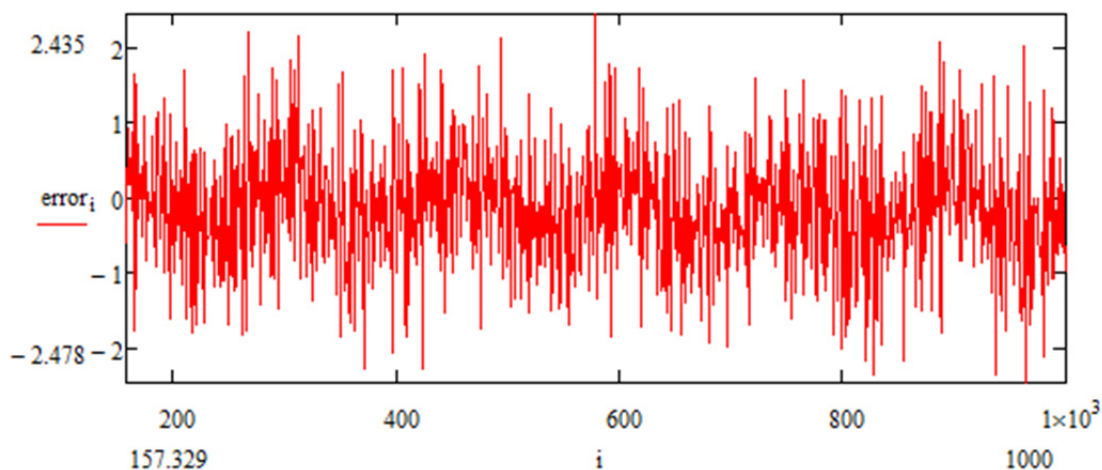


Рис. 9. График ошибки работы НИ

Данная ошибка описывается следующими параметрами: мат. ожидание – $-0,142$, дисперсия – $0,883$. Выполнив корректировку ошибки на квазидетерминированную компоненту, мы получим: мат. ожидание – $0,02$, дисперсия – $0,862$. Оценить эффект от «Гусеницы» можно, построив спектр ошибки (см. рис. 9). Как мы видим из рис. 10, «Гусеница» выделила и подавила низкочастотную компоненту, не изменив при этом оставшуюся часть сигнала.

Данный результат получен при длине окна «Гусеницы» $L = 512$. Изменяя длину «Гусеницы», можно подбирать точность выделения квазидетерминированной компоненты исходя из требований, предъявляемых к точности.

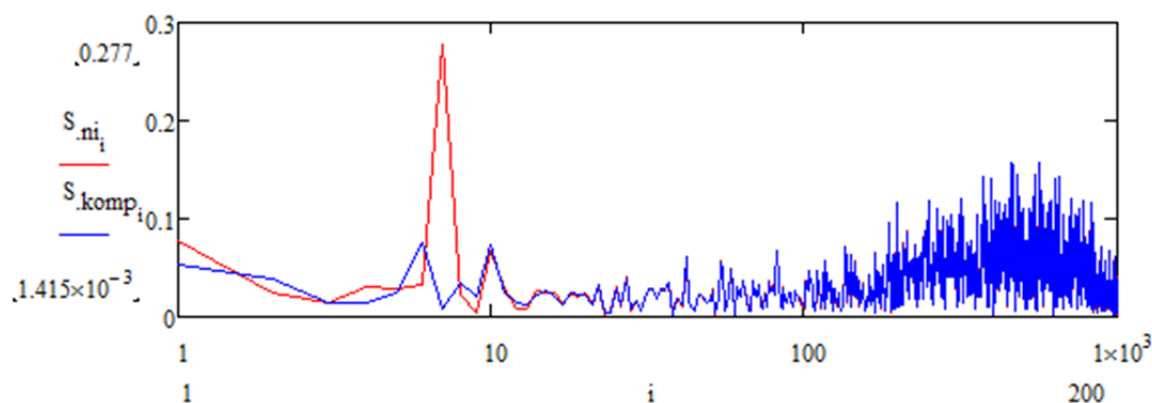


Рис. 10. Спектр общей погрешности до (1) и после компенсации (2)

В результате обработки данных с помощью «Гусеницы», мы выделили квазидетерминированную компоненту джиттера. Для выделения нам потребовалось минимальное количество исходных. «Гусеница», обладая адаптивными свойствами в отличие от ФАПЧ не требует перенастройки после изменения параметров ошибки и сигнала.

Список литературы

1. Бакланов, И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998. – 140 с.
2. Гурин, Е. И. Построение скоростных высокоточных преобразователей временных параметров серий импульсных последовательностей / Е. И. Гурин, Н. Н. Коннов // Автоматрия. – 1997. – № 6. – С. 102.
3. Нониусный измеритель временных интервалов на ПЛИС / Е. И. Гурин, Л. Е. Дятлов, Н. Н. Коннов, К. В. Попов, А. В. Севастьянов // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 4. – С. 44–48.
4. Пат. на изобретение 2255366 Российская Федерация. Устройство для измерения серий временных интервалов / Гурин Е. И., Дятлов Л. Е., Коннов Н. Н., Севастьянов А. В. – 02.02.2004.
5. Смагин, С. А. О применении метода «Гусеница» для выделения квазидетерминированной компоненты джиттера в каналах связи / С. А. Смагин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 37–46.
6. Диаконов, В. MathCAD 11/12/13 в математике : справочник / В. Диаконов. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2007. – 500 с.
7. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница» – SSA: анализ временных рядов : учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.
8. Коннов, Н. Н. Применение алгоритма «Гусеница» для коррекции инструментальной погрешности нониусных измерителей временных интервалов / Н. Н. Коннов, С. А. Смагин // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 1. – С. 284–288

Смагин Сергей Александрович

ведущий специалист,
департамент по внедрению BPM систем
(г. Москва)
E-mail: semasmagin@gmail.com

Smagin Sergey Aleksandrovich

leading specialist,
department of business performance
management systems (Moscow)

УДК 681.3

Смагин, С. А.

Моделирование работы многоканального нониусного измерителя «время – код» с оперативной калибровкой / С. А. Смагин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 52–57.