

## Рекурсивная фильтрация данных в системе синхронизации приемника-компаратора сигналов ГЛОНАСС/GPS

В.В. Акулов, А.И. Пихтелев

Нижегородское научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе  
603951, Российская Федерация, г. Нижний Новгород  
пр. Гагарина, 174

Проведен анализ работы системы синхронизации приемника-компаратора сигналов ГЛОНАСС/GPS с рекурсивной фильтрацией данных о расхождении эталонной и формируемой шкалы времени.

*Ключевые слова:* приемник-компаратор, система синхронизации, сигналы ГЛОНАСС/GPS, рекурсивная фильтрация.

### Введение

Приемники-компараторы сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS используются для измерения относительной погрешности по частоте и синхронизации частоты и шкалы времени (ШВ) удаленных высокоточных стандартов частоты и времени (СЧВ).

Система синхронизации (СС) приемника-компаратора определяет его точностные характеристики в основных режимах работы: синхронизация частоты и ШВ внутреннего опорного генератора (ОГ) с частотой и ШВ Госэталона (УТС) по сигналам СРНС; определение относительной погрешности по частоте высокостабильного ОГ.

### 1. Постановка задачи

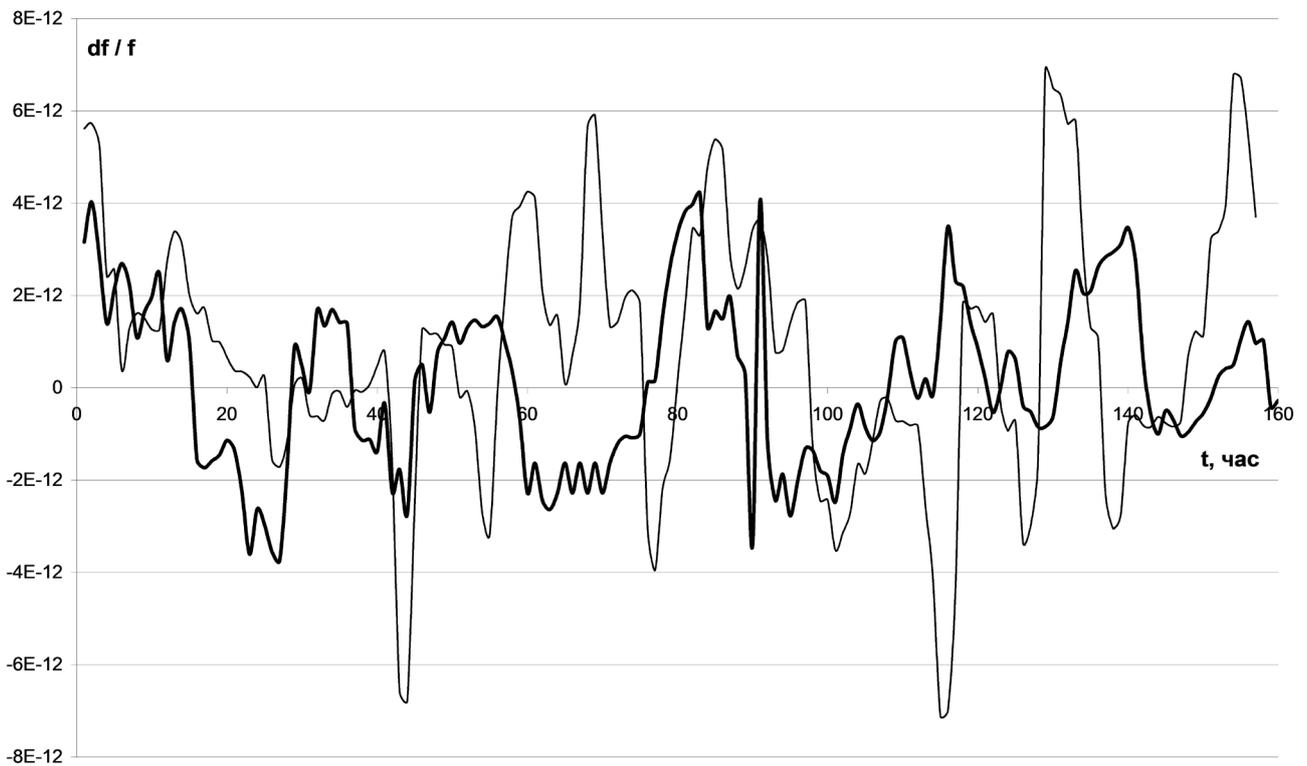
В основе принципа действия прибора лежит фазово-временной метод (ФВМ) определения относительной погрешности по частоте внутреннего или внешнего высокостабильного ОГ – измерение приращения (набега) разности фаз во временной области сигналов местной ШВ, формируемой из частоты встроенного или внешнего ОГ, и сигналов эталонных меток времени 1 Гц, формируемых по результатам приема и обработки сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, и автоматической синхронизации по данным сравнения частоты и ШВ местного (встроенного рубидиевого или внешнего) генератора по эталонному сигналу.

Данные об отстройке частоты, полученные ФВМ за интервалы времени между коррекциями частоты, являются исходными для СС частоты подстраиваемого ОГ, а также служат для расчета величины временной коррекции ШВ приемника-компаратора по тому или иному алгоритму работы.

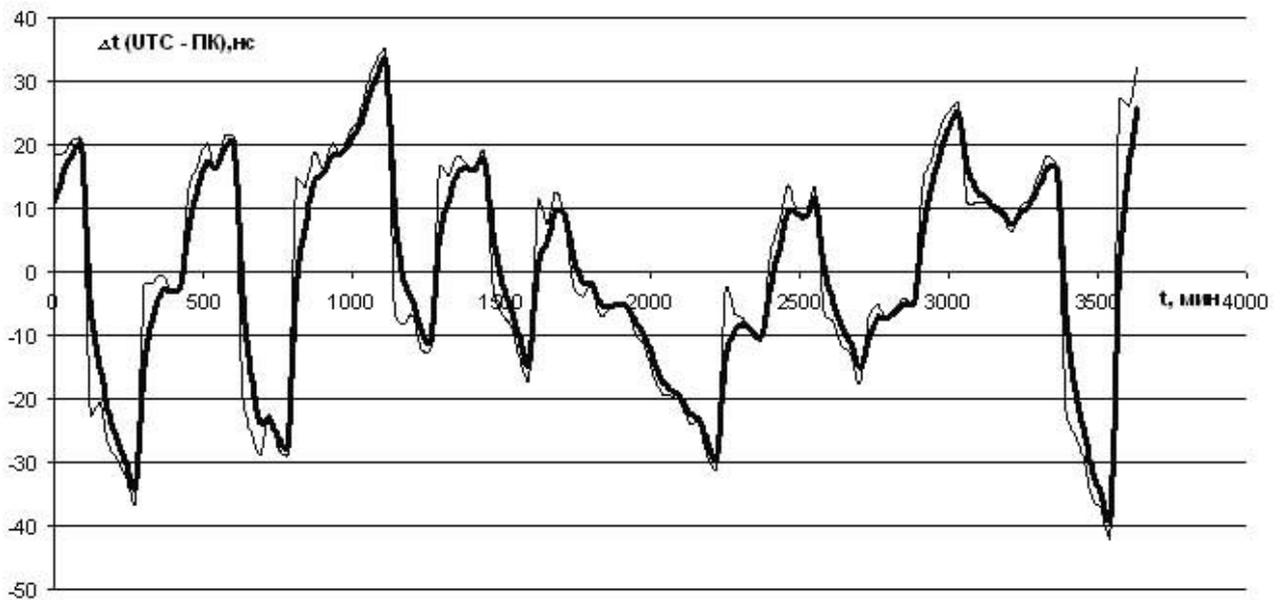
В [1; 2] были рассмотрены различные алгоритмы работы СС приемника-компаратора. В разработанной АО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» имени А.П. Горшкова» модификации приемника-компаратора ЧК7-56 реализован алгоритм, по которому величина очередной временной коррекции основной ШВ приемника-компаратора за время измерения  $T_{изм.}$  определяется с учетом тренда измеряемого в приборе расхождения между формируемой ШВ приемника-компаратора и ШВ СРНС.

На практике выдаваемая ЧК7-56 ШВ после обработки, хотя и укладывается в гарантируемые пределы отклонения от ШВ УТС  $\pm 50$  нс, но имеет достаточно большие сдвиги, обусловленные прежде всего как сдвигами ШВ с радионавигационного измерительного (РНИИ) модуля за счет, например, смены видимой группировки навигационных космических аппаратов, так и сдвигами самой системной ШВ СРНС.

Целью данной работы является исследование возможности рекурсивной фильтрации экспериментальных данных о расхождении эталонной ШВ и ШВ приемника-компаратора, вывод и анализ выражений для оценки ее эффективности по СКО в зависимости от выбираемого параметра рекурсивного фильтра.



**Рис. 1.** График зависимости текущих данных о расхождении эталонной ШВ, приведенной к ШВ UTC(SU), и ШВ приемника-компаратора в относительных отстройках по частоте, измеренных за 1 ч, без использования алгоритма рекурсивной фильтрации (тонкая линия) и с использованием алгоритма рекурсивной фильтрации (толстая линия) при  $СКО_x = 2,76 \cdot 10^{-12}$ ;  $k = 0,3$ ;  $СКО_y = 1,82 \cdot 10^{-12}$ ;  $СКО_{y_{теор}} = 1,84 \cdot 10^{-12}$



**Рис. 2.** График зависимости исходных (тонкая линия) и рекурсивно-усредненных (толстая линия) текущих данных о расхождении эталонной ШВ, приведенной к ШВ UTC(SU), и ШВ приемника-компаратора при  $СКО_x = 18,4$  нс;  $k = 0,4$ ;  $СКО_y = 16$  нс;  $СКО_{y_{теор}} = 11$  нс

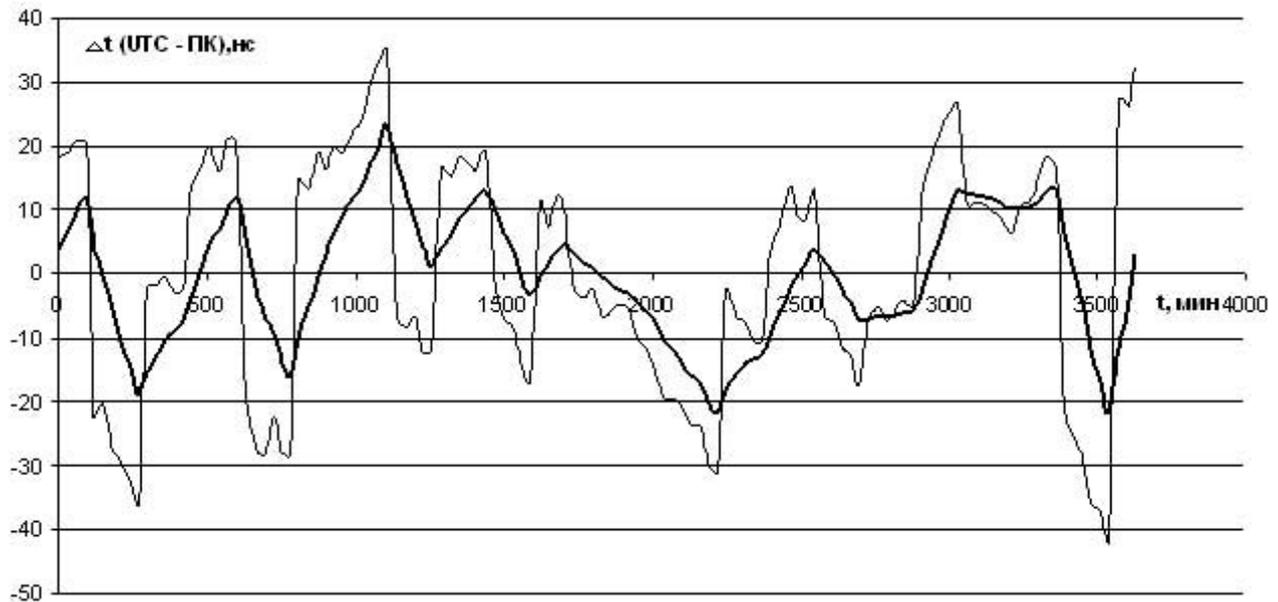


Рис. 3. График зависимости исходных (тонкая линия) и рекурсивно-усредненных (толстая линия) текущих данных о расхождении эталонной ШВ, приведенной к ШВ UTC(SU), и ШВ приемника-компаратора при  $\text{СКО}_x = 18,4$  нс;  $k = 0,8$ ;  $\text{СКО}_y = 10$  нс

## 2. Анализ алгоритма и оценка погрешности синхронизации

Фильтрация экспериментальных данных осуществлялась по рекурсивному выражению:

$$y_n = k y_{n-1} + (1 - k) x_n, \quad (1)$$

где  $y_n$  — усредненное значение текущих данных о расхождении эталонной ШВ и ШВ приемника-компаратора;  $x_n$  — текущее значение данных о расхождении эталонной ШВ и ШВ приемника-компаратора;  $k$  — параметр рекурсивного фильтра,  $0 \leq k < 1$ .

Известно [3], что такой фильтр эквивалентен РС-фильтру с коэффициентом передачи

$$k = e^{-\frac{T}{\tau}}, \quad (2)$$

где  $T$  — период дискретизации, с;  $\tau$  — постоянная фильтра, с.

Из (2) следует, что

$$\tau = -\frac{T}{\ln k}. \quad (3)$$

Предполагая, что каждое значение  $y_n$  при большом значении  $n$  и малых значениях  $k$  является почти независимым от предыдущего значения  $y_{n-1}$ , а в большей степени зависит от значения  $x_n$ , которое, в свою очередь, является независимым от значения  $x_{n-1}$ , что определяется взаимонезависимостью положений метки времени с РНПИ модуля сигналов СРНС в каждую секунду, и применяя оператор вычисления дисперсии к выражению (1) получим:

$$\sigma_{y_n}^2 + k^2 \sigma_{y_{n-1}}^2 = (1 - k)^2 \sigma_{x_n}^2, \quad (4)$$

где  $\sigma_{y_n} = \text{СКО}_{y_n}$ ;  $\sigma_{x_n} = \text{СКО}_{x_n}$ .

Считая далее, что при больших значениях  $n$   $\sigma_{y_n} = \sigma_{y_{n-1}} = \sigma_y$ , а  $\sigma_{x_n} = \sigma_x$ , из (4) следует:

$$\sigma_y^2 = \frac{(1 - k)^2}{1 + k^2} \sigma_x^2. \quad (5)$$

Очевидно, что выражением (5) можно пользоваться только при малых значениях  $k$ , так как при больших  $k$  существенное значение имеет взаимозависимость случайных величин в формуле (1), что приводит к необходимости вычисления ковариаций указанных величин. Последнее на практике не всегда возможно, так как требует знания совместных распределений вероятностей.

После обработки экспериментальных данных по выражению (1), изменяя параметр  $k$  по минимуму СКО обработанных данных, можно выбрать его наиболее приемлемое значение, а из выражений (2) и (3) — оптимальное соотношение  $T$  и  $\tau$ .

## 3. Результаты обработки экспериментальных данных

На рис. 1–4 представлены результаты обработки экспериментальных данных при различных значениях  $k$  и соответствующих значениях СКО.

Как видно из графиков, вычисленные значения СКО уменьшаются с возрастанием  $k$  ( $k \leq 1$ ,

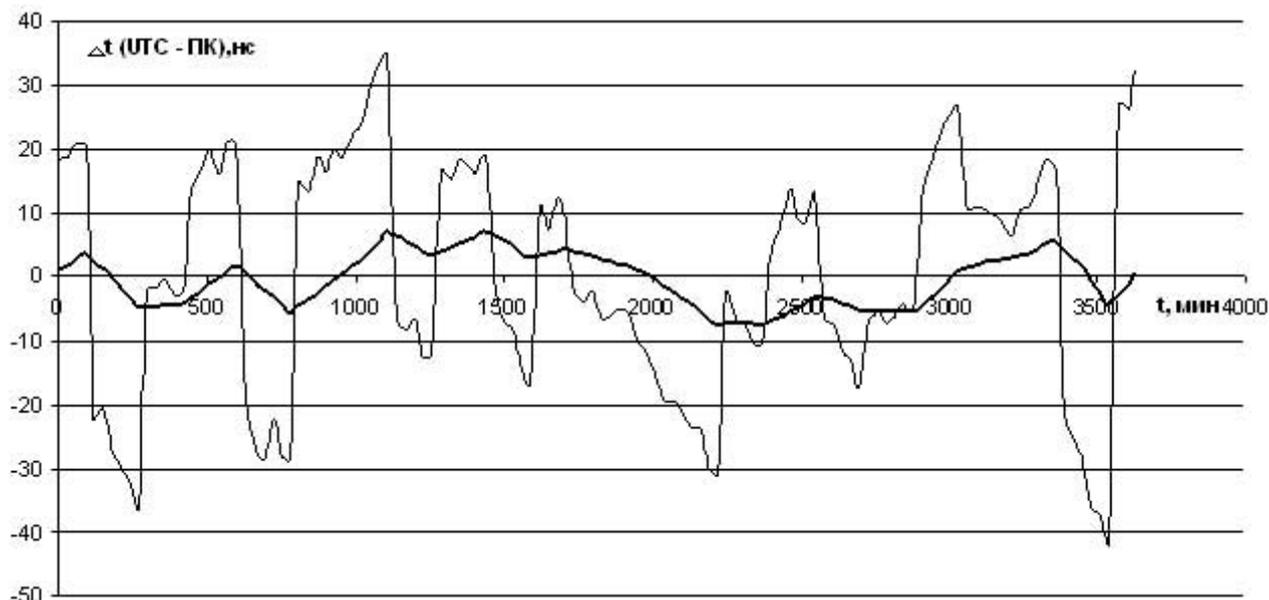


Рис. 4. График зависимости исходных (тонкая линия) и рекурсивно-усредненных (толстая линия) текущих данных о расхождении эталонной ШВ, приведенной к ШВ UTC(SU), и ШВ приемника-компаратора при  $СКО_x = 18,4$  нс;  $k = 0,95$ ;  $СКО_y = 4,1$  нс

рис. 3), но при этом из практических соображений, согласно (2),  $\tau$  не должно быть очень большим, а должно составлять 1–3 суток.

Результаты работы позволяют не только на практике использовать полученные после обработки усредненные экспериментальные данные, как более точные, для оценки качества изготавливаемых приемников-компараторов, но позволяют улучшить параметры выдаваемой приемником-компаратором ШВ, если использовать указанный рекурсивный алгоритм в системе синхронизации приемника-компаратора при выдаче данных на коррекцию ШВ и частоты.

### Заключение

Проведен анализ работы алгоритма синхронизации ШВ разработанного в АО «ФНПЦ «НИИ-ПИ «Кварц» имени А.П. Горшкова» приемника-компаратора сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS с эталонной ШВ, приведенной к ШВ UTC(SU) с

использованием рекурсивной фильтрации данных об их расхождении. Получена оценка погрешности синхронизации ШВ с учетом рекурсивного усреднения. Получены соответствующие реализации значения СКО и даны рекомендации по оптимальному выбору параметров указанного алгоритма.

### Список литературы

1. Приемник-компаратор сигналов ГЛОНАСС/GPS для автоматизированных систем поверки высокостабильных генераторов / В.В. Акулов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005. Т. 3. № 6. С. 21–26.
2. Алгоритмическое обеспечение системы синхронизации шкалы времени приемника-компаратора сигналов ГЛОНАСС/GPS / В.В. Акулов [и др.] // Труды XIII Международной научно-технической конференции RLNC-2007. Воронеж, 2007. Т. 3. С. 1904–1909.
3. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов // Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Мир, 1974.

## The recurrent filtering of dates in a synchronization system of the receiver-comparator of GLONASS/GPS signals

V.V. Akulov, A.I. Pikhtev

The analysis of the working of the synchronization system of the receiver-comparator of GLONASS/GPS signals with recurrent filtering of dates about a divergence of a reference and forming time scales was taken.

*Keywords:* receiver-comparator, synchronization system, GLONASS/GPS signals, recurrent filtering.