

УДК 621.396.96

Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.Ю. Приймак, Б.А. Ал-Твежри

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЛИЧЕНИЯХ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрено современное состояние сличения эталонов времени и частоты радиотехническими методами. Описаны основные методы сличения (радиометеорный и спутниковые) и проведен анализ их алгоритмов. Приведены соотношения для оценки сдвига шкал эталонов и погрешностей основных алгоритмов. Дана классификация и предложены способы оценивания неопределенности измерений как для алгоритмов, так и для основных методов сличения эталонов.

Ключевые слова: сличение эталонов времени и частоты, методы и алгоритмы измерений сдвига шкал, погрешности и неопределенность.

Введение и постановка задачи

Сличение территориально разнесенных эталонов времени и частоты необходимо для решения актуальные научно-технических и оборонных задач метрологии времени и частоты, координатно-временного обеспечения, радиоастрономии, радиолокации, радиопеленгации, цифровой синхронной связи. Успешное решение таких задач определяются как стабильностью эталонов, так и точностью их сличения. Высокие темпы совершенствования эталонов (относительная нестабильность современных эталонов составляет $10^{-13} \dots 10^{-14}$, а в перспективе – $10^{-15} \dots 10^{-16}$) определяют актуальность задачи повышения точности их сличения [1].

Помимо прямого метода (перевозимые квантовые часы – ПКЧ), наибольшую точность сличения обеспечивают радиотехнические методы с использованием различных частотных диапазонов. С 70-х годов прошлого века и до 2000 г. преимущественно использовался радиометеорный метод сличения (РМС) [2], а в настоящее время – метод, основанный на использовании спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС [3, 4]. Используется также ретрансляция сигналов через геостационарные спутники (ГС) [5], и в ХНУРЭ разрабатывается новый метод с применением сигналов, излучаемых ГС [6].

Основным критерием качества сличения является точность оценивания сдвига шкал $\widehat{\Delta T}^{ab} = -\widehat{\Delta T}^{ba}$ эталонов, размещенных в пунктах «а» и «б».

Сопоставление методов сличения по точности возможно только при использовании идентичных методик расчета погрешностей, а в настоящее время и неопределенностей измерений сдвига шкал [7–9].

Разработке основных подходов к решению этой задачи посвящена настоящая статья.

Основная часть

Системы, реализующие современные методы сличения (РМС, СРНС, ГС), используют технические средства и частотные диапазоны, обеспечивающие максимальную стабильность (а для некоторых систем – и обратимость) задержки сигналов при распространении радиоволн (РРВ).

Особую роль при анализе и сравнении систем сличения по точности и другим показателям играют алгоритмы измерений – порядок обмена сигналами между сличаемыми эталонами, который, после обработки этих сигналов, а также исключения времени задержки сигналов в канале РРВ и аппаратуре, обеспечивает измерение сдвига шкал.

Алгоритмы сличения, с точки зрения излучения сигналов в пунктах размещения эталонов, можно разделить на три вида [2, 10]:

1) полуактивный односторонний алгоритм (ОА) – сигналы излучаются только из одного пункта (англ. термин – *one-way*);

3) группа активных алгоритмов (встречный, ретрансляционный и опорно-ретрансляционный), в которых имеют место излучения сигналов в каждом из пунктов (англ. термин – *two-way*);

2) пассивный алгоритм общего охвата (АОО), основанный на приеме в пунктах сигнала общего источника (англ. термин – *common-view*).

В РМС, основанном на отражении радиоволн от метеорных следов, и при ретрансляции сигналов сличения через ГС наиболее часто применяется активный встречный алгоритм (ВА). Упрощенная структурная схема и идеальная временная диаграмма ВА приведены на рис. 1, где обозначены: $H_a(t)$, $H_b(t)$ – шкалы времени сличаемых эталонов; τ_p^{ab} , τ_p^{ba} – значения времени задержки сигналов в канале РРВ; t_1^a , t_1^b – временные положения принятых в пунктах сигналов.

Опорное значение (*reference value*) сдвига шкал в случае ВА составит

$$\Delta T^{ab} = 0,5[(t_1^a - t_1^b) - (\tau_p^{ab} - \tau_p^{ba})]. \quad (1)$$

В случае ВА время задержки сигналов в канале РРВ может быть неизвестным, требуется только его высокая стабильность и обратимость (в идеальном случае $\tau_p^{ab} - \tau_p^{ba} = 0$). Основной недостаток ВА состоит в необходимости излучения в сличаемых пунктах.

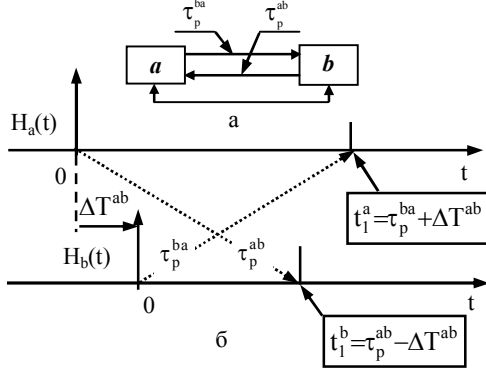


Рис. 1. Активный встречный алгоритм

АОО реализуется в СРНС и новом методе «ГС+АОО» [6]. Упрощенная структурная схема и идеальная временная диаграмма АОО приведены на рис. 2, где, кроме примененных на рис.1, введены обозначения: $s_o(t)$ – сигнал общего источника; τ^{ao} , τ^{bo} – задержки сигнала общего источника относительно шкал времени эталонов; τ_p^{oa} , τ_p^{ob} – задержки сигнала общего источника до пунктов в канале РРВ.

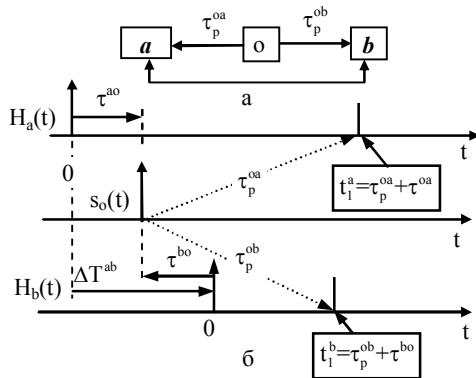


Рис. 2. Алгоритм общего охвата

Из рис. 2 следует выражение для опорного значения сдвига шкал в АОО

$$\Delta T^{ab} = (t_1^a - t_1^b) - (\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}). \quad (2)$$

Достоинствами АОО являются отсутствие излучения в пунктах и требований к стабильности сигнала общего источника, а недостатком – высокие требования к оценке разности задержек ($\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}$).

Кроме отличий опорных значений задержек сигналов в канале РРВ от их оценок, на точность

сличения влияют аналогичные отличия задержек сигналов в аппаратуре, а также помехи.

Для более полного анализа погрешностей и неопределенности сличений для ВА и ОРА можно использовать приведенные на рис.3 и рис.4 структурные схемы, где, кроме введенных выше, применены обозначения: $\tau_{прм}^a, \tau_{прм}^b, \tau_{прд}^a, \tau_{прд}^b$ – опорные значения задержек сигналов в приемных и передающих устройствах соответствующих пунктов; $u_{\Delta T}$ – суммарная стандартная неопределенность сличения. С учетом выражения (1) и структурной схемы системы (рис. 3) суммарная погрешность сличения для ВА составит:

$$\delta_{\Delta T}^{ab} = \widehat{\Delta T}^{ab} - \Delta T^{ab} = \delta_{\Delta T}^{ab}(\text{кан}) + \delta_{\Delta T}^{ab}(\text{ап}) + \delta_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}), \quad (3)$$

$$\text{где } \delta_{\Delta T}^{ab}(\text{кан}) = 0,5[(\tau_p^{ab} - \tau_p^{ba}) - (\tau_p^{ba} - \tau_p^{ab})],$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{ап}) = 0,5(\tau_{прм}^a - \tau_{прм}^a - \tau_{прд}^a + \tau_{прд}^a - \tau_{прм}^b + \tau_{прм}^b + \tau_{прд}^b - \tau_{прд}^b),$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = 0,5(\delta_t^a - \delta_t^b) \text{ – соответственно канальная,}$$

аппаратурная и помеховая слагаемые суммарной погрешности; $\tau_{прм}^a, \tau_{прд}^a, \tau_{прм}^b, \tau_{прд}^b$ – оценки соответствующих задержек; δ_t^a, δ_t^b – погрешности оценок временного положения (ОВП) сигналов, вызванные конечным отношением сигнал/помеха.

Суммарную погрешность для АОО можно записать в виде, аналогичном (3), а соответствующие слагаемые примут вид:

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{кан}) = [(\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}) - (\tau_p^{ob} - \tau_p^{oa})]; \quad (4)$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{ап}) = (\tau_{прм}^a - \tau_{прм}^a) - (\tau_{прм}^b - \tau_{прм}^b); \quad (5)$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = (\delta_t^a - \delta_t^b), \quad (6)$$

где τ_p^{oa}, τ_p^{ob} – оценки задержек в канале РРВ.

Учитывая случайный характер и некоррелированность помех в пунктах, помеховые погрешности сличения, с применением (3) и (6), можно оценить среднеквадратическими отклонениями (СКО):

$$\text{для ВА } \rightarrow \sigma_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(\text{с/п}) = 0,5\sqrt{(\sigma_t^a)^2 + (\sigma_t^b)^2}; \quad (4)$$

$$\text{для АОО } \rightarrow \sigma_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(\text{с/п}) = \sqrt{(\sigma_t^a)^2 + (\sigma_t^b)^2}, \quad (5)$$

где σ_t^a, σ_t^b – СКО ОВП сигналов в пунктах.

Поскольку СКО помеховых погрешности (4) и (5) определяются при статистической обработке результатов измерений сдвига шкал, эта оценка погрешности соответствует стандартной неопределенности типа А [7, 8]

$$u_{A/\Delta T}^{ab} = u_{A/\Delta T}^{ba}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(\text{с/п}).$$

Канальную и аппаратурную погрешности, описываемые выражениями (3), (4) и (5), нельзя определить путем статистической обработки результатов измерений. Поэтому, согласно [7, 8], эти погрешности формируют неопределенность типа В.

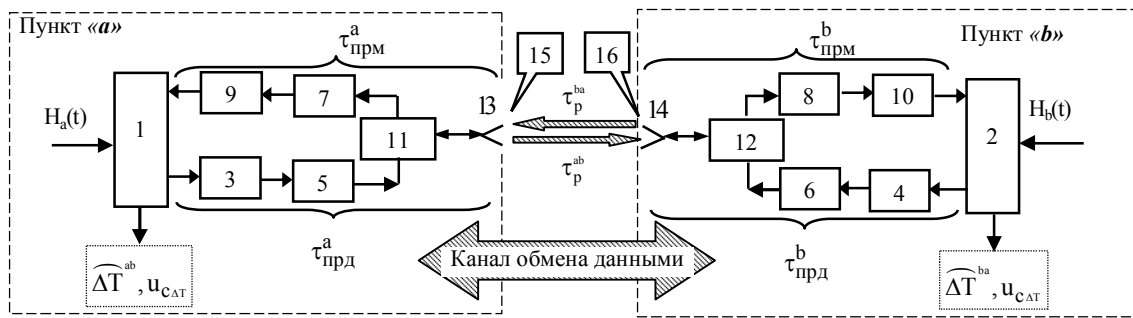


Рис. 3. Структурная схема систем сличения, реализующих ВА и другие активные алгоритмы: 1, 2 – устройства, реализующие алгоритм измерений и методы обработки результатов; 3, 4 – формирователи сигналов; 5, 6 – передающие устройства; 7, 8 – приемные устройства; 9, 10 – устройства оценки временного положения сигналов; 11, 12 – антенные коммутаторы; 13, 14 – антенны; 15, 16 – источники помех

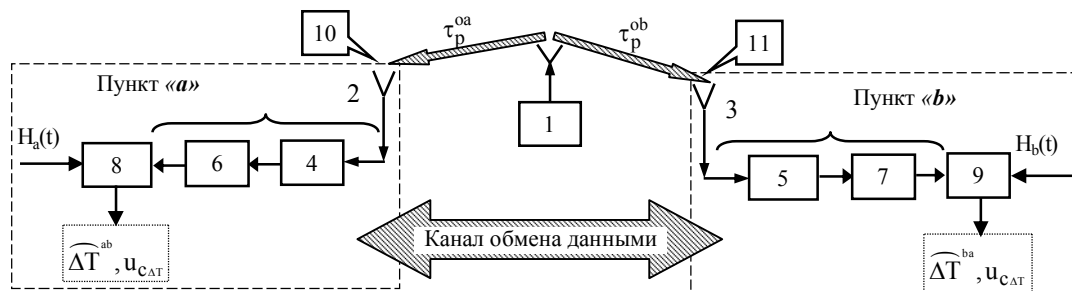


Рис. 4. Структурная схема систем сличения, реализующих АОО:

1 – источник общего сигнала $s_o(t)$; 2, 3 – антенны; 4, 5 – приемные устройства; 6, 7 – устройства оценки временного положения сигналов; 8, 9 – устройства, реализующие алгоритм измерений и методы обработки результатов; 10, 11 – источники помех

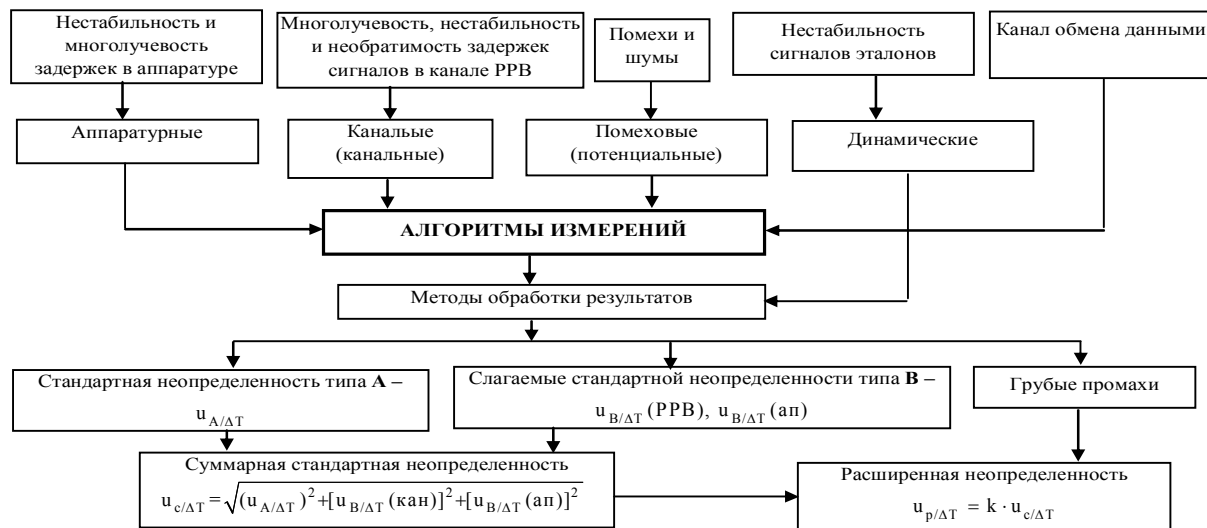


Рис. 5. Структура погрешностей и неопределенности измерений при сличениях эталонов времени и частоты

Для оценки стандартной канальной неопределенности $u_B(\text{кан})$ применимы модели канала РРВ, ПКЧ и другие независимые каналы калибровки (НКК), а для аппаратурной неопределенности $u_B(\text{ап})$ – измерения (пилотирование) аппаратурных задержек (АЗ) или проведение измерений в режиме «нулевой базы» (аппаратурные комплексы пунктов **a** и **b** совмещаются). Структура источников погрешностей, их классификация, влияние алгоритмов сличения и принцип формирования неопределенности приведены на рис. 5. Причины и методы учета неопределенности типа **B**

для РМС и нового метода «ГС+АОО» сведены в табл. 1 и 2. Там же приведены ссылки на соответствующие литературные источники.

Выводы

Анализ погрешности и неопределенности основных методов и алгоритмов сличения эталонов времени и частоты показал, что СКО помеховой погрешности измерений при сличениях совпадает со стандартной неопределенностью типа **A**.

Статистический анализ оценок канальных и аппаратурных погрешностей позволяет получить

слагаемые стандартной неопределенности типа В – $u_B(\text{кан})$ и $u_B(\text{ап})$. Для этого применимы модели и дополнительные измерения. Это обуславливает необходимость совершенствования моделей РРВ и методов измерения аппаратурных задержек.

Таблица 1

Причины и методы учета неопределенностей типа В при сличениях эталонов РМС

| Вид | Причины | Методы учета | |
|-------------------|--|-------------------------------------|------|
| $u_B(\text{кан})$ | Нестабильность МРРВ | Модели, ПКЧ, НКК | [2] |
| | Невзаимность МРРВ | | [13] |
| $u_B(\text{ап})$ | Невзаимность задержек в антенных трактах | Модель | [13] |
| | Температура, старение элементов и др. | Измерения АЗ и режим «нулевой базы» | [2] |

Таблица 2

Причины и методы учета неопределенностей типа В при сличениях эталонов методом «ГС+АОО»

| Вид | Причины | Методы учета | |
|-------------------|--|-------------------------------------|------|
| $u_B(\text{кан})$ | Параметры ионосферы | Модели, ПКЧ, НКК | [11] |
| | Параметры тропосферы | | |
| | Нутация ГС | | [12] |
| | Многочувствительность РРВ | Модель | [13] |
| $u_B(\text{ап})$ | Многочувствительность антенных трактов | Модель | [13] |
| | Температура, старение элементов и др. | Измерения АЗ и режим «нулевой базы» | [2] |

Список литературы

1. Финкельштейн А.М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение / А.М. Финкельштейн // Вестник Российской Академии наук. – 2007. – Т. 77, М 7. – С. 608-617.
2. Антипов И.Е. Развитие теории и совершенствование радиометрических систем связи и синхронизации» / И.Е. Антипов, Ю.А. Коваль, В.В. Обельченко. – Х.: Коллегиум, 2006. – 416 с.

3. Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO / V.S. Zhang, T.E. Parker, M.A. Weiss, F.M. Vannicola // EEE International Frequency Control Symposium. – June 2000. – P. 598-606.

4. Синхронизация часов по сигналам "ГЛОНАСС" / Ю.Г. Гужва, А.Г. Геворкян, П.П. Богданов, В.В. Овчинников // Радионавигация и время. – 1994.] № 1. – С. 11.

5. Recommendation ITU-R TF.1153-3, «The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN time codes». ITU, Radiocommunication Study Group, Geneva, Last update 2005.

6. Пат. 38167 Україна, МПК51 (2006), G04G 7/00. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів та стандартів часу і частоти / Нестеренко Г.В., Коваль Ю.О., Іванова О.О., Заяв. та власник Харківський нац. університет радіоелектр. – № u2008 09468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.

7. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.

8. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий "погрешность измерения" и "неопределенность измерения". Общие принципы.

9. The evaluation of uncertainties in [UTC - UTC(k)] / W. Lewandowski, D. Matsakis, G. Panfilo and P Tavella // Metrologia. – 2006. – 43. – P. 278-286.

10. B.W. Petley Time and frequency in fundamental metrology / B.W. Petley // PIEEE. – 1991. – Vol. 79, No. 1. – P. 1070-1076.

11. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М.: Эко-Тендз, 2001. – 270 с.

12. Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения / Е.А. Иванова, Ю.А. Коваль, Костыря, А.А. Ткаченко, В.А. Ямницкий, С.И. Ушаков // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №. 4/10 (40). – С. 25-29.

13. Влияние коррелированных помех в многочувствительных каналах на погрешность оценки временного положения сигналов / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова, В.Ю., Приймак, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хусейн // Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2011. – № 3/12 (51). – С. 51-60.

Поступила в редколлегию 13.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук Ю.И. Волощук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков,.

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРІВ ПРИ ЗВІРЕННЯХ ЕТАЛОНІВ ЧАСУ ТА ЧАСТОТИ РАДІОТЕХНІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Ю.О. Коваль, О.О. Костира, В.Ю. Приймак, Б.А. Ал-Твежри

Розглянуто сучасний стан звірення еталонів часу і частоти радіотехнічними методами. Описано основні методи звірення (радіометричний і супутникові) та проведено аналіз їх алгоритмів. Наведено співвідношення для оцінки зсуву шкал еталонів і похибок основних алгоритмів. Дана класифікація та запропоновано способи оцінювання невизначеності вимірювань як для алгоритмів, так і для основних методів звірення еталонів.

Ключові слова: звірення еталонів часу і частоти, методи та алгоритми вимірювань зсуву шкал, похибки і невизначеність.

ESTIMATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE COMPARISONS OF STANDARDS OF TIME AND FREQUENCY ELECTRONIC METHODS

Y.A. Koval, A.A. Kostyria, V.Y. Pryimak, B.A Al-Tvezhri

The current state of comparisons of standards of time and frequency radio engineering methods. Described the main methods of comparison (radiometer and satellite) and held an analysis of their algorithms. Shows the correlation for estimating the shear scale of standards and fundamental errors of algorithms. The classification and proposed methods of estimation of measurement uncertainty for both the algorithm and the basic methods for comparisons of standards.

Keywords: comparison of time and frequency standards, methods and algorithms for measuring the shear scale, the errors and uncertainties.