

УДК 621.317.76.089.68:621.373.82

Ан.М. Носик¹, А.П. Нарезный², Ал.М. Носик²¹ Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков² Метрологический центр военных эталонов Вооруженных Сил Украины, Харьков

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ АТОМНЫХ ЧАСОВ АСУ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В статье рассмотрена задача повышения точности частотно-временного обеспечения (определения вектора состояния) атомных часов эталонного сервера времени автоматизированной системы управления специального назначения, на основе применения метода стабилизированных оценок при обработке сигналов передаваемых глобальными навигационными спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС.

Ключевые слова: атомные часы, эталонный сервер времени, шкала времени.

Введение

Постановка проблемы. Особенностью современной автоматизированной системы управления (АСУ) специального назначения является широкое применение атомных часов (АЧ) для синхронизации процессов передачи данных по специальным каналам цифровой связи [1]. При этом повышение метрологической автономности эталонного сервера времени АСУ позволяет снизить материально-технические затраты на резервирование, а также повысить готовность за счет уменьшения или исключения времени изъятия из системы АЧ на период их аттестации. Для сличения шкал времени (ШВ) пространственно разнесенных АЧ используются сигналы, передаваемые с помощью различных средств. По точности и зоне действия наиболее перспективными являются методы, основанные на использовании перевозимых АЧ, дуплексных широкополосных каналов спутниковой связи и радиointерферометров со сверхдлинными базами [2]. Однако в силу своей сложности и отсутствием технических средств эти методы не применяются на территории Украины.

В настоящее время монопольное положение в Украине занимают методы синхронизации времени и частоты, основанные на использовании сигналов зарубежных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) [3]. Принадлежность ГНСС к зарубежным военным ведомствам не уменьшает актуальность исследований применения сигналов этих систем для синхронизации АСУ специального назначения. В связи с этим актуальным стал поиск метода синхронизации АЧ эталонного сервера времени АСУ специального назначения на основе процедуры выполнения синхронных фазовых наблюдений сигналов космических навигационных спутников (КНС) систем GPS/ГЛОНАСС.

Анализ литературы. В работах [4, 5] показано, что для АСУ специального назначения относитель-

ная погрешность по частоте первичных АЧ не должна превышать $1 \cdot 10^{-13}$, а погрешность формирования системного времени 0,5..1,0 мкс. Данные требования к точности частотно-временного обеспечения являются достаточно высокими. Так, например, государственный эталон единиц времени и частоты Украины характеризуется средним квадратическим относительным отклонением частоты при воспроизведении единицы $5 \cdot 10^{-14}$ и неисключенным остатком систематической погрешности не более $1 \cdot 10^{-13}$ [6].

Кроме того, точность синхронизации времени и частоты по сигналам ГНСС ограничена наличием следующих погрешностей: погрешности эфемеридной информации, частотно-временных поправок бортовых генераторов, погрешности за счет шумов приемника и внешних помех, многолучевости и особенностей распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере.

Требуемую точность сличений ШВ АСУ предполагается обеспечить на основе регулярных наблюдений сигналов ГНСС GPS и ГЛОНАСС фазовыми приемниками, работающими синхронно с приемниками пунктов национальной сети дифференциальной коррекции. При этом известно [7], что дифференциальный метод ГНСС GPS и ГЛОНАСС позволяет исключить или целиком минимизировать следующие виды погрешностей: погрешности селективного доступа, которые вводятся специально в сигналы GPS, ионосферные задержки, тропосферные задержки, эфемеридные погрешности.

Цель статьи. Повышение точности частотно-временного обеспечения (определения вектора состояния) АЧ эталонного сервера времени АСУ специального назначения, на основе применения метода стабилизированных оценок при обработке сигналов передаваемых ГНСС GPS/ГЛОНАСС.

При этом предполагается устранить систематические погрешности измерений методом относительного эталонирования.

Основной материал

Основная задача исследований заключается в оценке потенциальной точности определения вектора состояния АЧ эталонного сервера времени АСУ по сигналам ГНСС GPS/ГЛОНАС, используя С/А и ПТ коды на несущей частоте L1 методом относительного эталонирования. Данный метод позволяет изучить влияние на точность результирующих оценок вектора состояния АЧ координат и частотно-временных расхождений:

- случайных погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей;
- характеристик частотно-временных расхождений.

При этом все измерения проводятся по времени UTC (ГЛОНАС). Экспериментальная установка представляет собой групповой эталон, состоящий из трех рубидиевых квантовых стандартов частоты (КСЧ) типа СЧВ-74. В качестве канала внешних сличений используются сигналы ГНСС, принимаемые приемником СН-3834 (NAVIOR-S) украинского производства, а в качестве системы внутренних сличений использовались частотные компараторы Ч7-39 и частотомеры ЧЗ-64/1. Приемник СН-3834 для уменьшения влияния нестабильности частоты внутреннего опорного кварцевого генератора на результаты измерений при проведении эксперимента синхронизируется выходным сигналом ведущего КСЧ.

Для применения метода относительного эталонирования были проведены измерения геодезических координат фазового центра приемной антенны навигационного приемника. Координаты приемной антенны: X=12181,3 км; Y=11409,4 км; Z=155,93 м (система высоты Балтийская).

На рис. 1 приведен результат аппроксимации разности ШВ $\Delta T_{i\bar{i}-UTC(UA)}(t)$ между ведущим (опорным) СЧВ-74 и шкалой координированного времени UTC (ГЛОНАС). Аппроксимацию разности ШВ $\Delta T_{i\bar{i}-UTC}(t)$ предлагается производить по методу наименьших квадратов (МНК) полиномом вида $y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$.

При этом предполагается, что вектор остатков $\Delta \bar{\varepsilon} = [\Delta T_{i\bar{i}-UTC}(t_0) - y(t_0), \dots, \Delta T_{i\bar{i}-UTC}(t_N) - y(t_N)]^T$ будет иметь нормальный закон распределения. Таким образом, оценка вектора $\bar{A} = [a_0, \dots, a_3]^T$ коэффициентов полинома по МНК будет иметь следующий вид

$$\hat{A}^* = [X^T X]^{-1} X^T \Delta \bar{T}, \quad (1)$$

где $\Delta \bar{T} = [\Delta T_{i\bar{i}-UTC}(t_0), \dots, \Delta T_{i\bar{i}-UTC}(t_N)]^T$ – вектор разности ШВ размерностью $1 \times N + 1$;

$$X = \begin{bmatrix} t_0^0 & \dots & t_0^3 \\ \vdots & & \vdots \\ t_N^0 & \dots & t_N^3 \end{bmatrix}_{(N+1) \times 4} \quad \text{– матрица размера } (N+1) \times 4.$$

Как следует из (1), точность и устойчивость решения определяется обусловленностью информационной матрицы $K_{\hat{A}^*}^{-1} = [X^T X]^{-1}$. Обусловленность можно оценить по величине $q = \mu_{\max} / \mu_{\min}$, где μ_{\max} и μ_{\min} – максимальное и минимальное собственное значение из спектра собственных значений информационной матрицы $K_{\hat{A}^*}^{-1}$. В общем случае, при достаточно больших $q \approx (10^k)$ решение, получаемое обобщенным МНК, неустойчиво.

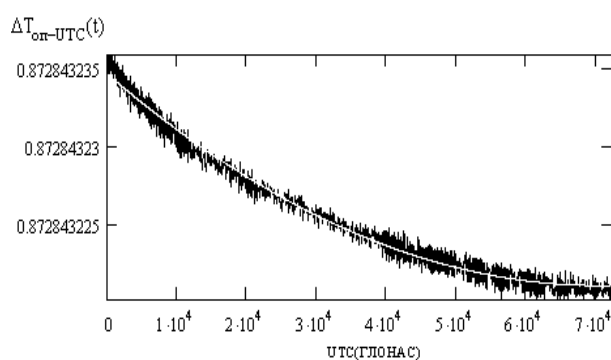


Рис. 1. Результат аппроксимации разности ШВ между ведущим СЧВ-74 и приемником NAVIOR-S полиномом второй степени по МНК

Информационная матрица размера 4×4 для модели $y(t)$ будет равна

$$K_{\hat{A}^*}^{-1} = \begin{bmatrix} A(N,0), \dots, A(N,3) \\ A(N,1), \dots, A(N,4) \\ A(N,2), \dots, A(N,5) \\ A(N,3), \dots, A(N,6) \end{bmatrix}_{4 \times 4}^{-1}, \quad (2)$$

$A(N, j) = \sum_{i=0}^N t_i^j$ – элемент информационной матрицы.

Из анализа информационной матрицы (2) следует, что число обусловленности $q \approx A(N,6)/A(N,0)$. Одним из способов уменьшения числа обусловленности информационной матрицы является использование существующих методов регуляризации [8]. При этом предпочтение следует отдать статистическим методам регуляризации, которые позволяют оценить точность полученного решения. Статистическая регуляризованная оценка в некотором смысле адекватна байесовской процедуре, сводящейся к следующему.

Смещение оценки \hat{A} определяется соотношением $\Delta \hat{A}^* = [X^T X]^{-1} X^T \bar{m}_\xi$ и может быть учтено

при известном векторе математических ожиданий шумов измерения \bar{m}_ξ .

Пусть известно априорное распределение компонент вектора \bar{A} . При гауссовском распределении априорная информация сводится к знанию двух первых моментов $M(\bar{A}) = m_A$ и $M[(\bar{A} - \bar{m}_A)(\bar{A} - \bar{m}_A)^T] = P_A$. При гауссовском распределении шумов измерений оптимальная байесовская оценка \hat{A}^* соответствует уравнению, имеющему следующий вид

$$\hat{A}^* = [X^T X + P_A^{-1}]^{-1} [X^T \Delta \bar{T} + P_A^{-1} \bar{m}_A]. \quad (3)$$

Оценка апостериорного среднего (3) гарантирует устойчивость и точность не хуже априорной. Получение оценок \bar{m}_A и P_A для каждой меры по сигналам ГНСС требует длительных наблюдений и непрерывного режима работы группового эталона. Для случая, когда группа набирается периодически с целью самоаттестации и длительных наблюдений не превышает 14 суток (при использовании сигналов ГНСС), наиболее целесообразным является метод стабилизированных оценок [8, 9]. При стабилизации в отличие от остальных методов борьбы с плохой обусловленностью информационной матрицы делается попытка прямой аппроксимации ошибки $\Delta \hat{A}^*$ регрессионной оценки \bar{A} , после чего проводится коррекция модели. Из (1) для ошибки $\Delta \hat{A}^*$

получаем $\Delta \hat{A}^* = \hat{A}^* - \bar{A} - \Delta \bar{A} = CX^T \Delta \bar{T} - CX^T \bar{\eta}$, где $\bar{\eta}$ – обозначен истинный (без шума) вектор $\Delta \bar{T}$ и $\bar{\eta} = M(\Delta \bar{T})$; C – матрица, действительные элементы которой находятся по формуле $\bar{\eta}_{ij} = (-1)^{i+j} \left| \left(K_{\hat{A}^*}^{-1} \right)^{ij} \right| \cdot 1 / \left| K_{\hat{A}^*}^{-1} \right|$, где $|B|$ – определитель от матрицы B , а $\left(K_{\hat{A}^*}^{-1} \right)^{ij}$ – минор, получаемый вычеркиванием i -й строки и j -го столбца. В [8] показано, что при плохой обусловленности вектор $\Delta \hat{A}^*$ можно аппроксимировать следующим образом:

$$\Delta \hat{A}^* \approx \beta \bar{\psi},$$

где случайная величина β – параметр стабилизации, а $\bar{\psi}$ находится по формуле $\bar{\psi} = (1/\|C\|) \cdot C \cdot \bar{1}$, где $\bar{1}^T = (1, \dots, 1)$ – 3×1 - вектор, а $\|B\|$ – сферическая норма вектора ($\|b\| = \sqrt{\sum_k b_k^2}$).

Таким образом, стабилизированная оценка будет равна $\hat{A}_{\bar{n}}^* = \hat{A}^* - \beta \bar{\psi} \approx \bar{A} - \Delta \bar{A}$. Полученная полиномиальная модель поведения разности ШВ, представленная на рис. 1, имеет коэффициенты: $a_0 = 0.872843$, $a_1 \approx 3.8 \cdot 10^{-13}$, $a_2 \approx 2.7 \cdot 10^{-18}$, $a_3 \approx 0$. Применение предлагаемых процедур для обработки результатов сличений внутри группы приведена на рис. 2 и 3.

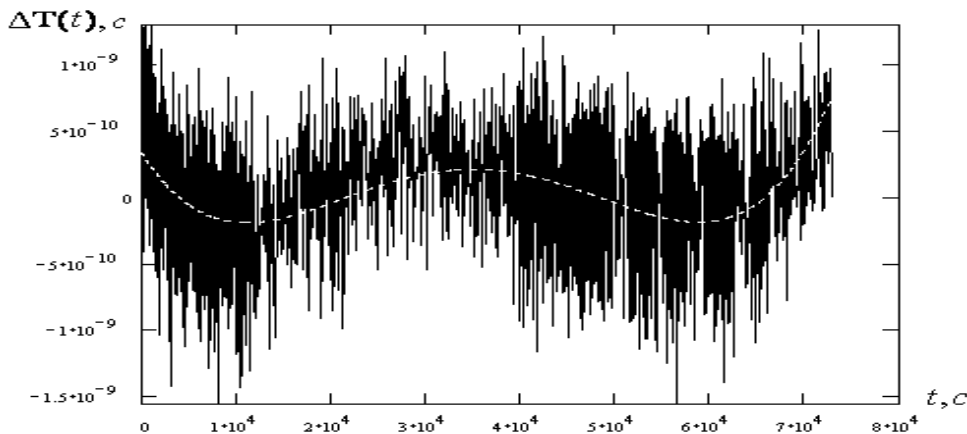


Рис. 2. Результат аппроксимации полиномом третьей степени остатка разности ШВ между ведущим СЧВ-74 и приемником NAVIOR-S после устранения полиномиальной зависимости второй степени по МНК

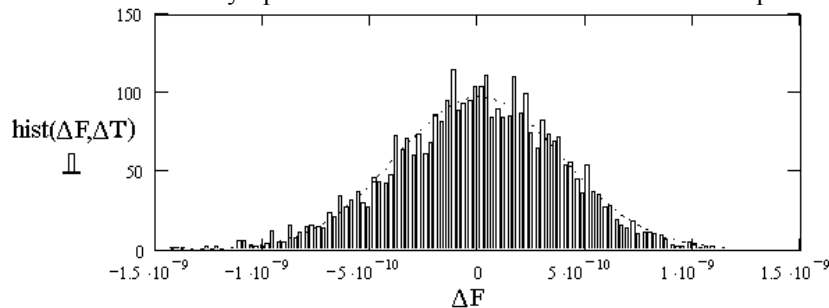


Рис. 3. Гистограмма распределения остатка разности ШВ между ведущим СЧВ-74 и приемником NAVIOR-S после устранения полиномиальной зависимости третьей степени

Погрешность определения времени в навигационной задаче зависит от режима работы с координатами. В приемнике NAVIOR-S имеется три режима: динамический, фиксированных координат и осреднения. Для реализации метода относительно эталонирования использовался режим с фиксированными координатами с точностью до 1 м. Кроме того, данный приемник позволяет вводить задержку сигнала в антенном кабеле.

Выводы

1. Экспериментальные исследования усовершенствованного метода относительного эталонирования с учетом стабилизированных оценок при обработке сигналов ГНСС GPS/ГЛОНАС показали возможность обеспечить точность на уровне долей наносекунд при применении точных координат антенны навигационного приемника, пост обработки точных эфемерид спутников, измеренного запаздывания в ионосфере и результатов калибровок приемника NAVIOR-S. При этом закон распределения остатка разности ШВ между системной шкалой ГНСС и шкалой АЧ близок к нормальному закону.

2. Основными мешающими факторами применения усовершенствованного метода относительного эталонирования для одночастотного режима (L1) при точности сравнения на уровне долей наносекунды могут быть влияние селективного доступа (SA) и преднамеренное ослабление сигналов спутников GPS, которые в настоящее время введены в состав спутниковых блоков GPS.

3. Результаты экспериментального исследования фазовой нестабильности задержки сигналов в радиоканале позволяют подтвердить фазовый принцип построения высокоточной навигационной аппаратуры синхронизации. Анализ теоретических и экспериментальных исследований источников погрешностей канала ГНСС показал, что измерения с использованием современной одночастотной навигационной аппаратуры сравнения ШВ позволяют

подтвердить модельную верхнюю теоретическую оценку сравнения ШВ менее 1 нс.

Список литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. Е. Г. Грозы и др. [2-е изд.] / Б. Скляр. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Финкельштейн А.М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение / А.М. Финкельштейн // Вестник Российской Академии Наук. – 2007. – Т. 77, № 7. – С. 608-617.
3. Эфемеридно-временное обеспечение системы ГЛОНАСС [Электронный ресурс] / М. Леонов, А. Круглов, В. Романюк, А. Забокрицкий, В. Пасынков, Е. Титов // Наука и производство. – 2007. – №1. – С. 66-69. – Режим доступа к журн.: http://www.rniikp.ru/2007-03-20_1.pdf.
4. Романько В.М. Розвиток системи частотно-часового забезпечення Збройних Сил України / В.М. Романько, С.Т. Черетков // Український метрологічний журнал. – 2004. – № 1. – С. 58-63.
5. Носик А.М. Особливості організації еталонного сервера часу АСУ спеціального призначення на основі атомного годинника, що синхронізується за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем / А.М. Носик, О.П. Нарезній // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: Науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС. – 2010. – №2(4). – С. 141-145.
6. Клейман О.С. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти / О.С. Клейман, В.П. Оголюк, Г.С. Сидоренко [та ін.] // Український метрологічний журнал. – 1997. – № 3. – С. 18-23.
7. Одуан К. Измерение времени. Основы GPS: пер. с англ. / К. Одуан, Б. Гино. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
8. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений: учебн. пособие / В.С. Сизиков. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 240 с.
9. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник / И. Гайдышев. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.

Поступила в редколлегию 28.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.А. Василец, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

СИНХРОНІЗАЦІЯ ПЕРВИННИХ АТОМНИХ ГОДИННИКІВ АСУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА СИГНАЛАМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

А.М. Носик, О.П. Нарезній, О.М. Носик

У статті розглянута задача підвищення точності частотно-часового забезпечення (визначення вектору стану) атомних годинників еталонного серверу часу автоматизованої системи управління спеціального призначення, на основі використання методу стабілізованих оцінок при обробці сигналів, що передаються глобальними навігаційними супутниковими системами GPS/ГЛОНАСС.

Ключові слова: атомний годинник, еталонний сервер часу, шкала часу.

СИНХРОНІЗАЦІЯ ПЕРВИННИХ АТОМНИХ ГОДИННИКІВ АСУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА СИГНАЛАМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

An.M. Nosyk, O.P. Narezniy, Al.M. Nosyk

This article considers the problem of improving the accuracy of time-frequency support (state vector determination), an atomic clock reference time server, automated control system for special purpose on the basis of the method of stabilized ratings signal processing transmitted global navigation satellite systems GPS / GLONASS.

Keywords: time server, reference time server, time scal.