

**МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ**

К. В. БАКУРСКИЙ*, А. А. МАКАРОВ, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, С. В. НИКИФОРОВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*vka@mil.ru

Аннотация. Проанализированы поправки к бортовым шкалам времени (ШВ) навигационных космических аппаратов (НКА), представлены результаты обработки измерений отсчетов ШВ для n выбранных аппаратов при аппроксимации полиномом второго порядка. Разработан метод формирования групповой шкалы времени (ГШВ) радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных. Проведено имитационное моделирование предложенного варианта формирования аналитической ГШВ.

Ключевые слова: шкала времени, групповая шкала времени, аппроксимация, ГЛОНАСС, метод наименьших квадратов, целевая функция

Ссылка для цитирования: Бакурский К. В., Макаров А. А., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В. Метод формирования групповой шкалы времени радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 271—279. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-271-279

**METHOD FOR FORMATION OF GROUP TIME SCALE
OF RADIO ENGINEERING COMPLEXES BASED
ON ADAPTIVE POLYNOMIAL DATA APPROXIMATION**

K. V. Bakurskiy*, A. A. Makarov, T. O. Myslivtsev, S. V. Nikiforov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vka@mil.ru

Abstract. Corrections to onboard time scales of navigation space vehicles are analyzed, and results of processing of the time scales readings for n selected spacecrafts using a second-order polynomial approximation, are presented. A method for formation of a group time scale of radio engineering complexes based on adaptive polynomial data approximation is developed. Simulation modeling of the proposed variant of analytical group time scale formation is carried out.

Keywords: time scale, group time scale, approximation, GLONASS, least squares method, objective function

For citation: Bakurskiy K. V., Makarov A. A., Myslivtsev T. O., Nikiforov S. V. Method for formation of group time scale of radio engineering complexes based on adaptive polynomial data approximation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 271—279 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-271-279.

В современных радиотехнических системах в качестве задающих и синхронизирующих устройств используются стандарты частоты и времени (СЧВ), которые являются высокостабильным источником колебаний в радиотехническом диапазоне [1, 2]. В большинстве радиотехнических систем точность и надежность формирования высокостабильных колебаний

обеспечивается методами аналитического (на основе вычислений) и аппаратного (на основе соответствующего преобразования сигналов) объединения СЧВ в групповой эталон [3—6]. При этом точность и стабильность в групповом эталоне достигается на базе усреднения характеристик нескольких часов, а надежность — на основе их резервирования.

Эталоны единиц частоты и времени представляют собой сложные комплексы аппаратуры воспроизведения, хранения и передачи размеров единиц частоты и времени, основу которых составляет групповой хранитель. В состав группового хранителя входят несколько высокостабильных атомных стандартов частоты и времени, оснащенных аппаратурой взаимных сличений по частоте и шкале времени. Причем элементы группового хранителя выполняют не просто функцию горячего резерва некоего основного стандарта, а являются „полноправными членами группы“ и участвуют в формировании выходных единиц эталона. Выходные единицы эталона — групповая частота и шкала атомного времени — обычно являются аналитическими величинами, сформированными на ансамбле хранителей путем статистической обработки данных взаимных сличений между элементами группы. Поэтому стабильность частоты группового хранителя и ход шкалы времени эталона определяются не только метрологическими характеристиками самих хранителей, но и эффективностью статистических методов обработки данных взаимных сличений.

Увеличение автономности функционирования систем синхронизации при одновременном повышении точности формирования и хранения шкал времени в настоящее время все чаще обеспечивается за счет статистических методов обработки временной информации и оптимизации алгоритмов управления, а при аппроксимации измерений значений шкалы времени, формируемой каким-либо стандартом частоты, в основном используется полиномиальная аппроксимация на основе метода наименьших квадратов (МНК) [7—10].

Предлагается на основе поправок к бортовым ШВ НКА сформировать ГШВ радиотехнических комплексов с помощью разработанного метода при реализации адаптивной полиномиальной аппроксимации данных.

В качестве исходных данных для моделирования воспользуемся поправками к бортовым ШВ НКА, передаваемыми в файлах формата RINEX-Clock (рис. 1). Шаг выдачи поправок в файлах формата RINEX-Clock — 5 мин (файл с расширением *.clk) [11—13]. Эти данные вполне пригодны для демонстрации принципа формирования ГШВ на основе предлагаемого метода, так как они имеют характерный линейный тренд, не содержащий экстремумов на суточном интервале. Но также возможно использование и другой информации о шкалах времени, формируемых высокостабильными стандартами частоты.

```

2.00          CLOCK DATA          RINEX VERSION / TYPE
          SVI          29/08/2018 14:17  PGM / RUN BY / DATE
CLK ANT X-OFFSET(M): 11F654 -1.620; 14F113 -2.083  COMMENT
CLK ANT Y-OFFSET(M): 11F654 0.000; 14F113 0.545  COMMENT
THE GLONASS CLOCKS ARE ALIGNED TO GLONASS TIME  COMMENT
THE EPOCHS DATA IN UTC TIME  COMMENT
1 AS  # / TYPES OF DATA
SVI  ANALYSIS CENTER
1 2018 08 18 0 0 0.000000 2018 08 18 23 55 0.000000# OF CLK REF
WTZR ANALYSIS CLK REF
51 # OF SOLN SATS
G01 G02 G03 G05 G06 G07 G08 G09 G10 G11 G12 G13 G14 G16 G17 PRN LIST
G18 G19 G20 G21 G22 G23 G24 G25 G26 G27 G28 G29 G30 G31 G32 PRN LIST
R01 R02 R03 R04 R07 R08 R09 R10 R11 R13 R14 R15 R16 R17 R18 PRN LIST
R19 R20 R21 R22 R23 R24 PRN LIST
END OF HEADER
AS G01 2018 08 18 00 00 0.000000 1 -.776701014673E-04
AS G02 2018 08 18 00 00 0.000000 1 .249096578654E-04
AS G03 2018 08 18 00 00 0.000000 1 .123065594623E-03
AS G05 2018 08 18 00 00 0.000000 1 -.313385887984E-05

```

Рис. 1

На рис. 2 представлены поправки Δ к шкалам времени пяти НКА одной из плоскостей орбитального сегмента системы ГЛОНАСС. Выбор космических аппаратов обусловлен наличием положительных и отрицательных трендов ухода ШВ.

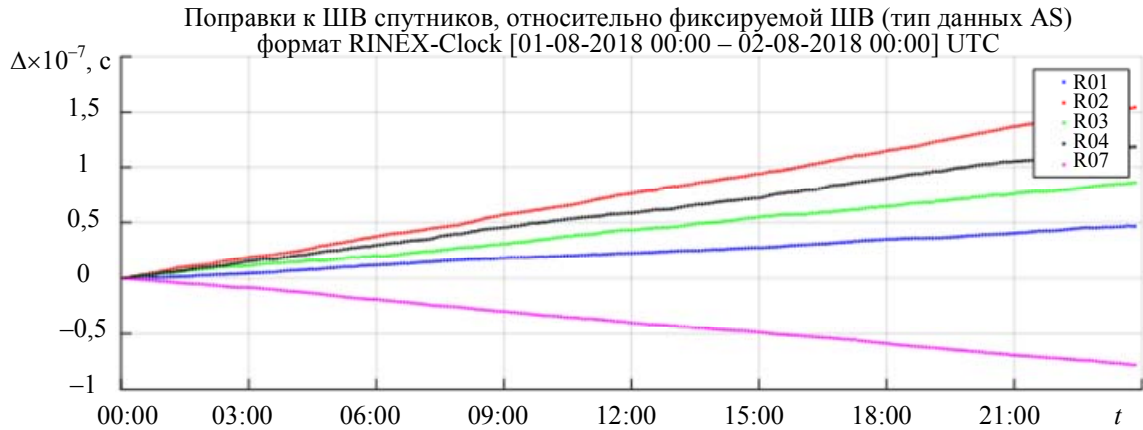


Рис. 2

Для получения оценок коэффициентов полинома по данным о поправках к ШВ НКА (далее — измерения отсчетов ШВ) рассмотрим повторяющиеся отсчеты в формате RINEX-Clock. Приведем соотношения, используемые при полиномиальной аппроксимации данных применительно к выбранным исходным данным.

Пусть

$$y_i = x + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где y_i — измеренные значения отсчетов ШВ; x — истинное значение ШВ, формируемое стандартом частоты; ε_i — ошибки измерений.

С использованием МНК величина x определяется из соотношения

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N (x - y_i)^2 = \min, \quad (2)$$

где N — общее количество измерений отсчетов ШВ.

Основываясь на свойствах центральной предельной теоремы, предположим, что ошибки измерений нормально распределены и имеют нулевое математическое ожидание $m = M\{\varepsilon_i\} = 0$ и дисперсию $D\{\varepsilon_i\} = M\{\varepsilon_i^2\} = \sigma^2$. Тогда вероятность получения каждого из значений отсчетов ШВ y_i пропорциональна

$$f_i(y_i) dy = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y_i - x)^2}{2\sigma^2}\right) dy. \quad (3)$$

Если использовать МНК для получения максимально правдоподобной оценки, в случае нормального распределения оптимальное значение отсчетов ШВ x отыскивается как среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{при} \quad \sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma^2}{N}. \quad (4)$$

При логарифмировании соотношения (3) максимум функции правдоподобия достигается реализацией соотношения (2):

$$\ln[f_i(y_i)] = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (y_i - x)^2 + \text{const}. \quad (5)$$

Таким образом, для получения оценки по МНК отыскивается минимум соотношения

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (x - y_i)^2 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \varepsilon_i^2 = \min, \quad (6)$$

в котором весовые коэффициенты обратно пропорциональны дисперсиям измерений отсчетов ШВ, и оптимальная величина x отыскивается как

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} y_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \text{ при } \sigma^2(\bar{x}) = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1}. \tag{7}$$

Величина

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (x - y_i)^2 \tag{8}$$

имеет распределение χ -квадрат с $(N - 1)$ степенями свободы.

Представим повторяющиеся измерения отсчетов ШВ при полиномиальной аппроксимации $y = Ax + \varepsilon$, (9)

где y — вектор измеренных значений отсчетов ШВ; x — вектор оцениваемых параметров (коэффициентов полинома); A — матрица связи измеренных значений отсчетов ШВ с коэффициентами полинома; ε — вектор ошибок измерений.

С использованием линейной и произвольной полиномиальной аппроксимации выражение (8) запишется как

$$y = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} + \varepsilon \text{ и } y = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^{m-1} \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & t_N & t_N^2 & \dots & t_N^{m-1} \end{bmatrix}^{N \times m} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} + \varepsilon. \tag{10}$$

При известной корреляционной матрице ошибок измерений оценка коэффициентов аппроксимирующего полинома отыскивается из соотношения

$$x = (A^T R_y A)^{-1} A^T R_y y. \tag{11}$$

Из полученного соотношения определяется ковариационная матрица оценки коэффициентов полинома: $K_{\bar{x}} = (A^T R_y A)^{-1}$. Корень квадратный из диагональных элементов этой матрицы определяет среднеквадратические значения ошибок оценки коэффициентов полинома.

В таблице представлены результаты обработки измерений отсчетов ШВ для пяти выбранных аппаратов при аппроксимации полиномом второго порядка.

Номер НКА [m]	Аппроксимирующая полиномиальная функция $y_{R0m} = a_2^{R0m} \cdot t^2 + a_1^{R0m} \cdot t + a_0^{R0m}$
R01	$y_{R01} = 2,5288 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 1,0029 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,021141$
R02	$y_{R02} = 8,1675 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 3,4747 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,070014$
R03	$y_{R03} = 4,6496 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 1,8078 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,038602$
R04	$y_{R04} = 6,3143 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 2,6352 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,053752$
R07	$y_{R07} = -4,2308 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 - 1,7141 \cdot 10^{-08} \cdot t + 0,035635$

Уточнить исходные результаты измерений возможно, подставив полученную оценку \bar{x} в исходное выражение (8):

$$\bar{y} = A(A^T R_y A)^{-1} A^T R_y y, \tag{12}$$

тогда ковариационная матрица уточненных значений результатов измерений

$$K_{\bar{y}} = A(A^T R_y A)^{-1} A^T R_y. \tag{13}$$

На рис. 3 представлены графики аппроксимирующих полиномов с СКО результатов.

Аппроксимированные значения поправок к ШВ спутников
[01-08-2018 00:00 – 02-08-2018 00:00] UTC

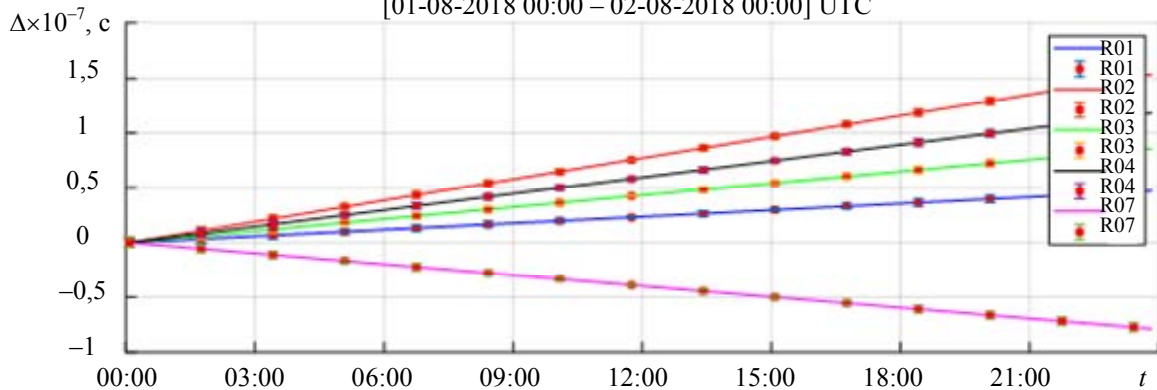


Рис. 3

Для формирования ГШВ каждому аппроксимирующему полиному необходимо добавить весовой множитель -1 или 1 , который „отражает“ полученную полиномиальную функцию относительно оси времени либо „не отражает“ ее.

Полиномиальная функция для ГШВ отыскивается как результирующая сумма взвешенных значений полученных полиномов. Очевидно, что для пяти выбранных стандартов (либо большего количества) используемых данных об уходах ШВ необходимо 2^5 или 2^m вариантов задания весовых коэффициентов. В результате полного перебора значений весовых множителей отыскивается минимум целевой функции

$$F(a_0^{R0k}, a_1^{R0k}, a_2^{R0k}, faktor(k)) = \text{abs} \left[\sum_{k=1}^m [faktor(k) \cdot (a_2^{R0k} \cdot t^2 + a_1^{R0k} \cdot t + a_0^{R0k})] \right] \rightarrow \min, \tag{14}$$

где $faktor(k)$ — весовой множитель для каждой полиномиальной функции; $\text{abs}[\cdot]$ — абсолютное значение взвешенной суммы.

Одним из вариантов полного перебора значений может быть присвоение $faktor(k) = 1$ или $faktor(k) = -1$ при переборе чисел от 0 до 2^m в двоичной форме. Например, для пяти выбранных стандартов, формирующих ГШВ, имеем 32 варианта значений весовых множителей

$$\begin{aligned} 00:00000 & faktor(11111), \\ 01:00001 & faktor(1111-1), \\ & \dots \\ 13:01101 & faktor(1-1-11-1), \\ & \dots \\ 30:11110 & faktor(-1-1-1-11), \\ 31:11111 & faktor(-1-1-1-1-1). \end{aligned} \tag{15}$$

На рис. 4 представлены результаты поиска минимума целевой функции F (14); показано, что минимум достигается при 14-м и 19-м вариантах выбора весовых коэффициентов n_k . Эти условия определяют вид результирующей полиномиальной функции для ГШВ: возрастающей либо убывающей во времени [13—15]. Для определенности примем в качестве полинома, аппроксимирующего ГШВ, возрастающую функцию.

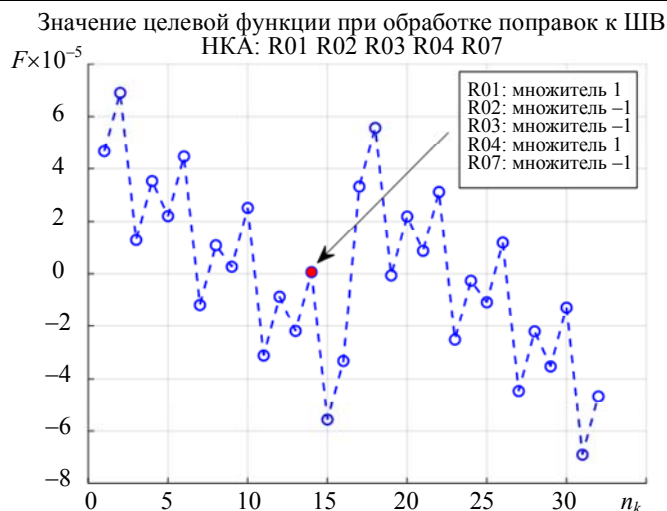


Рис. 4

Таким образом, полиномиальная функция второго порядка для формирования аналитической ГШВ отыскивается из соотношения

$$y_{ГШВ} = \sum_{k=1}^m [faktor(k) \cdot (a_2^{R0k} \cdot t^2 + a_1^{R0k} \cdot t + a_0^{R0k})], \tag{16}$$

при условии $F(a_0^{R0k}, a_1^{R0k}, a_2^{R0k}, faktor(k)) \rightarrow \min$.

На рис. 5 представлены аппроксимирующие полиномы после присвоения весовых коэффициентов и полином для ГШВ; на рис. 6 — значения целевой функции при обработке поправок к ШВ (а) и аналитическая ГШВ после обработки данных (б).

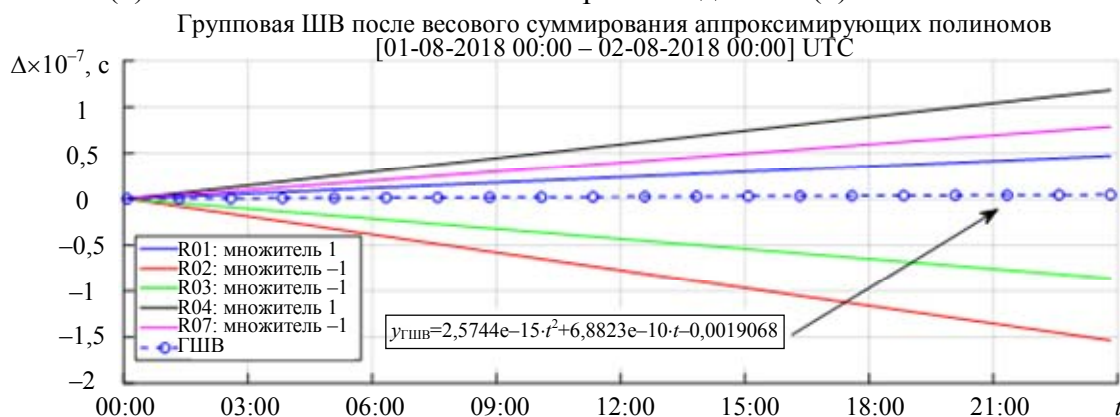


Рис. 5

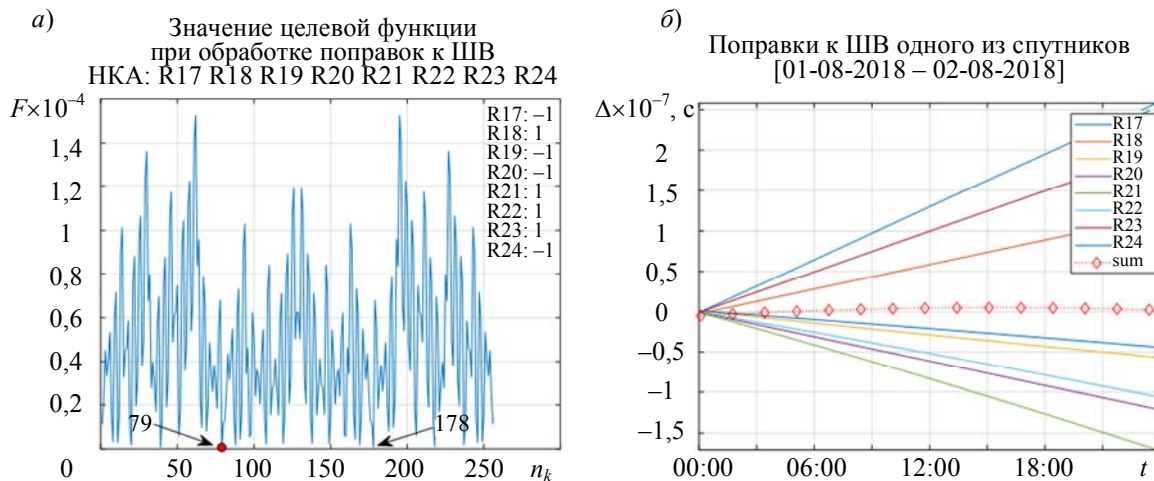


Рис. 6

Заключение. Радиотехнические системы с распределенной инфраструктурой, имеющие в своем составе комплексы, „завязанные“ на единую ШВ, требуют поддержания собственной (не зависящей от внешних систем синхронизации) ШВ, которая должна формироваться в едином центре данных на основе аналитической ГШВ. При наличии такой сетевой инфраструктуры в случае пропадания сигналов от систем внешней синхронизации или внезапного вывода из строя одного из элементов возможно использовать данные от собственной аналитической ГШВ, что существенно повысит стабильность выполнения поставленных перед системой задач.

На основе полученных результатов моделирования предложенного варианта формирования аналитической ГШВ можно сделать следующие выводы.

1. При аппроксимации измеренных значений ШВ полиномиальной функцией для дальнейшего формирования аналитической ГШВ важными факторами являются: качество аппроксимации на заданном интервале времени (например, с проверкой по критерию согласия χ -квадрат), с обязательным условием аппроксимации значений для всех используемых ШВ полиномов одинаковой степени.

2. Для формирования аналитической ГШВ в реальном масштабе времени необходимо накапливать данные измерений на интервале, достаточном для качественной аппроксимации (см. п. 1). Дальнейшее формирование ШВ проводится при обработке данных в скользящем окне, при этом выбор размеров окна может быть динамическим и зависеть от характеристик выбранных однотипных стандартов частоты, формирующих шкалы времени.

3. Для выбора каждого из множителей ($faktor(k)$) полиномиальных функций при формировании аналитической ГШВ возможно использовать различные варианты, но ввиду ограниченного числа стандартов частоты в группе полный перебор вариантов должен быть обязательным.

4. Перспективным направлением дальнейших исследований является формирование аналитической ГШВ на основе калмановской фильтрации данных измерений, что позволит формировать ГШВ без накопления данных в выбранном окне, с возможностью применения предложенного метода к однотипным стандартам частоты различного класса точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: Итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭР. 1978. Т. 66, № 9. С. 70—101.
2. Андрианов В. И., Балыков Ю. Ю., Беспалов А. Н. и др. Служба и средства измерения времени. Л.: МО, 2000. 152 с.
3. Хрусталева Ю. П. Статическая и динамическая обработка данных, получаемых в процессе ведения эталонов времени и частоты // Измерительная техника. 2004. № 6. С. 20—24.
4. Алешкин А. П., Макаров А. А., Мысливцев Т. О. Предложения по созданию единой шкалы времени на основе данных пространственно-распределенных стандартов частоты различной точности // Тр. Института прикладной астрономии РАН. СПб: ИПА РАН, 2016. Вып. 37. С. 19—22.
5. Донченко С. И., Крошкин А. Н. Новый подход к формированию групповой частоты и шкалы атомного времени на ансамбле хранителей // Измерительная техника. 1999. № 7. С. 3—6.
6. Ермишин С. М. Теоретические основы создания групповых средств измерений // Измерительная техника. 2000. № 2. С. 11—15.
7. Алёшкин А. П. Основы теории адаптивного смещенного оценивания с нелинейными ограничениями и ее применение к решению некорректных навигационных задач. СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 2001. 153 с.
8. Степанов М. Г. Введение в теорию смещенного оценивания параметров движения космических аппаратов по ограниченному данным. СПб: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1993. 135 с.
9. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.

10. Алёшкин А. П., Архипова И. Г., Макаров А. А., Полиенко В. Н., Семёнов А. А. Метод рекуррентного оценивания параметров движения подводного объекта по данным космических навигационных определений буксируемой аппаратуры потребителя // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 57—62.
11. Архивные данные прикладного потребительского центра ГЛОНАСС // Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения [Электронный ресурс]: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/SVOEVP/2018/clock/> (дата обращения: 16.11.2020).
12. Описание формата файлов часов // Сервер информационной системы центрального бюро Международного геофизического сообщества (IGS Central Bureau Information System) [Электронный ресурс]: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex_clock.txt> (дата обращения: 16.11.2020).
13. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
14. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М.: Наука, 1977. 343 с.
15. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Учеб. для вузов. М.: Мир, 1975. 536 с.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|--|
| Клим Валерьевич Бакурский | — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |
| Андрей Александрович Макаров | — д-р техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |
| Тимофей Олегович Мысливцев | — д-р техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |
| Сергей Валерьевич Никифоров | — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |

Поступила в редакцию 22.10.21; одобрена после рецензирования 18.01.22; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Rytman Zh. *Trudy Instituta Inzhenerov po Elektrotekhnike i Radioelektronike*, 1978, no. 9(66), pp. 70–101. (in Russ.)
2. Andrianov V.I., Balykov Yu.Yu., Bepalov A.N. et al. *Sluzhba i sredstva izmereniya vremeni* (Service and Means of Measuring Time), Leningrad, 2000, 152 p. (in Russ.)
3. Khrustalev Yu.P. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2004, no. 6, pp. 20–24. (in Russ.)
4. Aleshkin A.P., Makarov A.A., Myslivtsev T.O. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2016, no. 37, pp. 19–22. (in Russ.)
5. Donchenko S.I., Kroshkin A.N. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1999, no. 7, pp. 3–6. (in Russ.)
6. Ermishin S.M. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2000, no. 2, pp. 11–15. (in Russ.)
7. Aleshkin A.P. *Osnovy teorii adaptivnogo smeshchennogo otsenivaniya s nelineynymi ogranicheniyami i yeye primeneniye k resheniyu nekorrektnykh navigatsionnykh zadach* (Fundamentals of the Theory of Adaptive Biased Estimation with Nonlinear Constraints and Its Application to Solving Ill-Posed Navigation Problems), St. Petersburg, 2001, 153 p. (in Russ.)
8. Stepanov M.G. *Vvedeniye v teoriyu smeshchennogo otsenivaniya parametrov dvizheniya kosmicheskikh apparatov po ogranichennym dannym* (Introduction to the Theory of Biased Estimation of Spacecraft Motion Parameters from Limited Data), St. Petersburg, 1993, 135 p. (in Russ.)
9. Sobol I.M. *Metod Monte-Karlo* (Monte Carlo Method), Moscow, 1968, 64 p. (in Russ.)
10. Aleshkin A.P., Polonchik O.L., Nevzorov V.I., Vladimirov V.V. *Radio Industry*, 2018, no. 1, pp. 57–62. (in Russ.)
11. ftp://ftp.glonass-iac.ru/SVOEVP/2018/clock/. (in Russ.)
12. ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex_clock.txt. (in Russ.)
13. Perov A.I., Kharisov V.N., ed., *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of Construction and Operation), Moscow, 2010, 800 p. (in Russ.)
14. Aoki M. *Introduction to Optimization Techniques*, NY, Macmillan, 1971.
15. Himmelblau D.M. *Applied Nonlinear Programming*, NY, McGraw-Hill, 1972.

Data on authors

- | | |
|--------------------------|---|
| Klim V. Bakurskiy | — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru |
|--------------------------|---|

- Andrey A. Makarov** — Dr. Sci., Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Timofey O. Myslivtsev** — Dr. Sci., Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Sergey V. Nikiforov** — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru

Received 22.10.21; approved after reviewing 18.01.22; accepted for publication 28.02.22.