

УДК 629.78

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Андрашитов Д.С., Гежа С.А., Филимонов А.А.

*Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого,
Балашиха, e-mail: korynd-s@yandex.ru*

В работе рассматривается актуальный вопрос повышения точности измерений на борту космических аппаратов. Необходимость вызвана отсутствием существующих средств подтверждения точности и постоянно повышающимися требованиями к функционалу создаваемых космических аппаратов. Предлагаемый подход решения данного вопроса заключается в снижении инструментальной и методической погрешности процесса измерений за счет создания электронных двойников эталонов величин на борту и учета их в действующих методиках. Современный уровень измерительной техники позволяет реализовать стандарт частоты малых габаритных размеров, что делает возможным его размещение на любого рода космическом аппарате. Таким образом, становится возможным воспроизвести единицу времени, не привязанную к ГЛОНАСС и GPS, а функциональная зависимость других физических величин от частоты косвенным методом еще и единицу длины, напряжения, сопротивления, тока и мощности. Дальнейшая передача величин от эталонов к измерительным системам и датчикам контроля технического состояния космических аппаратов осуществляется по поверочным схемам. Обработка результатов сличения с дальнейшим принятием по ним решения осуществляется на наземных комплексах управления. Данный подход позволит повысить качество измерений, надежность контроля технического состояния и передаваемой измерительной информации, а также обеспечит эталонами космические аппараты.

Ключевые слова: космический аппарат, измерительные системы, единство измерений, эталон частоты, передача единицы, техническое состояние

PROBLEM ISSUES OF INCREASING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS ONBOARD SPACE VEHICLES

Andrahitov D.S., Gezha S.A., Filimonov A.A.

*Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Balashikha,
e-mail: korynd-s@yandex.ru*

The paper considers the urgent issue of improving the accuracy of measurements on board spacecraft. The need is caused by the lack of existing means of confirming accuracy and constantly increasing requirements for the functionality of the created spacecraft. The proposed approach to solving this issue is to reduce the instrumental and methodological errors of the measurement process by creating electronic counterparts of standards of quantities on board and taking them into account in existing methods. The modern level of measurement technology allows us to implement the standard for the frequency of small overall dimensions, which makes it possible to place it on any kind of spacecraft. Thus, it becomes possible to reproduce a unit of time not tied to GLONASS and GPS, but the functional dependence of other physical quantities on frequency by an indirect method is also a unit of length, voltage, resistance, current and power. Further transmission of values from standards to measuring systems and sensors for monitoring the technical condition of spacecraft is carried out according to calibration schemes. Processing of the comparison results with further decision making is carried out on the ground control complexes. This approach will improve the quality of measurements, the reliability of monitoring the technical condition and transmitted measurement information, as well as provide spacecraft with standards.

Keywords: spacecraft, measuring systems, unity of measurements, frequency reference, unit transfer, technical condition

На протяжении нескольких десятилетий наиболее высокотехнологичной областью в машиностроении остается создание космических аппаратов (КА) и спутников. Ежегодное увеличение их числа на орбите, увеличение объема решаемых ими задач лишь подчеркивает актуальность данного направления.

Наметившаяся тенденция к снижению размеров КА не приводит к снижению числа контролируемых параметров состояния, которые в зависимости от типа исчисляются от сотен до тысяч. При этом требования к качеству измерительной информации стремительно возрастают, а средства подтверждения точности или эталоны на борту отсутствуют.

Такое противоречие приводит к проблеме обеспечения единства измерений на космических аппаратах во время полётов, продолжительность которых существенно превышает продолжительность интервалов поверки средств измерений (СИ).

За этот период метрологические характеристики используемых на борту измерительных систем и датчиков контроля технического состояния уходят от номинальных значений, а отсутствие возможности их периодической поверки (калибровки) приводит к снижению точности измерений. Решается данная проблема двумя подходами:

– классический подход, заключается в воспроизведении на борту КА единицы

времени и частоты, получаемых по средствам ГЛОНАСС, GPS и передачи ее измерительным системам и датчикам, работа которых преимущественно связана со временем и частотой, в качестве эталонной. Точность такого подхода определяется точностью стандартов частоты КА систем ГЛОНАСС и GPS и составляет порядка $1 \cdot 10^{-11}$. Недостатком данного подхода является жесткая зависимость от указанных систем, что в случае вооружённых конфликтов не позволит обеспечить заданный режим работы КА. Кроме того, факт правильного или неправильного воспроизведения принимаемой единицы времени и частоты на борту КА ничем не подтверждается, т.е. отсутствуют средства подтверждения точности [1, 2];

– предлагаемый подход заключается в размещении малогабаритного стандарта частоты на борту КА. Его роль заключается в подтверждении получаемой от ГЛОНАСС и GPS единицы величины и дальнейшей передаче измерительным системам и датчикам космического аппарата. Однако принципы работы различного рода радиоэлектронной аппаратуры основаны не только на частоте и времени, но и на других физических величинах. Что весьма реализуемо, если учесть функциональную зависимость большинства физических величин от частоты. Следовательно, косвенным методом становится возможным воспроизвести длину, напряжение, сопротивление, ток и др. величины [3].

Цель исследования: повысить точность измерений на борту космических аппаратов за счет электронных двойников эталонов, реализующих передачу единицы величины измерительным системам и датчикам контроля технического состояния.

В ходе контроля технического состояния КА проводится оценка соответствия измеряемых (контролируемых) параметров заданным значениям допустимых отклонений, при этом проводится измерение M числа физических величин посредством N измерительных систем и датчиков, характеризующих i -м набором метрологических характеристик. Нормируемые метрологические характеристики конкретных измерительных систем и датчиков и их номинальные значения N_i^n определены в паспортах.

Однако в ходе эксплуатации действительные значения метрологических характеристик измерительных систем и датчиков N_i^n уходят от номинальных N_i^n ввиду, например, воздействия низких температур, давления и других внешних факторов.

Требуется повысить точность измерений за счет оценки инструментальной и методической погрешности измерительных

систем и датчиков путем сличения с эталонным значением величины

$$\Delta = M^{\Phi} - M^{\Psi} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где M^{Φ} – фактическое значение измеряемой физической величины;

M^{Ψ} – эталонное значение физической величины, воспроизводимое цифровым двойником эталона.

При этом оценка погрешности измерений определяется множеством погрешностей оценок метрологических характеристик измерительных систем и датчиков в ходе калибровки, выраженных как

$$\Delta_N = \left\{ \begin{array}{l} \Delta_{1,1}, \Delta_{1,2}, \dots, \Delta_{1,i} \\ \Delta_{2,1}, \Delta_{2,2}, \dots, \Delta_{2,i} \\ \vdots \\ \Delta_{N,1}, \Delta_{N,2}, \dots, \Delta_{N,i} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta_{N,i}$ – погрешность оценки i -й метрологической характеристики N -го датчика, $i \neq N, M \neq N$.

Эталонное значение M^{Ψ} большинства физических величин на борту космического аппарата может быть получено косвенным методом с высокой точностью от эталона частоты и времени.

Единый эталон времени – частоты – длины

Известные научные работы [1] ведущих ученых в совокупности с тем фактом, что максимально возможной по точности для воспроизведения единицы величины в настоящее время является частота (ГЭТ 1-2018, неисключенная систематическая погрешность воспроизведения размеров единиц которого не превышает $(2-3) \cdot 10^{-14}$), позволяет предположить высокую востребованность стандарта частоты, в качестве средства подтверждения точности, на борту КА.

В работе [2] А. Голубев утверждает, что наряду с существующими стандартами частоты и времени (табл. 1) утверждение скорости света $c = 299792458$ м/с за мировую константу в 1983 г. на XVII Генеральной конференции по мерам и весам позволило дать новое определение метра – через единицу времени – и привело к возможности создания единого эталона времени – частоты – длины.

Такой подход реализуем благодаря связи между длиной, временем и частотой, основанной на соотношении

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучения стабилизированного лазера, м,
 f – его частота, Гц.

Особенностью этой идеи является то, что частоту можно измерить с погрешностью, обеспеченной существующими эталонами частоты (таблица).

Показатели точности эталонов частоты

Тип генератора	Нестабильность частоты	Соответствующий уход частоты
Рубидиевый	$5 \cdot 10^{-12}$	0,15 с за 1000 лет
Цезиевый	$3 \cdot 10^{-13}$	0,01 с за 1000 лет
Водородный	$1 \cdot 10^{-14}$	0,2 с за 1 000 000 лет

Следовательно, эталон длины, воспроизводящий метр в его новом определении (3), может быть реализован при помощи атомного (цезиевого) эталона времени и частоты, дополненного радиооптическим частотным мостом [2] или на базе разработки фемтосекундных «оптических часов», способных также служить «оптическим метром». Подобные комплексы и представляют собой единый эталон времени – частоты – длины.

Современная элементная база позволяет реализовать возможность создания малогабаритного стандарта частоты на борту КА, который в свою очередь будет использован как стандарт времени и длины. Подобные сверхминиатюрные квантовые стандарты частоты, рубидиевые, разработаны в ведущем научном институте метрологии ВНИИФТРИ и представлены на международной метрологической выставке «МетролЭкспо-2019» в мае 2019 г. Габаритные размеры нового стандарта не превышают размеров спичечного коробка (рис. 1), а низкое энергопотребление при высокой стабильности частоты создает большие перспективы для его промышленного использования. Особенность практической реализации таких размеров заключается в переходе от габаритного сверхвысокочастотного резонатора к миниатюрному лазерному диоду и ячейке с парами рубидия оригинальной конструкции.



Рис. 1. Внешний вид стандарта частоты сверхминиатюрного квантового НАП-КПН

Эталон напряжения постоянного тока

Создание отечественных сверхпроводниковых интегральных схем с переходами сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник туннельного типа, реализующего эффект Джозефсона под действием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, позволяет воспроизводить единицу электрического напряжения вплоть до 1 мВ. Подобные квантованные значения напряжения определяются частотой излучения и номером ступени и подчиняются соотношению

$$U_n = \frac{f \cdot n}{K_j}, \quad (4)$$

где f – частота СВЧ-излучения, Гц,

n – целое число,

K_j – фундаментальная константа Джозефсона, Гц · В⁻¹.

Данное соотношение позволяет сделать вывод, что точность воспроизведения величины напряжения напрямую зависит от точности воспроизведения частоты, при неизменном значении других функциональных составляющих, входящих в выражение (4).

Существующие сверхпроводниковые интегральные схемы, рассчитанные для воспроизведения 1 В, требуют 1500–2000 переходов и представляют собой кристаллы размером не более 15х6 мм² и массой 1,5 г (рис. 2), что подразумевает их эффективное исполнение на борту КА.

Квантовый эталон сопротивления

Исследования [4, 5] квантового эффекта Холла, основанного на использовании явления сверхпроводимости, позволяют определить электрическое сопротивление через

$$R = n \left(\frac{h}{e^2} \right), \quad (5)$$

где h – постоянная Планка, связывает величину энергии кванта электромагнитного излучения с его частотой, Дж · с;

e – заряд электрона, Кл.

Рассмотренный эффект (5) получил название холловский контакт, который реализуем при условии охлаждения структуры металл – окисел – полупроводник до температуры в 4,2 К под влиянием сильного магнитного поля с индикацией (6–12) Тл.

В настоящее время размер холловского сопротивления (константа К. Клитцинга) $R = 25812,807$ Ом (5) воспроизведен с погрешностью не менее 10⁻⁸. Дальнейшие исследования в этом направлении предрекают оценку отношения h/e^2 с погрешностью до 10⁻²⁰. Таким образом, на порядок уменьшится и погрешность измерения единицы электрического сопротивления R .

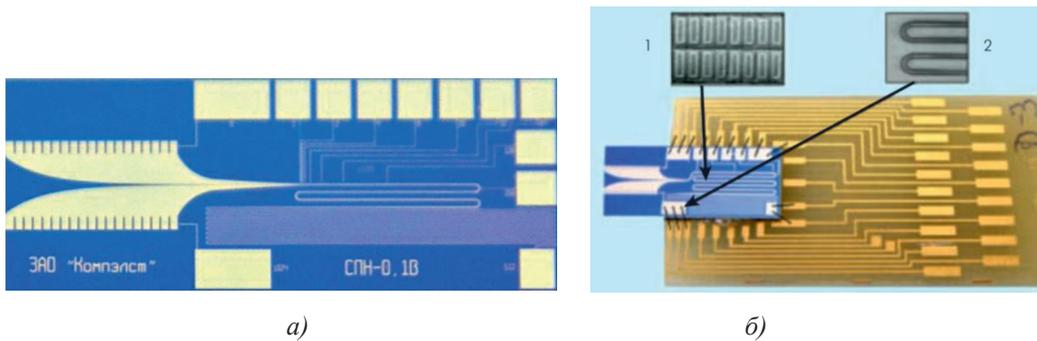


Рис. 2. Реализация кристаллов сверхпроводниковых интегральных схем программируемых эталонов вольты на основе джозефсоновских переходов: а) на 0,1 В (8192 перехода); б) разваренная на печатную плату: 1 – фрагмент цепочки джозефсоновских переходов; 2 – фрагмент сверхпроводниковой линии нагрузки

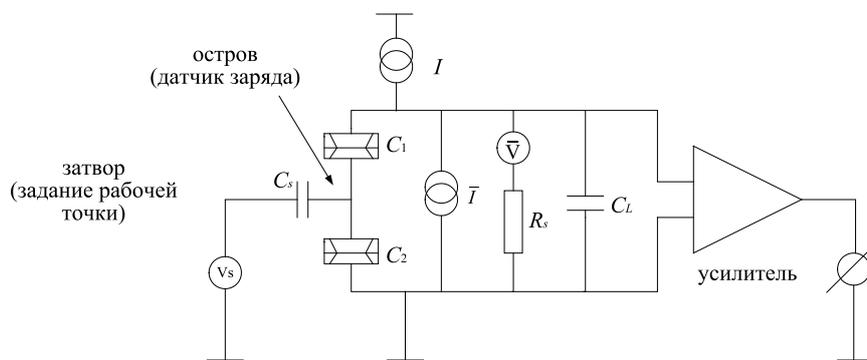


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема электрометров на постоянном токе на основе шунтированного блоховского транзистора

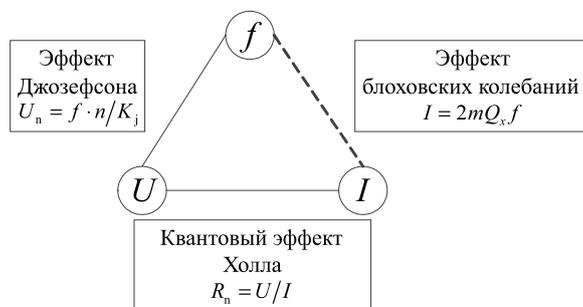


Рис. 4. Квантовый метрологический треугольник, вершинами которого являются основные электрические величины: напряжение, ток и частота

Работы по воспроизведению размера единицы электрического сопротивления с помощью квантового эффекта Холла со средним квадратическим отклонением менее 10^{-8} ведутся на экспериментальной установке ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, результаты обнародованы на сайте журнала «Контрольно-измерительные системы и приборы». Данная установка, воспроизводящая размер Ома, уже включена в состав государственного эталона электрического сопротивления. Другой составной частью эталона является группа из 10 ман-

ганиновых катушек сопротивления с номинальным значением 1 Ом, обеспечивающая воспроизведение Ома со средним квадратическим отклонением результата измерений $3 \cdot 10^{-8}$ (по десяти независимым измерениям). Неисключенная составляющая систематической погрешности не превышает $3 \cdot 10^{-7}$.

А. Зорин проанализировал блоховский электрометр постоянного тока (рис. 3) и предложил квантовый метрологический треугольник, демонстрирующий взаимосвязь напряжения, тока и частоты (рис. 4).

Стороны треугольника символически обозначают линейные связи, описываемые фундаментальными законами природы.

Связь реализованных стандартов на борту КА приведена на рис. 5. Их использование существенно увеличит число воспроизводимых на борту единиц величин с высокой точностью и создаст парк эталонов для калибровки измерительных систем и датчиков [3].

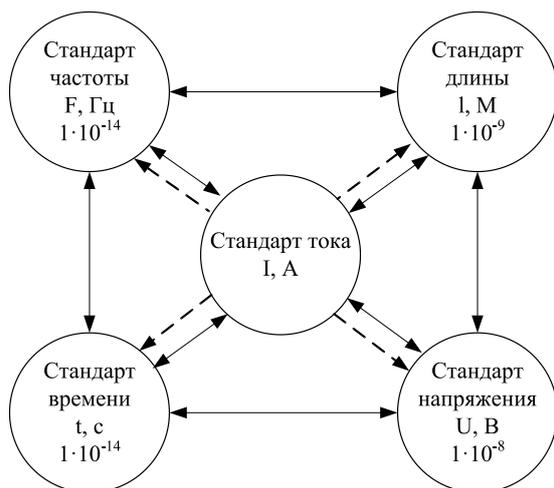


Рис. 5. Взаимосвязь воспроизведения частоты с другими физическими величинами

Заключение

Проведенный анализ показал, что измерительные системы и датчики в процессе эксплуатации КА в подавляющем большинстве случаев не подвергаются калибровке, как с организационной, так и с технической точек зрения.

1. Создание и размещение на борту КА высокоточного малогабаритного стандарта частоты позволит воспроизводить частоту и время с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-14}$, что позволяет проводить поверку СИ и калибровку датчиков с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-12}$.

2. Зависимость длины волны, при утвержденном значении скорости света, от частоты позволяет создать эталон воспроизведения длины погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-9}$, что позволяет проводить поверку СИ

и калибровку датчиков с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-7}$.

3. Применение стандарта частоты в совокупности со сверхпроводниковыми интегральными схемами малых размеров может быть использовано для воспроизведения единицы напряжения с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-8}$, что позволяет проводить поверку СИ и калибровку датчиков с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-6}$.

4. Квантовый эталон сопротивления на основе эффекта Холла обладает средним квадратическим отклонением менее 10^{-8} , что позволяет также использовать его для проверки СИ и калибровки датчиков с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-6}$.

5. Применение эталона частоты на борту КА в совокупности с системами ГЛОНАСС и GPS позволит создать групповой эталон [5–7].

Список литературы

1. Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А.Н., Краснополин И.Я. Эталон напряжения постоянного тока. Сверхпроводниковая ИС на основе переходов Джозефсона // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 6. С. 90–93.
2. Голубев А. В погоне за точностью: единый эталон времени – частоты – длины // Наука и жизнь. 2009. № 12. С. 93–99.
3. Шаврин В.В., Конаков А.С., Тисленко В.И. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРа. 2012. № 1 (25). С. 265–269.
4. Каверин А.М. ВНИИФТРИ предлагает шаги по увеличению сроков поверки навигационного оборудования // Вестник ГЛОНАСС, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/vniiiftri-predlagaet-shagi-pouvelicheniyu-srokov-poverki-navigatsionnogo-oborudovaniya.html> (дата обращения: 18.04.2020).
5. Кутовой Д.А., Перепелкина С.Ю., Федотов А.А. Оценка точностных характеристик бесплатформенного инерциального блока по ограниченному набору ориентаций и переходу между ними // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 11–26.
6. Васильев А.И. Калибровка съемочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 203–214.
7. Sedelnikov A., Khnyryova E., Ivashova T. Checking the correct operation of main measuring instruments on the flight model and prototype of AIST small spacecraft. MATEC Web of Conferences 234, 2018. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823401007.html> (date of access: 18.04.2020).