

05.11.15

# МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ПЛОСКОГО УГЛА ОТ РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ ВТОРОГО РАЗРЯДА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ К УГЛОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А.А. Фролов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Московская область, Солнечногорский район, п/о Менделеево

В статье рассмотрены новые методы передачи единицы величины плоского угла угломерной навигационной аппаратуре от тахеометров и имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Целью работы является обеспечение условий для массового применения угломерной навигационной аппаратуры в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений в интересах социально-экономического развития страны. Показана возможность использования методов при совершенствовании Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений. Предложенные методы позволяют проводить периодический контроль точностных характеристик угломерной навигационной аппаратуры в рабочих диапазонах скоростей объектов размещения аппаратуры, а также без демонтажа аппаратуры с объектов эксплуатации

*Ключевые слова:* методы передачи единицы плоского угла, поверочная схема, тахеометры, комплексы средств измерений, имитаторы навигационных сигналов, погрешность

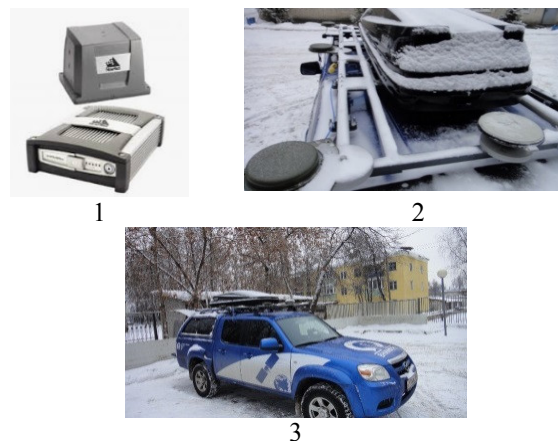
## ВВЕДЕНИЕ

Современные задачи, решаемые подвижными объектами на поверхности Земли, акватории Мирового океана, воздушном и околоземном космическом пространстве, такие как построение цифровых моделей рельефа земной поверхности, ориентация антенн систем спутниковой связи и др., предъявляют все более высокие требования к точности информации о пространственной ориентации.

В последнее время инерциальную навигационную аппаратуру (ИНА), как средство, обеспечивающее потребителя информацией в том числе о пространственной ориентации, результативно заменяет и (или) дополняет аппаратура определения углов пространственной ориентации по сигналам навигационных космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС и других ГНСС (GPS, GALILEO, BEIDOU) и комплексированная ИНА/ГНСС аппаратура.

Для угломерной навигационной аппаратуры (УНАП), применяемой в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, в соответствии с Государственной поверочной схемой для координатно-временных измерений [1] передача единицы плоского угла к УНАП осуществляется от рабочего эталона координат местоположения первого разряда (РЭ первого разряда) (составной части РЭ первого разряда - 2-х антенной комплексированной

ИНА/ГНСС навигационной системы, установленной на мобильном шасси) (рис. 1).



1 - ИНА/ГНСС – аппаратура; 2- антенный пост; 3 – мобильное шасси

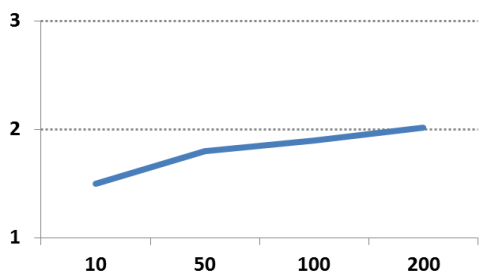
Рис. 1. Составная часть РЭ первого разряда для передачи единицы плоского угла

Обзор научных статей конференции ION (The Institute of Navigation, США) [7] показал, что все оценивания точности УНАП (ИНА/ГНСС) основаны на сравнении с данными от эталонных устройств при натуральных испытаниях с неповторяемыми траекториями. То есть применяемым в РЭ первого разряда методом.

Для исходных данных, указанных в таблице 1, на РЭ первого разряда может быть поверено не более 200 рабочих средств измерений в год (рис. 2)[2]. При этом, УНАП должна быть демонтирована с объекта размещения (так как при проведении поверки антенны поверяемой УНАП должны быть размещены на посадочных площадках антенного поста составной части РЭ).

Табл. 1. Исходные данные для расчета количества поверяемых средств измерений на РЭ в год

Межповерочный интервал УНАП	1 год
Доля времени использования рабочего эталона для поверки	0,7
Время, затраченное на поверку одного экземпляра УНАП	1 день
Число рабочих дней в году	250
Число одновременно поверяемых УНАП на рабочем эталоне	1 шт



ось абсцисс – количество поверяемых УНАП на РЭ первого разряда в год; ось ординат – количество требуемых для поверки эталонов

Рис. 2. Расчет числа требуемого для поверки УНАП РЭ

Таким образом, возникает противоречие между стремительно растущим парком УНАП и возможностями РЭ первого разряда по метрологическому обеспечению этого парка. Основная задача исследования, обеспечивающая достижение поставленной цели исследования – разработка новых методов передачи единицы величины (плоского угла) от рабочих эталонов Государственной поверочной схемой для координатно-временных измерений к УНАП.

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Устранить указанное противоречие возможно за счет использования для передачи единицы плоского угла к УНАП рабочих эталонов второго разряда – тахеометров, имитаторов навигационных сигналов, комплексов средств измерений, содержащих имитаторы навигационных сигналов (рис. 3), суммарный парк которых оценивается в несколько десятков средств измерений.

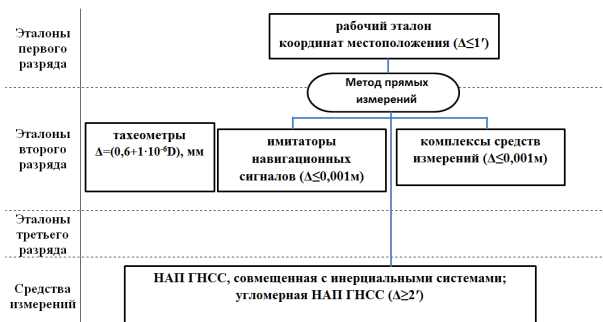


Рис. 3. Фрагмент действующей государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений

Для использования тахеометров в качестве средств передачи единицы плоского угла к УНАП необходима разработка метода расчета действительных значений углов курса, крена и тангажа из результатов измерений (наклонных дальностей и плоских углов) тахеометра. Для передачи единицы плоского угла от имитаторов сигналов ГНСС к УНАП возможно использование только специализированных модификаций имитаторов сигналов – имитаторов сигналов с несколькими радиочастотными выходами. Для оценки точностных характеристик УНАП с использованием имитатора необходимо определить погрешности имитатора сигналов ГНСС в части воспроизведения углов пространственной ориентации объекта. При этом необходимо обеспечить определение (формирование) действительных значений углов пространственной ориентации с погрешностью (при доверительной вероятности 0,997) не более 1'.

Метод определения действительных значений углов пространственной ориентации с использованием тахеометра представлен в [3], [4]. Итоговые формулы расчета углов пространственной ориентации из результатов измерений тахеометра:

- угол курса:

$$\alpha = 2\pi - A_2 + A_N + \arcsin \left( \frac{R_1 \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right)$$

- угол крена:

$$\gamma = \arcsin \left( \frac{R_3 \sin \Gamma_3 - R_4 \sin \Gamma_4}{L_1 \cos \beta} \right)$$

- угол тангажа:

$$\beta = \arcsin \left( \frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos \gamma} \right),$$

где R<sub>1-4</sub> – наклонные дальности до марок отражательных, закрепляющих строительные оси объекта (или измерительные оси УНАП), измеренные тахеометром, м; A<sub>1,2</sub>– углы в горизонтальной плоскости, измеренные тахеометром, рад; Γ<sub>1-4</sub> – углы в вертикальной

плоскости, измеренные тахеометром, рад;  $A_N$  – угол в горизонтальной плоскости между направлением на север и направлением на которое инициализирован тахеометр (азимут), рад;  $L$  ( $L_1$ ) – расстояние между марками отражательными, м.

Расчет погрешности (при доверительной вероятности 0,997) косвенных измерений определения углов пространственной ориентации представлен на рис.4 и рис. 5 (при расчетах принято  $L = 2$  м, предел погрешности измерения действительного значения азимута 3").

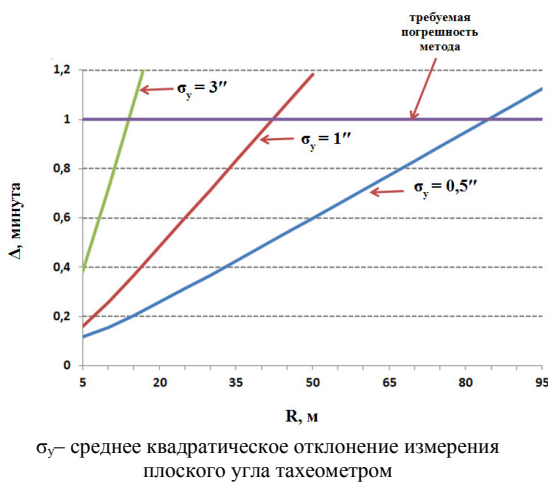


Рис. 4. Расчет погрешности определения угла курса разработанным методом

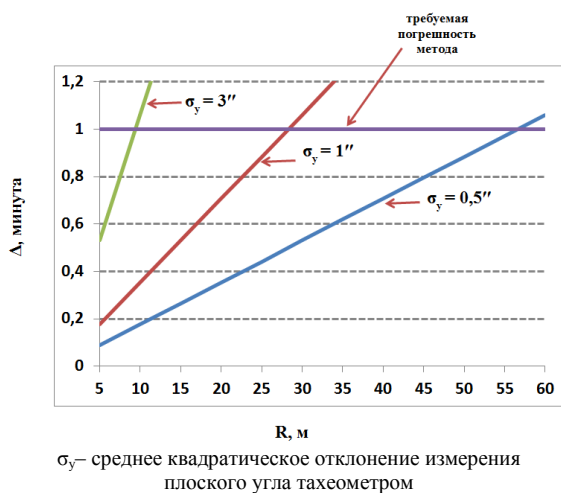


Рис. 5. Расчет погрешности определения углов крена и тангажа разработанным методом

Как видно из представленных графиков, для обеспечения погрешности (при доверительной вероятности 0,997) определения действительных значений углов курса, крена и тангажа не более 1' разработанным методом, необходимо использовать тахеометр с случайной погрешностью измерения плоского угла (среднее квадратическое отклонение) не более 3", при расстоянии между тахеометром и объектом размещения УНАП не более 12 м.

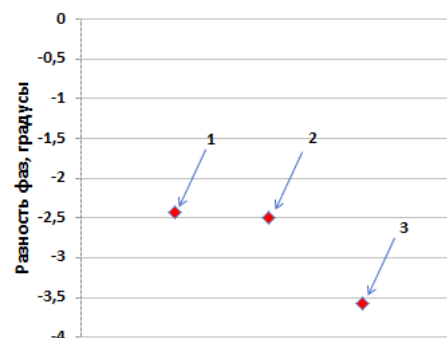
Формула расчета предельной погрешности формирования имитатором сигналов глобальных навигационных спутниковых систем углов пространственной ориентации представлена в [5]. В статье обоснована зависимость погрешности формирования углов пространственной ориентации имитатором сигналов ГНСС от имитируемого расстояния между объектами ( $L$ ), дискрета перестройки фаз несущей радионавигационного сигнала ( $\rho$ ) и случайной погрешности формирования беззапросной дальности по фазе несущей радионавигационного сигнала ( $\sigma_{pd}$ ):

$$\delta_{\alpha\beta\gamma} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot ADOP \cdot \left( \frac{2k \cdot \rho}{L} + 3 \frac{\sigma_{pd} \sqrt{2}}{L} \right),$$

где  $\lambda$  – длина волны несущей сигнала навигационного космического аппарата; ADOP (Attitude Dilution Of Precision) – фактор точности пространственной ориентации;  $k$  – коэффициент пропорциональности (выбирается из ряда  $k = 0; 1; 1,5; 2 \dots$ ).

На практике для определения фактической погрешности формирования имитатором сигналов глобальных навигационных спутниковых систем углов пространственной ориентации, необходимы прямые измерения разности фаз несущих сигнала навигационного космического аппарата, имитируемого с двух разных радиочастотных выходов имитатора сигналов ГНСС. Такие измерения с нормированной точностью могут быть проведены, например, с использованием широкополосных цифровых осциллографов. Метод расчета разности фаз между двумя цифровыми выборками гармонических сигналов описан в [6].

На рис. 6 показаны результаты эксперимента по измерению разности фаз несущих колебаний для сигнала навигационного космического аппарата ГЛОНАСС в частотном диапазоне L1 (частотная литера -6), имитируемого с двух разных (РЧ1 и РЧ2) радиочастотных выходов имитатора сигналов ГНСС (использовался цифровой осциллограф с полосой пропускания 40 ГГц).



- 1 – разность фаз между каналом 1 РЧ1 и каналом 49 РЧ2;
- 2 – разность фаз между каналом 8 РЧ1 и каналом 56 РЧ2;
- 3 – разность фаз между каналом 16 РЧ1 и каналом 64 РЧ2.

Рис. 6. Погрешность измерения разности фаз несущих колебаний сигнала навигационного космического аппарата

Полученные экспериментальным путем погрешности разностей фаз не противоречат теоретическим расчетам для данного типа имитатора сигналов

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены два новых метода передачи единицы величины (плоского угла) от рабочих эталонов второго разряда Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений. Разработанные предложения могут быть использованы при очередном пересмотре государственной поверочной схемы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приказ Росстандарта № 2831 от 29.12.2018 г «Об утверждении Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений»
2. МИ 2230-92. Методика количественного обоснования поверочных схем при их разработке [Текст]. – Введ. 30.10.1992. – С-Пб.: НПО «ВНИИМ им. Д.Н. Менделеева», 1992.
3. Фролов А.А. Разработка метода начальной выставки угломерной навигационной аппаратуры ГЛОНАСС на объектах размещения [Текст] /А.А. Фролов // III Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке». – 2015. -С. 192-196.
4. Фролов А.А. Юстировка угломерной навигационной аппаратуры ГЛОНАСС на объектах размещения [Текст] /А.А. Фролов // Радионавигационные технологии. Сб. статей под ред. А.И. Перова. – 2016. - Вып. 5. - С. 112-114.
5. Фролов А.А. Метод определения точностных характеристик имитатора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, предназначенного для испытаний угломерной навигационной аппаратуры потребителей [Текст] /А.А. Фролов // Вестник метролога. – 2018. - №2. - С. 19-22.
6. Воронов А.С. Измерение разности фаз сигналов [Текст] /А.С. Воронов // Горизонты образования. – 2007. - №9.
7. Инчагов Ю.М., Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Методика оценивания погрешностей инерциально-спутниковых навигационных систем [Текст] / Инчагов Ю.М. // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2015. -№ 11, ч. 2. – С. 197-208.

*Фролов Анатолий Александрович – начальник лаборатории метрологического обеспечения радиотехнических измерений научно-исследовательского отделения разработки и эксплуатации средств метрологического обеспечения координатно-временных и навигационных систем (НИО-8) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», тел. (495)5266379, e-mail: frolov\_aa@vniifiri.ru.*

# TRANSMISSION METHODS OF PLANE ANGLE UNIT FROM THE SECOND-CLASS WORKING STANDARDS OF STATE VERIFICATION SCHEDULE FOR COORDINATE - TEMPORAL MEASUREMENTS TO ATTITUDE REFERENCE GNSS RECEIVERS

**A.A. Frolov**

*Federal State Unitary Enterprise «Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering», Mendeleevo Moscow region*

**Abstract** –The article considers new methods for transmitting a unit of plane angle by attitude reference GNSS-receivers from tacheometer and GNSS-simulators of global satellite navigation systems. The aim of the work is to provide conditions for the mass use of attitude reference GNSS-receivers in the field of State regulation of ensuring the unity of measurements in the interests of the socio-economic development of the country. The possibility of using methods for improving the State hierarchy scheme for coordinate-temporal measuring means is shown. The proposed methods allow for periodic verifications of the accuracy characteristics of attitude reference GNSS-receivers in the working speed ranges of equipment placement objects, as well as without dismantling receivers from operating objects.

*Index terms:* transmission methods of plane angle unit, hierarchy scheme, tacheometer, complexes of measuring instruments, GNSS simulators, accuracy

## REFERENCES

1. Order of Rosstandart no. 2831 dated 12.29.2018 "On approval of the State hierarchy scheme for coordinate-temporal measuring means"
2. MI 2230-92. Methods of quantitative substantiation of hierarchy scheme for their development, State system for ensuring the uniformity of measurements, 1992.
3. Frolov A.A. Methods of GNSS attitude navigation receivers initial alignment on the customer's objects, 3-rd Scientific-practical conference of young scientists, graduate students and specialists "Metrology in the XXI century", pp. 192 – 196, 2015.
4. Frolov A.A. Initial alignment of GNSS attitude navigation receivers on user equipment, Radio navigation technology. Digest of articles, no. 5, pp. 112-114, 2016.
5. Frolov A.A. Definition of precision characteristics of GNSS simulator for attitude reference receivers, Research magazine «Vestnik Metrologa». no. 2, pp. 19-22, 2018.
6. Voronov A.S. Signal phase difference measurements, Education horizons, no. 9, 2007.
7. Y.M. Inchagov, A.Y. Shatilov, I.A. Nagin. ISNS errore estimation methodology // Izvestiya TulGU. Technical sciences. - 2015. - no. 11, part 2. – pp. 197 – 208.

*Frolov Anatoly Aleksandrovich – laboratory head of research department of development and operation of means for metrological support of time positioning and navigation systems (NIO-8) of Federal State Unitary Enterprise «Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering», (495)5266379, e-mail: frolov\_aa@vniiftri.ru.*