

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2009

№ 11 ноябрь

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издается
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических
и радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Уральский
научно-исследовательский
институт метрологии»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандарт
метрологии и оценке соо

Метрологическая академ

К ЮБИЛЕЮ ИНСТИТУТА

- А. А. Мамонов, Э. А. Абросимов.** Метрологическая база СНИИМ в области измерений параметров электрических цепей на переменном токе 3
- Э. А. Абросимов, О. Я. Малошенко, И. И. Расташанская, Ю. Хорски, Я. Хорска, П. Хорски.** Международные сличения высокочастотных эталонов электрической емкости 7
- Ю. А. Пальчун, В. И. Сединин, С. А. Гончаров.** Математический анализ полувольтового балансного трансформатора СВЧ-диапазона 9
- А. А. Коллер, И. Г. Цибин, В. Я. Черепанов.** Методы испытаний тензорезисторных датчиков с учетом условий их работы в большегрузных весах 10
- В. В. Копытов, В. В. Щербаков, А. Н. Носов, С. А. Загарских, Т. В. Набока.** Метрологическое обеспечение дорожных курвиметров и путеизмерительных устройств 14

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

- А. Г. Данелян, Д. И. Гарибашвили, Р. Р. Канкия, С. А. Мкртычян, С. В. Шоташвили.** О некоторых возможностях улучшения метрологической прослеживаемости линейных измерений в нанометровом диапазоне 17

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. М. Денисов.** Исследование погрешности определения углового положения космического аппарата при лазерной локации 22

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Р. М. Воронин, В. Н. Гаврилов, Ю. М. Грязнов, С. А. Кислицин, А. В. Махалов, П. Д. Мусеев, Н. М. Сонин, А. А. Частов.** Автоматизированное рабочее место поверки средств измерений параметров волоконно-оптических систем передачи ОКБ-13 25
- В. П. Солдатов.** Способ уменьшения погрешностей измерений координат объектов вследствие дискретизации сигналов в оптико-электронных приборах 30

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- И. Ю. Блинов, В. Н. Федотов.** Метрологические аспекты создания перспективной системы координатно-временного и навигационного обеспечения России 33
- И. А. Друга.** Влияние полосы пропускания частотных компараторов на погрешность измерений нестабильности частоты стандартов частоты и времени 36

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. М. Шапаронов, О. В. Карагиоз.** Избыточный шум проводимости электролитических сред в условиях электрического равновесия 39
- В. Г. Максименко, В. И. Нарышкин, А. В. Гатилов.** Определение положения подземного трубопровода по результатам измерения напряженности его магнитного поля 42

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Ю. В. Белова, И. Н. Малышев, С. М. Никулин.** Калибровка векторных анализаторов цепей в коаксиальных каналах с метрической резьбой 46

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Б. Родин.** Применение синхронного детектирования ультразвуковых сигналов для повышения точности измерения толщины изделий из сложноструктурных материалов 49
- В. К. Качанов, С. Л. Авраменко, Р. В. Концов.** Мультипликативно-корреляционный метод измерения скорости распространения акустических колебаний в крупногабаритных изделиях из бетона 52
- Д. В. Тимофеев.** Способ измерения скорости ультразвуковых продольных волн в крупногабаритных изделиях из бетона 54

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- В. П. Чечев.** Методы контроля согласованности наборов рекомендуемых данных для характеристик распада радиоактивных нуклидов 56

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. В. Лопарев, П. С. Игнатьев, К. В. Индукаев, П. А. Осипов, И. Н. Мазалов, А. В. Козырев.** Высокоскоростной модуляционный интерференционный микроскоп для медико-биологических исследований 60

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Г. Лисичкин.** Повышение точности фазовых измерений в приборах контроля влажности 65

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

- О. Н. Величко.** Прослеживаемость результатов измерений на разных уровнях метрологических работ 69

Главный редактор
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

В. С. Александров,
В. И. Белоцерковский,
Ю. А. Богомолов,
Ю. И. Брегадзе,
В. А. Вышлов, В. С. Иванов,
Л. К. Исаев, Г. И. Кавалеров,
А. Д. Козлов, С. А. Кононогов,
А. Ф. Котюк, П. А. Красовский,
А. Ю. Кузин,
В. М. Лахов
(зам. гл. редактора),
В. В. Леонов, В. Ф. Матвейчук,
А. И. Механиков,
В. В. Окрепилов, Ю. В. Тарбеев,
О. Е. Фомкина
(зам. гл. редактора),
Н. И. Ханов, В. Н. Храменков,
И. А. Шайко

Журнал переводится
на английский язык
под названием
«MEASUREMENT TECHNIQUES»
издательством Springer
www.springer.com/11018

Технический редактор **Г. А. Теребинкина**
Корректор **Е. Д. Дульнева**

Сдано в набор 02.10.2009. Подписано
в печать 10.11.2009. Формат 60×90^{1/8}. Бумага
офсетная. Печать офсетная. Усл. п. л. 9,0.
Уч.-изд. л. 10,60. Тир. 603 экз. Зак. 2031.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-21572
от 15.07.2005
Адрес редакции: 105062 Москва, Лялин пер., 6,
тел. 917-27-76;
Почтовый адрес: 123995 Москва, Гранатный пер., 4
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
e-mail: izmi@gostinfo.ru; www.gostinfo.ru

Калужская типография стандартов,
248021 Калуга, ул. Московская, 256

© Измерительная техника, 2009

ON INSTITUTE ANNIVERSARY

- A. A. Mamonov, E. A. Abrosimov. Metrological base of the «Siberian scientific research institute of metrology» in the field of the measurement of electric circuits parameters 3
E. A. Abrosimov, O. Ya. Maloshenko, I. I. Rastashanskaja, Yu. Horsky, Ya. Horska, P. Horsky. The international comparisons high-frequency standards of electrical capacitance 7
Yu. A. Palchun, V. I. Sedinin, S. A. Goncharov. Mathematical analysis of balun transformer UHF range 9
A. A. Koller, I. G. Tsibin, V. Ya. Cherepanov. State of question about the methods of tests of load cells taking into account the features of their work in composition weighing instrument 10
V. V. Kopytov, V. V. Shherbakov, A. N. Nosov, S. A. Zagarskikh, T. V. Naboka. Metrological assurance road curvimeter and track measuring devices 14

NANOMETROLOGY

- A. G. Danelian, D. I. Garibashvili, R. R. Kankia, C. A. Mkrtychyan, S. V. Shotashvili. On certain possibilities of linear measurements metrological traceability advancing in nanometer range 17

LINEAR AND ANGULAR MEASUREMENTS

- M. M. Denisov. Investigation space craft angular position determination error at laser location 22

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- R. M. Voronin, V. N. Gavrilov, Yu. M. Gryaznov, S. A. Kislitcin, A. V. Makhalov, P. D. Moiseev, N. M. Sonin, A. A. Chastov. The OK6-13 automatic work station for testing of optical-fiber communication parameter measurement equipment 25
V. P. Soldatov. The method for decrease of measurement errors of objects coordinates due discrete sampling of signals in electro-optical devices 30

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

- I. Yu. Blinov, V. N. Fedotov. Metrological aspects of perspective system of coordinate-time and navigating maintenance Russia 33
I. A. Driga. Influence of a pass-band of frequency comparators on an error of measurements of instability of frequency of standards of frequency and time 36

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- V. M. Shakhparonov, O. V. Karagioz. Excess noise of electrolytes conductivity in the conditions of electric equilibrium 39
V. G. Maksimenko, V. I. Naryshkin, A. V. Gatilov. Underground pipeline position defined by its magnetic field 42

RADIO MEASUREMENTS

- Yu. V. Belova, I. N. Malyshev, S. M. Nikulin. Complex chain analyzers calibration in coaxial metric ports 46

ACOUSTIC MEASUREMENTS

- A. B. Rodin. Applications of ultrasonic synchronous detection for increase the precision of measuring product thickness from complex structural materials 49
V. K. Kachanov, S. I. Avramenko, R. V. Kontsov. Multiplicative-correlative method of speed measurement of acoustic waves in large-sized concrete products 52
D. V. Timofeyev. Technique of speed measurement of ultrasonic longitude waves in large-sized concrete product 54

IONIZING RADIATION MEASUREMENTS

- V. P. Chechev. Consistency control methods of recommended data sets for radionuclides decay characteristics 56

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

- A. V. Lopatin, P. S. Ignatyev, K. V. Indukaev, P. A. Osipov, I. N. Mazalov, A. V. Kozyrev. High-speed modulation interference microscope for biomedical research 60

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

- V. G. Lisichkin. Precisions increase of phase measurements in devices of water content control 65

INTERNATIONAL COLABORATION

- O. N. Velichko. Traceability of measurements results on different levels of metrological works 69

измерений, важность которых указана в [2, 3]. Прослеживаемость измерений, проводимых в нанометровой области, обеспечивает их точность и воспроизводимость. При этом частота стандарта частоты (как и эталонные интервалы времени) может быть передана через каналы связи. Предложенный метод позволяет поддерживать одноступенчатую связь любых удаленных средств измерений и систем с первичным стандартом частоты.

Описанный метод задания (или измерения) изменения длины Δl контура задержки ГОМ дает возможность по двум частотам (при известном значении скорости света c) с наивысшей точностью задавать (или измерять) изменение периода повторения генерируемых импульсов ГОМ. Это изменение периода, в свою очередь, равняется половине времени прохождения со скоростью света расстояния, равного задаваемой (измеряемой) длине, связанной с ее единицей — метром, согласно определению единицы длины, принятому

в 1983 г. 17-й Генеральной Конференцией по мерам и весам.

Литература

1. Дарзбек С. А. и др. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений // Тр. ИОФ им. А. М. Прохорова РАН. — 2006. — Т. 62. — С. 14.
2. Постек М. Т. Метрология в нанометровом диапазоне // Вестник технического регулирования. — 2007. — № 7 (44). — С. 8; Postek M. T. Nanometer-Scale Metrology // Proc. SPIE. — 2002. — V. 4608. — P. 84.
3. Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А. Нанотехнология и нанометрология // Тр. ИОФ им. А. М. Прохорова РАН. — 2006. — Т. 62. — С. 3.
4. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света / Пер. с англ. — М.: Мир, 1988.

Дата принятия 04.06.2009 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.5.08:530.12

Исследование погрешности определения углового положения космического аппарата при лазерной локации

М. М. ДЕНИСОВ

Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва, Россия, e-mail: pm@mati.ru

Проведено моделирование угловых измерений при лазерной локации космических аппаратов с учетом влияния вращения Земли. Показано, что это влияние приводит к появлению угла между направлением оси телескопа лазерной станции в момент излучения светового импульса и направлением на истинное положение космического аппарата в момент отражения от него этого импульса.

Ключевые слова: лазерная локация, вращение Земли, угловое искажение, общая теория относительности.

The modelling of Earth rotation influence on angular measurements accuracy at laser location of spacecrafts is carried out. It is shown, that this influence leads to appearance of an angle between the direction of telescope axis at the moment of light pulse emission and the direction on the true position of spacecraft at the moment of this pulse reflection from spacecraft.

Key words: laser location, Earth rotation, angular aberration, general theory of relativity.

В последнее время для высокоточного контроля элементов орбит космических аппаратов все чаще стала применяться лазерная локация. В отличие от радиолокационных станций лазерные станции излучают электромагнитные импульсы с очень узкой диаграммой направленности — с расходимостью порядка нескольких угловых секунд. Это обстоятельство требует очень точной системы указания целей, так как в противном случае лазерный импульс пройдет в стороне от космического аппарата и не попадет на установленные на нем ретрорефлекторы.

Обычно при проведении лазерной локации и при обработке полученных данных неявно предполагают, что световые лучи, выходящие из телескопа лазерной станции и входящие в него, являются прямыми линиями. Однако телескоп лазерной станции находится в слабонеинерциальной системе отсчета, связанной с вращающейся Землей. По терминологии Эйнштейна [1], поля инерции неинерциальных систем отсчета являются гравитационными полями частного вида. Поэтому следует ожидать, что при проведении лазерной локации в неинерциальных системах отсчета с неко-

того уровня точности измерений будут проявляться эффекты общей теории относительности: искривление лучей, смещение частоты и изменение состояния поляризации лазерного излучения. Однако из-за малого ускорения, которое может быть создано в земных условиях и условиях спутникового лазерного эксперимента, эти эффекты малы.

Как показано в [2], лучи, выходящие из лазерной станции, являются кривыми линиями относительно координатного базиса, начало отсчета которого закреплено на поверхности Земли в точке, где находится эта станция. В случае локации геостационарных космических аппаратов угловые искажения, вызываемые искривлением лазерных лучей, могут достигать 3,5" — величины, в несколько раз превышающей точность измерения углов при лазерной локации (0,5" согласно [3]).

Поэтому представляется актуальной задача разработки математических моделей прецизионных систем измерения угловых положений космических аппаратов при их лазерной локации, анализ их предсказаний для оценки погрешностей, вносимых в эти измерения различными физическими факторами, всегда присутствующими при проведении сеансов в реальных условиях.

В качестве первого шага на пути к решению этой задачи исследуем погрешность определения углового положения космического аппарата, возникающую из-за неинерциальности лазерной станции, находящейся на поверхности вращающейся Земли.

Постановка задачи. Предположим, что на поверхности Земли в точке со сферическими координатами θ_0 и φ_0 расположена лазерная станция. Пусть в момент времени $t = t_1$ она излучает одиночный световой импульс в направлении космического аппарата, который в некоторый момент времени $t = t_2$ отражается от ретрорефлекторов этого аппарата. Если бы Земля не вращалась, то лучи, по которым распространяются электромагнитные импульсы, были бы прямыми линиями, и направление оси телескопа лазерной станции в момент излучения импульса совпадало бы с угловым положением космического аппарата на небесной сфере в момент времени $t = t_2$. Однако из-за вращения Земли лучи являются кривыми линиями. Поэтому между осью телескопа станции в момент излучения светового импульса и направлением на истинное положение космического аппарата на небесной сфере в момент времени $t = t_2$ отражения от него импульса будет существовать некоторый угол, который будет вносить погрешность в определение углового положения космического аппарата.

Вычислим значение этой погрешности измерений, т.е. угол между направлением оси телескопа лазерной станции в момент излучения импульса $t = t_1$ и направлением на истинное положение космического аппарата на небесной сфере в момент времени $t = t_2$. Для большей наглядности расчетов ограничимся только случаем круговых орбит космических аппаратов, позволяющим получать результат в аналитическом виде, без использования численных расчетов.

Эти вычисления удобно проводить в топоцентрической системе отсчета, начало которой совмещено с лазерной станцией, ось Z направлена вдоль местной вертикали, ось X — по касательной к меридиану, а ось Y — по касательной к параллели.

Закон движения лазерного импульса можно найти, если решить уравнения общей теории относительности [4] для изотропного геодезического движения:

$$\frac{dK^n}{d\sigma} + \Gamma_{pm}^n K^p K^m = 0, \quad g_{nm} K^n K^m = 0,$$

где σ — некоторый аффинный параметр; $K^i = dx^i / d\sigma$ — четырехвектор, касательный к изотропной геодезической линии.

В топоцентрической системе отсчета решение этих уравнений для семейства лучей, выходящих из лазерной станции при $t = t_1$, имеет вид

$$\begin{aligned} x_L(t) &= R_0 \sin \theta_0 \cos \theta_0 [\cos \Omega (t - t_1) - 1] + \\ &+ c(t - t_1) \{ \cos [\Omega (t - t_1) + \varphi_0 - \Phi] \sin \Theta \cos \theta_0 - \cos \Theta \sin \theta_0 \}; \\ y_L(t) &= -R_0 \sin \theta_0 \sin \Omega (t - t_1) - \\ &- c(t - t_1) \sin [\Omega (t - t_1) + \varphi_0 - \Phi] \sin \Theta; \\ z_L(t) &= R_0 \sin^2 \theta_0 [\cos \Omega (t - t_1) - 1] + \\ &+ c(t - t_1) \{ \cos [\Omega (t - t_1) + \varphi_0 - \Phi] \sin \Theta \sin \theta_0 + \cos \Theta \cos \theta_0 \}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Ω — частота вращения Земли; Θ , Φ — постоянные интегрирования, разным значениям которых соответствуют разные лучи рассматриваемого семейства.

Координаты x_S , y_S , z_S космического аппарата, движущегося по круговой орбите радиусом R_S в топоцентрической системе отсчета, в отличие от общего случая эллиптических орбит являются явными функциями времени:

$$\begin{aligned} x_S(t) &= R_S \{ [(1 + \cos \theta) \cos [(\omega - \Omega) t + \varphi + \psi_0 - \varphi_0] + \\ &+ (1 - \cos \theta) \cos [(\omega + \Omega) t + \varphi_0 + \psi_0 - \varphi]] \cos \theta_0 - \\ &- 2 \sin \theta \sin \theta_0 \sin (\omega t + \psi_0) \} / 2; \\ y_S(t) &= R_S \{ (1 + \cos \theta) \sin [(\omega - \Omega) t + \varphi + \psi_0 - \varphi_0] - \\ &- (1 - \cos \theta) \sin [(\omega + \Omega) t + \varphi_0 + \psi_0 - \varphi] \} / 2; \\ z_S(t) &= R_S \{ [(1 + \cos \theta) \cos [(\omega - \Omega) t + \varphi + \psi_0 - \varphi_0] + \\ &+ (1 - \cos \theta) \cos [(\omega + \Omega) t + \varphi_0 + \psi_0 - \varphi]] \sin \theta_0 + \\ &+ 2 \sin \theta \cos \theta_0 \sin (\omega t + \psi_0) \} / 2 - R_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где θ — наклонение орбиты; φ — долгота восходящего узла; ψ_0 — угловое расстояние космического аппарата в момент времени $t = 0$ от восходящего узла; $\omega = \sqrt{GM/R_S^3}$ — угловая частота обращения космического аппарата по круговой орбите; GM — постоянная, которая для Земли [5] составляет $GM = 398603 \cdot 10^9 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$.

Выражения (1), (2) позволяют решить поставленную задачу.

Определение погрешности измерения углового положения космического аппарата при лазерной локации. Для нахождения закона движения светового импульса между лазерной станцией и космическим аппаратом необходимо определить константы интегрирования Θ и Φ , при которых импульс попадет на ретрорефлекторы космического аппарата. Эти величины найдем из уравнений

$$x_S(t_2) = x_L(t_2), \quad y_S(t_2) = y_L(t_2), \quad z_S(t_2) = z_L(t_2).$$

Выразим сначала из этих равенств $\sin \Theta \cos (\Phi - \varphi_0)$, $\sin \Theta \sin (\Phi - \varphi_0)$ и $\cos \Theta$. Используя выражения (1) и (2), получаем

$$\begin{aligned} c(t_2 - t_1) \sin \Theta \cos (\Phi - \varphi_0) &= R_S \{ (1 + \cos \theta) \times \\ &\times \cos (\omega t_2 - \Omega t_1 + \varphi + \psi_0 - \varphi_0) + \\ &+ (1 - \cos \theta) \cos (\omega t_2 + \Omega t_1 + \varphi_0 + \psi_0 - \varphi) \} / 2 - R_0 \sin \theta_0; \\ c(t_2 - t_1) \sin \Theta \sin (\Phi - \varphi_0) &= R_S \{ (1 + \cos \theta) \times \\ &\times \sin (\omega t_2 - \Omega t_1 + \varphi + \psi_0 - \varphi_0) - \\ &- (1 - \cos \theta) \sin (\omega t_2 + \Omega t_1 + \varphi_0 + \psi_0 - \varphi) \} / 2; \\ c(t_2 - t_1) \cos \Theta &= R_S \sin \theta \sin (\omega t_2 + \psi_0) - R_0 \cos \theta_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Соотношения (1) и (3) описывают в параметрическом виде луч, соединяющий лазерную станцию с той точкой пространства, в которой космический аппарат должен находиться в момент времени $t = t_2$, а также закон движения светового импульса между лазерной станцией и этой точкой.

Для того чтобы световой импульс, испущенный лазерной станцией в момент времени $t = t_1$, попал в космический аппарат, ось телескопа станции должна быть направлена по касательной к лучу, соединяющему ее с этим аппаратом. Вектор, касательный к данному лучу на лазерной станции (т. е. при $t = t_1$), определяется выражением

$$\mathbf{N} = \frac{1}{c} \frac{d\mathbf{r}_L}{dt} \Big|_{t=t_1}.$$

Найдем компоненты этого вектора. Луч, по которому испущенный лазерной станцией в момент времени $t = t_1$ световой импульс распространяется к космическому аппарату, описывается выражениями (1), если константы интегрирования Θ и Φ выбрать в соответствии с (3). Используя (1), определяем компоненты этого вектора

$$N_x = \sin \Theta \cos (\Phi - \varphi_0) \cos \theta_0 - \cos \Theta \sin \theta_0;$$

$$N_y = -\frac{\Omega R_0}{c} \sin \theta_0 + \sin \Theta \sin (\Phi - \varphi_0);$$

$$N_z = \sin \Theta \cos (\Phi - \varphi_0) \sin \theta_0 + \cos \Theta \cos \theta_0.$$

Таким образом, для того чтобы световой импульс, испущенный лазерной станцией в момент времени $t = t_1$, попал в космический аппарат, ось телескопа должна быть ориентирована не в направлении вектора $\mathbf{R}_S(t_2) = \mathbf{R}_L(t_2) = \{x_L(t_2), y_L(t_2), z_L(t_2)\}$, соединяющего лазерную станцию с истинным положением космического аппарата в момент попадания в него светового импульса $t = t_2$, а вдоль вектора \mathbf{N} . Найдем угол $\delta\varphi$ между этими векторами, для чего воспользуемся известным соотношением

$$\cos \delta\varphi = (\mathbf{N}\mathbf{R}_L(t_2)) / |\mathbf{N}| |\mathbf{R}_L(t_2)|. \quad (4)$$

Используя (1) и (3) при $t = t_2$ и проводя вычисления с квадратичной погрешностью по малым параметрам $\Omega R_0/c \approx \omega(t_2 - t_1) = 10^{-6}$ и $\Omega R_S/c \approx 10^{-5}$, получаем

$$\begin{aligned} (\mathbf{N}\mathbf{R}_L(t_2)) &= c(t_2 - t_1) \left\{ 1 - \frac{2\Omega R_0}{c} \sin \Theta \sin (\Phi - \varphi_0) \sin \theta_0 + \right. \\ &+ \frac{\Omega^2 (t_2 - t_1) R_0}{2c} \sin \Theta \cos (\Phi - \varphi_0) \sin \theta_0 + \frac{\Omega^2 R_0^2}{c^2} \sin^2 \theta_0 - \\ &\left. - \frac{\Omega^2 (t_2 - t_1)^2}{2} \sin^2 \Theta \right\}; \end{aligned}$$

$$N^2 = 1 - \frac{2\Omega R_0}{c} \sin \Theta \sin (\Phi - \varphi_0) \sin \theta_0 + \frac{\Omega^2 R_0^2}{c^2} \sin^2 \theta_0;$$

$$\begin{aligned} R_L^2(t_2) &= c^2 (t_2 - t_1)^2 \left\{ 1 - \frac{2\Omega R_0}{c} \sin \Theta \sin (\Phi - \varphi_0) \sin \theta_0 + \right. \\ &+ \frac{\Omega^2 (t_2 - t_1) R_0}{c} \sin \Theta \cos (\Phi - \varphi_0) \sin \theta_0 + \left. \frac{\Omega^2 R_0^2}{c^2} \sin^2 \theta_0 \right\}. \end{aligned}$$

Подставив эти равенства в (4), получим с той же точностью

$$\cos \delta\varphi = 1 - \frac{\Omega^2 (t_2 - t_1)^2}{2} \sin^2 \Theta.$$

Так как угол $\delta\varphi$ очень мал, то $\cos \delta\varphi = 1 - (\delta\varphi)^2 / 2$.

С учетом (3) несложно получить в асимптотически главном приближении искомое выражение

$$\begin{aligned} \delta\varphi &\approx \frac{\Omega}{2c} \{ 2R_S^2 (1 + \cos^2 \theta) + 2R_S^2 \sin^2 \theta \cos 2(\omega t_1 + \psi_0) + \\ &+ 4R_0^2 \sin^2 \theta_0 - 8R_S R_0 [\cos(\omega t_1 + \psi_0) \cos(\Omega t_1 + \varphi_0 - \varphi) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega t_1 + \psi_0) \sin(\Omega t_1 + \varphi_0 - \varphi)] \sin \theta_0 \}^{1/2}. \quad (5) \end{aligned}$$

Выводы. Оценим погрешность определения угловых положений космических аппаратов, вызываемую вращением Земли, при их локации на различных орбитах. Для уменьшения погрешностей, вносимых неоднородностью атмосферы, рабочими при лазерной локации будем считать, как обычно, участки небесной сферы, расположенные на 15° выше местного горизонта. Это означает, что компонента N_z касательного вектора \mathbf{N} должна удовлетворять условию

$$\cos 75^\circ < N_z \leq 1.$$

Проведенный численный анализ (5) на условный экстремум показал, что при прочих равных условиях максимальное значение угла $\delta\varphi$ достигается, если касательный вектор \mathbf{N} лазерного луча лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения Земли. Значение угла $\delta\varphi$ при лазерной локации в этой плоскости существенно зависит от расстояния между лазерной станцией и космическим аппаратом. Оно изменяется от $\delta\varphi = 0,01''$ при локации космических аппаратов, находящихся на низких околоземных орбитах, до десятков угловых секунд — на орбитах дальше геостационара. В частности, при лазерной локации планирующегося к запуску в этом году космического аппарата «Спектр-Р», имеющего высоту орбиты 300000 км, погрешность при определении его углового положения, вызываемая вращением Земли, будет достигать значения $\delta\varphi = 14,6''$.

Так как современные лазерные станции позволяют [3] измерять угловое положение космических аппаратов с погрешностью 0,5", то ее необходимо учитывать при разработке измерительных систем для прецизионной лазерной локации космических аппаратов.

Литература

1. **Эйнштейн А.** Собрание научных трудов. Т. 1. — М.: Наука, 1965.

2. **Денисов М. М., Кравцов Н. В., Кривченков И. В.** // Письма в ЖЭТФ. — 2007. — Т. 85. — № 8. — С. 501.

3. **ГЛОНАСС** — принципы построения и функционирования. 3-е изд., перераб. / Под ред. А. И. Петрова и В. Н. Харисова. — М.: Радиотехника, 2005.

4. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теория поля. — М.: Наука, 1988.

5. **Подобед В. В., Нестеров В. В.** Общая астрометрия. — М.: Наука, 1975.

Дата принятия 07.08.2009 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.2.082.5.001.63:681.2.082.5.001.66

Автоматизированное рабочее место поверки средств измерений параметров волоконно-оптических систем передачи ОК6-13

Р. М. ВОРОНИН, В. Н. ГАВРИЛОВ, Ю. М. ГРЯЗНОВ, С. А. КИСЛИЦИН, А. В. МАХАЛОВ, П. Д. МОИСЕЕВ, Н. М. СОНИН, А. А. ЧАСТОВ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц», Н. Новгород, Россия, e-mail: kvarz_asu@sinn.ru

Приведены технические характеристики, схемы и рекомендации по применению автоматизированного комплекса для поверки средств измерений параметров волоконно-оптических систем передачи ОК6-13. Комплекс обеспечивает поверку рабочих средств измерений, предназначенных для работы на длинах волн 0,85; 1,31 и 1,55 мкм.

Ключевые слова: *автоматизированный комплекс, поверка, параметры волоконно-оптической системы передачи, рабочие средства измерений.*

The ОК6-13 specifications, schematics and recommendations for testing of optical-fiber communication parameter measurement equipment are given. This complex provides testing of working measurement instrumentations operating at 0,85; 1,31 and 1,55 μm wavebugths.

Key words: *automatic complex, verification, optical-fiber communication system parameters, working measurement means.*

Задача разработки метрологического обеспечения в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) возникла при создании первых оптических линий связи. В настоящее время в стране имеется обширный парк рабочих средств измерений (РСИ), для поверки которых существует несколько рабочих эталонов и дополнительных поверочных устройств. Однако они разнотипны, имеют малую степень автоматизации поверочного процесса и не обеспечивают поверки достаточного набора параметров РСИ [1]. Это сдерживает развитие всего комплекса рабочих средств измерений параметров ВОСП.

Комплекс ОК6-13 предназначен для автоматизированной поверки РСИ параметров ВОСП двойного назначения и позволяет проводить поверку следующих параметров:

мощности и нестабильности мощности излучения генераторов, источников излучения;

погрешности измерений абсолютных и относительных уровней мощности излучения ваттметрами, тестерами, рефлектометрами, измерителями затухания;

ослабления, погрешности установки ослабления излучения аттенюаторами;

погрешности измерения рефлектометрами расстояний и ослаблений;

спектральных характеристик чувствительности средств измерений мощности излучения и длины волны источников излучения.

Согласно [2] комплекс ОК6-13 соответствует рангу таких рабочих эталонов и дополнительных устройств, как:

рабочий эталон единиц средней мощности и ослабления оптического излучения на фиксированных длинах волн;