

В ГПЭ-2 использован двойной дифракционный монохроматор U-1000 французской фирмы «Jobin-Yvon», имеющий крайне низкий уровень рассеянного света (10^{-14}) и высокую воспроизводимость заданной длины волны (не более 0,01 нм).

Блок приемников включает фильтровые радиометры и трэп-детектор, которые монтируют в специально разработанных водоохлаждаемых радиаторах. Радиаторы устанавливают на юстировочные столики, обеспечивающие тонкую установку по трем линейным и угловым координатам. Все приемники располагают на подвижной платформе, что позволяет автоматически подводить каждый приемник под пучок излучения, выходящий из щели монохроматора.

Метрологические характеристики ГПЭ-2 при воспроизведении единицы величины спектральной чувствительности к освещенности излучения в спектральном диапазоне 0,35 — 1,00 мкм приведены в табл. 2.

Работа выполнена на уникальной установке для прецизионных измерений радиометрических и спектрометрических характеристик источников и приемников излучения в спектральном диапазоне 1 нм — 20 мкм при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.592.21.0001 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор работ RFMEFI59214X0001).

Л и т е р а т у р а

1. Eppeldauer G. P. Spectral responsivity-based calibration of photometer and colorimeter standards // J. Modern Opt. 2013. V. 60. N. 14. P. 1124—1135.

2. Theocharous E. The establishment of the NPL infrared relative spectral responsivity scale using cavity pyroelectric detectors // Metrologia. 2006. V. 43. N. 2. P. S115—S119.

Дата принятия 03.09.2015 г.

531.76.081

Метрологическое обеспечение измерений частоты излучения в информационных системах оптического диапазона

Ю. М. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, И. С. КОРОЛЕВ, В. Н. КРУТИКОВ,
С. В. ТИХОМИРОВ, Н. П. ХАТЫРЕВ, А. А. ЩЕРБИНА

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: korolev@vniiofi.ru

Проанализировано состояние метрологического обеспечения средств измерений частоты оптического излучения, способы снижения неопределенности воспроизведения и передачи единицы частоты оптического диапазона в волоконно-оптических системах передачи информации. Проведены экспериментальные исследования методов метрологического обеспечения средств измерений частоты оптического излучения.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы, спектральное уплотнение.

The ways of metrological assurance development for optical frequency measuring instruments, the methods of uncertainty reduction for realization and transfer of optical range frequency unit in optical fiber information transfer systems have been analyzed. Experimental researches of optical frequency measuring instruments methods were implemented.

Key words: fiber-optics systems, frequency, spectral multiplexing.

В качестве одного из способов увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ), изначально рассматривали импульсно-кодировую модуляцию. Таким образом скорость передачи удалось повысить до 40 Гбит/с на одной несущей частоте. Параллельно развивалась технология спектрального уплотнения Wavelength Division Multiplexing (WDM) — передачи сигналов по одному и тому же оптическому волокну на нескольких несущих частотах. Системы WDM подразделяются по ширине частотного интервала между каналами: с грубым (CWDM) и плотным (DWDM) мультиплексированием. Число информационных потоков в волокне на различных несущих частотах нередко достигает нескольких десятков.

Случайные изменения свойств волокна, характеристик оптического сигнала, несущего информацию, и его приемников могут приводить к появлению ошибок, когда приемная аппаратура при поступлении сигнала, соответствующего логической единице, интерпретирует его как логический ноль или наоборот. Существуют эффективные способы коррекции ошибок, но при большом количестве последних заметно снижается скорость передачи. В ВОСПИ среди различных факторов, приводящих к ошибкам, необходимо, прежде всего, обратить внимание на спектрально-временные характеристики оптических сигналов.

В 1998 и 2002 гг. Международный союз электросвязи (МСЭ, ITU) выпустил рекомендации, устанавливающие тре-

бования к спектральным характеристикам в ВОСПИ [1, 2]. Спектральные интервалы между соседними каналами DWDM-систем устанавливали шириной в 100; 50; 25 и 12,5 ГГц. Номинальные значения разрешенных к использованию несущих частот установлены с точностью до семи значащих цифр. Поэтому на практике применение этих рекомендаций требует измерений несущих частот с погрешностью не более 10^{-8} , что объясняется не только формальными соображениями, но и некоторыми физическими факторами. В частности, межканальный частотный интервал 12,5 ГГц достаточно близок к частотному сдвигу рассеянного в оптическом волокне излучения вследствие эффекта Мандельштама—Бриллюэна, который проявляется вблизи 11 ГГц.

Применяемые в настоящее время средства измерений (СИ) длины волны имеют недопустимую для DWDM-систем неопределенность измерений спектральных характеристик на уровне 10^{-6} — 10^{-7} . Если перейти к измерениям частоты, то в этом случае неопределенность спектральных измерений может составить 10^{-7} — 10^{-9} , что достаточно для удовлетворения приведенных выше требований по неопределенности частоты в телекоммуникационных системах.

С увеличением числа несущих оптических частот, передаваемых по волокну, расширяется полный частотный диапазон. Так, в настоящее время считается приемлемым диапазон 176,47—272,8 ТГц (1100—1900 нм). Количество спектральных каналов для ВОСПИ даже с межканальным интервалом 100 ГГц в этом диапазоне спектра составляет около 1000, а при минимальном интервале 12,5 ГГц количество каналов будет более 7000. Решение задачи метрологического обеспечения СИ частотных характеристик, работающих с таким большим числом каналов, было найдено в результате появления оптических синтезаторов частот или комб-генераторов. Эти генераторы с высокой собственной стабильностью частотных характеристик при необходимых дополнительных модулях и блоках можно использовать для воспроизведения и передачи единицы частоты в широком спектральном диапазоне.

Работа комб-генераторов основана на использовании периодически повторяющихся импульсов лазерного излучения фемтосекундного диапазона. Уменьшение длительности импульсов до 10^{-12} с приводит к значительному расширению спектра такого излучения. При периодической последовательности импульсов спектр излучения в частотном выражении представляет шкалу узких эквидистантных спектральных линий. Частотный интервал между отдельными линиями равен частоте повторения фемтосекундных импульсов, которая для различных вариантов технической реализации комб-генераторов изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен мегагерц и в отдельных случаях может находиться в гигагерцовом диапазоне. Сигнал от комб-генератора можно изобразить во временной области в виде последовательности коротких импульсов или в частотной области в виде набора эквидистантных оптических частот как показано на рис. 1 для частоты повторения импульсов 50 МГц.

Расширение спектра путем сокращения длительности импульсов недостаточно для перекрытия частотного диапазона 176,47—272,8 ТГц, поэтому приходится использовать дополнительные устройства, например, нелинейно-оптическую ячейку на основе фотонно-кристаллического волокна. В итоге удастся получить эквидистантную шкалу частот оптического диапазона с полной шириной, превышающей окта-

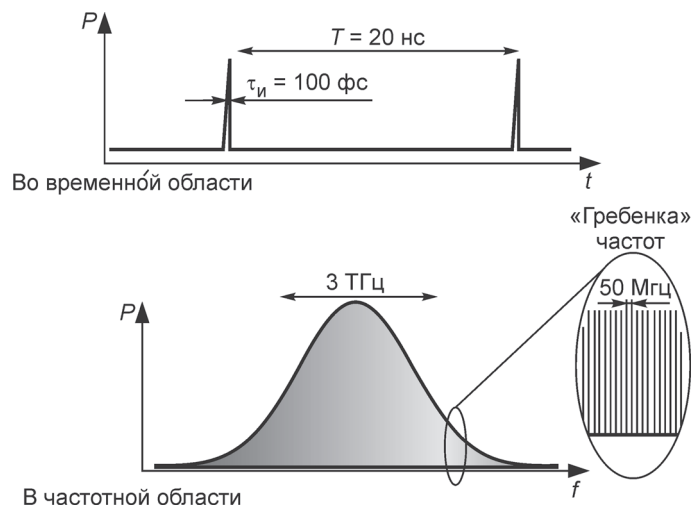


Рис. 1. Принцип генерации набора эквидистантных частот с помощью фемтосекундных лазерных импульсов

ву, т. е. отношение верхней граничной частоты этого диапазона к нижней равно или превышает 2. Для метрологического обеспечения в области высокоскоростных ВОСПИ необходим комб-генератор, перекрывающий диапазон 1000—2000 нм. Частоту, соответствующую n -й линии этой шкалы, можно выразить как

$$f_n = Nf_c + f_{\text{офс}},$$

где N — количество частотных интервалов, отсчитанное от n -й до начальной линии вблизи 0 Гц; f_c — частотный интервал между отдельными спектральными линиями, составляющими частотную шкалу; $f_{\text{офс}}$ — частота смещения (или офсетная частота), равная частоте начальной линии, причем эта линия находится далеко за пределами оптического диапазона, физически не существует, являясь виртуальным началом частотной шкалы вблизи нуля.

Принцип работы комб-генератора позволяет привязать эквидистантную шкалу частотных линий как к стандартам частоты радиодиапазона, так и к стандартам частоты оптического диапазона в перспективе. В настоящее время стандарты частоты официально связаны с радиодиапазоном [3]. Решение практических задач метрологического обеспечения измерений частоты в высокоскоростных ВОСПИ пока возможно с использованием стандартов частоты только этого типа. В радиодиапазоне наиболее распространены рубидиевые стандарты и водородные мазеры [4], их важнейшей характеристикой в рассматриваемой области применения является нестабильность частоты. Для промышленных образцов рубидиевых стандартов она обычно находится на уровне 10^{-11} за 1000 с. Отечественные водородные стандарты имеют нестабильность воспроизводимого значения частоты не больше $5 \cdot 10^{-16}$ за 10000 с [5, 6]. Существует усовершенствованный вариант рубидиевого стандарта, в котором частота постоянно подстраивается по эталонным сигналам частоты, распространяемым с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [7]. Стабильность воспроизводимого таким образом значения частоты оказывается на два порядка выше, чем у рубидиевого стандарта, работающего в автономном режиме.

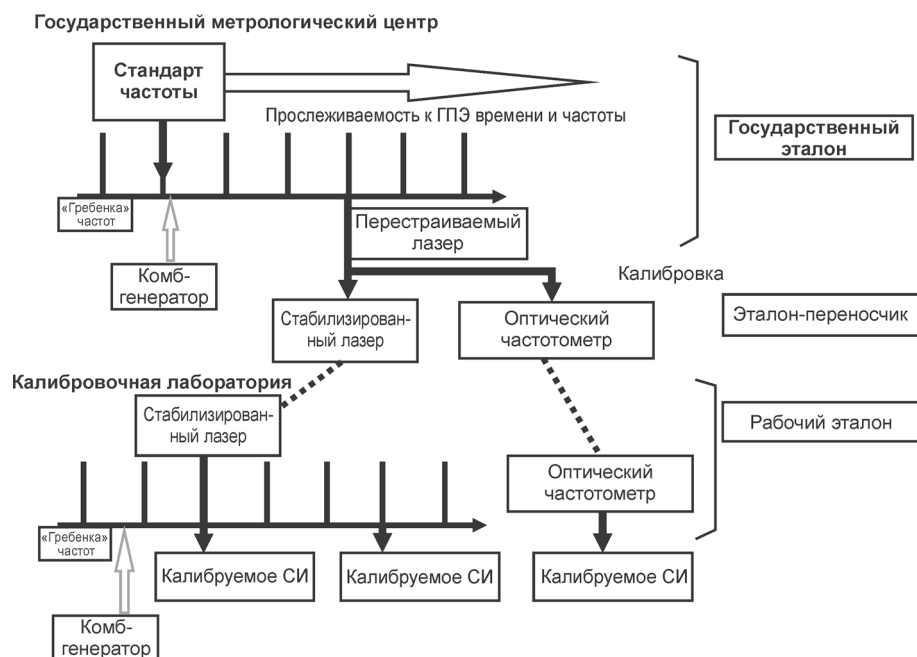


Рис. 2. Прототип калибровочной (поверочной) схемы на основе положений проекта стандарта [8]:

ГПЭ — государственный первичный эталон; СИ — средство измерений

Методы измерений частотных характеристик и методы калибровок и поверок рабочих СИ являются предметом деятельности Международной электротехнической комиссии (МЭК). Работа по стандартизации в области волоконно-оптических систем осуществляется Техническим комитетом 86 (ТК86 МЭК), в течение последних лет в Рабочей группе 4 комитета разрабатывался международный стандарт [8] для СИ частоты оптического излучения источников, типичных в индустрии волоконно-оптических телекоммуникаций. Сотрудники ВНИИОФИ принимали участие в подготовке стандарта (в настоящее время стандарт находится в ранге технической

спецификации). В стандарте описывается калибровка СИ частоты оптического излучения с использованием комб-генератора, которая возложена на калибровочные лаборатории или изготовителей СИ.

На рис. 2 приведена калибровочная схема для СИ частоты оптического излучения на основе комб-генератора. В МЭК такую схему рассматривают как необходимую для обеспечения функционирования высокоскоростных волоконно-оптических телекоммуникационных систем. Схема содержит эталонную установку высшей точности, эталон-переносчик, рабочий эталон и может служить для воспроизведения и передачи единицы частоты в спектральном диапазоне, используемом в ВОСПИ. В качестве компаратора (эталона-переносчика) используется лазер, стабилизированный по частоте, или измеритель оптической частоты высшей точности. Рабочий эталон состоит из стабилизированного лазера и оптического комб-генератора, от него единица оптической частоты передается рабочему СИ посредством перестраиваемого лазера.

Во ВНИИОФИ выполнили работы, направленные на создание высшего звена данной схемы и передачу единицы частоты оптического излучения нижестоящим СИ. В качестве комб-генератора был использован синтезатор частот оптического излучения FC1500-250-WG. Параметры шкалы генерируемых эквидистантных частот стабилизировали с помощью рубидиевого стандарта частоты, подстраиваемого по сигналам эталонных частот от ГНСС. В качестве такого стандарта частоты применяли эталонный генератор REFGEN 10491 (изготовитель — Timetech GmbH). Чтобы обеспечить эффективную подстройку частоты, его антенна должна одновременно принимать сигналы эталонных частот от нескольких спутников, для чего ее пришлось смонтировать за пределами здания на выносном кронштейне.

Наиболее существенной характеристикой комб-генератора является нестабильность частоты повторения фемтосекундных импульсов и офсетной частоты. Как показал эксперимент, проведенный во ВНИИОФИ, флуктуации частоты повторения импульсов на значительном интервале (около двух суток) имеют порядок 10^{-10} . С учетом девиации Аллана (рис. 3) нестабильность параметров генерируемой шкалы эквидистантных частот оптического излучения не превышает нестабильности частоты эталонного генератора REFGEN 10491.

Таким образом, была экспериментально подтверждена возможность генерации шкалы оптических частот с нестабильностью, не превышающей 10^{-13} за время более 1000 с. Однако такая нестабильность хотя и обеспечивает требуемые параметры, но без какого-либо технологического запаса. Дело в том, что от воспроизводимой шкалы единицу частоты оптического диапазона еще необходимо передать нижестоящему эталону или прецизионному рабочему СИ, а это порождает дополнительную неопределенность.

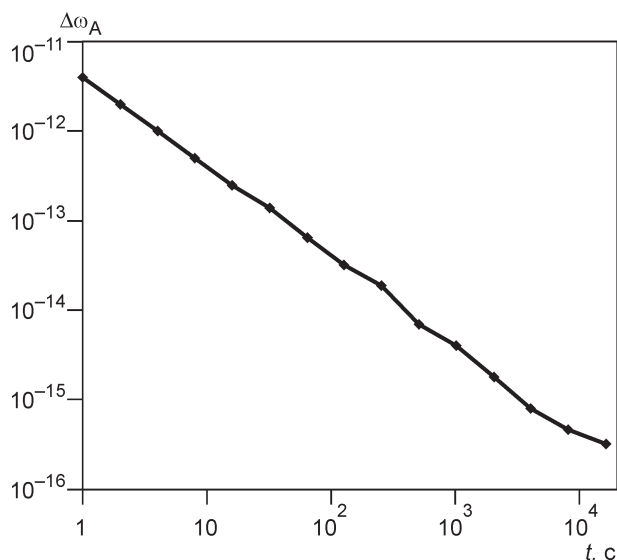


Рис. 3. Отклонения (девиации) Аллана при длительном измерении частоты повторения фемтосекундных импульсов

Бюджет неопределенности частоты эталона-переносчика $\Delta(f_{э-п})$ складывается из следующих составляющих:

$$\Delta(f_{э-п}) = N\Delta(f_c) + \Delta(f_{офс}) + \Delta(f_6),$$

где $\Delta(f_c)$, $\Delta(f_{офс})$ — неопределенности частотного интервала между спектральными линиями излучения комб-генератора и офсетной частоты, равные неопределенности $\Delta(f_{сч})$ используемого рубидиевого (или водородного) стандарта частоты; $\Delta(f_6)$ — неопределенность измерений частоты биений между излучением эталона-переносчика и одной из спектральных линий.

Пронормировав правую и левую части этой формулы на частоту $f_{э-п}$ можно перейти к неопределенностям в относительных единицах; согласно проекту стандарта МЭК [8] $\Delta(f_{э-п})/f_{э-п}$ может быть равна 10^{-8} . Если принять неопределенность частотных биений на уровне 10^{-10} (погрешность прецизионного частотомера), то можно записать следующую формулу для неопределенности стандарта частоты, которая должна соблюдаться для достижения указанного значения относительной неопределенности частоты эталона переносчика:

$$\Delta(f_{сч})/f_{э-п} = [\{\Delta(f_{э-п})/f_{э-п} + \Delta(f_6)/f_{э-п}\}]/(N + 1).$$

Если принять величину в квадратных скобках порядка 10^{-8} , $N = 800\,000$, то можно прийти к оценке неопределенности частоты, воспроизводимой используемым стандартом радиодиапазона, $\Delta(f_{сч})/f_{э-п} = 1,25 \cdot 10^{-14}$. Следовательно, наивысшую необходимую точность можно обеспечить только при использовании водородного стандарта частоты.

Также перспективно использовать разрабатываемые в настоящее время прототипы первичных эталонов частоты для оптического диапазона на основе одиночных атомов и ионов, охлажденных до сверхнизких температур. Достижимая точность воспроизведения единицы частоты такими установками как минимум на порядок превышает точности, достигнутые в радиодиапазоне. В наиболее распространенных прототипах оптических стандартов частоты используют колебания охлажденных лазером атомов и ионов ^{199}Hg ($\lambda = 265,6$ нм), $^{40}\text{Ca}^+$ ($\lambda = 729$ нм), ^{87}Sr ($\lambda = 698$ нм), ^{24}Mg ($\lambda = 457$ нм), $^{27}\text{Al}^+$ ($\lambda = 267$ нм) [9]. Исследования по привязке ГКЧ к прототипу оптического стандарта частоты, проведенные за рубежом, показали возможность достижения вносимой неопределенности порядка $5 \cdot 10^{-17}$ при передаче единицы частоты вторичному эталону [10].

Для исследования погрешности передачи единицы частоты оптического диапазона в качестве модели эталона-переносчика использовали высокостабильный перестраиваемый лазер Koheras Adjustik E15 (NKT Photonics, Дания), его излучение имеет ширину линии около 100 Гц. Используя частоту биений, измеряли разность частот линии генерации этого лазера и ближайшей к данной частоте линии ГКЧ. Полученное высокостабильное излучение с известной частотой

можно передавать на значительные расстояния как по специально организованным линиям, так и по линиям телекоммуникационных оптоволоконных сетей общего назначения. Это, в частности, позволяет проводить дистанционную калибровку СИ частоты, применяемых в ВОСПИ. Многократные эксперименты подтвердили, что на входе калибруемого СИ можно получить неопределенность воспроизведения частоты не более 1 МГц (10^{-8} — в относительных единицах).

Таким образом, в результате исследований была экспериментально подтверждена возможность реализации государственного первичного специального эталона единицы частоты оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи информации в соответствии с рекомендациями МЭК. Этот эталон позволит решить проблему метрологического обеспечения измерений частоты в волоконно-оптических системах и гармонизировать систему метрологического обеспечения с требованиями международных стандартов МЭК и ITU-T, увеличить надежность передачи данных и пропускную способность как магистральных российских, так и трансграничных ВОСПИ с DWDM.

Л и т е р а т у р а

1. **ITU-T Recommendation G.692.** Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers. 1998.
2. **ITU-T Recommendation G.694.1.** Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. 2002.
3. **ГОСТ 8.129—2013.** Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты.
4. **Yuanhong Cao, Lin Yang, Miao Liu, Ning Wang, Runchang Du, Chunhua Li.** A high accurate Rb atomic clock with the compensated techniques // Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp. Baltimore (MD USA), 2012. P. 1—2.
5. **Ораевский А. Н.** Молекулярные генераторы. М.: Наука, 1964.
6. **Козлов А. К., Якимов А. В.** Исследование фазовых флуктуаций в водородном стандарте частоты // Труды 3-й Науч. конф. по радиофизике. Н.Новгород, 1999. С. 215.
7. **Jefferson D. C., Lichten S. M., Young L. E.** A test of precision GPS clock synchronization // Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp. Honolulu (HI, USA), 1996. P. 1206—1210.
8. **IEC/TS 62129-3:2014.** Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments. Optical frequency meters using optical frequency combs.
9. **Udem Th., Reichert J., Holzwarth R., Hänsch T. W.** Absolute Optical Frequency Measurement of the Cesium D1 Line with a Mode-Locked Laser // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. 3568—3571.
10. **Rosenband T., Hume D. B., Schmidt P. O., Chou C. W., Brusch A., Lorini L., Oskay W. H., Drullinger R. E., Fortier T. M., Stalnaker J. E., Diddams S. A., Swann W. C., Newbury N. R., Itano W. M., Wineland D. J., Bergquist J. C.** Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks. Metrology at the 17th // Science. 2008. V. 319. P. 1808—1811.

Дата принятия 03.09.2015 г.