

Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений

Д. М. ФЕДОРОВА^{1,2}, Р. И. БАЛАЕВ¹, А. Ф. КУРЧАНОВ¹, В. И. ТРОЯН²,
А. Н. МАЛИМОН¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: dmshibaeva@vniiftri.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, e-mail: troyan@mephi.ru

Представлен метод передачи эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии. Описана схема электронной компенсации возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала 100 МГц в оптическом волокне. Приведены экспериментальные результаты измерений девиации Аллана эталонного сигнала 100 МГц, переданного на удаленный конец 100-километровой волоконной линии.

Ключевые слова: стандарты частоты, передача сигналов эталонных частот, сличение атомных часов, волоконно-оптические линии.

The method of radio frequency reference signal transmission by optical fiber line is represented. The scheme of electronic compensation of reference 100 MHz signal phase perturbations in optical fiber is described. The experimental results of measurements of Allan deviation of 100 MHz reference signal transmitted to the remote end of 100 km fiber line are presented.

Key words: frequency standards, standard frequency signal transmission, atomic clocks comparison, fiber-optic links.

В последнее десятилетие точность эталонов частоты и времени была повышена более чем на порядок. В настоящее время основой поддержания и формирования национальной шкалы времени является группа расположенных в одном помещении водородных хранителей Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1—2012, находящихся в процессе непрерывных взаимных сличений. Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единицы частоты цезиевым репером частоты фонтанного типа ГЭТ 1—2012 не превышает $5 \cdot 10^{-16}$ [1]. Нестабильность частоты водородных хранителей, входящих в состав первичного эталона, находится на уровне $7 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения. Вместе с тем, возникла проблема точного сравнения шкал времени и частот территориально удаленных совершенных эталонов и стандартов. Поэтому необходимы исследования по созданию новых каналов и методов передачи эталонных сигналов (ЭС), обеспечивающих передачу ЭС на удаленный конец канала без потери первоначальной точности.

Существуют различные методы и средства проведения высокоточных сравнений частот и шкал времени территориально разнесенных стандартов и эталонов. Исторически первым был метод, использующий возимые квантовые часы, которые сличали с одним эталоном, а затем после транспортировки — с другим. В настоящее время для стандартов, находящихся на больших расстояниях, широко применяют спутниковые методы, использующие сигналы космических

аппаратов навигационных систем, или специальные спутники связи, обеспечивающие дуплексный метод сличений. Погрешность, с которой можно сравнить частоты двух пространственно разнесенных эталонов с помощью этих методов, находится на уровне примерно $5 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения, а погрешность сравнения шкал времени составляет несколько наносекунд.

В настоящее время разрабатывают и исследуют системы и методы передачи эталонных сигналов частоты (ЭСЧ) по специально выделенным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Данные методы позволяют сравнивать стандарты, удаленные друг от друга на расстояние до нескольких сотен километров, с меньшей погрешностью, чем при использовании традиционных [2—7].

Следует отметить, что ряд физических процессов в оптическом волокне возмущают передаваемый эталонный сигнал и существенно снижают точностные характеристики ЭСЧ, доставляемого на удаленный конец ВОЛС. К этим процессам можно отнести: затухание оптической несущей по мере ее распространения в оптической линии, хроматическую и поляризационно-модовую дисперсию в оптическом волокне, вынужденное обратное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, релеевское рассеяние на микроскопических неоднородностях волокна. В связи с этим при использовании ВОЛС для передачи эталонных сигналов необходимо применять специальные пассивные и активные методы компенсации возмущений, оказывающих влияние на передаваемый эталонный сигнал.

Передача ЭСЧ по волоконным линиям без компенсации. На рис. 1 представлена упрощенная схема передачи ЭСЧ или сигнала эталонного времени на удаленный конец ВОЛС без систем компенсации возмущений, вносимых линиями. При передаче использована амплитудная модуляция оптической несущей сигналом эталонной радиочастоты, составляющей, например, 10 МГц, или импульсным сигналом эталонного времени с периодом в 1 с.

Промодулированная лазерная оптическая несущая, передающая информацию об эталонных радиочастоте или времени, распространяется не в вакууме, а последовательно в ряде материальных сред и устройств, возмущающих передаваемый сигнал и меняющих время его распространения. Основным фактором, возмущающим фазу ЭС, является температурная зависимость времени распространения сигнала в этих средах и устройствах. Изменение температуры окружающей среды оказывает влияние как на длину линии, так и на показатель преломления материала оптического волокна. При передаче сигнала на расстояние, превышающее 100 м, вариация задержки, а следовательно, и погрешность передачи будет в основном определяться линией [8].

Погрешность Δt передачи импульсного сигнала частотой 1 Гц в длинной линии, фронт которого несет информацию об эталонном времени, можно оценить как

$$\Delta t = \alpha_3 \Delta T L, \quad (1)$$

где α_3 — температурный коэффициент задержки сигнала в линии; ΔT — полная амплитуда (размах) температурной волны; L — длина оптической линии (кабеля).

Изменение температуры окружающей среды вызывает фазовую модуляцию температурной волной передаваемого по оптической линии радиочастотного ЭС. Это приводит к снижению точности частоты сигнала, детектируемого фотоприемником на удаленном конце линии. Предположив, что температурная волна имеет синусоидальную форму, можно оценить среднее квадратическое двухвыборочное относительное отклонение (СКДО) результата измерения частоты на удаленном конце ВОЛС [9]:

$$\sigma_y(\tau) = \Delta T \alpha_3 L \sin^2(\pi \nu_0 \tau) / \tau, \quad (2)$$

где τ — время усреднения в секундах; ν_0 — частота температурной волны [8].

Погрешность передачи сигнала времени, как это следует из (1), пропорциональна длине линии и изменению температуры в ней. Из (2) следует, что на интервалах усреднения, равных полупериоду температурной волны, погрешность передачи эталонной частоты имеет максимальное значение, пропорциональное длине линии и скорости изменения ее температуры. Отметим, что стандартные оптические волокна имеют близкий температурный коэффициент задержки $\alpha_3 \approx 38$ пс/(км·К) на длинах волн 1,31; 1,55 мкм, соответствующих окнам прозрачности волокна [8].

На основании (1), (2), можно получить следующие оценки. Из-за суточного изменения температуры на 1 °С 100-километровой линии погрешность передачи эталонной частоты будет примерно $1 \cdot 10^{-13}$, а погрешность передачи сигнала эталонного времени может достигать 4 нс. Сезонные изменения температуры оптических кабелей могут составлять несколько десятков градусов, следовательно погрешность передачи эталонного времени в кабеле длиной

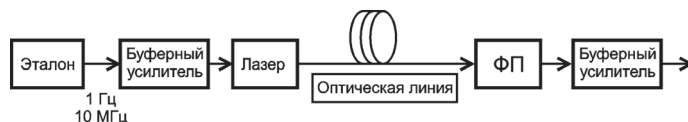


Рис. 1. Упрощенная схема передачи сигналов эталонной частоты или времени по оптоволоконной линии без компенсации возмущений, вносимых линиями; ФП — фотоприемник

100 км может достигать сотен наносекунд. Без использования специальных систем компенсации возмущений, вносимых линиями, передачу ЭС с уровнем точности, который соответствует характеристикам современной эталонной базы, можно реализовать только в относительно коротких линиях длиной до нескольких сотен метров.

Передача ЭСЧ по волоконным линиям с компенсацией. Принцип активной компенсации указанных возмущений основан на передаче ЭС по одному волокну в прямом и обратном направлениях. Из сравнения фаз двух сигналов — эталонного, который отправляется в линию, и пробежавшего по линии туда и обратно — можно получить сигнал фазовой ошибки, который будет пропорционален возмущениям, вносимым линией. Этот сигнал можно использовать для коррекции фазы ЭС, отправляемого в линию, и получить на удаленном конце линии сигнал, имеющий фазу ЭС. Такой метод компенсации, когда электронным фазовращателем корректируется фаза отправляемого в линию сигнала, получил название активной электронной компенсации. Если для коррекции возмущений фазы ЭС используется управляемая оптическая линия задержки, включенная последовательно в оптическую передающую линию, то такой метод компенсации называют оптоэлектронным [10].

В настоящей работе исследована схема (рис. 2) одной из возможных реализаций системы передачи ЭСЧ с активной электронной компенсацией. Это устройство обеспечивает передачу ЭС 100 МГц по 100-километровой волоконной оптической линии ОЛ, выполненной в виде катушек стандартного одномодового волокна SMF-28. В этой схеме радиочастотный 100 МГц сигнал вспомогательного управляемого кварцевого генератора КГ передается на конец ОЛ посредством модуляции оптической несущей полупроводникового ДФВ-лазера Л1 и детектируется фотоприемником ФП1. Сигнал в обратном направлении передается с помощью лазерной несущей Л2 и детектируется фотоприемником ФП2. Оптические циркуляторы ОЦ обеспечивают разделение встречных оптических сигналов на концах линии. Формирователь опорных эталонных частот ФОЭЧ из эталонной частоты 5 МГц водородного хранителя создает ЭС частотами 100; 40 МГц. С помощью смесителя См3 и полосовых фильтров ПФ60; ПФ140 синтезируются два опорных ЭС частотами 60 и 140 МГц, необходимых для выработки сигнала ошибки в петле фазовой автоподстройки. Сигнал КГ, пробежавший по линии туда и обратно, детектируется фотоприемником ФП2, усиливается У5 и фильтруется следящим фильтром СФ, затем смешивается на смесителе См2 с опорным 140 МГц ЭС. В свою очередь, сигнал 100 МГц, поступающий в линию от КГ, смешивается на См1 с опорным 60 МГц ЭС. На фазовом детекторе ФД сравниваются два сигнала 40 МГц с выходов смесителей См1; См2. Сформированный на ФД сигнал ошибки проходит через фильтр нижних частот ФНЧ и управляет частотой КГ, обеспечивая корректировку фазы поступающего в линию сигнала 100 МГц.

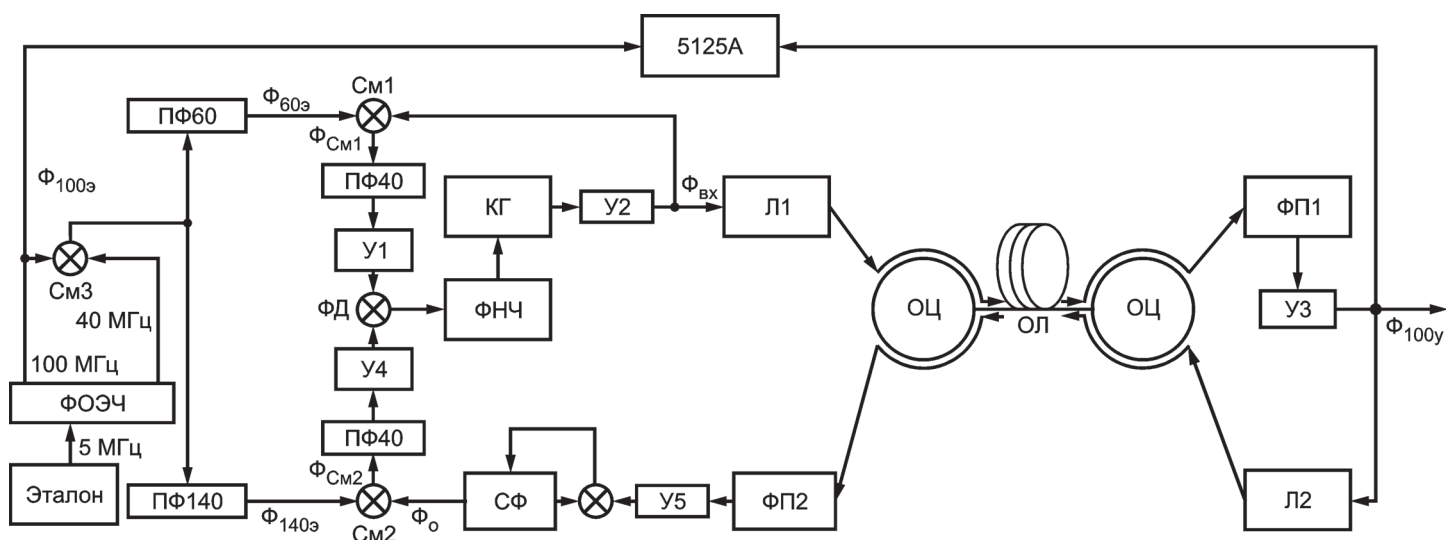


Рис. 2. Схема системы передачи ЭСЧ по волоконной линии с активной электронной компенсацией:

КГ — кварцевый генератор; У1—У5 — усилители; ФП1—ФП2 — фотоприемники; ОЛ — оптическая линия; Л1, Л2 — лазеры; ОЦ — оптические циркуляторы; ФОЭЧ — формирователь опорных эталонных частот; См1—См3 — смесители; ПФ40, ПФ60, ПФ140 — полосовые фильтры; СФ — следящий фильтр; ФД — фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот; 5125А — измеритель нестабильности частоты Symmetricom

Покажем, что фаза сигнала, получаемого на удаленном конце линии, соответствует эталонной, для чего запишем выражение для фаз в разных точках схемы. Фазы ЭС 100 МГц и двух опорных ЭС частотами 140 и 60 МГц, соответственно, выражаются:

$$\Phi_{100\text{э}} = \omega_{\text{э}} t + \varphi_{\text{э}}; \quad \Phi_{140\text{э}} = 1,4 \Phi_{100\text{э}}; \quad \Phi_{60\text{э}} = 0,6 \Phi_{100\text{э}}. \quad (3)$$

В (3), а также в некоторых последующих выражениях, не учтены постоянные сдвиги фаз сигналов, связанные с задержкой в кабелях и электронных устройствах, так как это несущественно для анализа работы схемы.

Фаза входного сигнала соответствует фазе КГ:

$$\Phi_{\text{вх}} = \Phi_{\text{КГ}} = \omega_{\text{КГ}} t + \omega_{\text{КГ}}. \quad (4)$$

Фаза $\Phi_{100\text{у}}$ выходного сигнала, получаемого на фотоприемнике ФП1 на удаленном конце линии, и фаза $\Phi_{\text{о}}$ обратного сигнала, прошедшего туда и обратно, который подается на См2, соответственно составят:

$$\Phi_{100\text{у}} = \Phi_{\text{КГ}} + \varphi_{\text{л}}; \quad (5)$$

$$\Phi_{\text{о}} = \Phi_{\text{КГ}} + 2\varphi_{\text{л}}. \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{л}}$ — сдвиг фазы, связанный с задержкой при распространении сигнала по оптической линии в одну сторону.

Фазы двух сигналов 40 МГц, которые получают на выходе смесителей См1, См2 и подаются на ФД, представляются формулами:

$$\Phi_{\text{См1}} = \Phi_{\text{КГ}} - 0,6\Phi_{\text{э}}; \quad (7)$$

$$\Phi_{\text{См2}} = 1,4\Phi_{\text{э}} - \Phi_{\text{о}}. \quad (8)$$

Поступающий на КГ с выхода ФД управляющий сигнал будет пропорционален разности фаз двух 40 МГц сигналов, и их разность с учетом (6)—(8) можно выразить как

$$\Phi_{\text{См1}} - \Phi_{\text{См2}} = 2\Phi_{\text{КГ}} - 2\Phi_{\text{э}} + 2\varphi_{\text{л}}. \quad (9)$$

При функционирующей петле фазовой автоподстройки эту разность фаз можно приравнять нулю. Тогда из (5), (9) следует, что фазы кварцевого генератора и выходного сигнала на удаленном конце линии составят

$$\Phi_{\text{КГ}} = \Phi_{\text{э}} - \varphi_{\text{л}}; \quad \Phi_{100\text{у}} = \Phi_{\text{э}}. \quad (10)$$

Таким образом, при работе компенсационной схемы фаза сигнала $\Phi_{100\text{у}}$ на удаленном конце линии будет соответствовать фазе $\Phi_{\text{э}}$ ЭС даже в случае изменения задержки сигнала в длинной линии, которая вызвана, например, изменением температуры.

Результаты измерений погрешности передачи 100 МГц сигнала по 100-километровой волоконной линии. При экспериментальных исследованиях активной электронной схемы компенсации использовали измеритель нестабильности частоты Symmetricom 5125А. С его помощью определяли СКДО частоты сигнала 100 МГц на выходе 100-километровой ВОЛС относительно ЭС 100 МГц на разных интервалах усреднения. В процессе измерений температура помещения, в котором находились 100-километровая оптическая линия и все блоки системы передачи ЭСЧ, не поддерживалась строго постоянной. В течение суток она испытывала естественный ход (отклонение) в пределах 5 °С. Следует отметить, что суточные вариации температуры оптических линий, изготовленных на основе подземных оптических кабелей, размещенных на глубине примерно 1 м, в несколько раз ниже. Суточный ход изменений температуры таких линий не превышает 1 °С [8]. На рис. 3, 4 представлены результаты измерений нестабильности сигнала, переданного на удаленный конец 100-километровой волоконной линии, соответственно — без компенсации и при работе системы активной электронной компенсации (см. рис. 2). Верхняя кромка области серого цвета на рис. 3, 4 соответствует уровню разрешения измерителя нестабильности 5125А.

Экспериментальные данные (см. рис. 4), подтверждают, что система передачи ЭСЧ по ВОЛС с активной электронной компенсацией передает ЭС 100 МГц по ВОЛС длиной

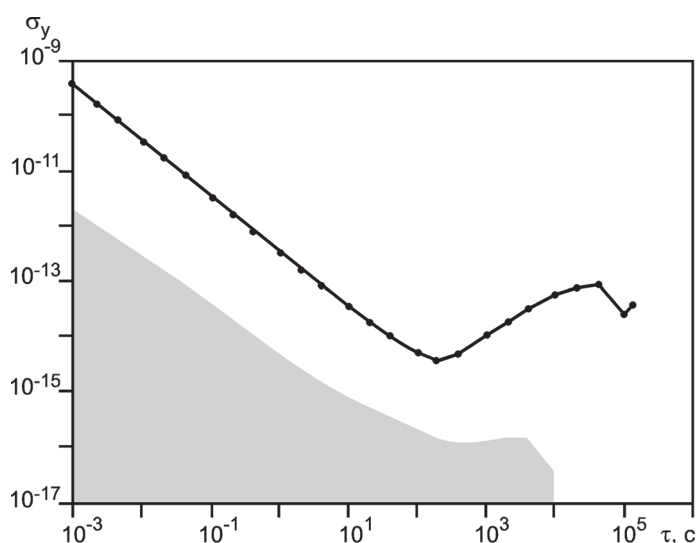


Рис. 3. Среднее квадратическое двухвыборочное отклонение сигнала (СКДО) 100 МГц, переданного на удаленный конец 100-километровой волоконной линии с выключенной системой электронной компенсации. По оси абсцисс — время усреднения

100 км с СКДО результата измерения частоты сигнала на удаленном конце линии, не превышающим $1 \cdot 10^{-16}$ и $3 \cdot 10^{-17}$ на 1 и 4 сут интервале усреднения, соответственно.

Из сравнения результатов, представленных на рис. 3, 4, следует, что при использовании системы электронной компенсации возмущений ЭС, вносимых 100-километровой ВОЛС, погрешность передачи ЭСЧ на интервалах усреднения более 1 сут снижается примерно на три порядка. Поэтому уровень дополнительной погрешности, вносимой 100-километровой ВОЛС в схеме с электронной компенсацией, незначителен по сравнению с собственной нестабильностью частоты водородных хранителей.

Заключение. Использование систем передачи ЭСЧ по ВОЛС с активной компенсацией открывает перспективу формирования шкалы времени на базе непрерывных сличений хранителей, которые могут находиться в различных географических пунктах, пространственно разнесенных на десятки и сотни километров. Это позволит оперативно формировать национальную шкалу времени на основе большого числа хранителей, уменьшит влияние эффектов взаимной паразитной корреляции водородных хранителей, находящихся в одном помещении, и повысит надежность фундаментального звена национальной системы единого времени.

Л и т е р а т у р а

1. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Норец И. Б. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 3—8.
2. Huang S., Calhoun M., Tjoelker R. Optical Links and RF Distribution for Antenna Arrays // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symp. and Expos. Miami, USA. 2006. P. 637—641. [Электрон. ресурс] <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40275/1/06-2522.pdf> (дата обращения 01.01.2015 г.).
3. Daussy C., Lopez O., Amy-Klein A., Goncharov A., Guinet M., Chardonnet C., Narbonne F., Lours M., Chamon D., Bize S., Clairon A., Santarelli G., Tobar M. E., and Luiten A. N. Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94 (20). 203904.

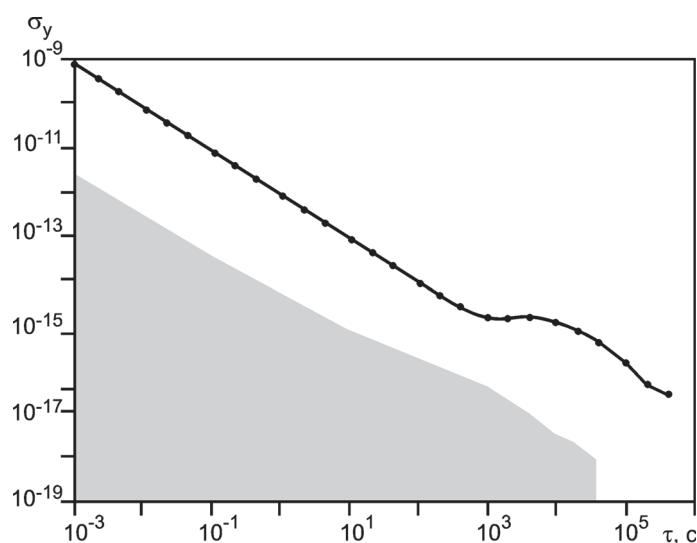


Рис. 4. Среднее квадратическое двухвыборочное отклонение сигнала (СКДО) 100 МГц, переданного на удаленный конец 100-километровой волоконной линии с включенной системой электронной компенсации

4. Wang B., Gao C., Chen W. L., Miao J., Zhu X., Bai Y., Zhang J. W., Feng Y. Y., Li T. C., Wang L. J. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the $5 \cdot 10^{-19}$ accuracy level // Sci. reports 2. Aug. 2012. [Электрон. ресурс] www.nature.com/srep/2012/120806/srep00556/full/srep00556.html (дата обращения 01.01.2015 г.).

5. Fujieda M., Kumagai M., Nagano S., Gotoh T. UTC (NICT) signal transfer system using optical fiber // Proc. of the 9th NICT IVS TDS Symp. 2010. N. 31. P. 17—20. [Электрон. ресурс] http://www2.nict.go.jp/aeri/sts/stmg/ivstdc/news_31/pdf/tdcnews_31.pdf (дата обращения 01.01.2015 г.).

6. Sliwczynski L., Krehlik P., Czuba A., Buczek L., Lipinski M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fiber optic link over a distance of 420 km // Metrologia. 2013. V. 50. P. 133—145.

7. Иванов А. В., Моховиков Н. В., Каган С. Н., Малимон А. Н., Пестерев С. В., Пальчиков В. Г., Галышев А. А. Сличения территориально удаленных эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды ИПА РАН, 2012. Вып. 23. С. 131—135.

8. Балаев Р. И., Шибаева Д. М., Малимон А. Н., Курчанов А. Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном времени и частоте // Альманах современной метрологии. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. № 2. С. 165—179.

9. ГОСТ 8.567—2014. ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения.

10. Галышев А. А., Каган С. Н., Малимон А. Н., Пальчиков В. Г., Шибаева Д. М. Передача эталонных радиочастот по волоконной линии с оптоэлектронной компенсацией вносимых линий возмущений // Материалы 6-го Междунар. симп. Метрология времени и пространства. Менделеево, 2012. С. 88—93.

Дата принятия 10.04.2015 г.