

Модем с волоконно-оптической линией связи для передачи эталонных сигналов частоты и времени

А. В. ЖЕГЛОВ, А. А. БЕЛЯЕВ, С. Ю. МЕДВЕДЕВ, И. А. ПИСАРЕВ

ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: zheglov@vremya-ch.com

Рассмотрены особенности разработанного многоканального модема для передачи эталонных сигналов частоты и времени по волоконно-оптической линии связи с компенсацией фазовой нестабильности. Оценена возможность передачи сигналов частоты активных водородных стандартов (например, Ч1-1003М), а также сигнала 1 PPS с погрешностью синхронизации не более 250 пс на расстояние до 100 км без использования оптических усилителей. Приведены результаты экспериментальной проверки метрологических характеристик модема.

Ключевые слова: передача сигналов частоты и времени, волоконно-оптическая линия связи.

The article deals with the features of developed in "VREMYA-CH" JSC multichannel modem for transmission the reference signals of frequency and time on fiber with phase instability compensation. Its capabilities to transmit signals of reference frequencies with the quality of active hydrogen masers and 1 PPS with a synchronization error of about 250 ps at distances up to hundred kilometers are estimated. Experimental results of verification of its metrological characteristics are presented.

Key words: comparison of time scales, frequency and time signals transmission.

Исследования передачи сигналов по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) с компенсацией фазовой нестабильности проводятся в ведущих научных и метрологических институтах – NASA, SYRTE, PTB, NIST, NICT, ВНИИФТРИ, а также метрологических центрах Швеции, Польши, Чехии, Китая и других стран [1–7]. Результатам этих исследований посвящены подробные обзоры [4, 8, 9].

Принципы компенсации фазовой нестабильности ВОЛС. Для оценки качества ВОЛС сравним вносимую нестабильность частоты с нестабильностью частоты выходного сигнала активного водородного стандарта частоты, например Ч1-1003М. Среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО) измеренного значения меры частоты стандарта Ч1-1003М на часовом интервале времени измерения составляет не более $1,5 \cdot 10^{-15}$, на суточном – не более $1 \cdot 10^{-15}$. Применяемая при испытаниях стандартов частоты (ЗАО «Время-Ч», Россия) линия передачи сигнала 100 МГц длиной 100 м без компенсации фазовой нестабильности имеет вносимое СКДО на часовом интервале порядка $2 \cdot 10^{-16}$, на суточном интервале – порядка $2 \cdot 10^{-17}$. Однако при увеличении длины линии до 2 км происходит увеличение нестабильности до недопустимых значений $5 \cdot 10^{-15}$ и $9 \cdot 10^{-15}$ на часовом и суточном интервалах, соответственно.

Авторы разработали ВОЛС-модем, который позволяет реализовать компенсацию фазовой нестабильности в оптоволокне. Компенсация основана на принципе фазового сопряжения: если в начале ВОЛС (на стороне передатчика) корректировать фазу сигнала на текущее значение фазовой задержки, то фаза на удалённом конце не будет зависеть от возмущений фазы в ВОЛС. При измерении фазовой задержки сигнал передаётся в обратном направлении. Схема работает при соблюдении условия равенства времени распространения сигнала в прямом и обратном направлениях.

Условие фазового сопряжения подразумевает, что фа-

зовая скорость волны (зависящая от длины волны) одинакова при распространении в обоих направлениях ВОЛС, однако на практике длины волн, излучаемые разными лазерами, немного отличаются. В первом приближении эта разница времён распространения может считаться постоянной и учитываться при калибровке ВОЛС. Вариантами фазового сопряжения являются схема с удвоением частоты [10] и двухчастотная схема [6]. В рассматриваемом модеме используется двухчастотная схема, отличающаяся повышенной термостабильностью и спектральной чистотой.

Результаты экспериментов, проведённых в ЗАО «Время-Ч», показали, что ВОЛС с компенсацией фазовых

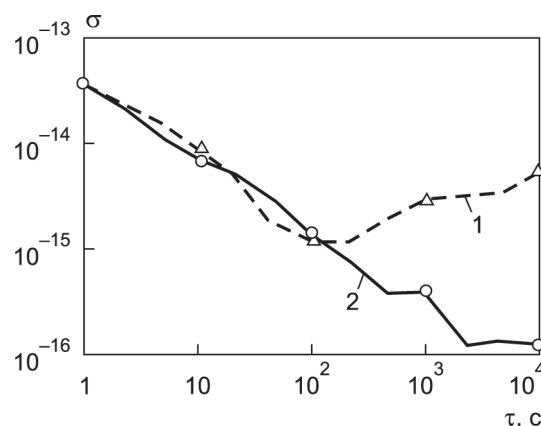


Рис. 1. Вносимая модемом нестабильность частоты $\sigma(\tau)$ при передаче эталонного сигнала 100 МГц по ВОЛС длиной 2 км при комнатных условиях (в полосе пропускания частотного компаратора 3 Гц) для линии без компенсации (1) и с компенсацией (2) фазовых возмущений

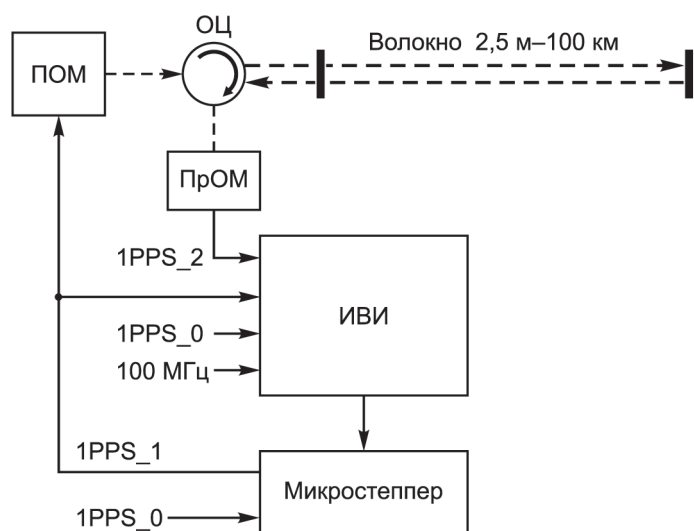


Рис. 2. Схема компенсации задержки сигнала времени: ПОМ, ПрОМ – передающий и приёмный оптические модули, соответственно; ОЦ – оптический циркулятор; ИВИ – измеритель временных интервалов; пунктирные и сплошные линии со стрелками соответствуют оптическому и электронному типам соединений

возмущений успешно передаёт долговременную стабильность частоты (рис. 1).

Для экспериментов использовали кабель, состоящий из двух волокон в одной оболочке, что обеспечивало идентичность механических и тепловых воздействий в каждом волокне. По одному из этих волокон передавался сигнал с компенсацией (сплошная линия 2), по другому волокну без компенсации фазовых возмущений (пунктирная линия 1).

При увеличении длины волокна до 4 км (соединение с помощью оптического разъёма двух волокон ВОЛС длиной 2 км) при отсутствии компенсации СКДО на интервале усреднения 1000 с составило $8 \cdot 10^{-15}$, на интервале усреднения

10000 с – $2 \cdot 10^{-14}$, что заметно отличается от данных (см. рис.1, линия 1) для ВОЛС длиной 2 км. В случае компенсации фазовых возмущений СКДО на интервале усреднения 1000 с составило $5 \cdot 10^{-16}$, на интервале усреднения 10000 с – значение $1 \cdot 10^{-16}$, близкое к линии 2.

Синхронизация сигналов с неопределённостью фронта импульса порядка 0,5 нс двух удалённых друг от друга концов ВОЛС может быть значительно повышена путём их привязки к переходу через нуль более стабильных высокочастотных (например, 100 МГц) сигналов. По ВОЛС одновременно передаются сигналы 100 МГц и 1 PPS (точнее, оптические сигналы, промодулированные сигналами 100 МГц и 1 PPS). Для компенсации фазовых флуктуаций, возникающих при распространении сигнала 100 МГц, используется компенсатор, работающий по двухчастотному методу [6], а для «первичной» синхронизации входного и выходного (опорного и удалённого) сигналов 1 PPS применяется схема компенсации задержки, расположенная на передающем конце линии. Схема компенсации задержки представлена на рис. 2. Входными сигналами схемы компенсации задержки импульсного сигнала являются: опорный гармонический сигнал 100 МГц, входной (опорный) импульсный сигнал 1PPS_0, импульсный сигнал, прошедший ВОЛС в обе стороны 1PPS_2. Выходным сигналом, передаваемым в линию (опережающим опорный 1PPS_0 с целью компенсации задержки), является 1PPS_1.

Для измерений интервалы времени между сигналами 1PPS_0 и 1PPS_1, а также сигналами 1PPS_2 и 1PPS_0 служит измеритель временных интервалов (ИВИ). Микростеппер устанавливает такое положение (опережение) сигнала 1PPS_1, при котором измеренные с помощью ИВИ интервалы времени становятся равными друг другу. Это обеспечивает синхронность импульсного сигнала на приёмном (удалённом) конце ВОЛС с опорным сигналом 1PPS_0. Погрешность данного сигнала должна быть достаточной для однозначного определения периода сигнала 100 МГц (на том же приёмном конце), переход через нуль сигнала 100 МГц должен соответствовать передаваемой шкале времени.

Приёмный и передающий оптические модули (ПрОМ и ПОМ, соответственно) обеспечивают длительности фронтов оптических и электрических сигналов не более 2,5 нс. Их вклад в температурную нестабильность синхронизации много меньше заданной погрешности синхронизации. Измеренный температурный коэффициент задержки фотодиодов и лазерных диодов, входящих в состав коммерческих SFP-модулей (Small Form-factor Pluggable), не превышает $1,5 \text{ пс/}^\circ\text{C}$ [11]. В описываемом модеме в состав ПрОМ и ПОМ входят диоды с близкими температурными коэффициентами.

Микростеппер, ИВИ и схемы компенсатора фазы сигнала 100 МГц в описываемом модеме выполнены на программируемых логических интегральных схемах семейства Intel (Altera) MAX10.

Оптический бюджет (разница между выходной мощностью ПОМ и чувствительностью ПрОМ, которая характеризует максимально допустимые потери оптической мощности в линии)

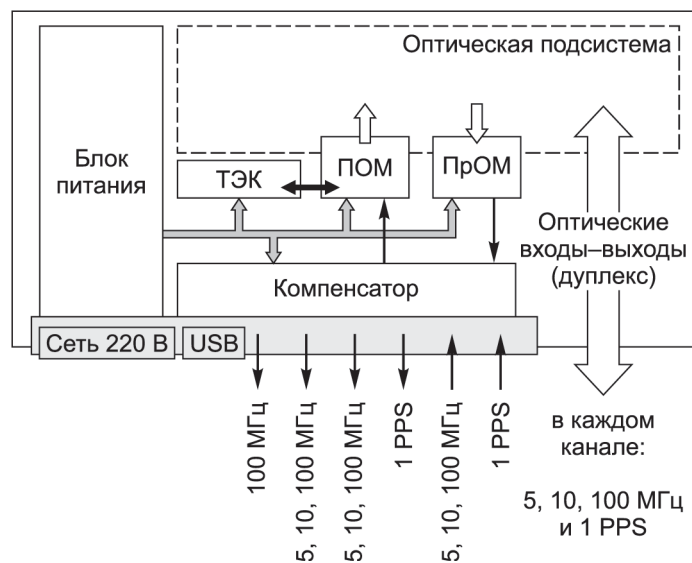


Рис. 3. Схема основных узлов модема: ТЭК – термодатчик; ПОМ, ПрОМ – те же, что на рис. 2

звена ПОМ–ПРОМ составляет 20 дБм. В случае применения рекомендуемого волокна типа SMF-28 стандарта G.652.C/D или G.656 такое значение оптического бюджета обеспечивает возможную дальность передачи до 100 км. Однако, чтобы полностью использовать оптический бюджет, необходимо ограничить влияние хроматической дисперсии оптоволокна. В настоящее время компенсация хроматической дисперсии в модеме не реализована.

ВОЛС-модем. Основные узлы разработанного модема представлены на рис. 3. Оптическая подсистема модема может служить для передачи эталонных сигналов от одного модема сразу на четыре соседних модема, причём на каждый из них вследствие спектрального уплотнения могут одновременно передаваться сигналы времени и частоты. Оптические циркуляторы, содержащиеся во всех оптических каналах, обеспечивают возможность дуплексной передачи сигналов и фазовой компенсации в каждой из четырёх ВОЛС.

Модем имеет два входа радиочастотных сигналов, на один подаётся гармонический сигнал 5, 10 или 100 МГц, а на другой – сигнал 1 PPS. Эталонный радиочастотный выход 100 МГц в модеме служит для проверки качества компенсации фазовых возмущений в линии. Также в модеме есть выходы приёмного тракта: радиочастотный выход 1 PPS и два рабочих выхода гармонического сигнала 5, 10, 100 МГц (а также возможны нестандартные значения из диапазона 1–300 МГц, конкретное значение выбирается программно или аппаратно). Оптические выходы модема в стандартном варианте рассчитаны на разъёмы типа FC/APC.

Основные характеристики модема

Вносимая нестабильность частоты (СКДО) на интервалах времени измерения, не более,

секунда	$1 \cdot 10^{-13}$
сутки	$1 \cdot 10^{-16}$

Погрешность синхронизации удалённого сигнала 1 PPS, не более

Габаритные размеры корпуса 1U

Крепление

Рабочая температура

Питание от сети переменного тока

Потребляемая мощность, не более

Для измерения СКДО используется компаратор частотный двухканальный VCH-314 (ЗАО «Время-Ч»), для измерения погрешности синхронизации сигнала 1 PPS – счётчик CNT-90 (Pendulum Instruments).

В зависимости от места положения в сети модем может программно или аппаратно конфигурироваться в качестве передатчика, приёмника или ретранслятора. Для выбора конфигурации и диагностики используется USB 2.0 интерфейс. Модем можно применять в оптических сетях различной топологии: линия (точка–точка–...–точка); звезда; кольцо с одним или несколькими ответвлениями; кольцо с резервированием и др. Четыре дуплексных входа–выхода позволяют организовать резервирование линий передачи прецизионных сигналов, реализовав по две ВОЛС с пред-

шествующим и последующим модемами (ретранслятор с резервированием). Результаты макетных испытаний ВОЛС с резервированием показали отсутствие каких-либо заметных скачков фазы передаваемых сигналов при отключении одной из резервных линий. При проведении экспериментальных исследований целесообразно применять оборудование Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ».

Заключение. Разработанный промышленный образец многоканального модема для передачи эталонных сигналов частоты и времени по ВОЛС с компенсацией фазовой нестабильности потенциально позволяет передавать сигналы частоты активных водородных стандартов (вносимая СКДО не более $1 \cdot 10^{-16}$ за сутки) и сигнал 1 PPS с погрешностью синхронизации не более 250 пс на расстояния до 100 км без использования оптических усилителей.

Литература

1. Huang S., Tjoelker R. L. Stabilized photonic links for deep space tracking, navigation, and radio science applications // Proc. 43rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2012. P. 1–8.
2. Santarelli G., Narbonneau F., Lours M., Chambon D., Bise S., Clairon A., Daussy Ch., Lopez O., Tobar M. Y. High performance frequency dissemination for metrology applications with optical fibers // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symp. Exposition. 2005. P.185.
3. Piester D., Rost M., Fujieda M., Feldmann T., Bauch A. Remote atomic clock synchronization via satellites and optical fibers // Adv. Radio Sci. 2011. V. 9. P. 1–7. DOI: 10.5194/ars-9-1-2011.
4. Foreman S. M., Holman K. W., Hudson D. D., Jones D. J., Ye J. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks // Rev. Sci. Instrum. 2007. V. 78 (021101). P. 1–25. DOI: 10.1063/1.2437069.
5. Fujieda M., Kumagai M., Gotoh T., Hosokawa M. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2009. V. 58. P. 1223–1228.
6. Фёдорова Д. М., Балаев Р. И., Курчатов А. Ф., Троян В. И., Малимон А. Н. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 34–37.
7. Балаев Р. И., Шибеева Д. М., Малимон А. Н., Курчанов А. Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонах времени и частоты // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 165–197.
8. Хабарова К. Ю., Калганова Е. С., Колачевский Н. Н. Передача точных сигналов частоты и времени в оптическом диапазоне // УФН. 2018. № 2. Т. 188. С. 221–230.
9. Hedekvist P. O., Ebenhag S.-Ch. Time and frequency transfer in optical fibers // Recent Progr. Opt. Fiber Res. 2012. P. 372–386.

10. Lopez O., Amy-Klein A., Daussy Ch., Chardonnet C., Narbonne F., Lours M., Santarelli G. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer // Eur. Phys. J. D. 2008. V. 48. P. 35–41.

11. Kodet J., Pánek P., Procházka I. Two-way time

transfer via optical fiber providing subpicosecond precision and high temperature stability. // Metrologia. 2016. V. 53. P. 18–26.

Дата принятия: 02.07.2018.

621.317.76

Оценка возможного уменьшения предельной нестабильности частоты водородного генератора при использовании пучка атомов в одном квантовом состоянии

А. А. БЕЛЯЕВ, Н. А. ДЕМИДОВ, В. А. ПОЛЯКОВ, Ю. В. ТИМОФЕЕВ

ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: polyakov@vremya-ch.com

Выполнена оценка возможного уменьшения предельной нестабильности частоты водородного генератора при использовании системы двойной сортировки атомов водорода по энергетическим состояниям. Показано, что при получении пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии возможно уменьшение нестабильности частоты примерно в 1,6 раза до значения $1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$.

Ключевые слова: активный водородный стандарт частоты, нестабильность частоты, система двойной сортировки атомов.

The frequency stability improvement estimation of active hydrogen maser with single state selected beam has performed. The frequency stability caused by microwave cavity noises is $1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$. The frequency stability possible improvement in comparing with present hydrogen masers is 1,6 times.

Key words: active hydrogen maser, frequency stability, double selecting system.

Многолетняя (полувековая) работа по развитию теории работы водородных мазеров, исследованию зависимости их частоты от различных факторов и конструктивных особенностей, систематическое конструктивное совершенствование позволили уменьшить нестабильность частоты водородного генератора (ВГ) практически до теоретического предела. Предельная нестабильность частоты водородного генератора определяется его собственным тепловым шумом, мощностью генерации и добротностью спектральной линии. Ещё большего уменьшения предельной нестабильности можно достичь, если использовать в ВГ пучок атомов водорода в одном квантовом состоянии [1].

Конструкция системы двойной сортировки атомов по квантовым состояниям. В классической конструкции водородного стандарта частоты в накопительную колбу попадают атомы водорода в двух квантовых состояниях: $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=1$. Атомы водорода во втором состоянии не участвуют в образовании генерации, но участвуют в спин-обменных взаимодействиях с рабочими атомами. Последнее приводит к дополнительному уширению спектральной линии и ограничению роста мощности генерации с увеличением интенсивности пучка, что препятствует повышению стабильности частоты ВГ. Для устранения этого нежелательного явления в [2–4] предложен способ получения пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии методом двойной сортировки атомов водо-

рода по энергетическим состояниям. Схема устройства приведена на рис. 1.

Согласно этой схеме пучок атомов водорода выходит из коллиматора и последовательно проходит два сортирующих магнита. Атомы водорода в состояниях с $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=1$, сфокусированные первым сортирующим магнитом, проходят область перехода Майорана. В этой области совершается переход атомов из состояния с $F=1, m_F=1$ в состояние $F=1, m_F=-1$ и их сортировка вторым сортирующим магнитом. Таким образом, в колбу попадают только активные атомы в состоянии $F=1, m_F=0$. Оценим вероятное улучшение метрологических характеристик ВГ в этом случае, предположив, что будут отсортированы 100 % атомов в состояниях $F=1, m_F=1$.

Нестабильность частоты ВГ с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям. Предельно возможная нестабильность частоты ВГ, обусловленная тепловыми шумами сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора, определяется следующим образом [5]:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{Q_0 \sqrt{P_r}} \sqrt{\frac{kT}{2}}, \quad (1)$$

где $\sigma(\tau)$ – среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (вариация Аллана); τ – время усреднения; Q_0 – добротность спектральной линии; P_r – мощность генерации в резонаторе; k – постоянная Больцмана; T – температура резонатора.