

Комплект аппаратуры для передачи по оптическому каналу эталонного сигнала 100 МГц

© А. В. Жеглов, С. Ю. Медведев, И. А. Писарев, И. Н. Чернышев

ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены механизмы возникновения и пути снижения фазовой нестабильности при передаче по волоконно-оптическому каналу прецизионного сигнала 100 МГц.

Приведены результаты передачи такого сигнала с помощью комплекта аппаратуры, разработанного в ЗАО «Время-Ч».

Комплект аппаратуры предлагается в двух вариантах — без компенсации и с компенсацией фазовой нестабильности.

Показано, что система с компенсацией обеспечивает передачу сигнала частоты, качества активного водородного стандарта на расстоянии до 100 км, а с применением оптических усилителей и более. Разработанная схема электронной компенсации обладает пониженной чувствительностью к температуре и повышенной спектральной чистотой скомпенсированного сигнала.

Ключевые слова: передача прецизионной частоты и времени, фазовая нестабильность, компенсация фазовой нестабильности.

Введение

Использование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием радиочастотного кабеля при передаче эталонных сигналов частоты и находит все более широкое применение:

- в радиоастрономии, радиолокации, радионавигации для передачи сигналов к антеннам;
- в метрологии при сличении эталонных комплексов, при передаче размеров единиц времени и частоты;
- на производстве для контроля качества и настройки выпускаемых кварцевых или квантовых генераторов.

Производственные применения ограничиваются, как правило, расстояниями передачи до нескольких сотен метров. Возможность использовать сигнал единого эталона на многих рабочих местах и лабораторных установках сулит ощутимую экономию и обеспечивает единство измерений. Для этих

целей может быть использован усеченный вариант комплекта аппаратуры без использования схемы компенсации фазовой нестабильности.

При передаче на расстояния больше нескольких сотен метров требуется компенсация фазовых искажений передаваемых сигналов, вызываемых влиянием окружающей среды на оптический кабель, в первую очередь температуры, механических и акустических воздействий.

Разработано несколько методов компенсации фазовых искажений [1, 2]. Исследования по этому направлению проводятся в ведущих научных центрах мира — NASA, SYRTE, PTB, NIST, NICT, в метрологических центрах Швеции, Польши, Чехии, Китая, ВНИИФТРИ и др.

Однако промышленные образцы подобной аппаратуры на сегодняшний день на рынке не представлены.

В ЗАО «Время-Ч» разработан комплект аппаратуры, обеспечивающей передачу сигналов 100 МГц качества активных водородных стандартов (Ч1-1003М) на расстояния от нескольких метров до сотни километров без использования оптических усилителей.

Основные проблемы и решения

Задержка сигналов частоты и времени в оптоволокне $t = L \cdot n / c$ (где L — длина оптоволоконной линии, n — показатель преломления, c — скорость света в вакууме). Она зависит от тепловых (T — температура) и механических (p — давление) воздействий на оптоволокно. Также, в силу хроматической дисперсии $n = n(\lambda)$, она зависит от длины волны λ используемого лазерного диода (ЛД). Нестабильность T , p , λ приводит к нестабильности задержки сигналов, то есть фазовой нестабильности. Необходимо, чтобы добавляемая каналом передачи нестабильность была много меньше нестабильности частоты, передаваемой от стандарта.

Диапазон температурных воздействий на оптоволокно ограничен характеристиками оптоволоконных кабелей, у кабелей для воздушной прокладки он составляет от -60 до $+70$ °С. Волокна с покрытием из металла позволяют работать до $+800$ °С. Стандартные оптические волокна имеют близкий температурный коэффициент задержки около 38 пс/(км·К). Суточное изменение температуры 100-километровой линии из стандартного волокна SMF28 на 1 °С дает погрешность задержки сигнала до 4 нс, а погрешность передачи частоты порядка $1 \cdot 10^{-15}$. Частично проблему можно сгладить путём подземной прокладки волокна. В этом случае суточные колебания температуры не превышают 1 °С, а сезонные — 10 °С. Другим способом сглаживания проблемы является использование полимерного покрытия оптоволоконной линии, за счёт чего можно влиять на величину фазовой чувствительности [3]. Одним из лучших фазостабильных кабелей является PSOF (Furukawa Electric Co., Ltd.), с температурным коэффициентом задержки 5 пс/(км·К) в диапазоне от 0 до 35 °С.

Важным механизмом возникновения фазовой нестабильности являются механические воздействия на оптоволокно [4]. На уровень внешних механи-

ческих напряжений влияют геологическая активность (землетрясения, оползны), провисание кабеля, передача сигнала на подвижные платформы, ветровые нагрузки, при подводной прокладке — приливы, течения. Неравномерность температуры на разных участках кабеля, также приводит к механическим напряжениям. Типичное время релаксации механических напряжений оптоволокна может занимать несколько минут и вносить заметный вклад в долговременную нестабильность передачи сигнала.

Следующим по важности механизмом возникновения фазовой нестабильности является хроматическая дисперсия. При работе в окне прозрачности 1550 нм при изменении длины волны ЛД на 1 нм она приводит к задержке 1.7 нс в кабеле длиной 100 км. Это сопоставимо с температурными задержками в подземном кабеле.

Для снижения влияния хроматической дисперсии необходимо обеспечить стабильность длины волны ЛД.

Длина волны ЛД имеет токовую и температурную зависимость, различную для разных типов ЛД. Типичная токовая зависимость ЛД с распределённой обратной связью 0.002 нм/мА, а температурная 0.008 нм/°С.

Источниками теплового воздействия на ЛД являются внешняя среда и протекающие через лазер токи — постоянный ток смещения и ток модуляции.

Ток смещения приводит к нагреву активной среды лазера и контактов. Тепловая инерционность активной области ЛД не превышает 10 мкс. Для снижения нагрева активной среды необходимо ограничивать ток смещения ЛД областью, где КПД ЛД достигает максимума. Тепловая инерционность контактов более 1 мс. Влияние тока модуляции при частоте больше 10 МГц не оказывает заметного влияния на нагрев лазера.

Длина волны ЛД также сильно зависит от излучения, попадающего в него обратно из прилегающего волокна. Чувствительность ЛД к попадающему в него свету находится на уровне квантовых шумов, так как среда внутри резонатора оптически активна.

Обратная волна в волокне образуется как за счёт рассеяния, так и за счёт отражения света. В оптоволокне свет рассеивается равномерно со всех участков волокна, а отражается только в местах нарушения однородности волокна.

Рассеяние света в основном обусловлено вынужденным рассеянием Манделштамма–Бриллюена (ВРМБ). Уровень ВРМБ из волокна возрастает при увеличении длины волокна, закачиваемой в волокно мощности и сужении ширины спектра.

Мощность, отражённая от неоднородности в длинном волокне, как правило, меньше мощности, рассеянной назад во всем волокне, но она оказывает значительно более сильное воздействие на ЛД. Обусловлено это тем, что неоднородность образует дополнительный резонатор, связанный оптически с основным резонатором ЛД.

Если удаление до неоднородности меньше длины когерентности ЛД, то результат воздействия обратного света зависит от фазы. При этом любые изменения длины оптического тракта в пределах долей длины волны вызывают нестабильность через механизм интерференции.

Для ЛД с распределённой обратной связью типичная ширина линии порядка 0.1 нм. Длина когерентности для 1550 нм соответственно 24 м. Длина когерентности ЛД более чем на порядок меняется от тока смещения.

Результат когерентного взаимодействия сильно зависит от поляризации. Поэтому необходимо в зоне когерентности подбирать элементы с низкой поляризационной чувствительностью.

Таким образом, для снижения фазовой нестабильности, вызванной нестабильностью длины волны ЛД, необходимо использование стабильного источника тока, термоконтроллера ЛД и снижение уровня обратного света, особенно из зоны когерентности.

Перечисленные выше меры позволяют обеспечить достаточную фазовую стабильность передачи сигналов по коротким (до 100 м) линиям внутри здания, при благоприятных условиях в пределах антенного поля. Однако на длинных дистанциях (более 100 м) всегда необходимо использовать схемы компенсации фазовой задержки.

В основе большинства таких схем лежит принцип фазового сопряжения. Если в начале линии подкорректировать фазу сигнала на величину фазовой задержки, то фаза на удалённом конце линии не будет зависеть от возмущений фазы в оптоволокне. Для его реализации необходимо создать дуплексную линию и обеспечить равенство времени распространения сигнала в прямом и обратном направлении.

На этом принципе созданы оптические и электронные схемы компенсации. Электронные схемы дешевле и компактнее. Известны варианты схем с умножением частоты и 2-частотная схема [2].

Эксперимент и результаты

Для оценки работы схемы компенсации использовался макет, показанный на рис. 1. Сигнал 100 МГц от активного водородного стандарта частоты Ч1-1003М (ЗАО «Время-Ч») через электронный повторитель передавался одновременно по двум каналам — с компенсацией и без компенсации фазовой нестабильности. Качество переданного сигнала оценивалось с помощью позволяющего работать одновременно с двумя каналами частотного компаратора VCH-314 (ЗАО «Время-Ч»).

Идентичность внешнего температурного и механического воздействия на оба канала обеспечивалась использованием кабеля с 2 волокнами, помещёнными в одну оболочку. Нагреватель обеспечивал изменение температуры кабеля в пределах 25 °С.

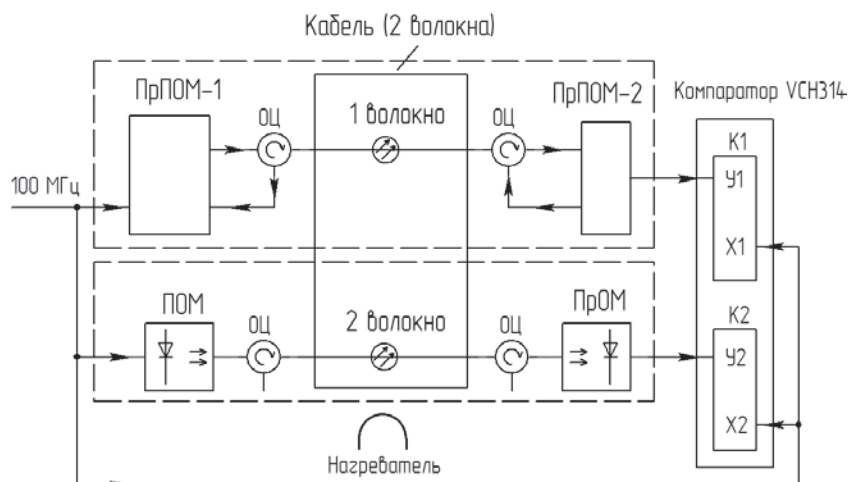


Рис. 1. Макет для оценки работы схемы компенсации

Канал с компенсацией является дуплексным. Это обеспечивалось использованием двух оптических циркуляторов. Для сохранения идентичности каналов в канал без компенсации также были установлены циркуляторы.

Для компенсации использовалась 2-частотная схема электронной компенсации с использованием 3 управляемых кварцевых генераторов, разработанная ЗАО «Время-Ч» (рис. 2).

Достоинства разработанной схемы: спектральная чистота, малая чувствительность к воздействию температуры. Устойчивость схемы обеспечивалась путём подбора постоянной времени интегратора.

Для обеспечения стабильности длины волны ЛД использовался разработанный ЗАО «Время-Ч» прецизионный источник стабильного тока, гальванически отвязанный от сети питания, что важно в условиях повышенного уровня помех от мощных промышленных установок, электросварочных аппаратов, грозовых наводок и т. д.

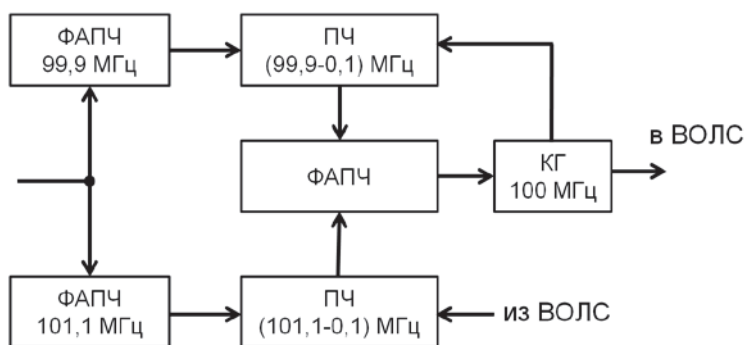


Рис. 2. Двухчастотная схема компенсации с 3 управляемыми генераторами

Дополнительно для этой цели использовался термодатчик, который поддерживал температуру активной области ЛД. Результат использования термодатчика представлен в табл. 1.

Результаты работы ВОЛС со схемой компенсации и без неё представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Таблица 1

Сравнение нестабильности частоты выходного сигнала с ЛД при отсутствии и наличии термодатчика

	Интервал времени измерения (с)		
	1	10	100
Без термодатчика	8.26×10^{-14}	2.46×10^{-14}	1.78×10^{-15}
С термодатчиком	4.96×10^{-14}	6.21×10^{-15}	6.11×10^{-16}

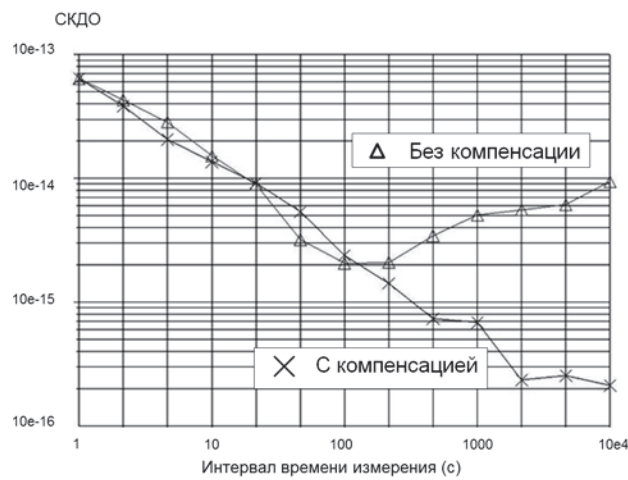


Рис. 3. Результаты передачи сигнала частоты 100 МГц по 2-километровой линии

Таблица 2

Результат передачи сигнала через ВОЛС. Нестабильность частоты выходного сигнала при измерениях в полосе пропускания 3 Гц

Интервал усреднения	Ч1-1003М	Добавляет 200 м линия	Добавляет 2 км линия	Добавляет 2 км линия с компенсацией
1 секунда	2×10^{-13}	6×10^{-14}	6×10^{-14}	6×10^{-14}
10 секунд	3×10^{-14}	9×10^{-15}	1×10^{-14}	1×10^{-14}
100 секунд	7×10^{-15}	2×10^{-15}	3×10^{-15}	2×10^{-15}
1 час	2×10^{-15}	2×10^{-16}	5×10^{-15}	2×10^{-16}
1 сутки	1×10^{-15}		9×10^{-15}	1×10^{-16}

Заклучение

Предлагаемый ЗАО «Время-Ч» комплект аппаратуры с компенсацией фазовых нестабильностей обеспечивает передачу сигналов 100 МГц качества активного водородного стандарта на дистанции до 100 км (при использовании оптоволоконных усилителей и больше). При передаче сигналов на короткие дистанции во многих случаях может быть использован вариант комплекта аппаратуры без компенсации фазовой нестабильности.

Литература

1. Федорова Д. М., Балаев Р. И., Курчатова А. Ф., Троян В. И., Малимон А. Н. // Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. — М.: ВНИИМС, 2015. — № 9. — С. 34–37.
2. Fujieda M., Kumagai M., Gotoh T., Hosokawa M. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NIST. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement — 2009. — Vol. 58. — P. 1223–1228.
3. Балаев Р. И., Шibaева Д. М., Малимон А. Н., Курчанов А. Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонах времени и частоте. // Альманах современной метрологии. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. — № 2. — С. 165–197.
4. Жеглов А. В., Медведев С. Ю., Пастухов А. А., Сахаров Б. А. Влияние механических деформаций оптоволокна на передачу по нему сигналов прецизионных частот // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2013. — Вып. 27. — С. 442–445.

A Set of Equipment to Transmit a 100 MHz Reference Signal via an Optical Channel

A. V. Zheglov, S. Yu. Medvedev, I. A. Pisarev, I. N. Chernyshev

Mechanisms of the phase instability and ways to reduce it are considered for a precision 100 MHz signal which is transmitted via a fiber optic line. We present our results of such signal transmitted with the help of a set of the “Vremya-CH” JS Company’s equipment. This set of equipment is created in two versions — without compensation and with compensation of the phase instability. The presented scheme of electronic compensation has a lower sensitivity to temperature and a higher spectral purity of the signal transmitted via the optical fiber.

Keywords: transmission of precision frequency, compensation of phase instability.