

Повышение дальности передачи сигналов частоты и времени модемами VCH-608

© А. В. Жеглов, Р. С. Кобяков, Р. Н. Новожилов, С. Ю. Медведев

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

Реферат

Рассмотрены особенности передачи сигналов частоты и времени в зависимости от протяжённости и элементного состава волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) с учётом вносимых потерь и потерь, обусловленных отражением.

Исследования проведены на базе двух модификаций волоконно-оптических модемов: VCH-608 и VCH-608.02. В модификации VCH-608 для организации дуплексной связи используется циркулятор. Модемы этой модификации связываются по одному волокну. Для передачи сигналов 100 МГц и 1 PPS необходимо использовать две длины волны 1310 нм и 1550 нм. Однако доступных оптических усилителей, одновременно работающих на этих двух длинах волн, нет. В модификации VCH-608.02 для организации дуплексной связи используется четыре волокна единого кабельного модуля. Это позволяет передавать сигналы 100 МГц и 1 PPS на одной и той же длине волны, а также упрощает использование в ВОЛП оптических усилителей и компенсаторов хроматической дисперсии.

Проведено макетирование вариантов передачи сигналов частоты и времени парами сопряжённых модемов и их каскадами. Рассмотрены ограничения на оптический бюджет ВОЛП, связанные с эффектами хроматической дисперсии и вынужденного рассеяния Манделштама-Бриллюэна. Дана методика оценки вносимой нестабильности при каскадировании ВОЛП. Экспериментально исследована работа ВОЛП с двумя каскадами.

Показана возможность одновременной передачи сигналов 100 МГц и 1 PPS качества активного водородного стандарта частоты парой сопряжённых модемов через ВОЛП с оптическим бюджетом до 25 дБ на длине волны 1310 нм, что в пересчёте на номинальную длину ВОЛП соответствует 60 км, и с оптическим бюджетом до 29 дБ на длине волны 1550 нм, что в пересчёте на номинальную длину ВОЛП соответствует более 110 км, без использования оптических усилителей. При использовании двух последовательно соединённых каскадов (то есть участков типа: передающий модем — ВОЛП — принимающий модем, где выходные радиочастотные сигналы принимающего модема первого каскада поступают на радиочастотные входы передающего модема второго каскада) достижимая номинальная длина ВОЛП удваивается.

Ключевые слова: передача прецизионной частоты и времени, компенсация фазовой нестабильности, сличение шкал времени.

Контакты для связи: Жеглов Александр Викторович (zheglov@vremya-ch.com).

Для цитирования: Жеглов А. В., Кобяков Р. С., Новожилов Р. Н., Медведев С. Ю. Повышение дальности передачи сигналов частоты и времени модемами VCH-608 // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 35–43.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.67.35-43>

Increasing the Transmission Range of Frequency and Time Signals by VCH-608 Modems

A. V. Zheglov, R. S. Kobayakov, R. N. Novozhilov, S. Yu. Medvedev

“Vremya-CH” JS Company, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

The features of transmission of frequency and time signals are considered depending on the length and elemental composition of the FOCL, taking into account the total and return losses.

The studies were carried out on the basis of two modifications of the VCH-608 and VCH-608.02 modems. In modifications of the VCH-608 modem, a circulator is used to organize duplex communication. Modems of this modification are connected via one fiber. To transmit 100 MHz and 1 PPS signals, two wavelengths of 1310 nm and 1550 nm must be used. However, there are no available optical amplifiers that operate simultaneously at these two wavelengths. In modifications of the VCH-608.02 modem, four fibers of a single cable module are used to organize duplex communication. This makes it possible to transmit 100 MHz and 1 PPS signals at the same wavelength, and also simplifies the use of optical amplifiers and chromatic dispersion compensators in fiber optic lines.

Prototyping of options for transmitting frequency and time signals by pairs of conjugated modems and their cascades has been carried out. The limitations on the optical budget of FOCL associated with the effects of chromatic dispersion and stimulated Mandelstam-Brillouin scattering (SMBS) are considered. A technique for assessing the introduced instability in cascading FOCL is given. The operation of FOCL with two stages has been experimentally studied.

The possibility of simultaneous transmission of signals of the quality of the active hydrogen maser of 100 MHz and 1 PPS by a pair of coupled modems through the FOCL with an optical budget of up to 25 dB at a wavelength of 1310 nm is shown, which, in terms of the nominal length of the FOCL, corresponds to 60 km and with an optical budget of up to 29 dB over the length waves of 1550 nm, which, in terms of the nominal length of the FOCL, corresponds to more than 110 km without the use of optical amplifiers, and when using a two cascaded technology, the achievable nominal length of the FOCL doubles.

Keywords: transmission of precision frequency and time, compensation of phase instability, comparison of time scales.

Contacts: Aleksandr V. Zhiglov (zhiglov@vremya-ch.com).

For citation: Zhiglov A. V., Kobayakov R. S., Novozhilov R. N., Medvedev S. Yu. Increasing the transmission range of frequency and time signals by VCH-608 modems // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 35–43.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.35-43>

Введение

Передача сигналов стандартов частоты и времени по ВОЛП используется при решении таких задач, как формирование опорных частот на радиотелескопах в радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ); синхронизация опорных узлов формирования шкал времени в сетях 5G, 6G и др. При этом в РСДБ вносимая относительная нестабильность опорных частот не должна превышать $5 \cdot 10^{-15}$ на интервале времени 1 час (Жуков, 2006), в сетях 5G и 6G сигнал 1 PPS должен передаваться с точностью порядка 1 нс, а радиочастоты 5, 10 и 100 МГц с погрешностью по частоте не хуже $\pm(1 \cdot 10^{-12})$ (Рыжков, Шварц, 2021).

Передача сигналов с такими параметрами точности и стабильности на расстояния до нескольких километров возможна с помощью волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) на основе фазостабильных кабелей, протянутых под землёй (Балаев и др., 2015). Однако радиотелескопы в РСДБ могут быть связаны между собой ВОЛП значительно большей протяжённости, например, описанная в работе (Yabai He et al., 2018) ВОЛП имела длину 155 км, а опорные узлы формирования шкал времени в сетях 5G и 6G могут быть удалены друг от друга на расстояния до 200 км (Рыжков, Шварц, 2021). Для передачи на расстояния свыше нескольких километров требуются модемы с компенсацией фазовой нестабильности, возникающей в ВОЛП, например из-за теплового воздействия окружающей среды (Жеглов и др., 2018; Кобяков и др., 2021).

Работы в данном направлении ведутся во многих зарубежных лабораториях. Так, на территории комплекса дальней космической связи Голдстоун в Калифорнии NASA проводило эксперименты по передаче сигналов частоты 100 МГц с использованием 16-километровой ВОЛП, фазовая компенсация осуществлялась с помощью 4-километровой катушки оптоволокна в регулируемом термостате (Calhoun et al., 2000). LPL и SYRTE в районе Парижа передавали сигналы по 86-километровой незадействованной «темной» жиле телекоммуникационного кабеля, добавив в схему компенсации быстродействующий пьезоэлектриче-

ский растяжитель оптоволокна (Lopez et al., 2010). В Польше (Central Office of Measures, Time and Frequency Laboratory) ведутся работы по передаче сигналов с компенсацией на основе специальной комплементарной линии задержки (Krehlik et al., 2012). Среди российских предприятий исследованиями в данном направлении занимаются во ВНИИФТРИ (Фёдорова и др., 2015), ВНИИОФИ (Григорьев, 2018), работы по совместной передаче сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну ведутся в ИПА РАН (Карпичев и др., 2022).

При необходимости увеличения протяжённости ВОЛП может быть использован каскад из нескольких регенерационных участков типа передающий модем — ВОЛП — принимающий модем. В работе (Ding Chen, 2021) рассмотрен каскад из участков по 100 км общей протяжённостью 700 км, используемый для передачи сигналов 1 PPS. Сигнал частоты при этом не передавался.

При использовании модемов с компенсацией фазовой нестабильности общую нестабильность частоты (среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение измеренного значения меры частоты — СКДО) переданного сигнала можно оценить по формуле:

$$\text{СКДО} = \sqrt{(\text{СКДО}_{\text{in}})^2 + (\text{СКДО}_{\text{out}})^2 + \sum_{k=1}^n (\text{СКДО}_k)^2}, \quad (1)$$

где СКДО_{in} — нестабильность сигнала на входе линии, СКДО_k — вносимая нестабильность передачи сигналов парой сопряжённых модемов k регенерационного участка, СКДО_{out} — нестабильность, вносимая устройствами, расположенными на выходе последнего регенерационного участка линии, например, внешними усилителями. СКДО_{out} может быть уменьшена путём включения устройств, расположенных на приёмном конце линии, внутрь петли компенсации модема, как это изложено в работе (Кобяков и др., 2021).

Таким образом, для снижения вносимой нестабильности передачи сигналов целесообразно увеличение протяжённости ВОЛП передач между модемами каждого регенерационного участка при снижении собственной нестабильности, вносимой модемами.

На нестабильность, вносимую модемами, влияет режим их работы, например, температурный режим в местах установки модемов. Также участок ВОЛП между соседними модемами может содержать компоненты, влияющие на режим работы модемов за счёт попадания на приёмные площадки фотодиодов (ФД) и внутрь резонаторов лазерных диодов (ЛД) модемов паразитных излучений. Используемые в данной работе ФД выполнены в виде модулей, имеющих в своём составе трансимпедансный усилитель и систему автоматической регулировки уровня (АРУ). Паразитные излучения могут возникать за счёт отражения от неоднородностей типа оптических разъемов и неразъемных соединений, вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), а также за счёт фоновых излучений ЛД от соседнего модема и расположенных на линии оптических усилителей.

В данной работе ставится задача описания модели передачи сигналов частоты и времени, учитывающая перечисленные технические сложности. На основании описанной модели выявить критерии подбора режима работы ЛД, оценить уровень возникающих в ВОЛП возвратных потерь и сравнить его с чувствительностью ФД.

Модель передачи сигналов частоты и времени, учитывающая протяжённость ВОЛП

Дальность передачи сигналов через ВОЛП определяется оптическим бюджетом — прогнозируемой суммой потерь оптического сигнала на всех компонентах ВОЛП, выраженной в дБ.

Дальность передачи сигналов двумя смежными модемами через ВОЛП ограничена характеристиками ЛД передающего модема, уровнем чувствительности ФД принимающего модема с учётом паразитной фоновой засветки и оптическим бюджетом ВОЛП, расположенной между ними.

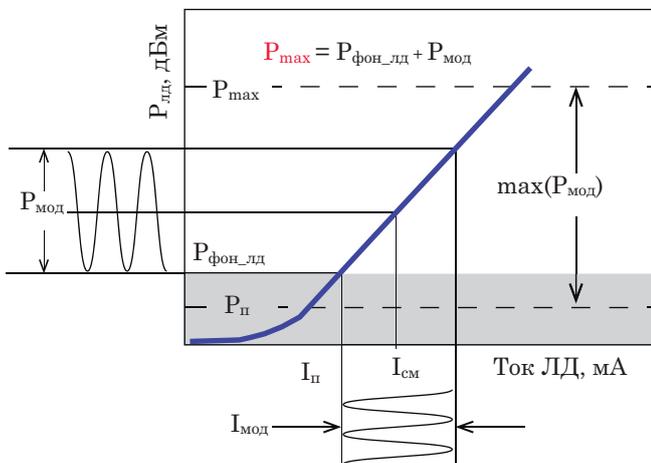


Рис. 1. Типовая характеристика ЛД

Для модификации модемов VSN-608, имеющих в своём составе циркулятор, дополнительным фактором ограничения дальности передачи сигналов является мощность обратного рассеяния и отражения из линии — возвратные потери.

Для рассмотрения ограничений со стороны ЛД обратимся к рис. 1.

Оптическая мощность на выходе ЛД модема $P_{\text{ЛД}}$ складывается из мощности фонового излучения $P_{\text{фон_лд}}$ и мощности, модулируемой полезным сигналом $P_{\text{мод}}$. Мощность $P_{\text{фон_лд}}$ при передаче гармонического сигнала не может быть ниже мощности спонтанного излучения лазерных диодов — $P_{\text{п}}$, который получается при пороговом токе накачки $I_{\text{п}}$. Для использованных в модемах VSN-608 лазерных модулях $P_{\text{п}}$ составила -15 дБм при комнатной температуре.

$P_{\text{мод}}$ зависит от уровня входного гармонического сигнала. Необходимо настраивать модем таким образом, чтобы при заданном максимальном действующем напряжении модулирующего электрического сигнала 1200 мВ мощность $P_{\text{л}}$ не превышала допустимой паспортной мощности излучения ЛД модема — P_{max} , то есть для модемов VSN-608 около 12 дБм. Рабочая точка ЛД — ток смещения $I_{\text{см}}$ подбирается так, чтобы $P_{\text{фон_лд}}$ была близка к $P_{\text{п}}$.

Однако, в процессе работы возможно поступление на вход модема пониженного действующего напряжения модулирующего электрического сигнала вплоть до 800 мВ. Это может произойти из-за использования более слабого источника модулирующего сигнала или потерь мощности сигнала при его прохождении через кабели. В этом случае, если $I_{\text{см}}$ не уменьшить, из-за снижения коэффициента модуляции $P_{\text{фон_лд}}$ увеличится вплоть до 3 дБм, а уровень $P_{\text{мод}}$ уменьшится примерно на 1 дБ, что увеличит вносимую нестабильность.

Таким образом, желательно иметь интерфейс, позволяющий пользователю управлять $I_{\text{см}}$.

Далее рассмотрим распространение оптических сигналов в ВОЛП.

В процессе прохождения излучения между двумя смежными модемами через ВОЛП происходят вносимые и возвратные потери оптической мощности (ORL — Optical Return Loss). Вносимые потери и ORL измеряется в децибелах.

Вносимые потери происходят из-за эффектов поглощения и рассеяния в оптоволокне, потерь в соединениях. Для оценки вносимых потерь в линии достаточно сложить значения вносимых потерь на каждом её элементе: участках волокна, соединениях, аттенюаторах, циркуляторах и прочих пассивных оптических компонентах.

Сложнее оценить возвратные потери линии (ORL — Optical Return Loss).

Как известно, возвратные потери линии определяются выражением: $ORL = 10 \lg (P_o/P_{\text{отрл}})$, где

P_0 — мощность сигнала, вводимого в линию, Вт; $P_{\text{отгр}}$ — суммарная мощность сигнала, возвращающегося к источнику, Вт. При этом $P_{\text{отгр}}$ зависит не только от коэффициентов отражения элементов линии, но и от их расположения (последовательности), так как сигнал, отражённый от элемента, находящегося в дальнем от источника конце линии, будет претерпевать большие потери нежели сигнал, отражённый от элемента, находящегося в ближнем к источнику конце линии (Никитин, Пирмагомедов, 2013). В итоге в обратном направлении приходит сумма по-разному ослабленных отражённых сигналов от каждой неоднородности ещё и с разной задержкой.

Оценить ORL можно без проведения измерений линии, основываясь на паспортных оптических параметрах элементов линии — вносимых потерях A_N (дБ) и коэффициентах обратного отражения R_N (дБ) N -го элемента линии, пользуясь формулой (Никитин, Пирмагомедов, 2013):

$$ORL = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^N 10^{0,1Rk-0,2 \sum_{i=1}^{k-1} A_i} \right)^{-1}. \quad (2)$$

В модификациях модемов VCN-608, имеющих в своём составе циркулятор, вернувшееся обратно излучение попадает на фотодиодный модуль смешиваясь с полезным сигналом, что дополнительно ограничивает качество и дальность передачи.

На рис. 2 представлена модель для расчёта вносимых и возвратных потерь при передаче при помощи модемов VCN-608.

Для оценки вносимых потерь линии достаточно сложить потери на каждом её элементе. Вносимые потери рассчитывались от выхода APC1 до входа принимающего модема APC2, то есть равнялись потерям на двух аттенюаторах Att1+Att2, с учётом того что потерями (менее 0.05 дБ) в использованном в работе 100 м волоконном кабеле типа ШОС-breakout-4x3,0-4FC/APC-4FC/APC можно пренебречь.

При расчётах возвратных потерь использовалась формула (2) и значения паспортных потерь использованных в измерениях элементов.

Вносимые потери на разъёмах APC — 0.4 дБ, между 2 и 3 портами ОЦ — 1.5 дБ, на аттенюаторах — 1, 2, 5, 7, 9, 25, 29 дБ. Аттенюаторы 25, 29 дБ ставились только на линии с модемами VCN-608.02 и ставились только в начале линии, то есть со стороны ЛД. На линии с модемами VCN-608 аттенюаторы ставились симметрично, по одному с каждого конца линии, чтобы обеспечить фазовое сопряжение в линии, необходимое для работы системы компенсации.

Возвратные потери на Att-FM FC/APC-SM — 60 дБ; разъёмах FC/APC — 60 дБ; ФД — 50 дБ и оптических циркуляторах — 55 дБ.

При расчёте возвратных потерь в качестве элемента $k = 1$ в формуле (2) принимался ОЦ1 (сигнал отражается от порта 2 к порту 3, рис. 2), а в качестве элемента $k = N$ принимался ФД2 (рис. 2).

В случае передачи при помощи модемов VCN-608.02 при расчёте вносимых потерь исключались: ОЦ1, ОЦ2, Att2.

В формуле (2) нумерация элементов линии начинается от первого элемента стоящего за источником излучения.

Для расчёта имитируемой на стенде дальности передачи ВОЛП, соответствующей вносимым с помощью аттенюаторов потерям (рис. 2), использовались значения километрического оптического затухания для одномодового оптического волокна, в соответствии со стандартом EIA/TIA-568:

— на длине волны 1310 нм: номинальное — 0.35 дБ/км, максимальное — до 0.5 дБ/км;

— на длине волны 1550 нм: номинальное — 0.2 дБ/км, максимальное — до 0.4 дБ/км.

Указанные в стандарте EIA/TIA-568 максимальные значения затуханий указаны как сильно завышенные, обычно достижимы указанные в стандарте номинальные значения, которыми пользуются на практике (Fibertop).

В табл. 1 приведены имитируемые (номинальная и минимальная) протяжённости ВОЛП на длинах волн 1310 нм и 1550 нм. Это прогнозируемая длина линии, полученная пересчётом из

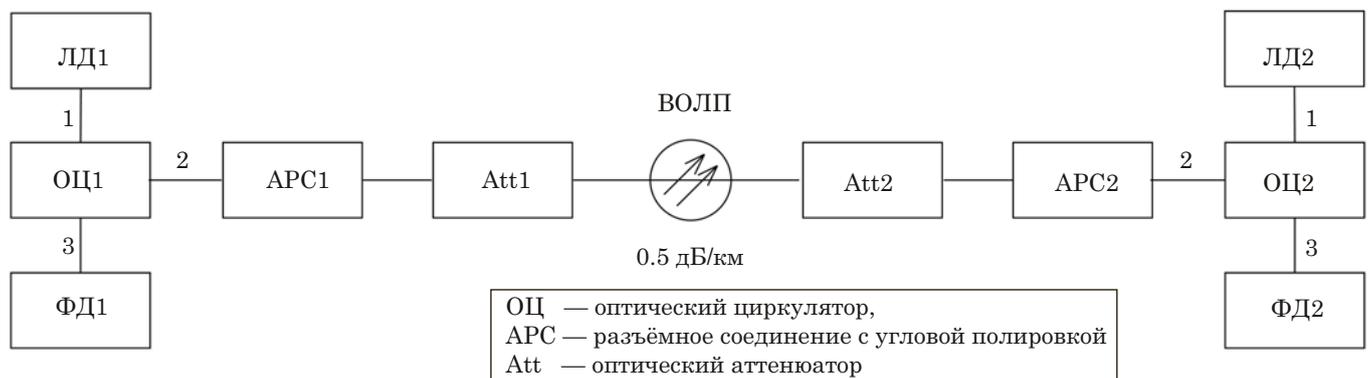


Рис. 2. Модель для расчёта вносимых и возвратных потерь в исследуемых вариантах передачи

Таблица 1

Имитируемая дальность передачи в исследуемых линиях

Номинальная протяжённость ВОЛП, км							
на длине волны 1310 нм	4.5	9	24	33	41	60	69
на длине волны 1550 нм	8	16	40	56	72	100	116
Минимальная протяжённость ВОЛП, км							
на длине волны 1310 нм	3	6	16	22	29	40	46
на длине волны 1550 нм	4	8	20	28	36	50	58
Вносимые потери, дБ	2	4	10	14	18	25	29
Возвратные потери, дБ	48.9	49.1	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2
Рекомендация	доп. аттенуаторы		доп. усилитель			VSN-608.02	

оптического бюджета, при включении дополнительных потерь на характерное для данной длины линии количество разъёмных и неразъёмных соединений, а также эксплуатационный запас до 6 дБ.

Результат по имитации ВОЛП с общими потерями 29 дБ, приведённый в таблице, был достигнут при замене в модеме VSN-608.02 ЛД с длиной волны 1310 нм на ЛД с длиной волны 1550 нм.

В использованных в эксперименте модемах сигнал 100 МГц передавался на длине волны 1310 нм, а 1 PPS — на 1550 нм. В модификациях VSN-608.02 возможна передача обоих сигналов на одной длине волны: 1310 нм — если важна компенсация хроматической дисперсии или 1550 нм — если важна дальность передачи.

Вносимые оптические потери в ВОЛП в данной работе имитировались с помощью оптических аттенуаторов на специальном оптическом волокне фиксированного типа Att-FM FC/APC-SM, включая потери за счёт ВРМБ и ХД. Данные аттенуаторы вносят в линию потери от 1 до 30 дБ.

Вносимые и возвратные оптические потери контролировались измерителем оптической мощности ТОПАЗ-7220-А.

Общие и возвратные потери, приведённые в таблице и рассчитанные по формуле (2), получены при условии работы ниже порога возникновения нелинейных эффектов. Однако благодаря ВРМБ потери зависят от уровня вводимой оптической мощности (Скляров, 1999, с. 103–107). Также потери оптической мощности происходят из-за хроматической дисперсии (Былина, Попова, 2016). Длины ВОЛП, приведённые в таблице, имитировались с учётом хроматической дисперсии.

Эффект ВРМБ имеет наиболее низкий порог возникновения из всех нелинейных эффектов в оптоволокне, возникает при рассеянии света на флуктуациях плотности материала световода — фононах. Свет как бы модулируется волной, возникающей вследствие следующего эффекта. Из-за структуры волновода, с ростом мощности волны накачки начинает преобладать рассеяние назад —

стоксова компонента. Волна накачки интерферирует с обратной волной — возникает бегущая интерференционная картина, в пучностях которой из-за эффекта электрострикции меняется плотность материала световода. Таким образом возникает сбалансированная по фазе система из волны накачки, рассеянной назад стоксовой компоненты и акустической решётки Брэгга. Баланс фаз ведёт к лавинообразному росту ВРМБ, вплоть до насыщения. В допороговой области флуктуации плотности материала световода распределены случайно, индуцируются флуктуациями температуры.

Порог ВРМБ убывает при понижении ширины спектральной линии вводимого в волокно излучения, увеличении длины и уменьшении площади сердцевины волокна. В случае стандартного одномодового волокна и излучения от лазерного диода с распределённой обратной связью, который применяется в модеме VSN-608, порог ВРМБ составляет для непрерывного излучения порядка 0 дБм. В случае модулированного излучения порог ВРМБ возрастает, что определяется временем, необходимым для перекрытия акустической и световой волн, которое в стандартном одномодовом волокне составляет 10–15 нс. Порог ВРМБ при соответствующем подборе параметров передаваемого импульсного сигнала может быть увеличен до 10 дБм.

Таким образом, с учётом ВРМБ для увеличения дальности передачи сигналов следует путём регулирования $I_{см}$ уменьшить $P_{фон_лд}$ как минимум ниже порога ВРМБ — 0 дБм, а при передаче сигнала 1 PPS использовать импульсную последовательность из импульсов длительностью не более 10–15 нс.

Для рассмотрения ограничений со стороны ФД обратимся к рис. 3. В результате передачи через ВОЛП, как показано на рис. 3, на входе принимающего модема наблюдается оптическая мощность $P_{фд}$, состоящая из мощности полезного сигнала P_s , мощности фоновой засветки $P_{фон_пр}$, а также мощности обратного рассеяния и отражения из линии, которая включает в себя постоянную составляющую

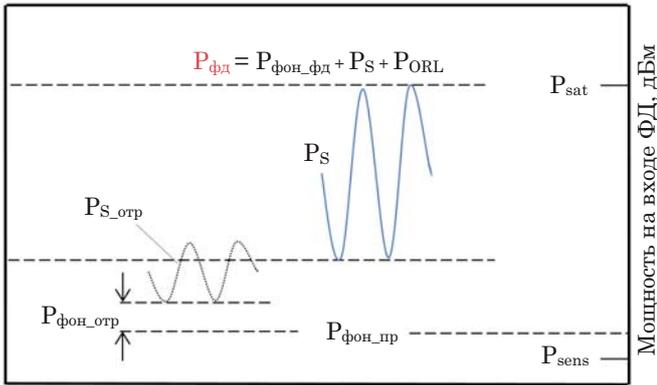


Рис. 3. Составляющие оптической мощности на входе ФД модема

$P_{фон_отр}$, увеличивая фоновую засветку и переменную составляющую — сигнал, отражённый из линии $P_{S_отр}$.

Для детектирования сигнала необходимо, чтобы P_s попадала в рамки динамического диапазона используемых ФД, то есть была ограничена сверху мощностью насыщения P_{sat} , а снизу — чувствительностью P_{sens} . В случае коротких ВОЛП P_s мо-

жет оказаться выше P_{sat} , в этом случае сигнал должен быть специально ограничен либо путём ограничения глубины модуляции ЛД, либо включением в ВОЛП оптических аттенюаторов. При этом включение аттенюаторов, либо ограничение глубины модуляции ЛД должно быть одинаковым со стороны каждого из сопряжённых модемов, чтобы не нарушить условия фазового сопряжения. Задачей оптического согласования является увеличение соотношения $P_s / P_{фд}$. При хорошем согласовании должно быть выполнено условие максимального использования динамического диапазона, то есть P_s должна быть близка к P_{sat} , а мощность суммарного фона засветки ($P_{фон_отр} + P_{фон_пр}$) близка к P_{sens} . Для использованных в модемах VCH-608 фотодиодных модулей P_{sat} равна 3 дБм, а P_{sens} —23 дБм на длине волны 1310 нм и —27 дБм — на длине волны 1550 нм.

Схема эксперимента

Для оценки дальности передачи сигналов СЧВ был создан стенд, позволяющий макетировать различные варианты их передачи, структурная схема которого приведена на рис. 4а.

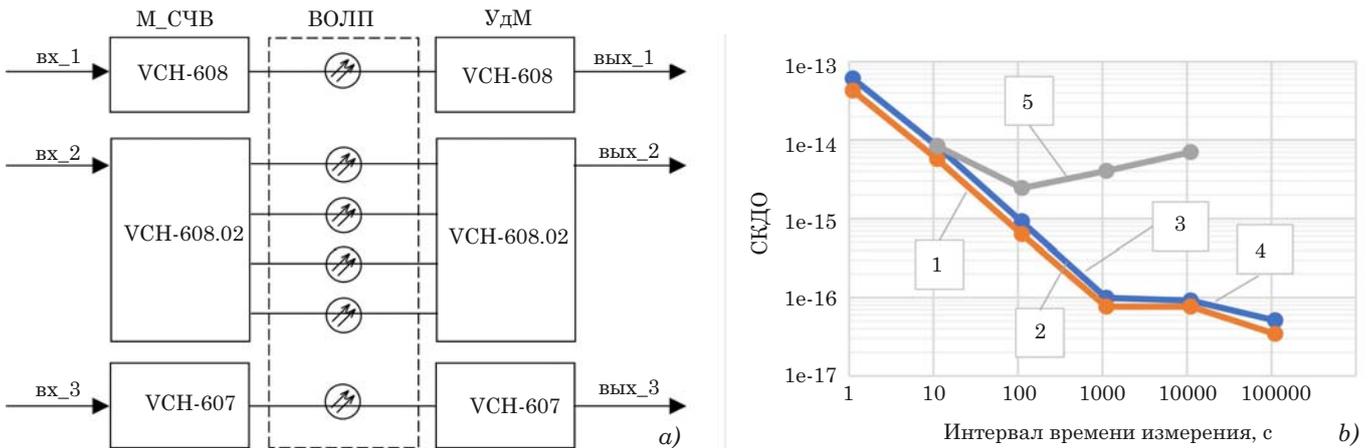


Рис. 4. Структурная схема стенда для исследования вариантов передачи сигналов СЧВ и результаты измерения СКДО (М_СЧВ — модемы, установленные на стороне СЧВ; УдМ — модемы, удалённые от СЧВ на противоположный конец ВОЛП или принимающие модемы, кривые 1–5 на рис. 4b соответствуют вариантам передачи 1–5, указанным в тексте)

Таблица 2

Результаты измерения СКДО

Время усреднения, с	Вносимая системой передачи нестабильность частоты (СКДО)				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
1	$5.63 \cdot 10^{-14}$	$5.61 \cdot 10^{-14}$	$8.01 \cdot 10^{-14}$	$8.04 \cdot 10^{-14}$	$7.95 \cdot 10^{-14}$
10	$7.52 \cdot 10^{-15}$	$6.98 \cdot 10^{-15}$	$1.03 \cdot 10^{-14}$	$9.97 \cdot 10^{-15}$	$1.13 \cdot 10^{-14}$
100	$8.31 \cdot 10^{-16}$	$8.26 \cdot 10^{-16}$	$1.15 \cdot 10^{-15}$	$1.22 \cdot 10^{-15}$	$3.22 \cdot 10^{-15}$
1000	$1.00 \cdot 10^{-16}$	$1.03 \cdot 10^{-16}$	$1.27 \cdot 10^{-16}$	$1.31 \cdot 10^{-16}$	$5.25 \cdot 10^{-15}$
10000	$1.01 \cdot 10^{-16}$	$1.02 \cdot 10^{-16}$	$1.18 \cdot 10^{-16}$	$1.16 \cdot 10^{-16}$	$9.17 \cdot 10^{-15}$
100000	$4.47 \cdot 10^{-17}$	$4.49 \cdot 10^{-17}$	$6.65 \cdot 10^{-17}$	$6.73 \cdot 10^{-17}$	—

Вариант 1. Передача при помощи модемов VCH-608. Модемы VCH-608 имеет в своём составе мультиплексор и демупльтиплексор для уплотнения по длинам волн и циркулятор для организации дуплекса. Модемы этой модификации связываются по одному волокну. Исследуемые сигналы 100 МГц поступают на vx_1 и снимаются с $вых_1$.

Вариант 2. Передача при помощи модемов VCH-608.02. Модемы модификации VCH-608.02 не имеют в своём составе мультиплексора, демупльтиплексора и циркулятора. Для организации дуплексной связи модемов этой модификации используются четыре волокна кабельного модуля — каждый лазерный диод (ЛД) одного модема подсоединён только к сопряжённому фотодиоду (ФД) противоположного модема. Исследуемые сигналы 100 МГц поступают на vx_2 и снимаются с $вых_2$.

Вариант 3. Передача при помощи каскада. Исследуемые сигналы 100 МГц поступают на vx_1 и снимаются на стороне потребителя с выхода $вых_2$, выход $вых_1$ соединён коротким фазостабильным РЧ-кабелем со входом vx_2 .

Вариант 4. Аналогичен варианту 3. Но исследуемые сигналы 100 МГц поступают на vx_2 и снимаются на стороне потребителя с выхода $вых_1$, выход $вых_2$ соединён коротким фазостабильным радиочастотным кабелем со входом vx_1 .

Вариант 5. Для контроля режима компенсации использовался канал передачи на основе модемов VCH-607. Модемы VCH-607 собраны на тех же ЛД и ФД модулях, что и VCH-608 и работают в тех же режимах, но не имеют модуля компенсации. Сигналы 100 МГц поступают на вход vx_3 и снимаются на стороне потребителя с выхода $вых_3$.

Сигнал 100 МГц от активного водородного стандарта частоты Ч1-1003М (АО «Время-Ч») через усилитель сигналов высокой частоты VCH-605 поступают на входы модемов М_СЧВ, находящихся со стороны стандарта, в зависимости от выбранного варианта. Усилитель VCH-605 обеспечивает размножение входного сигнала 100 МГц на каждый из выбранных входов, один из выходов усилителя используется для подачи опорного сигнала на компаратор. Всего усилитель имеет по 4 идентичных выхода на вход.

Нестабильность, вносимая при каждом из вариантов передачи сигналов, оценивалось с помощью частотного компаратора VCH-314.

Передача импульсных сигналов контролировалась с помощью частотомера Pendulum CNT-90.

Идентичность внешнего температурного и механического воздействия на все исследуемые каналы передачи обеспечивалась использованием в качестве ВОЛП помещённых в единую оболочку волокон многоволоконного кабеля типа ШОС-breakeout-4x3,0-4FC/APC-4FC/APC.

Результаты и выводы

На рис. 4b представлены результаты измерений вносимой системой передачи (передающий + приёмный модемы + ВОЛП) нестабильности частоты (СКДО) сигналов 100 МГц от СЧВ для 5 вариантов, приведённых на рис. 4a и в табл. 2.

СКДО были получены при изменении температуры воздуха не более чем на $\pm 0.3^\circ\text{C}$ в течение часа, при этом суточное изменение температуры воздуха не превышало $\pm 2.5^\circ\text{C}$, в пределах рабочего диапазона температур (20 ± 5) $^\circ\text{C}$ за всё время исследования.

СКДО для варианта 1 получено при вносимых потерях 18 дБ. В диапазоне вносимых потерь от 2 дБ до 18 дБ изменения СКДО не наблюдалось. При отсутствии аттенюаторов на осциллографе наблюдалось ограничение 100 МГц сигнала на выходе ФД модема сверху, что говорит о попадании P_s за рамки динамического диапазона используемых ФД ($P_s > P_{\text{sat}}$). Ограничение наблюдалось вплоть до вносимых потерь в линии 2 дБ. Так как в ряду фиксированных оптических аттенюаторов отсутствуют аттенюаторы менее 1 дБ, потери в линии менее 2 дБ имитировались сгибанием оптоволокна в петельки диаметром менее 10 мм с каждого конца линии. Потери в петлях контролировались измерителем оптической мощности ТОПАЗ-7220-А. Так как выходной сигнал 100 МГц окончательно формируется в компенсаторе принимающего модема петлёй ФАПЧ, его форма сохраняется гармонической несмотря на искажения ФД. При потерях в линии менее 2 дБ наблюдался рост вносимой нестабильности.

Для варианта 2 СКДО получено при вносимых потерях 25 дБ. При вносимых потерях в линии менее 4 дБ наблюдалось увеличение нестабильности в ВОЛП. Разница в 2 дБ по сравнению с вариантом 1 может быть связана с отсутствием оптических циркуляторов в модемах VCH-608.02. При увеличении потерь выше 18 дБ в варианте 1 и 25 дБ в варианте 2 сигнал не детектировался. Варианты 3 и 4 отличались последовательностью включения в каскад вариантов 1 и 2, то есть исследовался вариант с последовательностью подключения каскадов на базе модемов 608 и 608.02. Значение СКДО для вариантов 3 и 4 хорошо согласуется с полученным по формуле (1) из значений для вариантов 2 и 3.

Сравнение СКДО, полученных в вариантах 1–4, с СКДО, полученным в варианте 5, подтверждает наличие компенсации фазовой нестабильности в ВОЛП на базе модемов VCH-608, VCH-608.02 и каскадов на их основе. Суточные колебания температуры в помещении в период проведения измерений составляли 5°C . Оптическая мощность сигнала 100 МГц оценивалась с помощью предварительно откалиброванного широкополос-

ного фотоприёмника ДФДМШ40-16 (ф. Дилаз) и составляла от 6 до 6.5 дБм. Это меньше допустимой паспортной мощности используемых в модемах ЛД — 12 дБм. Мощность постоянного фонового излучения во всех вариантах составляла менее 0 дБм, что гарантировало работу ниже порога ВРМБ.

Заключение

На основе рассмотренной модели и проведённого макетирования:

— выработаны критерии подбора режима работы ЛД с целью минимизации паразитного фона и эффекта ВРМБ;

— приведена методика оценки возвратных потерь в ВОЛП, которые не должны превышать уровня чувствительности ФД модема, приведены примеры оптических элементов, обеспечивающих приемлемый уровень возвратных потерь;

— отмечено снижение вносимой нестабильности при использовании оптических аттенуаторов для оптического согласования излучения с выхода передающего модема со входом принимающего модема для коротких линий.

С учётом изложенных результатов ведётся совершенствование конструкции и программного обеспечения модемов. Предложена модификация модема VCN-608.02, которая за счёт передачи по четырём волокнам одного кабельного модуля позволяет увеличить номинальную дальность передачи сигнала на 28 км, при использовании оптического кабеля с погонными потерями 0.25 дБ/км на длине волны 1550 нм. Благодаря тому, что в каждом из четырёх волокон распространяется излучение только одной длины волны, в линию ВОЛП на основе VCN-608.02 можно включить оптические усилители, а также легче устранять хроматическую дисперсию. Кроме того, можно передавать оба сигнала 100 МГц и 1 PPS на одной длине волны, при которой дальность передачи будет больше. Обычно вносимые потери оптической мощности в стандартном одномодовом волокне на длине волны 1550 нм меньше, чем на 1310 нм, но в некоторых случаях, например, если волокно имеет множество сильных изгибов, может быть наоборот.

Показана возможность передачи сигналов через ВОЛП с оптическим бюджетом до 25 дБ на длине волны 1310 нм, что в пересчёте на номинальную длину ВОЛП соответствует 60 км и с оптическим бюджетом до 29 дБ на длине волны 1550 нм, что в пересчёте на номинальную длину ВОЛП соответствует 116 км без использования оптических усилителей и каскадирования.

Подтверждена возможность каскадирования двумя каскадами, при этом нестабильность вносимая двумя каскадами измеренная экспериментально хорошо согласуется с полученной по фор-

муле (1) из вносимых нестабильностей, измеренных экспериментально для каждого каскада в отдельности.

Литература

Балаев Р. И., Шибалева 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. 2015. № 2. С. 165–179. EDN TSZHVJ.

Былина М. С., Попова С. С. Методика расчёта длины регенерационного участка ВОЛС с компенсаторами дисперсии // Труды учебных заведений связи. 2016. № 2. С. 33–39.

Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрев А. К., Савкин К. Б., Тихомиров С. В. Передача высокостабильного сигнала времени по волоконно-оптической линии связи // Измерительная техника. 2018. № 10. С. 47–49.

Жеглов А. В., Беляев А. А., Медведев С. Ю., Писарев И. А. Модем с волоконно-оптической линией связи для передачи эталонных сигналов частоты и времени // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 25–28.

Жуков Е. Т. Оценка потерь когерентности из-за фазовой и частотной нестабильности стандартов частоты в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 15. С. 140–155.

Карпичев А. С., Зиновьев П. В., Вытнов А. В. Совместная передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 39–43.

Кобяков Р. С., Жеглов А. В., Медведев С. Ю. и др. Передача сигналов перспективных водородных стандартов частоты и времени по оптоволоконному каналу с компенсацией фазовой нестабильности // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 42–47.

Кобяков Р. С., Новожилов Р. Н., Писарев И. А. и др. Некоторые методы повышения точности компенсации фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 36–40.

Никитин Б. К., Пирмагомедов Р. Я. Надёжность пассивных оптических сетей. Возвратные потери // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. II-я Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. научных статей под. ред. С. М. Доценко. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2013. С. 751–754.

Рыжков А. В., Шварц М. Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования — основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15, № 7. С. 14–22.

Скляров О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. М.: Издательство «СОЛОН-Р». С. 106.

Фёдорова Д. М., Балаев Р. И., Курчанов А. Ф. и др. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 34–37.

Ding Chen, Jiangning Xu, Yifeng Liang, et al. Long-distance time transfer in optical fiber networks using a cascaded taming technology // Mathematical problems in engineering. 2021. Article ID 8860028, 10 pages.

Calhoun M., Wang R., Kirk A., et al. Stabilized reference frequency distribution for radio science with the casini spacecraft and the deep space network // 32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Mtg., Reston, VA. Nov. 28–30, 2000.

Fibertop [Электронный ресурс]. URL: [https:// fiber-top.ru/kilometrisheskoe_zatuhanie/](https://fiber-top.ru/kilometrisheskoe_zatuhanie/) (дата обращения: 14.07.2023).

Krehlik P., Sliwczynski L., Buczek L., Lipinski M. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active sta-

bilization of propagation delay // IEEE Transaction and Measurement. 2012. Vol. 61, No. 10. P. 2845–2851.

Lopez O., Amy-Klein A., Daussy C., et al. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer // in The European Physical Journal D. 2008. Vol. 48. P. 35–41.

He Y., Baldwin K. G. H., Orr B. J., et al. Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy // Optica. 2018. Vol. 5, no. 2. P. 138–146.