

Некоторые методы повышения точности компенсации фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени

© Р. С. Кобяков^{1,2}, Р. Н. Новожилов¹, И. А. Писарев¹, А. В. Жеглов¹, С. Ю. Медведев¹

¹ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Реферат

Нестабильность частоты выходных сигналов водородных стандартов частоты и времени (СЧВ) на суточном интервале времени измерений имеет величину порядка $2 \cdot 10^{-16}$. При передаче потребителю эти сигналы приобретают дополнительные фазовые возмущения, величина которых зависит от температурных коэффициентов изменения фазы, входящих в систему передачи оптических и коаксиальных кабелей, лазерных и фотодиодов, распределительных усилителей сигналов и т. д. Вклад электронных составляющих системы передачи в итоговую фазовую нестабильность достигает 50 пс/°С. Чтобы сохранить нестабильность частоты сигнала на приёмном конце линии передачи, близкой к нестабильности частоты выходных сигналов СЧВ, необходимо, чтобы вносимые этой системой передачи вариации фазовой задержки не превышали 1 пс.

В статье рассмотрены описанные в литературе пути снижения вносимой фазовой нестабильности переданного потребителю сигнала СЧВ: снижение температурных коэффициентов изменения фазы, термостатирование, компенсация. Описаны их ограничения. Точность и скорость термостатирования ограничивается габаритами устройств. Точность компенсации фазовой нестабильности ограничивается элементами системы передачи, не охваченными петлёй компенсации.

Для преодоления этих ограничений предлагается модем, разработанный авторами. В модеме добавлен и апробован новый алгоритм стабилизации температуры измерительных каналов компенсатора. Стабилизация температуры измерительных каналов достигается за несколько секунд с точностью 0.1 °С. Интерфейс модема позволяет включить в петлю компенсации внешний изолирующий усилитель. Представлена схема такого подключения.

В условиях обогрева и охлаждения с размахом 20 °С корпусов передающего модема и внешнего усилителя, расположенного на стороне принимающего модема, нестабильность частоты, вносимая системой передачи с внешним усилителем на интервале времени измерений 10000 с, достигла величины менее:

— $3.4 \cdot 10^{-16}$ при включении внешнего усилителя вне петли компенсации;

— $3.2 \cdot 10^{-17}$ при включении внешнего усилителя внутри петли компенсации.

При этом в разработанном модеме фронт импульсного сигнала 1 PPS на приёмном конце линии привязан к сигналу 100 МГц, поэтому компенсация нестабильности частоты сигнала 100 МГц позволяет также поддерживать синхронизацию импульсных сигналов между входом передающего и выходом принимающего модема.

Ключевые слова: температурный коэффициент фазы, компенсация фазовой задержки, девиация Аллана.

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

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

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.36-40>

Some Enhancement Methods of Phase Instability Compensation Accuracy when Transmitting Signals of Frequency and Time

R. S. Kobayakov^{1,2}, R. N. Novozhilov¹, I. A. Pisarev¹, A. V. Zheglou¹, S. Yu. Medvedev¹

¹JSC “Vremya-CH”, Nizhniy Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University, Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract

In hydrogen frequency and time standards, the frequency instability of the output signals is expected on a daily measurement time interval of the order of 2×10^{-16} . However, on the way to the consumer, these signals acquire additional phase disturbances. We have considered the ways described in the literature to reduce the introduced phase instability. We have described their limitations. The accuracy and speed of temperature control is limited by the size of the devices. The accuracy of compensation of phase instability is limited by the part of the transmission system falling inside the compensation loop.

To overcome these limitations, we used a modem that we developed. We have added and tested a new algorithm for stabilizing the temperature of the measuring channels of the modem compensator. The modem interface developed by us allows an external isolating amplifier to be included in the compensation loop. We have presented a diagram of such a connection.

In the conditions of heating and cooling with a span of 20 °C of the cases of the transmitting modem and an external amplifier located on the side of the receiving modem, we obtained frequency instability introduced by the transmission system with an external amplifier at a measurement time interval of 10,000 s less:

- 3.4×10^{-16} when the external amplifier is turned on outside the compensation loop;
- 3.2×10^{-17} when you turn on the external amplifier inside the compensation loop.

At the same time, in the modem developed by us, the 1 PPS pulse signal is tied to the 100 MHz signal, therefore, the compensation for the instability of the 100 MHz signal frequency also makes it possible to maintain synchronization of the pulse signals between the input of the transmitting and the output of the receiving modem.

Keywords: phase delay compensation, phase drifts to the temperature, frequency instability, Allan deviation.

Contacts: Aleksandr V. Zheglov (zheglov@vremya-ch.com).

For citation: Kobyakov R. S., Novozhilov R. N., Pisarev I. A., Zheglov A. V., Medvedev S. Yu. Some enhancement methods of phase instability compensation accuracy when transmitting signals of frequency and time // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 58. P. 36–40.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.36-40>

Введение

В компании ЗАО «Время-Ч» разрабатываются перспективные водородные стандарты частоты и времени (СЧВ) с нестабильностью частоты на суточном интервале порядка $2 \cdot 10^{-16}$. Потребитель получает сигналы от СЧВ через волоконнооптическую систему передачи, включающую в себя множество промежуточных материальных сред и устройств, как волоконных, так и электронных. Изменения фазы, обусловленные вариацией задержки передаваемого сигнала в этих промежуточных материальных средах и устройствах, приводят к увеличению нестабильности частоты эталонного сигнала на удалённом конце линии. Чтобы при передаче сигнала сохранить нестабильность частоты близкой к возможностям СЧВ, необходимо, чтобы нестабильность задержки, вносимая системой передачи, была на уровне 1 пс.

Как правило, наибольший вклад в нестабильность задержки вносят температурные изменения задержки, величина которых оценивается по температурному коэффициенту изменения фазы (ТКФ) (температурному коэффициенту задержки — ТКЗ). Совокупный вклад в фазовую нестабильность от электронных составляющих системы передачи достигает 50 пс/°C и сравним или превышает вклад оптоволоконного кабеля длиной 1 км.

Для снижения температурного вклада в фазовую нестабильность могут быть использованы методы компенсации, термостатирования, снижения ТКФ.

Система компенсации вносит собственную нестабильность, зависящую от температурных вариаций окружающей среды, при этом компенсация не может охватывать всю систему передачи.

Элементами системы передачи, не охваченными системой компенсации, обычно являются:

- коаксиальные кабели;
- участки линии передачи на печатных платах;

- оптические кабели, лазерные диоды и фотодиоды коротких линий передачи (без компенсации);

- импульсные и высокочастотные изолирующие усилители.

Коаксиальные кабели стандартного типа обладают эффектами так называемого температурного колена и гистерезиса в диапазоне температур от 15 °C до 22 °C, которые могут вызвать трудности с прогнозированием и компенсацией фазовой задержки (Czuba, 2011). ТКФ кабеля определяется прежде всего диэлектрической проницаемостью прослойки между проводниками, для стандартного кабеля длиной 1 км, например, RG-58 достигает 420 пс/°C, для фазостабильного FSJ1-50A — 30 пс/°C (Балаев, 2015). Для повышения точности передачи эталонных сигналов по коаксиальному кабелю может быть использован метод компенсации интегральной температуры длинного коаксиального кабеля с применением пропорционально-интегрально-дифференцирующего алгоритма и распределённого нагревателя (Грунин, 2020).

Кроме коаксиальных кабелей средой передачи сигналов могут выступать участки печатных плат. Задержка в линиях передачи на печатной плате также зависит от температуры и материала печатной платы. Для наиболее популярного материала FR4 в линии передачи длиной 40 см вариация задержки составит 6 пс/°C, аналогичная линия на печатной плате из материала для высокочастотных применений RO4350B будет иметь ТКФ около 0.6 пс/°C (Носов, 2019).

Для передачи сигналов на расстояние до 1 км могут быть использованы волоконные линии передачи без компенсации. В состав линии входят лазерные диоды и фотодиоды, аналогичные используемым в SFP-модулях для систем с плотным спектральным уплотнением каналов DWDM. Их совокупный ТКФ около 1.5 пс/°C (Kodet, 2016).

ТКФ фазостабильного оптического кабеля в несколько раз меньше, чем у фазостабильного коаксиального кабеля — от 4 до 10 пс/°С (Балаев, 2015).

В качестве импульсных и высокочастотных изолирующих усилителей в системах передачи эталонных сигналов могут быть использованы устройства, специально разработанные для метрологических применений. В этих устройствах гарантируется ТКФ порядка 5–10 пс/°С (Spectra-Dynamics, Время-Ч).

Метод термостатирования заключается в помещении устройств, находящихся на концах системы передачи в термостат, например в камеру со специальными климатическими условиями внутри которой поддерживается температура с точностью 0.2 °С (Балаев, 2017). Однако, когда ограничено доступное пространство, например в кабине радиотелескопа РТ-13, предпочтительнее снижать чувствительность к изменениям температуры, подбирать элементы системы передачи с низким ТКФ (Носов, 2019).

В данной работе рассмотрены некоторые частные методы решения задачи уменьшения фазовых возмущений:

- стабилизация температуры в измерительных каналах (ИК) компенсатора;
- включение в петлю компенсации устройств, расположенных на приёмном конце линии, на примере усилителя сигналов высокой частоты VCH-605 (Время-Ч).

Материалы и методы

В качестве передающего и приёмного использовался модем, ранее разработанный и описанный

авторами в одной из предыдущих работ (Жеглов, 2018). В передающем модеме добавлен алгоритм термоконтроля ИК компенсатора. В приёмном модеме компенсатор не использовался.

Оптический сигнал между модемами передавался по стандартному одномодовому оптоволокну G.657.B3 в защитной оболочке диаметром 3 мм и длиной 75 м. Радиочастотные сигналы между устройствами передавались по стандартным радиочастотным кабелям RG58 длиной 50 см.

Нестабильность частоты сигналов среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО), вносимая модемами и внешним усилителем контролировалась с помощью частотного компаратора VCH-314 методом трёх генераторов.

Измерения проводились при работающем кондиционере, который поддерживал в помещении колебания температуры с размахом от 2 до 4 °С.

Измерения СКДО с отключённой и включённой стабилизацией температуры ИК проводились в соответствии с рис. 1, при этом кабель 2 напрямую подключался ко входу f_y компаратора частотного, а кабель 1 и внешний усилитель не использовались. Обогрев/охлаждение корпуса передающего модема осуществлялись с размахом 20 °С. Включение термостабилизации ИК осуществлялось командой с консоли ПК на ПЛИС платы компенсатора.

Измерения СКДО с внешним усилителем проводились в соответствии со схемой на рис. 1 — при его включении вне петли компенсации и на рис. 2 — при его включении в петлю компенсации. Передающий модем работал при включённой

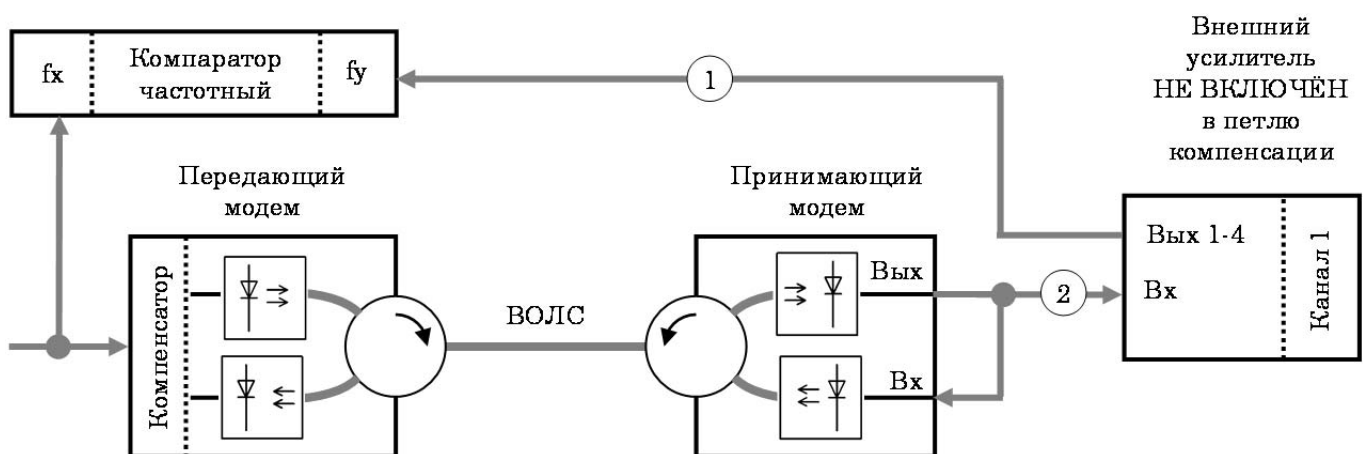


Рис. 1. Схема измерения нестабильности, вносимой модемами и внешним усилителем при его включении вне петли компенсации

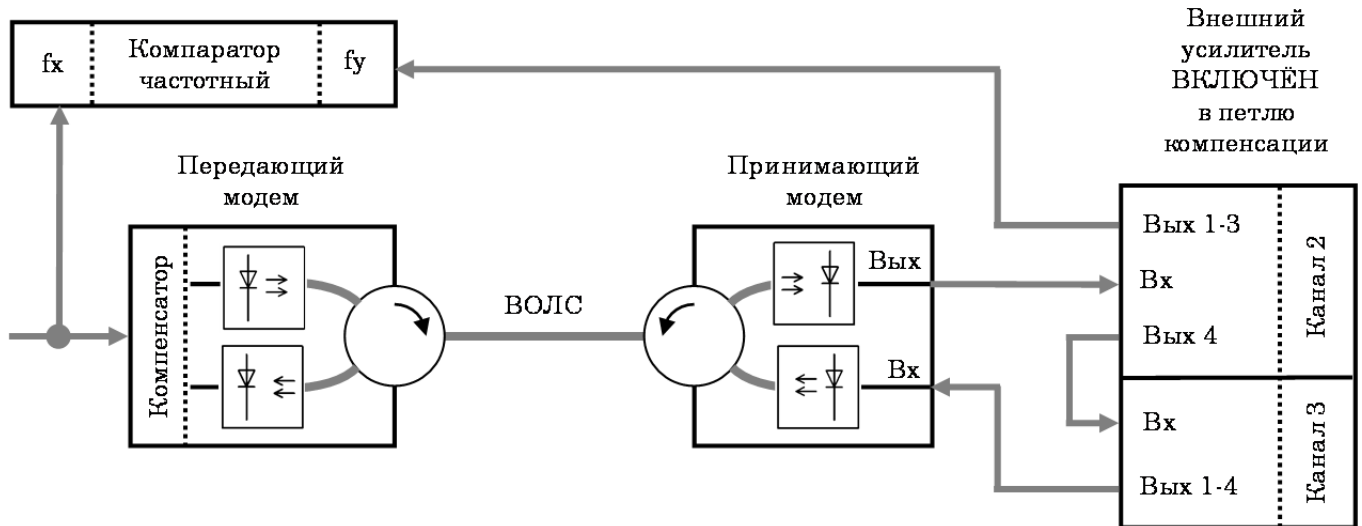


Рис. 2. Схема измерения нестабильности, вносимой модемами и внешним усилителем при его включении в петлю компенсации

термостабилизация ИК. Обогрев/охлаждение корпуса усилителя осуществлялись с размахом 20 °С.

Результаты

Результат измерений СКДО с отключённой и включённой стабилизацией температуры ИК (тер-

мокомпенсацией) приведён на рис. 3а, а результат измерений СКДО при различных вариантах подключения внешнего усилителя — на рис. 3б.

В таблице в графе Термокомпенсация ИК приведены результаты без подключения внешнего усилителя.

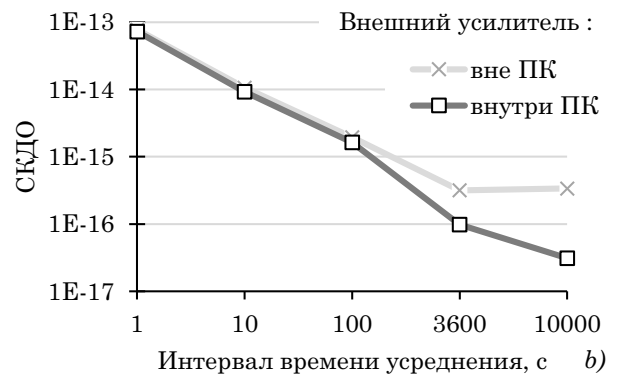
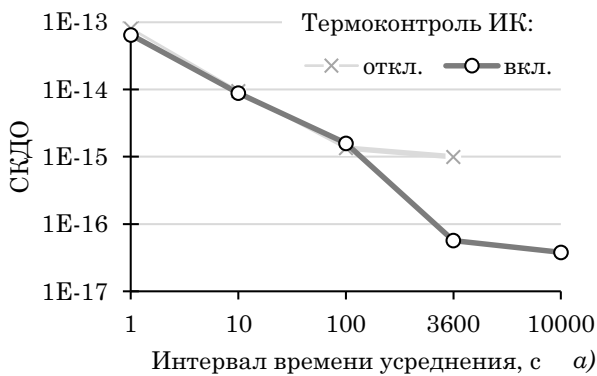


Рис. 3. Результат измерения нестабильности, вносимой модемами и внешним усилителем при различных вариантах подключения (ИК — измерительный канал, ПК — петля компенсации, СКДО — среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение измеренного значения меры частоты, девиация Аллана)

Таблица

Нестабильность частоты сигналов (СКДО), вносимая системой передачи, изображённой на рис. 1 и рис. 2

Интервал времени измерения	Термокомпенсация ИК		При включении внешнего усилителя	
	Откл.	Вкл.	вне петли компенсации	внутри петли компенсации
1 с	8.03 · 10 ⁻¹⁴	6.47 · 10 ⁻¹⁴	7.74 · 10 ⁻¹⁴	7.24 · 10 ⁻¹⁴
10 с	9.48 · 10 ⁻¹⁵	8.79 · 10 ⁻¹⁵	1.06 · 10 ⁻¹⁴	9.23 · 10 ⁻¹⁵
100 с	1.35 · 10 ⁻¹⁵	1.59 · 10 ⁻¹⁵	1.95 · 10 ⁻¹⁵	1.63 · 10 ⁻¹⁵
1 ч	9.99 · 10 ⁻¹⁶	5.69 · 10 ⁻¹⁷	3.17 · 10 ⁻¹⁶	9.87 · 10 ⁻¹⁷
10000 с	—	3.80 · 10 ⁻¹⁷	3.39 · 10 ⁻¹⁶	3.13 · 10 ⁻¹⁷

Обсуждение и выводы

Результат сравнения СКДО при отключённой и включённой термокомпенсации ИК позволяет сделать вывод о заметном улучшении долговременной стабильности при включении термокомпенсации. При этом стабилизация температуры ИК с точностью 0.1 °С достигается за несколько секунд. Разработанный метод термокомпенсации ИК основан на пропорционально-интегральном регулировании, качество и скорость работы которого существенно зависит от подбора коэффициентов регулирования.

Метод включения в схему компенсации устройств, расположенных на приёмном конце линии рассмотрен на примере усилителя сигналов высокой частоты VCH-605 (ЗАО «Время-Ч»), предназначенным для метрологических целей с гарантированным ТКФ не более 5 пс/°С. Важно отметить наличие в усилителе каналов усиления с близкими характеристиками, геометрическая близость которых обеспечивает также близость температурного воздействия на них окружающей среды. Можно ожидать аналогичный результат применения метода к другим устройствам, которые могут быть использованы на приёмном конце линии. Метод не требует вложений. Результат сравнения СКДО систем передачи с внешним усилителем на стороне принимающего модема показывает заметное преимущество по долговременной стабильности при его включении внутри петли компенсации.

На компенсацию фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени требует учёта фазовой нестабильности, вносимой не только волоконной линией и внешним усилителем, а также коаксиальными кабелями, расположенными с обеих сторон этой линии. Применение фазостабильных кабелей, указанных ранее, могло бы дополнительно улучшить СКДО.

Проблема повышения точности компенсации фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени носит многоуровневый комплексный характер, для её решения требуется применение совокупности поддерживающих друг друга подходов как на уровне промежуточных материальных сред и устройств, так и системы передачи в целом: термостатирования, снижения ТКФ, компенсации. Оставшиеся неустранёнными вариации задержки в некоторых случаях также могут

быть измерены и учтены в процессе обработки наблюдений (Царук, 2019).

Следует также отметить, что в разработанном авторами модеме компенсация фазовой нестабильности для гармонического сигнала 100 МГц, автоматически приводит к стабилизации задержки передаваемого импульсного сигнала 1 PPS, который привязывается к 100 МГц.

Таким образом, совокупность рассмотренных методов увеличивает точность компенсации фазовой нестабильности при передаче сигналов как частоты, так и времени.

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. 165–197.

Балаев Р. И., Малимон А. Н., Фёдорова Д. М. и др. Оценка точности передачи эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 38–42.

Время-Ч [Электронный ресурс] URL: <http://www.vremya-ch.com> (дата обращения: 04.10.2021).

Грунин А. П., Калинов Д. Г., Мигунов Д. С. Повышение точности передачи эталонных сигналов частоты и времени по коаксиальному кабелю // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 55–59.

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.

Носов Е. В., Бердников А. С., Маршалов Д. А. Стабильность задержки в системах преобразования сигналов для РСДБ-радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 52–59.

Царук А. А., Жуков Е. Т., Вытнов А. В., Зиновьев П. В. Волоконно-оптическая линия передачи и измерения задержки секундного импульса в РСДБ-телескопе РТ-13 // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 50. С. 73–78.

Czuba K., Sikora D. Temperature Stability of Coaxial Cables // Acta Physica Polonica A. 2011. Vol. 119, no. 4. P. 553–557.

Kodet J., Pánek P., Procházka I. Two-way time transfer via optical fiber providing subpicosecond precision and high temperature stability // Metrologia. 2016. Vol. 53. P. 18–26.

SpectraDynamics, Inc. (SDI) [Электронный ресурс] URL: <http://spectradynamics.ru/products/usiliteli/pd-5> (дата обращения: 04.10.2021).