

07;09
©1994

КОМПЕНСАЦИЯ ФАЗОВЫХ УХОДОВ РАДИОСИГНАЛОВ В ВОЛОКОННЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В.И.Гасюк, О.И.Котов, Л.Б.Лиокумович, В.М.Николаев

Передача опорных сигналов высокостабильной частоты на расстоянии 100-ни и 1000-чи метров необходима для многих радиофизических систем с большой базой. Такие задачи возникают в радиоастрономии, радиолокации и других областях. При этом тракт передачи не должен вносить флуктуаций фазы в передаваемый сигнал. В последнее время для этих целей успешно применяют волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) [1,2], обеспечивающие большие дистанцию и стабильность передачи по сравнению с традиционными кабельными и волноводными трактами.

Кратковременная (< 1 с) нестабильность фазы, вносимая ВОСП, определяется отношением сигнал/шум на выходе линии [1,3]. Но, как правило, более важна долговременная (≈ 1000 с) стабильность фазы передаваемых сигналов. Одним из основных факторов, снижающих долговременную стабильность фазы, являются температурные изменения фазовой задержки ВО кабеля, и для борьбы с ними разрабатываются специальные системы стабилизации [1,4,5]:

В большинстве случаев в ВОСП опорных сигналов используется модуляция интенсивности оптического излучения передаваемым радиочастотным (РЧ) сигналом. Фазовая задержка огибающей частоты f_0 в световоде длиной L определяется выражением:

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L \cdot n_r}{c}, \quad (1)$$

где n_r — групповой показатель преломления сердцевины, c — скорость света.

Температурные изменения фазовой задержки волокна характеризуются коэффициентом:

$$K_T = \frac{\Delta\varphi}{\varphi \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — приращение φ при изменении температуры на ΔT . Типичное значение K_T имеет порядок $10^{-5} (1/K)$, однако проводятся исследования по созданию волокон с уменьшенным K_T [6].

Известны варианты построения систем стабилизации фазовой задержки ВОСП [1,4,5] основаны на контроле ухода φ с помощью РЧ фазовых измерений и его компенсации. В [1] для этого анализируются фазы сигнала на входе волоконной линии и сигнала, переданного по линии в прямом и обратном направлениях. В [4,5] предлагается сравнивать фазы сигналов, переданных по основному и вспомогательному волокнам, которые должны находиться в одинаковых температурных условиях, но иметь различные K_T . В данной работе рассматривается использование волоконно-оптического интерферометра для контроля изменений фазы передаваемых сигналов.

В [6] показано, что относительные температурные изменения фазы оптического излучения и фазы РЧ огибающей в волоконном световоде одинаковы:

$$\frac{\Delta\psi}{\psi \cdot \Delta T} \approx \frac{\Delta\varphi}{\varphi \cdot \Delta T} = K_T, \quad (3)$$

где $\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot L = \beta \cdot L$ — фазовый набег оптического излучения, λ — длина волны света, β — постоянная распространения света в волокне, n — эффективный показатель преломления сердцевины.

Таким образом, контролируя изменения фазы оптического излучения, можно судить об изменениях фазы огибающей. Но так как частота оптического излучения на много

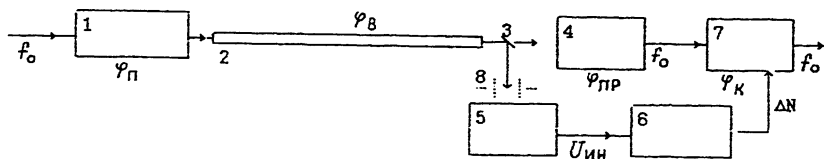


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки.

порядков больше, чем у РЧ сигналов, фаза световой волны значительно сильнее меняется от температуры волокна, чем фаза РЧ огибающей (это обусловило широкое развитие волоконно-оптических интерференционных датчиков [7]). Поэтому применение волоконно-оптической интерферометрии для систем стабилизации фазы РЧ сигналов, передаваемых по ВОСП, позволяет получить значительно более высокую точность контроля, чем при РЧ методах. В этом случае ВО кабель используется не только как передающая среда, но и как оптический интерферометр, по сигналу которого определяются уходы фазы передаваемого РЧ сигнала.

Вариант такой системы изображен на рис. 1. Излучение оптического передатчика 1, модулированное по интенсивности РЧ сигналом с частотой f_0 , распространяется по световоду 2. На выходе волокна свет делится расщепителем луча 3 на две части. Одна подается на фотоприемник 4, который усиливает и выделяет сигнал с частотой f_0 , другая — на фотоприемник 5, на выходе которого получаем сигнал волоконно-оптического интерферометра — $U_{ин}$. При изменении температуры ВО кабеля, вызывающем изменение φ , происходит сдвиг интерференционного сигнала на некоторое число полос — ΔN (по аналогии с терминами оптической интерферометрии под “сдвигом” интерферометрического сигнала на одну полосу понимается его изменение при сдвиге разности фаз интерферирующих сигналов на 2π). Реверсивный счетчик полос 6 регистрирует величину и направление сдвига сигнала интерферометра и формирует управляющий сигнал для компенсатора 7 (управляемого фазовращателя), который вносит компенсирующий сдвиг в РЧ сигнал.

Рассмотрим кратко соотношения, описывающие работу схемы. Фазовая задержка РЧ сигнала в таком тракте:

$$\varphi = \varphi_n + \varphi_v + \varphi_{pp} + \varphi_k, \quad (4)$$

где $\varphi_n, \varphi_v, \varphi_{pp}, \varphi_k$ — фазовые сдвиги, вносимые оптическим передатчиком, волокном, приемником и компенсатором соответственно.

Изменение температуры кабеля на ΔT вызывает изменение $\varphi_{\text{в}}$ (2) и сдвиг интерференционного сигнала:

$$\Delta N = K_{\text{и}} \cdot L \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где коэффициент $K_{\text{и}}$ зависит от λ , волокна и типа интерферометра.

Сдвиг фазы, вносимый компенсатором, зависит от управляющего сигнала:

$$\Delta \varphi_{\text{к}} = -K_{\text{к}} \cdot \Delta N = -K_{\text{к}} \cdot K_{\text{и}} \cdot L \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где $K_{\text{к}}$ — крутизна характеристики компенсатора.

Уход фазы на выходе тракта составит, в соответствии с (1, 2, 4-6),

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_{\text{в}} + \Delta \varphi_{\text{к}} = \left(\frac{K_{\text{т}} \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot n_{\text{г}}}{c} - K_{\text{к}} \cdot K_{\text{и}} \right) L \cdot \Delta T. \quad (7)$$

Для компенсации уходов фазы должно выполняться условие

$$\left(\frac{K_{\text{т}} \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot n_{\text{г}}}{c} - K_{\text{к}} \cdot K_{\text{и}} \right) = 0. \quad (8)$$

Из приведенных выражений видны факторы, определяющие точность стабилизации фазовой задержки такой системой.

1. Минимальный сдвиг интерференционного сигнала, фиксируемый счетчиком $-\Delta N_{\text{min}}$, ограничивает точность контроля:

$$\Delta \varphi_{\text{min}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot n_{\text{г}}}{c} \cdot \Delta N_{\text{min}} / K_{\text{и}}. \quad (9)$$

2. Неточность выполнения условия (8) обуславливает остаточный уход фазы:

$$\delta \varphi = \left(\frac{K_{\text{т}} \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot n_{\text{г}}}{c} - K_{\text{к}} \cdot K_{\text{и}} \right) L \cdot \Delta T = K_{\text{ош}} \cdot \Delta T. \quad (10)$$

Величина $K_{\text{ош}}$ определяется линейностью характеристики компенсатора и точностью подбора $K_{\text{к}}$.

Для реализации такой схемы можно использовать различные волоконно-интерферометрические схемы. Мы использовали межмодовую интерференцию на выходе двухмодового волокна. Такой интерферометр менее чувствителен

к воздействиям и поэтому, в условиях сильных температурных воздействий на волокно, снижаются требования к динамическому диапазону и быстродействию счетчика полос. К тому же при межмодовой интерференции ослабляются требования к длине когерентности источника. При введении пространственной диафрагмы 8 (рис. 1) на выходе двухмодового световода межмодовый интерференционный сигнал, регистрируемый фотоприемником, имеет вид

$$U_{\text{ин}} = A \cos(\varphi_{12}), \quad \varphi_{12} = (\beta_1 - \beta_2) \cdot L, \quad (11)$$

где β_1, β_2 — постоянные распространения первой и второй моды, A — коэффициент, зависящий от типа волокна, мощностей мод и условий диафрагмирования.

Величина сдвига интерференционного сигнала в таком интерферометре

$$\Delta N = \varphi_{12}/2\pi. \quad (12)$$

Эксперименты [8] с волокном ДСК-74-07 (двухмодовом при $\lambda = 0.63$ мкм) показали, что φ_{12} меняется от температуры линейно (это позволяет использовать межмодовую интерференцию в рассмотренной выше методике), а коэффициент $K_{\text{и}}$ составляет:

$$K_{\text{и}} = \frac{\Delta N}{L\Delta T} \approx 0.3 (\text{м} \cdot \text{К})^{-1}. \quad (13)$$

Для демонстрации работоспособности рассмотренного метода стабилизации фазовой задержки ВОСП была собрана экспериментальная установка по схеме на рис. 1. В качестве оптического передатчика использовался HeNe лазер ($\lambda = 0.63$ мкм) и внешний электрооптический модулятор МЛ-102. Излучение передатчика, модулированное по интенсивности сигналом с частотой 15 МГц, передавалось по двухмодовому волокну (ДСК-74-07) длиной 300 м, помещенному в термостат. Для реверсивного счета полос применялся вспомогательный пьезокерамический волоконно-оптический фазовый модулятор и счетчик [9], обеспечивающий точность регистрации сдвига до 1 полосы ($\Delta N_{\text{min}} = 1$), что соответствует точности контроля уходов фазовой задержки для данного макета (9,13):

$$\Delta\varphi_{\text{min}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot n_{\text{г}} \cdot \Delta N_{\text{min}}}{c \cdot K_{\text{и}}} \approx 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ радиан.}$$

Показания счетчика преобразовывались ЦАП в аналоговый сигнал, подаваемый на управляющий вход фазовращателя, компенсирующего уход фазы.

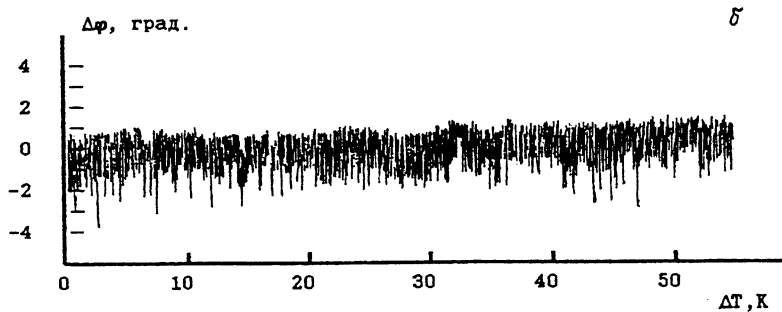
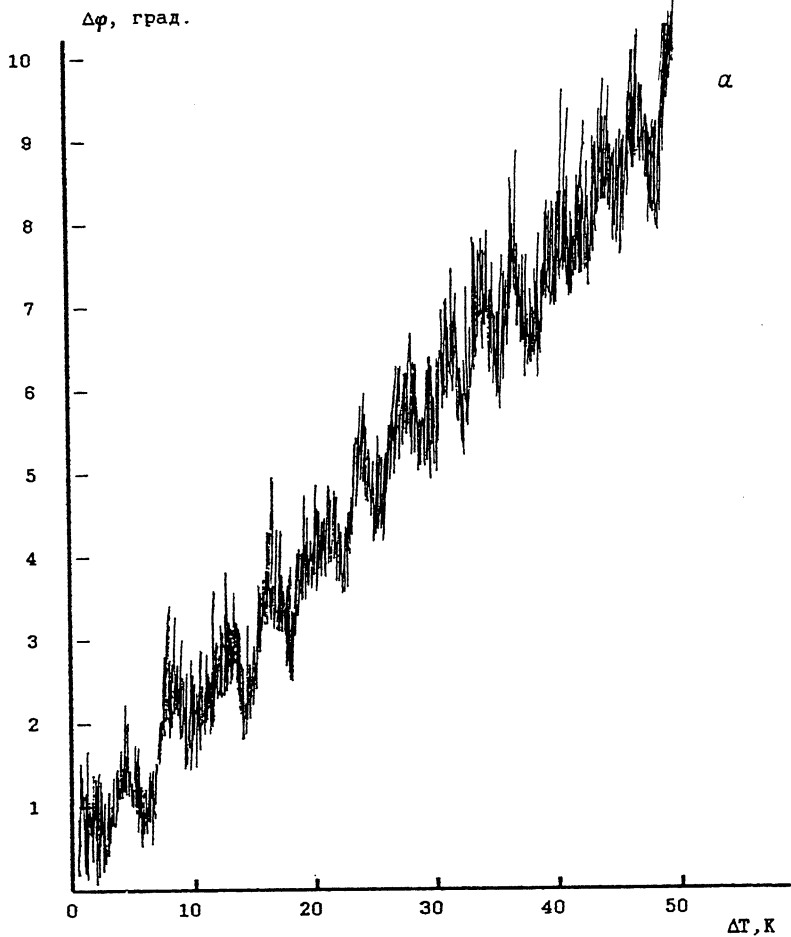


Рис. 2. Зависимости фазовой задержки от температуры волокна.
a — без стабилизации, *b* — со стабилизацией.

Сигналы со входа электрооптического модулятора и выхода фазовращателя подавались на измеритель разности фаз ФК2-12. Сигнал с выхода фазового детектора измерителя разности фаз записывался самописцем.

Поведение фазовой задержки при нагреве волокна показано на рис. 2,а. Нерегулярные флуктуации (шумовая дорожка $\approx 1.5^\circ$) не связаны с нагревом. Они вызваны низким уровнем сигнал/шум (который может быть повышен при использовании более совершенных лазера и фотоприемника) и характеризуют кратковременную нестабильность фазы. Однако для данного исследования наибольший интерес представляли температурные уходы задержки, определяющие долговременную нестабильность фазы ВОСП. Регулярный уход фазовой задержки при изменении температуры кабеля на 60°C составил $\approx 12^\circ$. При включении системы стабилизации температурный уход фазовой задержки был скомпенсирован с точностью до $\approx 0.5^\circ$ (рис. 2,б). По нашему мнению, в данном макете точность компенсации уходов фазы определялась нелинейностью характеристики управляемого фазовращателя.

В настоящей работе применялась компенсация уходов фазы сигнала в электронной части тракта. Однако оптический метод контроля фазовой задержки эффективно сочетается с компенсацией в волоконной части системы передачи (например, за счет управления температурой участка волокна или с помощью высокоэффективного пьезокерамического модулятора [10]). Именно в таком варианте возможна реализация высокой потенциальной точности методов оптической интерферометрии. Кроме того, такие системы способны работать независимо от частоты радиосигнала и передавать несколько частот или широкополосные сигналы со стабильной временной задержкой.

Список литературы

- [1] *Lori E. Primas.* // Microwave J. December 1990. V. 33. N 12. P. 81-92.
- [2] *Katsuhia S., Tadayoshi H., Mitsumi F., Seisuke K., Seiitsu T., Yoshiaki T., Tetsuo S., Koichi S.* // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 1992. V. 41. N 3. P. 385-389.
- [3] *Валухов В.П., Вытнов Ф.В., Котов О.И., Куццов В.Д., Люкумович Л.Б., Марусов О.Л., Николаев В.М., Смоленцев С.Г.* // Техника средств связи. Сер. Проводная связь. 1992. В. 4. С. 79-82.
- [4] *Прокофьева Л.П., Францесон А.В., Шаталов Ф.А.* Многоволоконные оптические тракты передачи опорных ВЧ и СВЧ сигналов. Проектир. элементов и блоков СВЧ радиоприем. трактов. Препринт Радиотехнического института АН СССР. 1990. С. 90-94.
- [5] *Жминченко С.М., Мировицкий Д.И., Назаров В.Л.* // Радиотехника. 1990. В. 9. С. 71-74.

- [6] *Еремин Ю.М., Прокофьев Л.П., Шаталов Ф.А.* Температурная фазовая нестабильность волоконных световодов и оптических кабелей. Препринт. Радиотехнический институт. 1988. 29 с.
- [7] *Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г., Шестериков В.А.* Световодные датчики. М., 1990. 256 с.
- [8] *Kotov O.I., Liokimovich L.B., Nicolaev V.M.* // Proceedings of Conference ISFOC-93. P. 260-263.
- [9] *Котов О.И., Медведев А.В., Николаев В.М.* А.С. 1528518. БИ № 46. 1989.
- [10] *Семенов А.Т., Шелков Н.В.* // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. В. 10. С. 2056-2058.

Санкт-Петербургский государственный
технический университет

Поступило в Редакцию
25 мая 1994 г.