

Волоконно-оптический преобразователь угла с упреждающей коррекцией погрешности неравномерности деления оптической мощности

В. М. ГРЕЧИШНИКОВ*, В. Г. ДОМРАЧЕВ**, О. В. ТЕРЯЕВА*, А. А. ЮДИН*

* Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: gv@ssav.ru

** Московский государственный университет леса, Москва, Россия, e-mail: vgdomr@rambler.ru

Проанализирована инструментальная погрешность, вызванная неравномерностью ввода излучения в измерительные каналы волоконно-оптической линии связи. Исследована конструкция преобразователя, в котором реализован метод упреждающей коррекции. Приведены результаты экспериментальной оценки эффективности разработанных аппаратно-программных средств.

Ключевые слова: волоконно-оптический цифровой преобразователь угла, алгоритм автокоррекции, достоверность выходного кода.

An instrument error caused by irregularity of radiation input into the measuring channels of fiber optic communication line has been analyzed. The design of converter in which a proactive correction method is realized has been studied. The results of experimental estimation of the developed hardware-software are presented.

Key words: fiber optic digital angle converter, auto correction algorithm, output code reliability.

Волоконно-оптические цифровые преобразователи угла (ВОЦПУ) — перспективные элементы систем измерений, контроля и управления объектами, функционирующими в условиях потенциально опасных производств [1]. Несмотря на очевидные преимущества ВОЦПУ по сравнению с классическими оптоэлектронными преобразователями, номенклатура данного вида приборов недостаточно полно представлена на мировом рынке датчиковой аппаратуры. Во многом это обусловлено трудностями решения технологических проблем, связанных с конструктивной интеграцией волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и кодирующими элементами преобразователей. Обзор публикаций показал, что только в фирме Micropor (Швейцария) проводятся ком-

мерческие разработки энкодеров с информационной емкостью 10—13 бит [2, 3].

При изготовлении многоканальных ВОЛС, предназначенных для считывания информации с многозарядных кодовых масок ВОЦПУ, ее передающую часть выполняют в виде оптического коллектора, связанного с излучателем (рис. 1). При этом входные торцы световодов располагают в общем капилляре, установленном в металлическом наконечнике. Диаметр капилляра выбирают так, чтобы обеспечить максимальную плотность упаковки волокон.

Описанные конструктивные особенности создают трудности обеспечения равномерного деления оптической мощности при вводе излучения от светоизлучающих диодов (СИД)

в измерительные каналы ВОЛС. Поэтому на практике из-за несимметричности диаграммы направленности излучателя (см. рис. 1, а), неравномерности укладки торцов волокон во втулку (см. рис. 1, б), неидеальности обработки торцов передающих и приемных световодов (шероховатость, сколы, выпуклость, вогнутость и др.) наблюдается значительный разброс уровней излучения, вводимого в каждый из передающих световодов. Данное обстоятельство вызывает разброс амплитуд сигналов на выходе фотоусилителей (ФУ), что при одинаковом во всех разрядах пороге срабатывания компараторов приводит к дополнительной инструментальной погрешности. Следует отметить, что указанную погрешность можно уменьшить, регулируя коэффициен-

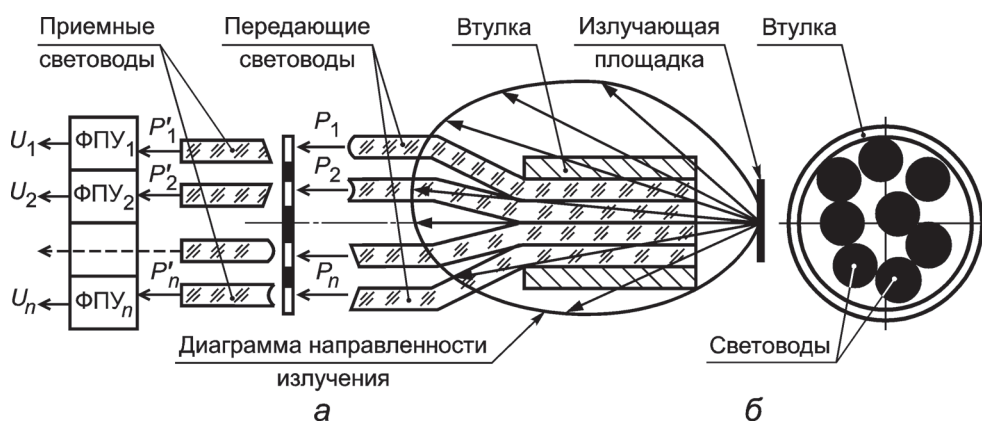


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптической системы считывания:

схемы ввода, приема и модуляция излучения в ВОЛС (а), расположения световодов в наконечнике (б)

ты усиления ФУ, но из-за малого уровня мощности и миниатюрных размеров используемых СИД эта возможность ограничена. Использование высокоомных резисторов (8—10 МОм и выше) в цепи обратной связи преобразователя тока в напряжение, в дополнение к указанным выше факторам, также затрудняет регулировку коэффициента усиления и создает возможность самовозбуждения фотоусилителя [1].

Стремление довести амплитуды выходных сигналов ФУ до номинального уровня (что возможно при увеличении общего тока накачки СИД), вызывает превышение допустимого теплового режима и выход излучателя из строя.

Проведенный эксперимент показал, что при использовании в 8-разрядном ВОЦПУ излучателя типа 3Л115 диапазон изменений уровней мощности, поступающей на фотоприемники, находится в интервале 42—107 нВт. Из-за неравномерного ввода излучения амплитуды сигналов в отдельных каналах оказываются ниже номинального порога срабатывания (70 нВт), вследствие чего происходит существенное искажение информации на выходе ВОЦПУ.

Общий подход к построению аппаратно-программных средств упреждающей коррекции рассмотренной погрешности изложен в [4]. Он основан на последовательном (во времени) определении значений разрядных цифр выходного кодового вектора с использованием упреждающих корректирующих воздействий на источник излучения, заблаговременно формируемых с учетом номера разряда выходного кода. Однако в [4] не отражен ряд важных аспектов алгоритмического обеспечения и экспериментальная оценка эффективности предлагаемых решений, поэтому целесообразно изложить их в данной статье.

Анализ погрешности от неравномерности ввода излучения в ВОЛС. Рассмотрим количественное влияние неравномерности ввода излучения на результирующую погрешность преобразования. Из рис. 2, а следует, что погрешность, вызванная отклонением амплитуды сигнала от номинального значения на ΔU , соответствует разности $\Delta\alpha = \alpha'_0 - \alpha_0$, где α'_0, α_0 — реальная и идеальная границы смены выходного кода, соответственно, которые определяются выражениями $\alpha'_0 = U_{cp} \operatorname{ctg} \beta_1$; $\alpha_0 = U_{cp} \operatorname{ctg} \beta_0$, где U_{cp} — напряжение, равное половине амплитуды номинального сигнала и соответствующее переходу сравнивающего устройства из логического «0» в логическую «1»; β_1, β_0 — углы наклона передних фронтов реального и номинального сигналов, соответственно.

Смещение U_0 , в основном, вызвано темновым током фотоприемника. Поэтому на практике чаще всего применяют схему включения фотоприемника в гальванический режим, при котором темновой ток, а следовательно и U_0 , равны нулю.

Учитывая, что

$$\operatorname{ctg} \beta_1 = \alpha^* / (2U_{cp} + \Delta U); \operatorname{ctg} \beta_0 = \alpha^* / (2U_{cp}),$$

получаем

$$\Delta\alpha = U_{cp} \alpha^* / (2U_{cp} + \Delta U) - U_{cp} \operatorname{ctg} \beta_0, \quad (1)$$

где α^* — длительность переднего фронта номинального сигнала.

Известно, что $\operatorname{ctg} \beta_0 = \alpha^* / (2U_{cp})$. Приведем дроби в (1) к общему знаменателю. Тогда $\Delta\alpha = -\alpha^* \Delta U / [2(2U_{cp} + \Delta U)]$.

Представим длительность переднего фронта номинального сигнала в виде

$$\alpha^* = k\alpha_n, \quad (2)$$

где $k = \alpha^* / \alpha_n = 0 \dots 1$ — относительная ширина считывающего элемента; $\alpha_n = 360^\circ / 2^n$ — расчетный интервал смены кода; n — число разрядов выходного кода.

Абсолютную погрешность от неравномерности деления оптической мощности запишем как

$$\Delta\alpha = -360 \Delta U / [2^{n+1} (2U_{cp} + \Delta U)]. \quad (3)$$

Приведем полученную погрешность $\Delta\alpha$ к расчетному интервалу смены кода:

$$\gamma_\alpha = \Delta\alpha / \alpha_n. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (4), получаем

$$\gamma_\alpha = -k \Delta U / [2 (2U_{cp} + \Delta U)]. \quad (5)$$

Семейство кривых, построенное по (5), показано на рис. 2, б. Из приведенных графиков следует, что с увеличением относительной ширины считывающей щели рассмотренная дополнительная инструментальная погрешность может достигать 35 % шага квантования перемещения. Кроме того, асимметрия кривых (см. рис. 2, б) свидетельствует о том, что отклонения амплитуды сигналов в сторону отрицательных значений приводят к большему увеличению погрешности, чем при отклонении в сторону положительных значений. При этом суммарная погрешность в совокупности с другими инструментальными погрешностями может значительно превзойти допустимый предел $\pm 0,5\alpha_n$ и, следовательно, существенно снизить достоверность преобразования.

Все эти факторы делают актуальным развитие принципов коррекции рассмотренной выше инструментальной погрешности.

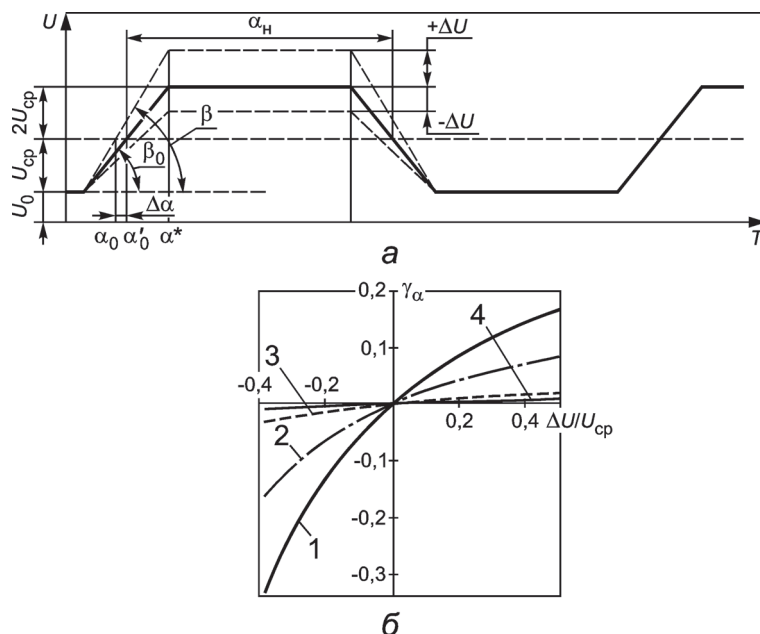


Рис. 2. Сигнал на выходе фотоприемника (а) и приведенная погрешность при различной относительной ширине считывающего элемента (б):

1—4 соответствуют $k = 1; 0,1; 0,5; 0,01$

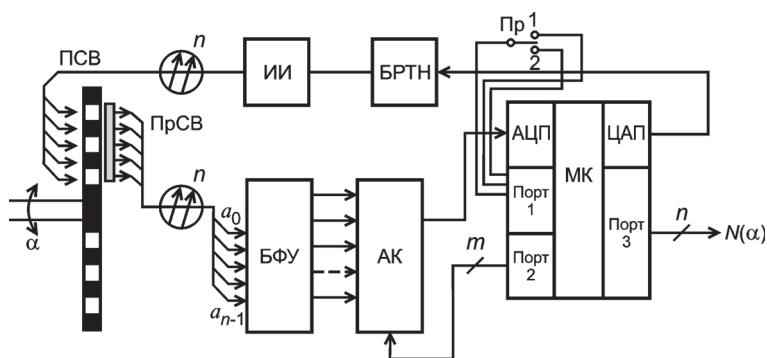


Рис. 3. Структурная схема ВОЦПУ с упреждающей коррекцией

Принцип построения и алгоритмы работы ВОЦПУ с упреждающей коррекцией погрешности. Рассмотрим принцип реализации упреждающей коррекции погрешности выходного кода ВОЦПУ, вызванной неравномерным делением оптической мощности излучателя. На рис. 3 приведена структурная схема ВОЦПУ, реализующая принцип упреждающей коррекции инструментальной погрешности. Преобразователь содержит оптико-механический блок с кодовым диском, источник излучения ИИ, оптически связанный с входными торцами жгута передающих световодов ПСВ. Выходные торцы световодов через разрядные дорожки диска оптически связаны с входными торцами приемных световодов ПрСВ, которые передают промодулированные оптические сигналы на блок фотоусилителей БФУ.

Для реализации адаптивной коррекции в составе преобразователя использован аналоговый коммутатор АК, управляемый в соответствии с программой, записанной в памяти микроконтроллера МК. Алгоритм работы микроконтроллера включает два режима: упреждающей настройки и преобразования. Выбор режима происходит с помощью переключателя Пр. В первом режиме контролируется работоспособность устройства и происходит самонастройка его каналов преобразования по каждому разряду. Для этого вал ВОЦПУ надо установить в положение 0° , что соответствует гарантированной засветке приемных световодов на всех кодовых дорожках.

Далее в соответствии с программой, записанной в микроконтроллер (алгоритм программы приведен на рис. 4, а), управляющий код $N_{j\text{ЦАП}}$ на входе цифроаналогового преобразователя (ЦАП) обнуляется, а ко входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) подключается выход с блока фотоусилителей первого канала (см. рис. 3). После этого микроконтроллер начинает постепенное увеличение управляющего кода в ЦАП. Пропорционально выходному сигналу ЦАП посредством блока регулировки тока накачки БРПН СИД увеличивает мощность оптического излучения, генерируемого излучателем. В результате увеличивается мощность оптического излучения, вводимого в нулевой (первый) канал, а следовательно, и уровень напряжения на выходе фотоусилителя соответствующего канала. Аналого-цифровой преобразователь переводит это напряжение в код, который сравнивается с кодом номинальной амплитуды N_n , хранящимся в памяти микроконтроллера. Код N_n заносится в контроллер при программировании. Как только значение кода, хранящегося в микроконтроллере, и выходного кода АЦП становятся равными, т. е. $N_{j\text{ЦАП}} = N_n$, значение управляющего кода ЦАП $N_{j\text{ЦАП}}$ помещается в оперативную память микро-

контроллера. После этого ко входу АЦП по очереди подключаются последующие выходы блока фотоусилителей, для которых описанный выше процесс повторяется. В результате для каждого канала ВОЦПУ определяются управляющие коды $N_{j\text{ЦАП}}$ на входе ЦАП, при которых амплитуды сигналов разрядных фотоусилителей равны номинальному значению.

Во втором режиме преобразователь работает циклами, реализуя алгоритм развертывающего преобразования для каждого измеряемого угла. В течение каждого цикла происходит последовательное (во времени) определение разрядных цифр выходного кода. Алгоритм программы изображен на рис. 4, б.

В этом случае управляющие коды, хранящиеся в оперативной памяти микроконтроллера, поочередно попадают на вход ЦАП, выходной сигнал которого задает мощность излучателя, соответствующую формированию сигнала номинальной амплитуды в данном разряде. Одновременно с этим АЦП оцифровывает напряжения с выходов соответствующих фотоусилителей. Полученные таким образом коды сигналов $N_{j\text{АЦП}}$ сравниваются с кодом порога сравнения $N_{j\text{пз}}$, хранящимся в памяти микроконтроллера, и в соответствии с выражением

$$\bar{a}_j = \begin{cases} 0 & \text{при } N_{j\text{АЦП}} < N_{j\text{пз}}; \\ 1 & \text{при } N_{j\text{АЦП}} \geq N_{j\text{пз}} \end{cases}$$

формируются разрядные цифры $\bar{a}_j$ кода Грея. Разрядные цифры, определенные в процессе цикла опроса всех сигналов с блока фотоусилителей всех разрядов, образуют общий цифровой инверсный код Грея, преобразуемый с помощью микроконтроллера в двоичный позиционный код измеряемого ВОЦПУ угла. После выдачи кода начинается новый измерительный цикл.

Длительность одного цикла преобразования $T = n\Delta t + t_{\text{ф}}$, где Δt — время формирования одного разряда; $t_{\text{ф}}$ — время формирования полной кодовой комбинации из разрядных цифр.

Экспериментальный анализ эффективности упреждающей коррекции. Цель экспериментальных исследований — определение влияния предложенной схемы коррекции на достоверность преобразования. В качестве объекта исследований был выбран разработанный Самарским государственным аэрокосмическим университетом экспериментальный образец 8-разрядного цифрового волоконно-оптического преобразователя угла ПУФ-ВП-8. Результаты измерений оптической мощности $P_{\text{опт}}$ на выходах световодов представлены в таблице. Оптические сигналы измеряли цифровым оптическим ваттметром ОМЗ-65.

Результаты измерений оптической мощности

Оптическая мощность излучения, введенного в канал $P_{\text{опт}}$, нВт	№ канала
47	1
58	2
93	3
42	4
85	5
107	6
67	7
49	8

Числовой массив погрешностей получен с помощью автоматизированной поверочной установки, выполненной на базе оптической делительной головки ОДГ-60. В качестве образцового преобразователя использован фотоэлектрический 14-разрядный преобразователь угла «Мхитар». Поверочные данные до и после коррекции обрабатывали с использованием моделирующего авторского программного комплекса «OptoElectronic Workspace».

Результаты статистической обработки данных показали, что до коррекции форма гистограммы близка к нормальному распределению. Достоверность выходного кода при этом составляет 0,67. После коррекции достоверность выходного кода ВОЦПУ повысилась до 0,92. Форма гистограммы при этом приблизилась к форме равномерного распределения на интервале $\pm 0,703125$, что составляет $\pm 0,5$ кванта корректируемого 8-разрядного ВОЦПУ.

Добиться полной компенсации инструментальной погрешности предложенным методом в общем случае невозможно, так как кроме фактора неравномерности ввода излучения в ВОЛС на результат преобразования влияет ряд других инструментальных погрешностей, которые не корректируются с помощью рассмотренной схемы.

Заключение. В результате проведенных исследований показано, что неравномерность излучения является существенным фактором увеличения общей инструментальной погрешности и снижения достоверности преобразования. В работе получены количественные оценки инструментальной погрешности волоконно-оптического преобразователя угла, вызванной неравномерностью ввода излучения. Выявлена асимметрия графиков абсолютной и приведенной погрешностей при отклонении относительного приращения амплитуды сигналов в сторону отрицательных и положительных значений. Показано, что снижение амплитуд сигналов приводит к большим погрешностям, чем их превышение относительно номинального значения.

Исследована конструкция преобразователя, а также разработаны алгоритмы и программы работы микроконтроллера, позволяющие существенно снизить влияние общей инструментальной погрешности при нивелировании фактора разброса мощностей излучения, вводимого в волоконно-оптические каналы. Результаты проведенных экспериментальных исследований преобразователя ПУФ-ВП-8 показали, что реализация предложенных схемотехнических приемов и программных продуктов позволила в 1,4 раза повысить достоверность выходного кода.

Следует отметить, что по сравнению с аналогом (ПУФ-ВП-8) быстродействие волоконно-оптического преобразователя угла с корректирующим блоком снижается в n раз за счет последовательной процедуры формирования каждой кодовой комбинации. Однако этот недостаток не является крити-

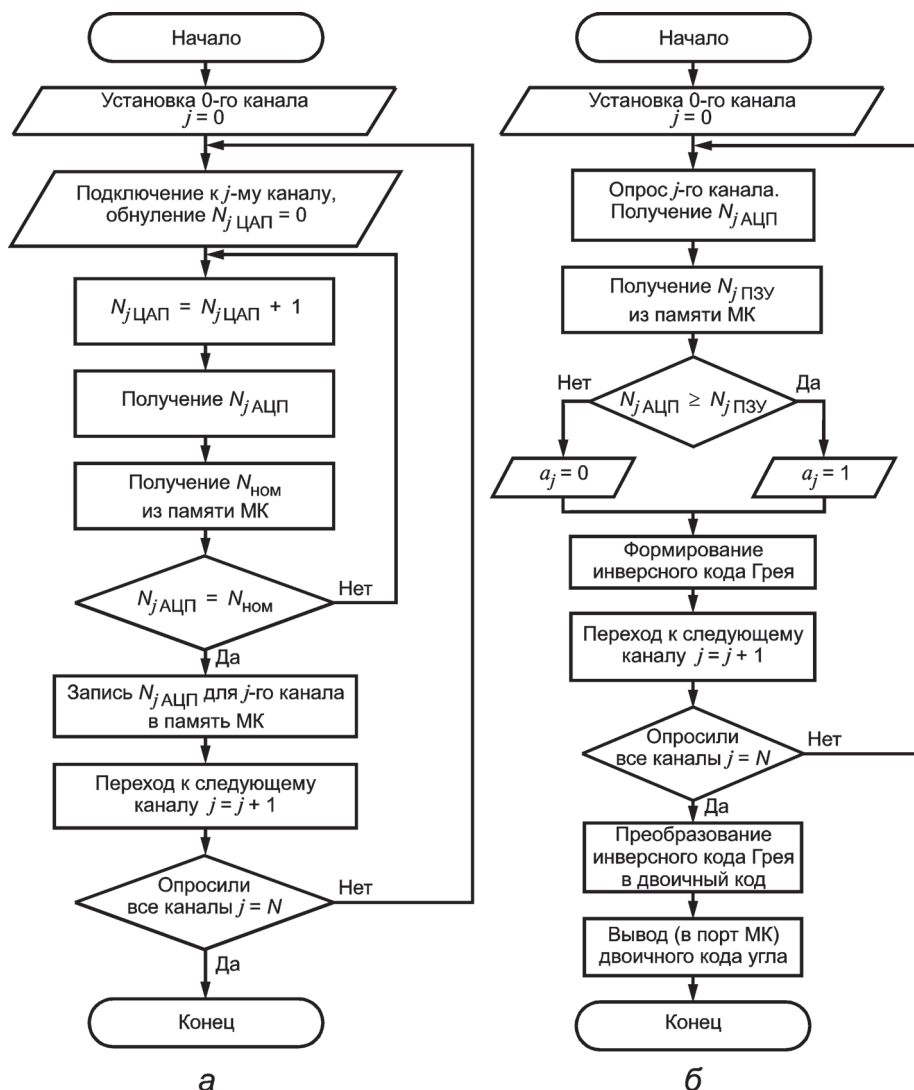


Рис. 4. Алгоритмы работы программы МК в режиме настройки (а) и преобразования (б)

ческим, что обусловлено высокими динамическими характеристиками современной электронной техники.

Литература

1. Гречишников В. М., Конюхов Н. Е. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещения со встроенными волоконно-оптическими линиями связи. М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Вращательный энкодер с волоконно-оптической передачей данных [Электрон. версия]: [http:// www.sensors.com.ua](http://www.sensors.com.ua) (дата обращения 03.04.2010 г.)
3. Fiber Optic Position Sensors [Офици. сайт]: [http:// www.micronor.com](http://www.micronor.com). (дата обращения 05.08.2014 г.)
4. Юдин А. А. Волоконно-оптический цифровой преобразователь угла (ВОЦПУ) с самонастраивающимся электронным блоком // Микроэлектроника и информатика 2009: Тез. докл. 16-й Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: МИЭТ, 2009.

Дата принятия 29.09.2014 г.