

УДК 621.317.799

Ю. В. Шабатура, к. т. н., доц.; О. В. Зеленая**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ВРЕМЕННЫМ
ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Обосновано целесообразность использования волоконно-оптических ИИС, функционирующих на основе интервального метода измерений, а также рассмотрена реализация кольцевой структуры ИИС, в которой используется только одна линия связи, к которой подключены сенсоры, способные воспринимать кодовые сигналы выбора для каждого отдельного сенсора, для волоконно-оптических ИИС, что достигается пространственным разделением оптических сигналов и переходом от непрерывного к импульсному режиму работы.

Ключевые слова: волоконно-оптическая техника, информационно-измерительная система, интервальный метод измерений, кольцевая структура, пространственное разделение оптических сигналов.

Введение

Современное состояние информационно-измерительных методов требует создания и разработки информационно-измерительных систем (ИИС), которые основываются на новых научных исследованиях [1, 2]. Эти исследования обеспечивают дальнейшее развитие перспектив для таких систем. Сейчас состояние развития волоконно-оптической техники позволяет использовать ее особенности и преимущества не только в системах связи, но и при построении информационно-измерительных систем. Причем постоянно растущие требования к точности и достоверности измерений разных физических величин требуют разработки новых и усовершенствования старых методов измерений. Передовые специалисты многих фирм США, Японии и Западной Европы склоняются к мысли, что в недалеком будущем волоконно-оптические измерительные системы заменят традиционные электрические и электронные. Причина такого оптимистического прогноза в уникальных качествах волоконно-оптических ИИС (отсутствие влияния внешних электромагнитных помех на результат измерения, высокая механическая стойкость, безопасность и простота конструкции, удобство преобразования сигналов и широкие возможности согласования с разными электронными системами и т. п.) [3, 4].

Основная цель

Разработать теоретические и практические аспекты конструкции волоконно-оптических ИИС с временным представлением информации.

Анализ современного состояния волоконно-оптических ИИС

Практически все раньше разработанные ИИС с использованием оптических волокон в качестве каналов связи и сенсоров имели радиальную структуру. Отличия состояли только в использовании датчиков проходного или отображающего типа. Структура такой системы показана на рисунке 1.

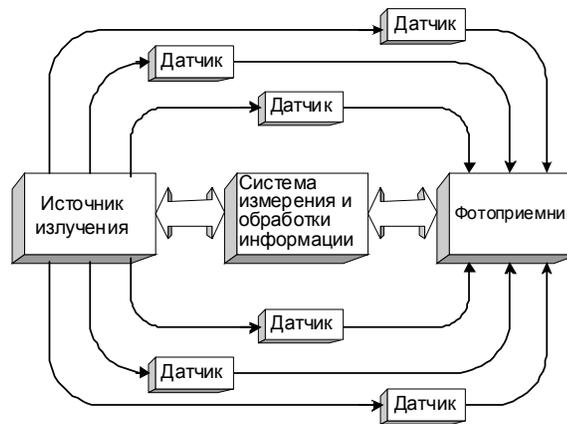


Рис. 1. Классическая структура волоконно-оптической ИИС

Эта структура наряду с некоторыми преимуществами имеет ряд недостатков, среди которых один из основных состоит в необходимости для каждого нового канала измерения выделять физический канал связи для отдельного сенсора [2]. Вместе с тем необходимо отметить, что большинство электронных ИИС используют кольцевую структуру, в которой используется только одна линия связи, к которой подключены “интеллектуальные” сенсоры. Эти “интеллектуальные” сенсоры воспринимают кодовые сигналы выбора для каждого отдельного сенсора, после чего выбранный сенсор активизируется и посылает в канал связи свою измерительную информацию. Структура этих систем унифицирована [2]. Она предполагает преобразование измерительной информации в эквивалентный временной интервал, который потом измеряют. Необходимость такого преобразования становится понятной, если учесть, что единица времени является единственной из шести основных единиц измерения Международной системы единиц измерения (SI), относительная погрешность которой составляет на сегодняшний день 10^{-15} . К сожалению, построение волоконно-оптических ИИС по такому принципу пока невозможно в связи с отсутствием подобных электронным “интеллектуальных” волоконно-оптических датчиков [1]. Но если в основе волоконно-оптических датчиков лежит принцип временного представления информации, тогда становится возможным создание волоконно-оптических ИИС с радиальной структурой. В этой структуре отдельные волоконно-оптические датчики в цепи являются взаимосвязанными единственным волокном.

Постановка задачи

Разработать структуру и обосновать целесообразность использования принципиально нового класса волоконно-оптических ИИС, функционирующих на основе интервального метода измерения [1].

Ключевые положения

Реализовать кольцевую структуру для волоконно-оптических ИИС можно только при использовании интервального метода с пространственным разделением оптических сигналов и переходом к импульсному режиму работы. В качестве сенсоров в такой системе должны быть использованы датчики проходного типа. Структура такой системы представлена на рисунке 2.

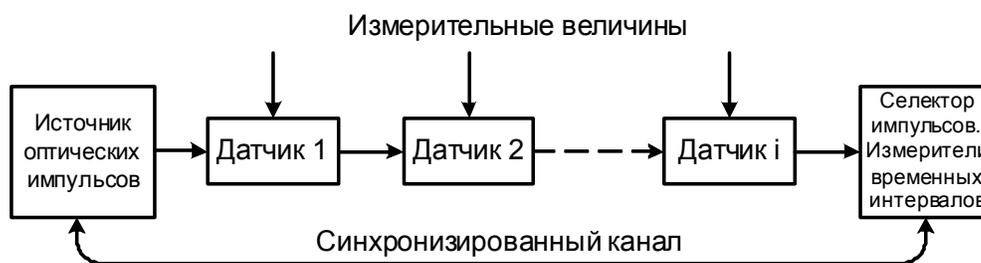


Рис. 2. Волоконно-оптическая ИИС с кольцевой структурой

Датчики в представленной системе по своей структуре напоминают интерферометры Маха-Цендера.

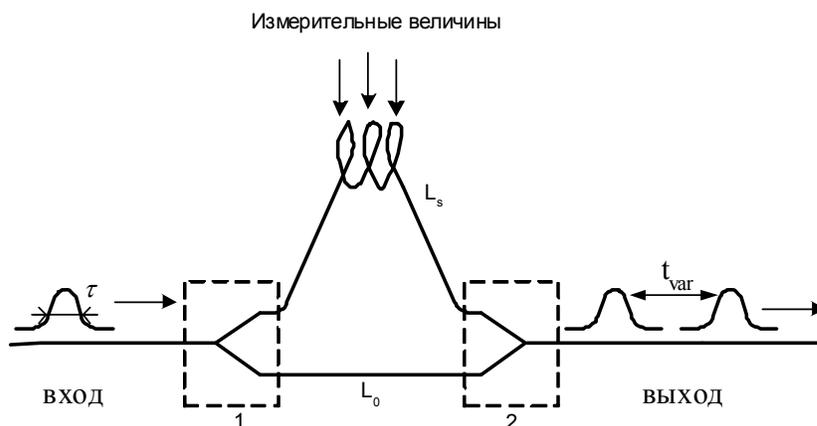


Рис. 2. Структура и принцип работы предложенного волоконно-оптического датчика

Но, как видно из рисунка 3, в датчике не используется явление интерференции. Входной оптический импульс τ , попадая в первое Y-подобное ответвление 1, разделяется на два одинаковых импульса, один из которых проходит короткий внутренний отрезок сенсорного волокна L_0 , а второй проходит через длинный отрезок сенсорного световода, на который непосредственно воздействуют измеряемые физические величины. При этом соотношение длин короткого отрезка L_0 , сенсорного световода, протяжность импульса τ и возможных изменений задержки импульса в сенсорном световоде впоследствии влияния физических величин и его дисперсии выбирают такими, чтобы во втором Y-подобном сумматоре 2 оба импульса не перекрывались, а значит, и отсутствовала их интерференция. Учитывая, что в системе по мере распространения от входа к первому датчику и до выхода из последнего будет наблюдаться мультипликация импульсов, то при общем количестве датчиков в системе n число оптических импульсов с выхода последнего датчика будет составлять:

$$N = 2^n. \quad (1)$$

Длина короткого отрезка волоконного световода L_0 является одинаковой во всех датчиках. Она рассчитывается из соотношения:

$$L_0 = c \cdot t_0 \cdot n_0, \quad (2)$$

где c – скорость распространения в вакууме; n_0 – коэффициент преломления сердцевины волоконного световода; t_0 – время задержки импульса в световоде.

Длины отрезков сенсорных волоконных световодов являются разными в каждом датчике и рассчитываются по формуле:

$$L = c \cdot t_i \cdot n_i, \quad (3)$$

где n_i – коэффициент преломления сердцевины сенсорного световода в i -ом датчике; t_i – время задержки оптического импульса в сенсорном световоде i -го датчика при отсутствии влияния измерительной величины.

Значение времени задержки в сенсорном световоде каждого датчика определяется по формуле:

$$t_i = \Delta_i + t_0, \quad (4)$$

где Δ_i – дополнительное время задержки в сенсорном световоде i -го датчика.

Оно выбирается из условия, что влияние измерительной величины в заданном диапазоне измерений не приведет к таким изменениям n_i , что станет возможным перекрытие оптических импульсов на выходе хотя бы одного из датчиков.

Для формулировки простых математических соотношений, позволяющих сделать расчеты длин сенсорных световодов, необходимых и достаточных для удовлетворения сформулированных выше требований, сделаем следующие предложения. Предположим, что протяженность входного импульса τ составляет 1 выбранную временную единицу (в. ед.). Время задержки в коротком световоде датчика t_0 тоже составляет 1 в. ед.

Влияние измеряемой величины на сенсорный световод в каждом из датчиков не приводит к увеличению или уменьшению времени задержки в этом световоде больше чем на 1 в. ед. ($\Delta t < 1$ в. ед.). При выполнении этих условий дополнительное время задержки в сенсорном световоде определяется по формуле:

$$\Delta_i = 2^i \text{ в. ед.} \quad (5)$$

Полное время задержки:

$$t_i = 2^i + t_0, \quad (6)$$

где i – порядковый номер датчика.

Для системы, в которой используются три измерительных датчика, информация о значении измеряемой физической величины для первого сенсорного волоконного световода будет определяться посредством измерения значения временного интервала между первым и вторым – T_{12} , или между III и IV – T_{34} , или между V и VI – T_{56} , или между VII и VIII – T_{78} выходными импульсами в порядке их поступления с выхода последнего измерительного блока [7, 8]. Соответственно значения измеряемой величины для второго сенсорного волоконного световода будет определяться измерением временного интервала между первым и третьим T_{13} , или вторым и четвертым T_{24} , или пятым и седьмым T_{57} , или шестым и восьмым T_{68} оптическими импульсами. Аналогично будет определяться и информация о значении измеряемой величины для третьего сенсорного световода.

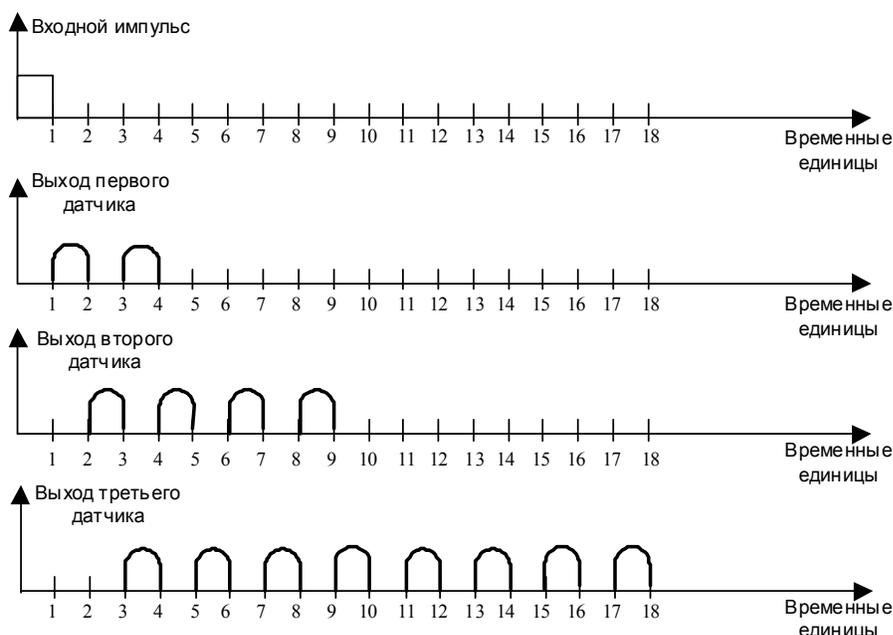


Рис. 4. Временные диаграммы

В общем виде, при протяжности входного импульса τ , допустимого диапазона изменения время задержки импульса в сенсорном световоде в результате влияния измеряемой величины Δt и времени задержки в коротком световоде датчика t_0 , расчетное время задержки в сенсорном световоде i -го датчика определяется по формуле:

$$t_i = 2^{i-1} \cdot \tau + 2^{i-1} \cdot \Delta t + t_0. \quad (7)$$

Таким образом, расчетная длина сенсорного световода i -го датчика соответственно будет определяться по формуле:

$$L_i = t_i \cdot n_i \cdot c, \quad (8)$$

где n_i – коэффициент преломления сердцевины сенсорного световода в i -ом датчике.

Рассмотрим некоторые особенности изменения протяжения оптического импульса и времени его задержки в сенсорном световоде, которые могут быть не связанными с влиянием физической величины, а значит, их необходимо учитывать с целью обеспечения необходимой точности измерения.

Как известно, в случае использования многомодового волокна оптический импульс на его выходе станет шире, чем он был на входе. Расширение импульса за счет модовой дисперсии обуславливается разным временем распространения в световоде основной (фундаментальной) моды, для которой угол ввода излучения относительно оси световода $q_z = 0$, а значит, время ее распространения является минимальным:

$$t_{M.\min} = \frac{L}{c} n_1, \quad (9)$$

где L – длина световода; n_1 – показатель преломления сердцевины световода.

В случае $q_z = q_c$ (q_c – угол, который отвечает полному внутреннему отражению между сердцевиной и оболочкой световода):

$$t_{M.\max} = \frac{L}{c} \left[\frac{n_1^2}{n_2} \right], \quad (10)$$

где n_2 – коэффициент отражения оболочки световода.

Значит, расширение импульса можно определить следующим образом:

$$\Delta t_M = t_{M.\max} - t_{M.\min} = \frac{L}{c} n_1 \left[\frac{n_1}{n_2} - 1 \right]. \quad (11)$$

Для приблизительных расчетов целесообразно воспользоваться формулой:

$$\Delta t_M = \frac{L n_1 q_c^2}{2c}. \quad (12)$$

Из предыдущего соотношения:

$$L_M = \frac{2\Delta t_M c}{n_1 q_c^2}. \quad (13)$$

Учитывая, что $\Delta t_m = t_{\min} / 2$:

$$L_M = \frac{t_{\min} c}{n_1 q_c^2}. \quad (14)$$

Используя полученные математические соотношения, можно представить результаты расчетов для типичных световодов. Например, если для оптической линии задержки используется многомодовый световод со следующими параметрами: диаметр сердцевины 50 мкм, диаметр оболочки 125 мкм, апертура 0,2, а на длине волны 850 нм он имеет в среднем полосу 1000 МГц на 1 км, то в этом случае на уровне 0,5 от амплитуды импульсы будут расширяться на 0,44 нсек/км, а среднеквадратическое расширение составит 0,187 нсек/км. Таким образом, для того, чтобы разделительная способность была не хуже чем 1 нсек, протяжение самого большого световода в линии задержки не должно превышать 1,136 км. Такое значение является более чем достаточным для построения информационно-измерительных систем.

В случае использования одномодового световода, расширение импульса происходит только за счет хроматической дисперсии, но ее влияние на расширение импульсов незначительное. Например, она не превышает 3,5 псек в диапазоне длин волн от 1285 до 1330 нм. Это значит, что если импульсы с длиной волны 1325 нм будут распространяться в световоде с нулевой хроматической дисперсией на длине волны 1300 нм, то полное среднеквадратическое расширение импульса после прохождения 50 км такого световода составит всего лишь 279 псек.

Для типичных материалов, используемых в волоконно-оптических системах, были проведены расчеты, результаты которых показаны в таблице 1:

Таблица 1

Материал	Длина волны в вакууме λ нм	Показатель преломления n	Длина волны в материале λ нм	Время задержки		Линейная протяженность материала мм	
				1 нс	1 пс	Для 1 нс	Для 1 пс
Стекло	850	1,4525	585,5	1	1	206,5	0,2065
Стекло	1300	1,4469	898,5	1	1	207,3	0,2073
Стекло	1550	1,4440	1073,4	1	1	207,7	0,2077
CaAlAs	850	3,6	236,1	1	1	83,3	0,083
Пластик	650	1,4 – 1,5	433 – 464	1	1	214,2	0,214
				1	1	200	0,200

В градиентном волокне коэффициент преломления уменьшается от центра к периферии по квадратическому закону, поэтому точки, в которых луч изменяет свою траекторию, отдаляются от оси по мере увеличения угла распространения. Таким образом, учитывая обратную зависимость скорости света от коэффициента преломления, лучи, которые распространяются ближе к оси, будут иметь меньшую скорость, а лучи мод более высокого порядка будут проходить больший путь, но они будут иметь и большую скорость распространения, поскольку будут проходить через часть сердцевины световода, имеющую меньший коэффициент преломления. Значит, расширение оптического импульса в градиентном волокне за счет разной скорости мод будет значительно меньше и будет определяться по формуле:

$$\Delta\tau \approx \frac{n_1 L}{c} \cdot \frac{(n_1 - n_2)^2}{2n_2^2}. \quad (15)$$

В отличие от многомодовых волокон в одномодовых отсутствует временная разница в распространении мод, поэтому их лучше всего использовать в предложенной системе. Но при распространении светового импульса в любом волокне необходимо учитывать дисперсию групповой скорости и нелинейный характер зависимости коэффициента преломления от интенсивности поля импульса.

В одномодовых волокнах для моделирования процесса распространения импульса можно использовать следующее уравнение:

$$i \frac{\partial A(z, \eta)}{\partial z} = -\frac{k_L^*}{2} \frac{\partial^2 A(z, \eta)}{\partial \eta^2} + \chi |A(z, \eta)|^2 A(z, \eta), \quad (16)$$

где $A(z, \eta)$ – функция, характеризующая амплитуду поля импульса; z – координата; η – волновой аргумент; k_L^* – коэффициент дисперсии групповой скорости; χ – коэффициент, учитывающий влияние поля импульса на коэффициент преломления; $\chi = k_L n_2^\nabla / n_0$, где n_2^∇ – показатель преломления, который зависит от интенсивности импульса.

С помощью метода инверсного рассеивания это уравнение было аналитически решено для волокна с положительной дисперсией групповой скорости и положительным нелинейным показателем преломления [4].

В случае, когда импульс проходит через волокно достаточной длины:

$$z \geq \frac{0,6\tau_{Lo}}{\sqrt{\chi k_L^* A_{o\max}}}, \quad (17)$$

его форма практически теряет зависимость от начальной и приближается к прямоугольной с продолжительностью:

$$\tau_{LT} = 2,9\sqrt{k_L^* \chi A_{o\max} z}, \quad (18)$$

а напряженность поля импульса удовлетворяет соотношению:

$$A_L \approx 0,6 \sqrt{\frac{A_{o\max} \tau_{Lo}}{\sqrt{k_L^* \chi z}}}. \quad (19)$$

Для типичных параметров одномодового волокна $n_2^\nabla \approx 1,5 \cdot 10^{-22} M^2 / B^2$, $\chi = 6,5 \cdot 10^{-16} M / B^2$, $k_L^* \approx 6,5 \cdot 10^{-26} C^2 \cdot M^{-1}$. Протяженность выходного импульса будет уменьшаться с увеличением напряженности поля входного импульса до достижения минимального значения при длине пути импульса в линейной среде:

$$z = 5,6 \frac{\tau_{Lo}}{\sqrt{\lambda k_L^* A_{o\max}}} . \quad (20)$$

Таким образом, если использовать рассмотренное свойство одномодовых световодов при построении ИИС на оптических волокнах с кольцевой структурой, появляется принципиальная возможность компенсировать погрешность, обусловленную дисперсионным расширением импульсов, и получить информативный сигнал, который будет содержать информацию только об измеряемых параметрах.

Выводы

Таким образом, была разработана структура волоконно-оптических информационно-измерительных систем, функционирующих на основе интервального метода измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабатура Ю.В. Основы теорії та практики інтервальних вимірювань. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 167 с.
2. Т. Окуси, К. Окамото и др. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
3. Б.А. Красюк, О.Г. Семенов и др. Световодные датчики. – М.: Машиностроение, 1990. – 375 с.
4. А.Снайдер, Дж.Лав. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 525 с.
5. Херман И., Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов. – М.: Мир, 1986. – 368 с.
6. Vinarub E. I. Optical fibers make low-cost and reliable sensors//Electronic Design. – 1993. – № 7. – P. 188 – 195.
7. Verber S.M. The exiting promise of fiber-optical sensors//Mech. Eng. – 1998. – № 5. – P. 60 – 70.
8. H.F. Wolf Ed. Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications. – New York: Garland STPM Press, 1999. – 447 p.

Шабатура Юрий Васильевич – доцент кафедры метрологии та промышленной автоматизики;

Зелена Ольга Викторовна – магистр кафедры метрологии та промышленной автоматизики
Винницкий национальный технический университет