

Многосердцевинное оптическое волокно и волоконно-оптическая линия задержки на его основе

О.Н.Егорова, М.С.Астапович, М.Е.Белкин, С.Л.Семенов

Впервые изготовлена и исследована переключаемая волоконно-оптическая линия задержки на многосердцевинном оптическом волокне длиной 1300 м. Получены времена задержек сигнала до 45 мкс с шагом 6.43 мкс. Последовательное прохождение сигнала по сердцевинам многосердцевинного оптического волокна позволяет сократить длину волокна, необходимую для получения заданного времени задержки, что важно для снижения массы и габаритов устройств, основанных на использовании волоконно-оптических линий задержки.

Ключевые слова: многосердцевинное оптическое волокно, групповая задержка, волоконно-оптические линии задержки.

1. Введение

Обработка, генерация и передача радиочастотного сигнала с помощью оптического излучения относится к междисциплинарной области, получившей название «радиофотоника» [1, 2]. В большинстве задач радиофотоники аналоговый радиочастотный сигнал переносится в оптический диапазон путем модуляции высококогерентного оптического излучения. Для дальнейшей обработки такого модулированного оптического сигнала широко используются различные виды многоканальных и одноканальных линий задержки, являющихся ключевыми элементами для создания устройств радиофотоники [3, 4]. Для ряда задач необходимы линии, обеспечивающие значительную (свыше 100 мкс) задержку сигнала. Одним из вариантов создания такого устройства, обеспечивающего подобную задержку сигнала, являются волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ).

В ВОЛЗ задержка оптического сигнала, модулированного радиочастотным сигналом, достигается за счет прохождения отрезка одномодового оптического волокна (ОВ) длиной L . Величина задержки $\tau = Ln_g/c$, где n_g – групповой показатель преломления моды ОВ; c – скорость света в вакууме. Преимуществами ВОЛЗ по сравнению с электронными аналогами являются простота, устойчивость к электромагнитным помехам, малые шумы и незначительные перекрестные помехи между сигналами, основным недостатком – большие габариты и масса, необходимые для получения времен задержки 100 мкс и более и связанные с использованием ОВ значительной длины. Большие габариты и масса устройств обработки радиочастотного сигнала неприемлемы, особенно для бортовых применений данных устройств.

О.Н.Егорова, М.С.Астапович, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@fo.gpi.ru, sls@fo.gpi.ru
М.Е.Белкин. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 21 октября 2016 г.

Уменьшение габаритов и массы ВОЛЗ может быть достигнуто за счет использования многосердцевинного оптического волокна (МСОВ) [5], содержащего не одну, а несколько сердцевины. Поскольку оптический сигнал последовательно проходит по каждой из сердцевины МСОВ, требуемая задержка может быть обеспечена при такой длине МСОВ, которая меньше длины односердцевинного ОВ в число раз, равное количеству сердцевины [6]. Настоящая работа посвящена созданию и исследованию параметров переключаемой волоконно-оптической линии задержки на основе многосердцевинного оптического волокна. Сведения о практической реализации такой конструкции линии задержки в литературе пока отсутствуют.

2. Схема ВОЛЗ на основе МСОВ

Схема переключаемой ВОЛЗ на основе МСОВ с пристраиваемыми к нему с обеих сторон устройствами ввода-вывода (УВВ), представлена на рис.1. Источником сигнала служил высококогерентный полупроводниковый лазерный излучатель (ПЛИ) на длине волны 1550.92 нм. Для моделирования радиочастотного сигнала использовался генератор сигналов (ГС), создававший последовательность радиоимпульсов длительностью 1 мкс с периодом следования 50 мкс и частотой несущей 100 МГц. Излучение ПЛИ модулировалось с помощью электрооптического модулятора (ЭОМ) сигналом, полученным от ГС. После ЭОМ модулированное оптическое излучение подавалось на микрооптический электромеханический переключатель П1. При одном из положений П1 сигнал вводился в канал, осуществляющий нулевую задержку сигнала, т. е. в односердцевинное ОВ малой длины. В другом положении П1 сигнал вводился в односердцевинное ОВ и через устройства ввода-вывода УВВ1, осуществляющего ввод и вывод излучения из сердцевины МСОВ в односердцевинное ОВ, вводился в первую сердцевину (С1) МСОВ. Пройдя по С1, сигнал приобретал временную задержку $\tau = Ln_g/c$ и с помощью переключателя П2 подавался либо на выход ВОЛЗ, либо в следующую сердцевину (С2). Длина МСОВ составляла 1300 м. При $n_g = 1.468$ (телекоммуникационное волокно) расчетное значение τ после прохождения одной сердцевины составляло

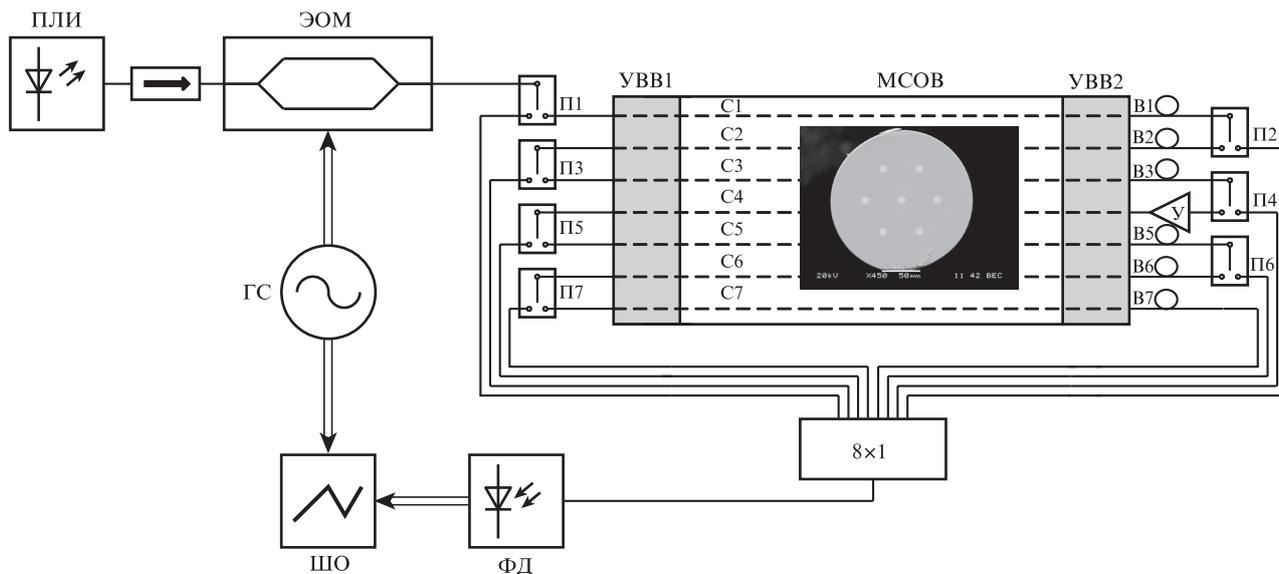


Рис.1. Схема линии задержки на МСОВ (B1–B7 – дополнительные витки, У – усилитель). На вставке – фотография торца МСОВ.

6.36 мкс. После прохождения C2 сигнал приобретает задержку 2τ и с помощью П3 подавался либо на выход линии задержки, либо в третью сердцевину (C3). Аналогично могли быть получены задержки сигнала на время 3τ , 4τ , 5τ , 6τ и 7τ . На выходе ВОЛЗ различные каналы объединялись с помощью волоконно-оптического сумматора 8×1 . Таким образом, в исследуемой схеме переключаемой линии задержки на МСОВ в каждый момент времени осуществлялась одна из задержек сигнала на время от 0 до 7τ с одинаковым интервалом τ .

Выходной сигнал оптического сумматора преобразовывался в электрический с помощью фотодетектора (ФД), к выходу которого был подключен широкополосный осциллограф (ШО). Для определения времени задержки от ГС на вход осциллографа также подавался синхросигнал, соответствующий моменту поступления переднего фронта модулирующего радиопульса на вход ЭОМа.

3. Многосердцевинное оптическое волокно для ВОЛЗ

Использование семисердцевинного ОВ вместо односердцевинного в описанной выше схеме позволяет уменьшить длину отрезка волокна, необходимого для получения требуемой задержки сигнала, в семь раз. Линия задержки содержит семь каналов, в каждом из которых осуществляется одинаковая задержка оптического сигнала. Хотя равенство оптических путей каждого из каналов (между переключателями П1–П2, П2–П3 и т.д.) может быть достигнуто подбором длин подводящих односердцевинных ОВ, тем не менее желательно, чтобы оптические длины всех сердцевин в отрезке МСОВ совпадали. Поэтому для создания ВОЛЗ использовалось МСОВ с одинаковыми параметрами сердцевин и, следовательно, с одинаковыми групповыми показателями преломления мод соседних сердцевин.

МСОВ было изготовлено методом сверления [7]. Для этого в стержне из нелегированного кварцевого стекла диаметром 20 мм высверливались отверстия с осями, параллельными оси стержня. Затем в отверстия вставлялись стержни с легированной оксидом германия сердцевиной,

полученные из заготовок, которые были изготовлены методом химического осаждения из газовой фазы. Собранный таким образом заготовка консолидировалась и из нее вытягивалось оптическое волокно. Фотография поперечного сечения МСОВ, полученная на электронном микроскопе, показана ниже (рис.4). Разность показателей преломления сердцевин и оболочки составляла 0.0055, расстояние между центрами соседних сердцевин было равно 47 мкм, внешний диаметр оболочки из кварцевого стекла составлял 180 мкм. Измеренные длины волны отсечки первой высшей моды в каждой из сердцевин находились в диапазоне 1340–1380 нм.

Потери на длине волны 1.55 мкм в центральной сердцевине МСОВ составили 0.8 дБ/км, в боковых сердцевинах – от 2.1 до 2.4 дБ/км. Высокий уровень потерь в боковых сердцевинах связан с недостаточной толщиной оболочки из кварцевого стекла, в результате чего часть излучения мод боковых сердцевин вытекает в полимерную оболочку с большим, чем у кварцевого стекла, показателем преломления. Высокие оптические потери в боковых сердцевинах в дальнейшем могут быть снижены путем увеличения расстояния от боковых сердцевин до края оболочки из кварцевого стекла. Тем не менее полученный уровень оптических потерь уже приемлем для проведения настоящего исследования. Измеренная на отрезке МСОВ длиной 1560 м величина перекрестных оптических помех между центральной и боковыми сердцевинами составила $-54 \text{ дБ} \pm 2 \text{ дБ}$.

4. Измерение разности групповых задержек между сердцевинами МСОВ

Из-за случайных флуктуаций параметров заготовки параметры соседних сердцевин МСОВ также могут немного различаться. Это может приводить к различию групповых показателей преломления мод соседних сердцевин и, следовательно, времен задержек сигнала между сердцевинами одного и того же отрезка МСОВ. Кроме того, к различию параметров соседних сердцевин может приводить изгиб волокна. Для исследования влияния этих факторов мы измерили разность времен задержек между соседними сердцевинами в изготовленном МСОВ.

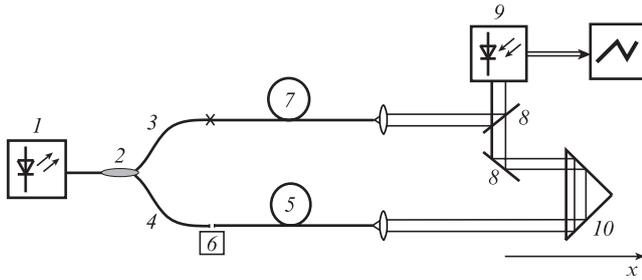


Рис.2. Схема установки для измерения разности групповых задержек между сердцевинами МСОВ.

Нами применялся интерферометрический метод с использованием интерферометра Маха – Цендера и низкокогерентного источника излучения. Схема установки представлена на рис.2. Излучение полупроводникового суперлюминесцентного диода 1 с шириной спектра 50 нм и центральной длиной волны 1530 нм делилось с помощью волоконного разветвителя 2 между двумя отрезками односердцевинных ОВ – 3 и 4. Выходной торец ОВ 3 состыковался с одной из сердцевины МСОВ (5) с помощью трехкоординатного транслятора 6, ОВ 4 приваривалось к отрезку односердцевинного ОВ 7, длина которого примерно соответствовала длине исследуемого МСОВ 5. Излучение, выходящее из ОВ 7 и исследуемой сердцевины МСОВ 5, с помощью линз преобразовывалось в параллельные пучки, затем оба пучка поступали на делительную пластину 8, где складывались. После пластины 8 излучение поступало на фотоприемник 9, с помощью которого фиксировалось наличие или отсутствие интерференции между двумя пучками, прошедшими через различные плечи интерферометра. Интерференция наблюдалась в случае, если различие между длинами плеч интерферометра было меньше длины когерентности используемого источника, которая в настоящей работе составляла около 50 мкм.

Для измерения разности задержек между сердцевинами МСОВ в плечо интерферометра (измерительное) вводилась одна из сердцевины МСОВ. Затем с помощью перемещения углового отражателя 10 вдоль оси *x* изменялась длина измерительного плеча интерферометра для достижения условия интерференции. После этого в измерительное плечо интерферометра вводилась другая сердцевина МСОВ, для которой также достигалось условие интерференции. Исходя из различия в положениях Δx углового отражателя, которое соответствует разности длин измерительного плеча интерферометра $2\Delta x$, определялась разность времен задержек $\Delta\tau$ между сердцевинами:

$$\Delta\tau = 2\Delta x n_{\text{air}}/c, \tag{1}$$

где $n_{\text{air}} \approx 1$ – групповой показатель преломления воздуха. Аналогично определялась разность времен задержек между другими сердцевинами МСОВ.

Разность групповых задержек измерялась на отрезке МСОВ длиной 94 м, намотанного на катушки с радиусами 25, 80 и 160 мм. Измеренные значения разностей задержек между центральной и каждой из боковых сердцевины на 1 м МСОВ приведены в табл.1. На рис.3 показано взаимное расположение сердцевины с различными значениями разностей задержек для радиуса намотки МСОВ 25 мм. Три из боковых сердцевины имеют отрицательную разность групповой задержки относительно центральной (групповая задержка в боковой сердцевине меньше, чем в центральной), три остальных – положительную. Абсолютные значения разностей времен задержек с разными знаками попарно совпадают в пределах 15%, сердцевина с отрицательным значением расположена с одной стороны от оси *y*, с положительными – с другой. Такой же характер распределение времен задержек между сердцевинами был обнаружен и при радиусах намотки МСОВ 80 и 160 мм. Различие между разностями времен задержек в «парных» сердцевинах достигало при этом 34%.

Полученная разность времен задержек в различных сердцевинах связана с изгибом МСОВ. На рис.4, *a, б* представлены неизогнутое МСОВ и соответствующий профиль показателя преломления вдоль оси *x*, на рис.4, *в* – изогнутое семисердцевинное МСОВ. Изогнутое ОВ оптически эквивалентно прямому ОВ с наклонным профилем показателя преломления [8]. Соответствующий изогнутому МСОВ эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси *x* представлен на рис.4, *г*. Как видно из рис.4, *б* и *г* при изгибе МСОВ будет происходить измене-

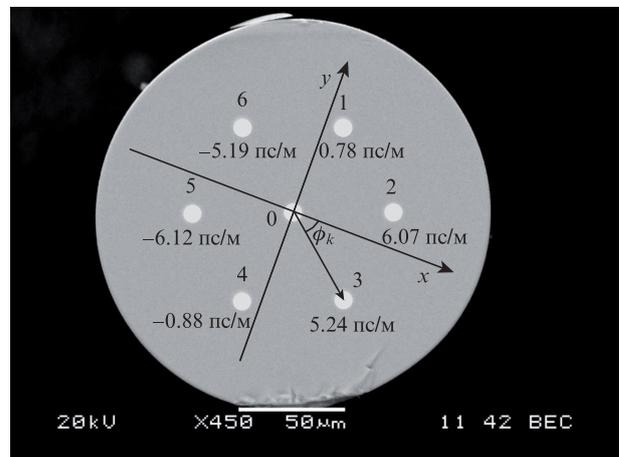


Рис.3. Фотография поперечного сечения МСОВ. Показано взаимное расположение сердцевины (0–6) с различными разностями групповых задержек (числа у каждой сердцевины) при радиусе намотки МСОВ 25 мм.

Табл.1. Разность групповых задержек $\Delta\tau_{k-0}/L$ (пс/м) между центральной и боковыми сердцевинами на 1 м МСОВ при различных радиусах намотки.

| R (мм) | Номер сердцевины <i>k</i> | | | | | | Расчетные максимальные значения $\Delta\tau_{k-0}/L$ (пс/м) |
|--------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 25 | 0.78 | 6.07 | 5.22 | -0.89 | -6.10 | -5.18 | 9.20 |
| 80 | 0.41 | 0.79 | 0.47 | -0.34 | -0.89 | -0.48 | 2.87 |
| 160 | 0.47 | 1.08 | 0.67 | -0.35 | -1.08 | -0.65 | 1.44 |

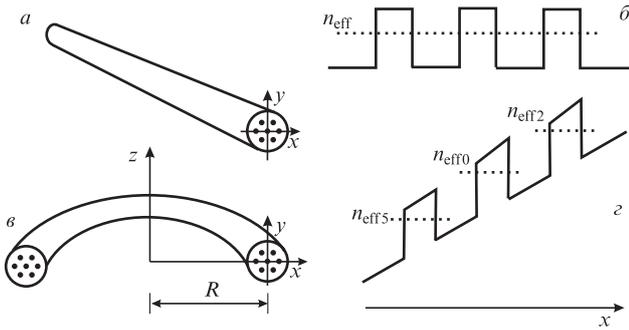


Рис.4. Прямое МСОВ (а), профиль показателя преломления вдоль оси x прямого МСОВ (б), изогнутое МСОВ (в) и эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси x изогнутого МСОВ (г).

ние фазовых (n_{effk}) и, следовательно, групповых (n_{gk}) эффективных показателей преломления мод сердцевин, а также их разности. В случае, если сердцевин одинаковы, фазовые показатели преломления мод центральной и боковой сердцевин связаны соотношением [9]

$$n_{effk} = n_{eff0} [1 + (D/R) \cos \phi_k], \quad (2)$$

где D – расстояние между центрами соседних сердцевин; ϕ_k – угол между радиальным направлением изгиба (ось x) и радиус-вектором, проведенным к центру сердцевины с номером k (см. рис.3). Поскольку групповой показатель преломления моды $n_{gk} = n_{effk} - \lambda dn_{effk}/d\lambda$, то, используя (2), для разности групповых показателей преломления мод центральной и боковой сердцевин получаем:

$$\Delta n_{gk-0} = n_{gk} - n_{g0} = \frac{D \cos \phi_k}{R} n_{g0}. \quad (3)$$

Разность времен задержек между центральной и боковой сердцевинами

$$\Delta \tau_{k-0} = \tau_k - \tau_0 = \frac{L}{c} \Delta n_{gk-0} = \frac{L}{c} \frac{D \cos \phi_k}{R} n_{g0}. \quad (4)$$

Зависимостью группового показателя преломления моды от угла ϕ_k и объясняется найденное экспериментально распределение значений $\Delta \tau_{k-0}$.

Характер распределения измеренной разности задержек между центральной и боковыми сердцевинами свидетельствует о том, что ее наличие связано с изгибом МСОВ. Пользуясь (4), можно рассчитать максимальное значение разности групповых задержек, соответствующее $\cos \phi_k = 1$. Для оценки можно принять $n_{g0} = 1.468$ (это значение группового показателя преломления моды стандартного телекоммуникационного ОВ SMF-28). Для $D = 47$ мкм расчетные значения $\Delta \tau_{k-0}/L$ при различных радиусах изгиба представлены в табл.1. Экспериментально измеренные разности задержек меньше максимально возможного значения. Это связано с ненулевым значением угла ϕ_k . При длине МСОВ 1300 м, использованной для создания линии задержки, разность задержек оптического сигнала между сердцевинами составляет менее 12 нс для МСОВ с радиусом изгиба 25 мм, менее 4 нс для радиуса изгиба 80 мм и менее 2 нс для радиуса 160 мм. Эти значения много меньше задержки сигнала (6.36 мкс) при прохождении одной сердцевины МСОВ и, следовательно, изменение разности групповых задержек между сердцевинами МСОВ при изгибе волокна не будет оказывать существенного влияния на параметры исследуемой схемы ВОЛЗ.

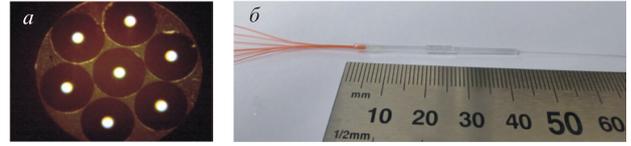


Рис.5. Торце (а) и внешний вид устройства ввода-вывода (б).

5. Устройство ввода-вывода излучения для МСОВ

Для ввода и вывода излучения из каждой сердцевин МСОВ в односердцевинные ОВ был выбран один из вариантов волоконно-оптического устройства [10], имеющих малый размер и обеспечивающий достаточную механическую надежность и малые оптические потери. Выбранная конструкция устройства ввода-вывода представляет собой семь отрезков односердцевинных ОВ, каждый длиной несколько метров, сложенных вместе. С одного из концов каждого отрезка ОВ удалялось по несколько сантиметров полимерного покрытия, а затем на зачищенном участке с помощью плавиковой кислоты проводилось травление кварцевой оболочки ОВ до диаметра, равного расстоянию между центрами соседних сердцевин в МСОВ. После этого стравленные участки ОВ складывались вместе и помещались в капилляр из кварцевого стекла, внутренний диаметр которого в три раза превышал общий диаметр стравленных ОВ. Внутри капилляра участки ОВ заклеивались и торец капилляра полировался. Торце устройства ввода-вывода после полировки показан на рис.5,а. Геометрия расположения сердцевин односердцевинных ОВ соответствует расположению сердцевин на торце МСОВ. Затем торцы устройства ввода-вывода и МСОВ состыковывались и производилась юстировка, после которой торцы соединялись с помощью склеивания. Место склейки фиксировалось внутри капилляра большего диаметра, изготовленного также из кварцевого стекла. На рис.5,б показано устройство ввода-вывода с присоединением к нему МСОВ. Оптические потери на стыковку МСОВ с устройствами ввода-вывода приведены в табл.2. Достигнутые величины оптических потерь обеспечили проведение экспериментов по задержке оптического сигнала.

6. Эксперимент и обсуждение результатов

На рис.6 показана объединенная осциллограмма импульсных радиосигналов на выходе ФД, прошедших через одну, две и т.д. сердцевин МСОВ в схеме, приведенной на рис.1. Число сердцевин, через которые прошел сигнал, обозначено на рис.6 соответствующими цифрами. Показаны также синхронизирующие импульсы, получаемые напрямую от ГС. Вследствие оптических потерь (табл.2) амплитуда напряжения электрического сигнала на выходе фотодетектора при увеличении числа проходимых сердцевин уменьшалась. Для компенсации потерь между третьей и четвертой сердцевинами в схему ВОЛЗ был включен волоконный эрбиевый усилитель У (см. рис.1). Для того чтобы все каналы имели одинаковую длину, длины подводящих односердцевинных ОВ выбиралась с учетом длины эрбиевого усилителя, для чего делались дополнительные витки В1–В7, длины которых были равны длине эрбиевого усилителя. Из-за вы-

Табл.2. Оптические потери в ВОЛЗ на длине волны 1.55 мкм.

| Потери | Номер сердцевинны | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Потери в МСОВ (1.55 мкм) (дБ/км) | 0.8 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 2.2 | 2.3 | 2.3 |
| Потери на стыковке МСОВ с УВВ1 (дБ) | 0,8 | 1.6 | 1.3 | 1.5 | 1.4 | 1.8 | 1.7 |
| Потери на стыковке МСОВ с УВВ2 (дБ) | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 1,1 | 1,6 | 0,6 | 0,5 |
| Суммарные потери (дБ) | 2.5 | 4.4 | 4.1 | 4.8 | 5.2 | 4.6 | 4.4 |

соких оптических потерь, а также наличия усилителя, амплитуды сигналов на рис.6 различны. Оптические потери, представленные в табл.2, в дальнейшем могут быть существенно снижены за счет отработки технологии изготовления МСОВ и УВВ.

Полученное значение максимальной задержки при прохождении сигнала по всем сердцевинам МСОВ, измеренное по переднему фронту импульса (осциллограмма 7 рис.6), составило 45.0 мкс. Разность оптических задержек между соседними каналами составила 6.43 мкс. Полученные оптические задержки соответствуют расчетным значениям, вычисленным по формуле $\tau = (Ln_g)/c$. При $n_g = 1,468$ и $L = 1300$ м расчетное значение групповой задержки составляет 6.36 мкс. Различие расчетной и измеренной разности задержек между каналами в данной схеме было обусловлено дополнительной длиной эрбиевого усилителя и витков подводящих односердцевинных ОВ В1-В7.

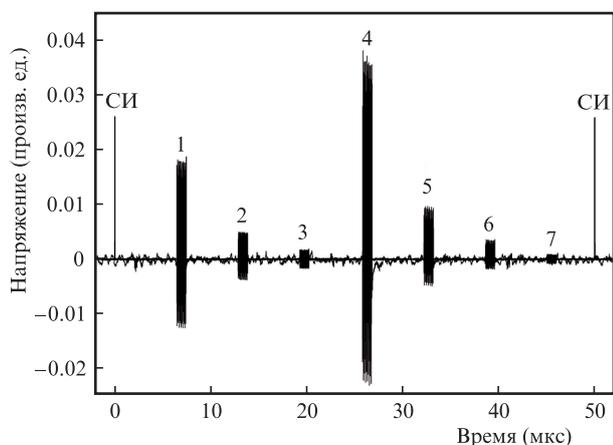


Рис.6. Объединенная осциллограмма импульсных радиосигналов на выходе фотодетектора, прошедших через 1, 2 и т.д. сердцевинны МСОВ, а также синхронизирующие импульсы (СИ), полученные от ГС.

7. Заключение

В настоящей работе впервые изготовлена переключаемая волоконно-оптическая линия долговременной задержки на многосердцевинном оптическом волокне длиной 1300 м. С помощью линии задержки получены времена задержек сигнала до 45 мкс с шагом 6.43 мкс. Данная конструкция волоконно-оптической линии задержки является перспективной для задач, в которых необходимо получение значительных времен задержки сигнала. Последовательное прохождение сигнала по сердцевинам многосердцевинного оптического волокна позволяет уменьшить длину оптического волокна, необходимую для получения требуемой задержки сигнала, а следовательно, массу и габариты устройств, осуществляющих задержку сигнала, что особенно важно для бортовых применений этих устройств.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № RFMEFI60715X0138).

1. Seeds A. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, **50**, 877 (2002).
2. Capmany J., Novak D. *Nat. Photonics*, **1**, 319 (2007).
3. Capmany J., Ortega B., Pastor D., Sales S. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 702 (2005).
4. Minasian R.A. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, **54**, 832 (2006).
5. Inao S., Sato T., Sentsui S., Kuroha T., Nishimura Y., in *Proc. Opt. Fiber Commun.* (Washington, D.C., USA, 1979, WB1).
6. Егорова О.Н., Астапович М.С., Белкин М.Е., Семенов С.Л. Заявка на Патент РФ № RU 2016124251 от 20.06.2016.
7. Ishida I., Akamatsu T., Wang Z., Sasaki Y., Takenaga K., Matsuo S., in *Proc. Opt. Fiber Commun.* (Anaheim, CA, 2013, OTu2G).
8. Marcuse D. *Appl. Opt.*, **21**, 4208 (1982).
9. Li S., Butler D.L., Li M.-J., Koklyushkin A., Nazarov V., Khrapko R., Geng, Y., McCollum R.L., in *Proc. IEEE Photon. Conf.* (Bellevue, WA, 2013, TuF3.2).
10. Li B., Feng Z., Tang M., Xu Z., Fu S., Wu Q., Deng L., Tong W., Liu S., Shum P.P. *Opt. Express*, **23**, 10997 (2015).