

Экспериментальная проверка метода рефлектометрии частотной области с широкополосным зондирующим сигналом

Н.Ю. Ситнов, Н.И. Горлов, И.В. Богачков

В статье рассматривается комплекс экспериментов, целью которых является практическое подтверждение работоспособности одной из разновидностей метода частотной рефлектометрии, основанной на использовании широкополосных зондирующих сигналов со спектром, представляющим собой сетку частот с равномерным шагом. Приведено описание методики проведения экспериментов. Представлены результаты и выводы, обозначены перспективы дальнейшего развития и применения метода. Материал работы изложен таким образом, чтобы дать возможность экспериментаторам получить описываемыми способами аналогичные результаты и продолжить исследования.

Ключевые слова: рефлектометрия частотной области, зондирующий сигнал, спектрографическая рефлектограмма, разрешающая способность, преобразование Фурье, имитационная модель, весовое окно Ханна.

1. Введение

В работе [1] рассмотрен вариант метода рефлектометрии частотной области, отличительной особенностью которого является использование зондирующего сигнала со спектром в виде набора частотных компонентов, расположенных с равными интервалами. Суть метода состоит в получении спектрограммы огибающей спектра суммы передаваемого и принимаемого (отраженного и рассеянного) сигналов. Эту спектрограмму будем называть в дальнейшем спектрографической рефлектограммой.

Экспериментальная проверка указанного метода включает в себя получение рефлектограмм одного и того же участка оптического волокна этим методом и методом рефлектометрии временной области (OTDR) с последующим сопоставлением результатов. Проведение экспериментов предполагается осуществить с использованием компьютерного моделирования. Следовательно, необходимо применение соответствующего программного обеспечения. Оно должно обеспечивать имитационное моделирование оптического волокна и процессов распространения в нём сигналов. Должно осуществляться и моделирование рефлектометра, состоящее в обеспечении возможности отправки в модель волокна тестовых сигналов заданной формы, приёма отражённых (рассеянных) сигналов с фиксацией их в файле.

Кроме того, необходимо обеспечить синтез тестирующего сигнала, анализ полученных данных и визуализацию результата. Указанные операции могут быть осуществлены внешними средствами (по отношению к моделирующим программам). В данном случае они реализуются в среде электронных таблиц.

2. Определение параметров зондирующего сигнала и модели волокна

Определим параметры широкополосного зондирующего сигнала, который предполагается использовать в экспериментах. Как было указано выше, спектр этого сигнала представляет собой сетку частот с равномерным шагом. При выборе минимальной частоты в спектре будем иметь в виду то, что временной интервал, кратный периодам всех спектральных составляющих, должен превышать удвоенное время распространения излучения в тестируемом оптическом волокне с показателем преломления сердцевины 1.4675. Это необходимо для исключения ложных пиков на спектрографической рефлектограмме. Такое условие будет заведомо выполнено, если упомянутое время двукратного пробега сигнала в волокне будет меньше периода спектральной составляющей зондирующего сигнала, которая имеет минимальную частоту f_H .

$$2 \cdot T_{\text{пр}} = \frac{L}{V} = \frac{nL}{c} < t_{\text{max}} = \frac{1}{f_H}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пр}}$ – время пробега сигнала от одного конца волокна до другого,

L – длина волокна,

V – скорость распространения световых волн в волокне,

n – показатель преломления стекла в сердцевине волокна,

c – скорость света в вакууме,

t_{max} – период спектральной составляющей, частота которой равна f_H .

Верхняя частота должна обеспечивать требуемую разрешающую способность Δs . Примем, что последняя равна одному метру. Известно [1], что

$$\Delta s = \frac{c(f_B + f_H)^2}{8(f_B - f_H) \cdot n^2 f_B f_H}, \quad (2)$$

где f_B и f_H – соответственно верхняя и нижняя границы полосы частот, занимаемой измерительным сигналом,

c – скорость света в вакууме,

n – показатель преломления стекла сердцевины волокна.

Поскольку частота f_H является весьма низкой (по отношению к f_B), разрешающая способность определяется, в основном, верхней частотой. Используя (2), можно показать, что для $\Delta s=1$ м значение f_B должно быть равно 175 МГц.

Применяя теорему Котельникова, выбираем сначала длину элемента модели волокна, равную 0.5 м. Можно показать, что при распространении электромагнитных волн в среде с показателем преломления, равным 1.4675 (стекло в сердцевине волокна), частоте 175 МГц соответствует длина волны 1.168 м. Это значит, что длина элемента 0.5 м в данном случае также удовлетворяет условию теоремы Котельникова, поскольку спектральной составляющей максимальной частоты соответствует более чем два отсчёта.

Если задаться длиной моделируемого волокна, равной 1024 м, то его модель будет состоять из 2048 элементов. Это означает, что анализ полного набора принятых данных использованным в работе методом возможен лишь не более чем при двукратном проходе волокна излучением (если отражающие неоднородности расположены в его начале и конце). При этом приёмная таблица должна содержать 4096 элементов. Следовательно, изучение резонансных явлений в волокне¹ необходимо производить с использованием неоднородностей, расположенных близко от его начала. Указанное ограничение длины может в некоторых случаях существенно по-

¹ В данной работе не рассматривается, но может представлять интерес для дальнейших исследований.

влиять лишь на фантомные пики рефлектограммы (исключить их появление), что является вполне допустимым.

При указанных выше условиях частота дискретизации $f_{\text{дискр}}$ не должна быть менее $175 \cdot 2 = 350$ МГц. Кроме того, поскольку

$$f_{\text{дискр}} = 4 f_{\text{max}}, \quad (3)$$

где f_{max} – максимальная частота для преобразования Фурье (центр шкалы, точка разграничения основной и зеркальной областей), и должно выполняться условие

$$f_{\text{в}} < f_{\text{max}} = \frac{f_{\text{дискр}}}{4}, \quad (4)$$

то появляется ещё одно ограничение, в результате чего разрешающая способность при анализе снижается в два раза (поскольку для получения корректного результата необходимо обеспечить выполнение неравенства (4), то это означает отказ от присутствия в спектре составляющих с частотами выше $f_{\text{дискр}}/4$). Следовательно, для сохранения разрешающей способности необходимо в два раза уменьшить длину элемента модели, приняв ее равной 0.25 м. Длина всей модели волокна при этом будет составлять 512 м. Количество элементов (2048) сохраняется.

Вычислим точное значение частоты дискретизации. Она равна

$$f_{\text{дискр}} = \frac{V}{\ell_e} = \frac{c}{n \ell_e}, \quad (5)$$

где V – скорость распространения световых волн в волокне,

ℓ_e – длина элемента,

c – скорость света в вакууме,

n – показатель преломления стекла в сердцевине волокна.

$$f_{\text{дискр}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.4675 \cdot 0.25} = 817717206 \text{ Гц} \approx 817.7 \text{ МГц}. \quad (6)$$

То есть один элемент передаёт сигнал от входа до выхода за время, равное $1.22292 \cdot 10^{-9}$ с.

Обработку данных предполагается производить при помощи Microsoft Excel. Он имеет так называемый пакет анализа, позволяющий, в частности, осуществлять преобразование Фурье. При этом максимальное число отсчётов исходного сигнала равно 4096. Принимая во внимание тот факт, что лишь половина выходных отсчётов составляет спектральное представление сигнала (тогда как другая половина соответствует его зеркальному отображению), а также то, что рассматриваемый метод предполагает последовательное проведение двух преобразований Фурье, можно сделать вывод, что число отсчётов спектрографической рефлектограммы равно 1024. Если учесть упомянутое выше соотношение частоты дискретизации и максимальной частоты спектра зондирующего сигнала (4), то очевидно, что только четверть отсчётов результата первого преобразования Фурье может быть использована в дальнейшей обработке данных. Поэтому, при указанных условиях, спектрографическая рефлектограмма может включать в себя не более чем 512 частотных отсчётов.

Так как спектрограмма суммы сигналов имеет 2048 частотных отсчётов, и лишь половина из них используется в дальнейшей обработке, то, для достижения максимальной разрешающей способности при данных условиях, спектр зондирующего сигнала должен содержать 1024 линии.

Теперь, разделив максимальную частоту спектра $f_{\text{в}}$ на количество спектральных линий $N = 1024$, можно получить значение частотного интервала δf между последними. Он равен

$$\delta f = \frac{f_B}{N} = \frac{175 \cdot 10^6}{1024} = 170898.4375 \text{ Гц (170.9 кГц)}. \quad (7)$$

Численно равной этому интервалу будет и минимальная частота f_H в спектре. Проверим соответствие её приведённому выше критерию (1):

$$2 \cdot T_{\text{пр}} = \frac{nL}{c} = \frac{1.4675 \cdot 512}{3 \cdot 10^8} = 2.5045 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$t_{\text{max}} = \frac{1}{f_H} = \frac{1}{170898.4375} = 5.85143 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Следовательно, неравенство (1) выполняется.

Такой широкополосный сигнал фактически является суммой сигнала основной частоты 170.9 кГц и тысячи двадцати трех его высших гармоник.

Отметим, что спектральный анализ такого сигнала указанным ранее методом, применяемым при проведении экспериментов, даёт некорректный результат, если начальные фазы всех составляющих спектра являются одинаковыми (равными нулю). С целью достижения правильного формирования спектрограммы, было введено приращение начальной фазы каждой следующей (по мере увеличения частоты) спектральной составляющей, равное $3 \cdot \pi/4$.

3. Описание имитационных моделей

Основу экспериментальной системы составляет комплекс программ, осуществляющий имитационное моделирование оптического волокна, процессов распространения в нём сигналов, генерацию и регистрацию измерительных сигналов. Под генерацией в данном случае следует понимать подачу в модель волокна последовательности цифровых отсчётов зондирующего сигнала, сформированной заранее. Регистрация представляет собой запись последовательности отсчётов сигнала, принимаемого из волокна, в базу данных (БД).

Подробное описание комплекса программ можно найти в [2]. Здесь же необходимо указать, что взаимодействие его с остальными компонентами экспериментальной системы осуществляется через таблицы формата .dbf. При этом в таблице transmit.dbf необходимо задать последовательность отсчётов зондирующего сигнала, посылаемого в волокно в процессе рефлектометрического исследования. Отклик волокна на такое воздействие формируется в файле receive.dbf. Каждая запись последнего соответствует участку волокна длиной 0.25 м, представляющему собой так называемый элемент – минимальную (неделимую) составную часть, обладающую заданной совокупностью параметров. Параметры всех элементов модели волокна задаются в файле f_param.dbf.

Каждый элемент характеризуется двенадцатью параметрами. Из них в данной серии экспериментов существенное значение имеют те, что приведены ниже:

K_FWRD	– коэффициент передачи в прямом направлении,
T_FWRD	– временная задержка при распространении в прямом направлении,
KR_FWRD	– коэффициент отражения при передаче в прямом направлении,
TR_FWRD	– временная задержка отражённого сигнала при распространении в прямом направлении,
K_BWRD	– коэффициент передачи в обратном направлении,
T_BWRD	– временная задержка при распространении в обратном направлении,
KR_BWRD	– коэффициент отражения при передаче в обратном направлении,
TR_BWRD	– временная задержка отраженного сигнала при распространении в обратном направлении.

Значения указанных параметров для всех элементов модели оптического волокна будут приводиться в соответствующих таблицах при описании экспериментов.

4. Синтез зондирующего сигнала

Как указывалось выше, программа экспериментов включает в себя проведение двух видов рефлектометрических измерений. Один из них является собой метод OTDR, применением которого предполагается получить «опорные» данные для сравнения с результатами, полученными вторым, спектрографическим методом.

Формирование зондирующего сигнала для проведения измерений методом OTDR осуществляется путём непосредственного внесения значений отсчётов измерительного импульса в поле AENV_FWRD нескольких первых записей таблицы transmit.dbf [2]. В данном случае был сформирован импульс прямоугольной формы, длительность которого равна четырём интервалам частоты дискретизации (четыре отсчёта). Указанная операция может быть проведена любыми средствами, позволяющими редактировать таблицы .dbf (например – командой Browse, имеющейся в FoxPro).

Синтез измерительного сигнала для второго метода представляет собой более сложную задачу. Формирование всех составляющих его спектра осуществляется с использованием пакета Microsoft Excel. Ниже дано подробное описание системы синтеза сетки частот.

Система состоит из двух частей. Каждой из них соответствует файл формата .xls. Синтез производится в два этапа, первый из которых состоит в формировании групп из шестидесяти четырех спектральных линий. Это реализуется одной из упомянутых частей, которая представляет собой так называемую «книгу» Microsoft Excel, состоящую из двух листов. На одном листе задаются исходные данные. Вид этой части листа с изображением формул представлен в форме табл. 1.

Таблица 1

	A	B	C	D
1				
2	f _d =	817717206.1	Гц	
3	f _{min} =	170898.4375	Гц	
4	f _{max} =	10937500	Гц	
5	Дельта f =	170898.4375	Гц	
6				
7	t _d =	=1/B2	с	
8	t _{max} =	=1/B3	с	
9	t _{min} =	=1/B4	с	
10				
11				
12		=B2/B4	=8*ПИ()	
13		=B12/4	=B13*C12/B12	
14				
15	Нач.фаза =	0		
16				
17	Нач. фаза для след. расчёта:			=BR7
18				

Продолжение таблицы 1

	A	B	C	D
19				
20	№	f _{нач} , Гц	f _{кон} , Гц	Н, фаза
21		170898.4375	10937500	0
22		11108398.4375	21875000	150.7964474
23		22045898.4375	32812500	301.5928948
24		32983398.4375	43750000	452.3893422
25		43920898.4375	54687500	603.1857896
26		54858398.4375	65625000	753.982237
27		65795898.4375	76562500	904.7786844
28		76733398.4375	87500000	1055.5751318
29		87670898.4375	98437500	1206.3715792
30		98608398.4375	109375000	1357.1680266
31		109545898.4375	120312500	1507.964474
32		120483398.4375	131250000	1658.7609214
33		131420898.4375	142187500	1809.5573688
34		142358398.4375	153125000	1960.3538162
35		153295898.4375	164062500	2111.1502636
36		164233398.4375	175000000	2261.946711

Выделенные ячейки содержат исходные данные и заранее рассчитанные значения начальной и конечной частот составляющих спектральной группы и начальной фазы первой из них. Для синтеза определённой группы линий спектра эти значения необходимо вручную скопировать в соответствующие ячейки исходных данных.

Имеется ряд столбцов, в которых формируются значения фаз спектральных составляющих для всей последовательности отсчётов зондирующего сигнала (табл. 2).

Таблица 2

	E	F	G		BQ	BR
1	№	1	=F1+1			
2	Частота	=B3	=F2+\$B5			
3	Период	=1/F2	=1/G2			
4	Отн.период	=F3/\$B7	=G3/\$B7			
5	дельта	=\$C13/F4	=\$C13/G4			
6						
7	Нач.фаза	=B15	=F7+3*ПИ()/4			=BQ7+3*ПИ()/4
8	1	=F7+F\$5	=G7+G\$5			
9	=E8+1	=F8+F\$5	=G8+G\$5			
10	=E9+1	=F9+F\$5	=G9+G\$5			
16391	=E16390+1	=F16390+F\$5	=G16390+G\$5		=BQ16390+BQ\$5	

На втором листе (табл. 3) производится вычисление значений отсчётов всех частотных составляющих спектральной группы и значений отсчётов суммарного сигнала (выходные данные).

Таблица 3

	A	B	C	D	
1		1	=B1+1	=C1+1	
2	1	=SIN(Лист1!F8)	=SIN(Лист1!G8)	=SIN(Лист1!H8)	
3	=A2+1	=SIN(Лист1!F9)	=SIN(Лист1!G9)	=SIN(Лист1!H9)	
4	=A3+1	=SIN(Лист1!F10)	=SIN(Лист1!G10)	=SIN(Лист1!H10)	
16385	=A16384+1	=SIN(Лист1!F16391)	=SIN(Лист1!G16391)	=SIN(Лист1!H16391)	

Окончание таблицы 3

	BM	BN
1	=BL1+1	Сумма
2	=SIN(Лист1!BQ8)	=СУММ(B2:BM2)/64
3	=SIN(Лист1!BQ9)	=СУММ(B3:BM3)/64
4	=SIN(Лист1!BQ10)	=СУММ(B4:BM4)/64
16385	=SIN(Лист1!BQ16391)	=СУММ(B16385:BM16385)/64

В ходе формирования сигнала производится поочерёдный синтез всех спектральных групп и копирование значений из столбца BN во вторую часть системы формирования сигнала. Копирование производится вручную.

Вторая часть (табл. 4) предназначена для объединения сигналов шестнадцати спектральных групп и формирования суммарного сигнала, спектр которого содержит 1024 спектральные линии.

Таблица 4

	A	B	C	D	
1	№	1	=B1+1	=C1+1	
2	1	-0.000644010130603178	-0.000616591416146405	-0.000584820272419025	
3	=A2+1	-0.00125983140045002	-0.00113287315236726	-0.000973984214573072	
4	=A3+1	-0.00184303560945707	-0.00152107469358028	-0.00110293462353958	
16385	=A16384+1	0.0067971939483225	0.0117704480039573	0.00743560944284834	

Окончание таблицы 4

	P	Q	R
1	=O1+1	=P1+1	Сумма
2	0.0000292295115291337	0.0000886979374470406	=СУММ(B2:Q2)/16
3	0.0013511071650243	0.00140456265185657	=СУММ(B3:Q3)/16
4	0.00130585292534814	0.000846476754417192	=СУММ(B4:Q4)/16
16385	0.00958209297873023	0.0112475213118666	=СУММ(B16385:Q16385)/16

Спектрограмма сформированного сигнала представлена на рис.1.

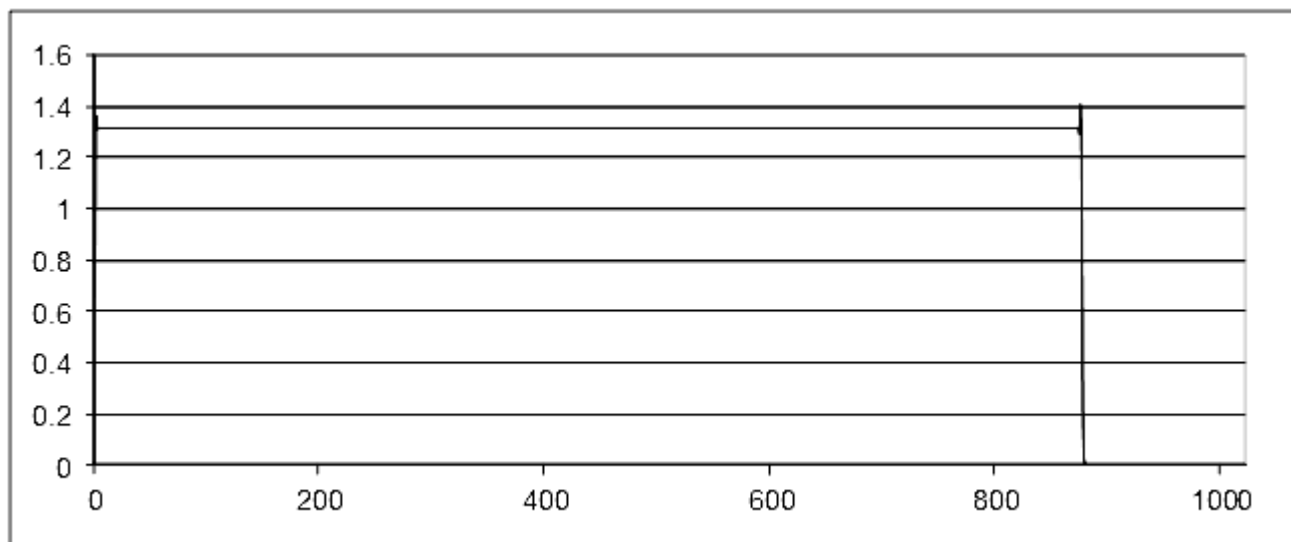


Рис.1. Спектр зондирующего сигнала

Форма сигнала показана на рис.2.

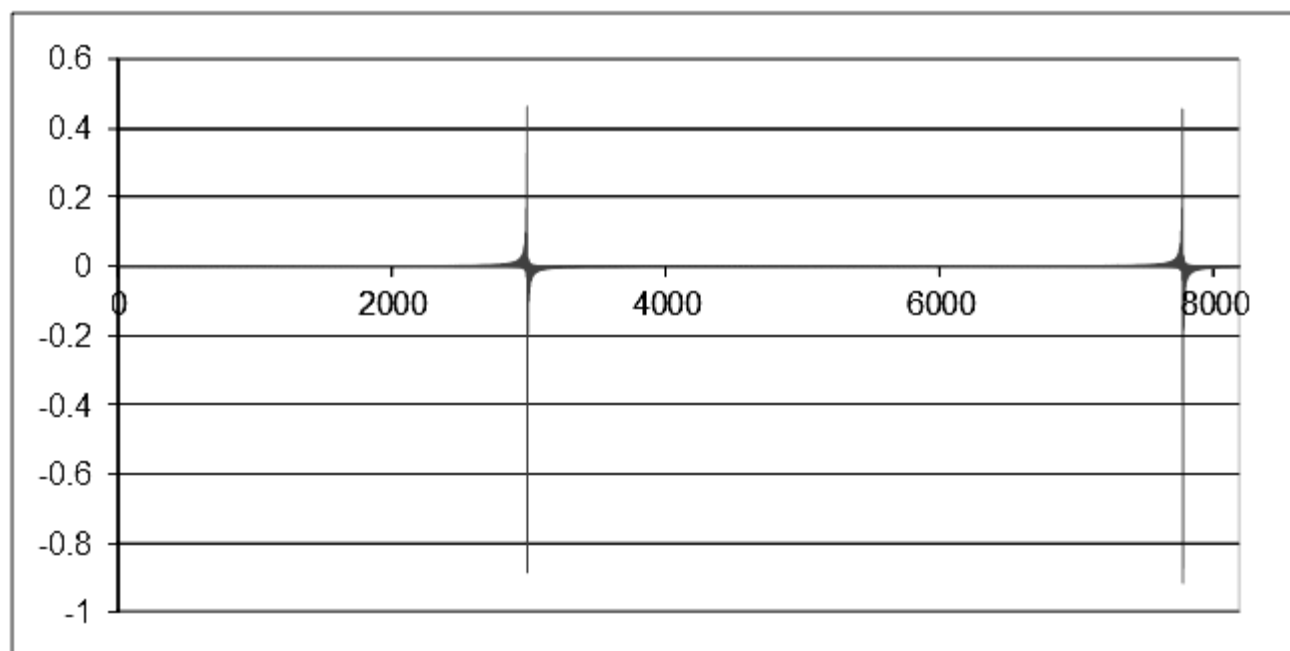


Рис.2. Форма зондирующего сигнала

Очевидно, что практически вся его энергия сосредоточена во временных интервалах, где фазы спектральных составляющих являются близкими или совпадают. Поэтому отрезок последовательности отсчётов, выбранный для экспериментов, должен обязательно содержать как минимум один такой интервал. Это же касается и анализа полученных рефлектометрических данных.

5. Анализ данных и визуализация результатов

Для получения спектрографической рефлектограммы данные, имеющиеся в выходной таблице программы-рефлектометра, должны быть обработаны, а результат – представлен в графическом виде. Это можно осуществить с использованием Microsoft Excel. Ниже приведена структура подсистемы анализа экспериментальных данных (табл. 5).

Таблица 5

	A	B	C	D
1				
2	№	Для входных данных		Сумма
3	1	-0.00002178	0.00000334	=B3+C3
4	=A3+1	0.00050385	0.00057894	=B4+C4
5	=A4+1	0.00200695	0.00108568	=B5+C5
4098	=A4097+1	0.00063815	0.00064705	=B4098+C4098

Продолжение таблицы 5

	E	F
1	Спектр суммарного сигнала	
2	Преобразование Фурье_1 (макрос. Ctrl+w)	Веществ.часть
3	-0.8804458	=МНИМ.ABS(E3)
4	2.61315537025899+1.71369289996646i	=МНИМ.ABS(E4)
5	1.97888990473267E-002-0.325591023076243i	=МНИМ.ABS(E5)
4098	2.61315537025897-1.71369289996649i	=МНИМ.ABS(E4098)

Продолжение таблицы 5

	G	H	I	J
1	Выделение огибающей спектра			Переключ.
2				0
3	=F3	=ЕСЛИ(F3=G3;G3;0)	=H3	=ЕСЛИ(J\$2=0;F3;I3)
4	=МАКС(F3:F5)	=ЕСЛИ(F4=G4;G4;0)	=ЕСЛИ(H4>0;H4;I3)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F4;I4)
5	=МАКС(F4:F6)	=ЕСЛИ(F5=G5;G5;0)	=ЕСЛИ(H5>0;H5;I4)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F5;I5)
6	=МАКС(F5:F7)	=ЕСЛИ(F6=G6;G6;0)	=ЕСЛИ(H6>0;H6;I5)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F6;I6)
7	=МАКС(F6:F8)	=ЕСЛИ(F7=G7;G7;0)	=ЕСЛИ(H7>0;H7;I6)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F7;I7)
8	=МАКС(F7:F9)	=ЕСЛИ(F8=G8;G8;0)	=ЕСЛИ(H8>0;H8;I7)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F8;I8)
9	=МАКС(F8:F10)	=ЕСЛИ(F9=G9;G9;0)	=ЕСЛИ(H9>0;H9;I8)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F9;I9)
10	=МАКС(F9:F11)	=ЕСЛИ(F10=G10;G10;0)	=ЕСЛИ(H10>0;H10;I9)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F10;I10)
1026	=МАКС(F1025:F1027)	=ЕСЛИ(F1026=G1026;G1026;0)	=ЕСЛИ(H1026>0;H1026;I1025)	=ЕСЛИ(J\$2=0;F1026;I1026)

Продолжение таблицы 5

	К	L	М
1			
2	Весовое окно (Ханна)		Произведения
3	0	$=0.5*(1-\cos(2*\pi()*K3/1023))$	$=J3*L3$
4	$=K3+1$	$=0.5*(1-\cos(2*\pi()*K4/1023))$	$=J4*L4$
5	$=K4+1$	$=0.5*(1-\cos(2*\pi()*K5/1023))$	$=J5*L5$
1026	$=K1025+1$	$=0.5*(1-\cos(2*\pi()*K1026/1023))$	$=J1026*L1026$

Окончание таблицы 5

	N	O
1	Спектр огибающей спектра	
2	Преобразование Фурье_2 (макрос. Ctrl+e)	Веществ.часть
3	1494.36515212082	$=\text{МНИМ.ABS}(N3)$
4	-783.206573303551-19.2687756257181i	$=\text{МНИМ.ABS}(N4)$
5	-5.10640931956243-25.2420098994932i	$=\text{МНИМ.ABS}(N5)$
1026	-783.206573303549+19.2687756257242i	$=\text{МНИМ.ABS}(N1026)$

Входные данные помещают в столбцы В и С. Один из них, например В, должен содержать последовательность отсчётов зондирующего сигнала, передаваемого в волокно, другой – принятую последовательность. Столбец D содержит суммы. Характерная форма суммарного сигнала обуславливает отсутствие необходимости умножения последовательности его отсчётов на весовое окно перед проведением преобразования Фурье.

Ранее уже упоминалось о том, что для обработки данных используется инструмент «Анализ Фурье», входящий в пакет анализа Microsoft Excel. В данной подсистеме он применяется дважды: для получения спектра суммы переданного и принятого сигнала, а также спектра огибающей этого спектра. Входные данные первого преобразования расположены в столбце D (табл. 6), выходные должны быть помещены в столбец E. Для второго преобразования – это столбцы M и N соответственно.

Результат первого преобразования может подвергаться дополнительной обработке, состоящей в выделении огибающей спектральных пиков (столбцы G – I). При этом имеется возможность выбора из двух вариантов исходных данных для второго преобразования Фурье: можно использовать либо непосредственно выходные данные первого преобразования, либо результат указанной выше дополнительной обработки. Этот выбор осуществляется путём задания в ячейке J2 нулевого или ненулевого числовых значений соответственно.

Перед проведением второго преобразования Фурье производится предварительное умножение полученной последовательности на весовое окно Ханна. Выходные данные подсистемы формируются в столбце O.

Для отображения результата используется так называемая «точечная диаграмма» (из набора диаграмм Microsoft Excel), представляющая собой обычный график. На оси абсцисс располагаются числовые значения, сформированные в столбце A, то есть номера отсчётов. Особого внимания заслуживает перевод этого номера в значение пространственной позиции отражающей неоднородности.

Можно предложить следующую эмпирическую формулу для вычисления номера частотного отсчёта E в зависимости от величины сдвига S :

$$E = \frac{2GS}{H}, \quad (8)$$

где

G – количество частотных отсчётов спектрографической рефлектограммы;

H – количество временных отсчётов исходного суммарного сигнала.

Если подставить в неё приведённые выше значения, то она примет следующий вид:

$$E = \frac{S}{4}. \quad (9)$$

Это, в свою очередь, означает, что разности частот в один частотный отсчёт на спектрографической рефлектограмме, длиной 512 отсчётов, соответствует временной сдвиг принимаемого сигнала относительно переданного, равный четырём периодам частоты дискретизации. Таким образом, умножая номер отсчёта на восемь (с учётом удвоенного пробега сигнала – от начала волокна до отражающей неоднородности и обратно), можно получить число периодов частоты дискретизации, характеризующее сдвиг принятого сигнала относительно переданного. Следует также отметить, что номер частотного отсчёта на спектрографической рефлектограмме в данном случае численно равен удвоенному расстоянию в метрах до соответствующей точки волокна.

При моделировании метода OTDR специальная обработка данных, получаемых в табл. receive.dbf, не требуется. Данные представляются графически на «точечной диаграмме». Для удобства отсчёта расстояний, числовые значения оси абсцисс могут представлять собой номера временных отсчётов, делённые на восемь.

6. Программа экспериментов

В соответствии с постановкой задачи данной работы, предполагается произвести сравнение рефлектограмм, полученных двумя различными путями – методом OTDR и рассматриваемым спектрографическим методом рефлектометрии. Следовательно, в рамках каждого эксперимента необходимо проведение двух видов опытов, каждый из которых состоит в получении рефлектограммы одним из перечисленных методов.

Следует заметить, что для получения результата на разработанном комплексе моделирующих программ [2] требуется достаточно длительное время (до нескольких суток, в зависимости от мощности компьютеров). Некоторые виды опытов можно производить, искусственно задавая взаимный сдвиг двух одинаковых последовательностей зондирующего сигнала, смещая одну из них относительно другой непосредственно в таблице Microsoft Excel. Но такой подход нельзя в полной мере считать имитационным моделированием. При использовании его может оказаться затруднительным учёт всех действующих факторов, которые естественным образом проявляются в случае опытов с комплексом моделирующих программ. Поэтому последние необходимы, но, учитывая длительность получения результата, потребовалось ограничить их количество.

Проверки функционирования всех компонентов экспериментальной системы, включая подсистему синтеза зондирующего сигнала, комплекс моделирующих программ, подсистему анализа данных и визуализации результатов, были произведены заранее, по отдельности. Первые эксперименты должны состоять в проверке экспериментальной системы в целом, при получении рефлектограмм участка волокна с одной отражающей неоднородностью, с параметрами, близкими к реальным.

Затем осуществляется рефлектометрическое зондирование модели волокна, содержащего две отражающих неоднородности. При этом одна из них расположена в конце первой половины волокна, а вторая – на расстоянии 400 м от его начала. Такое положение неоднородностей обу-

словлено стремлением к выявлению некоторых проблем обработки данных, характерных для исследуемого в работе метода частотной рефлектометрии.

Целью следующего эксперимента является проверка возможности получения спектрографической рефлектограммы с отображением близкорасположенных отражающих неоднородностей, группы которых находятся на различных расстояниях от начала волокна. Эксперимент проводится при условии однократного отражения сигнала от каждой такой неоднородности.

7. Проведение экспериментов и их результаты

Первый эксперимент

Отражающая неоднородность находится на расстоянии 50 м от рефлектометра. Таблица параметров волокна `f_param.dbf` заполняется следующим образом (табл. 6).

Таблица 6

№ элем.	K_FWRD	T_FWRD	KR_FWRD	TR_FWRD	K_BWRD	T_BWRD	KR_BWRD	TR_BWRD
1 – 199	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
200	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
201 – 2047	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
2048	0.99976125	0.00122292	0.10000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292

Рефлектограмма, полученная методом OTDR, представлена на рис.3.

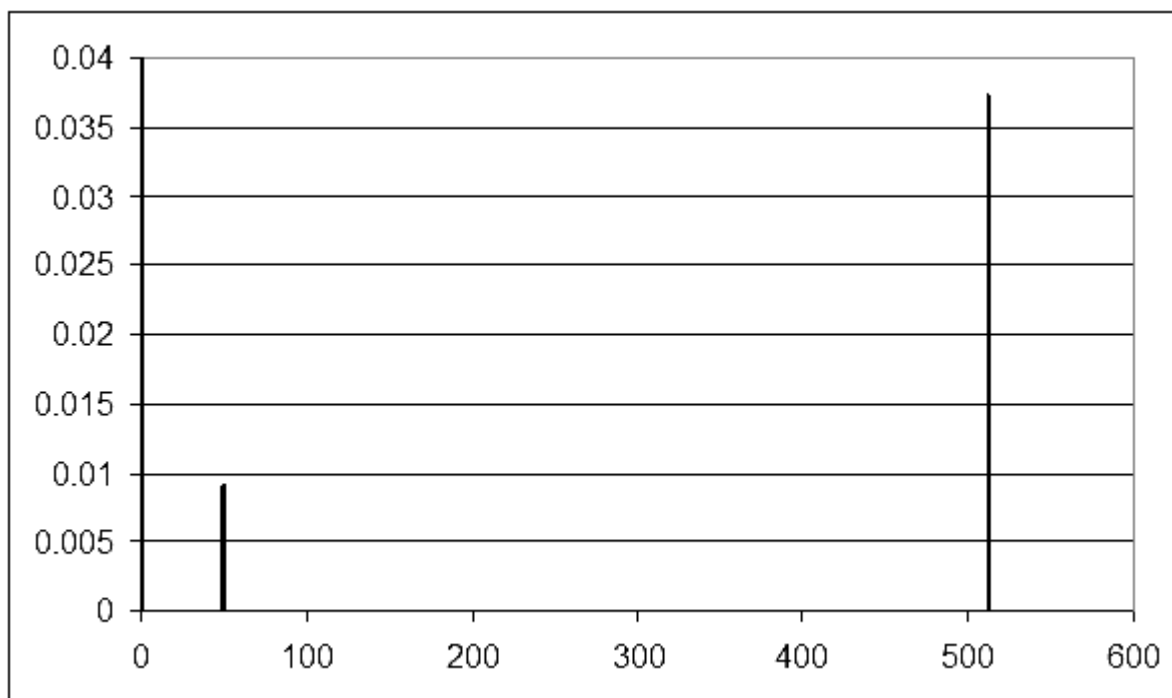


Рис.3. Рефлектограмма, полученная методом OTDR.

Расстояние от рефлектометра до отражающей неоднородности равно 50 м

Необходимо отметить, что рефлектограммы в данной работе являются упрощёнными, поскольку существующая модель волокна не позволяет симитировать рэлеевское рассеяние. Горизонтальная ось проградуирована в метрах, а вертикальная – в относительных единицах амплитуды. Амплитуда зондирующего импульса равна единице (на данном графике, а также на всех

последующих – ограничена). Видны пики, соответствующие отражающей неоднородности и концу волокна.

Спектрографическая рефлектограмма показана на рис.4.

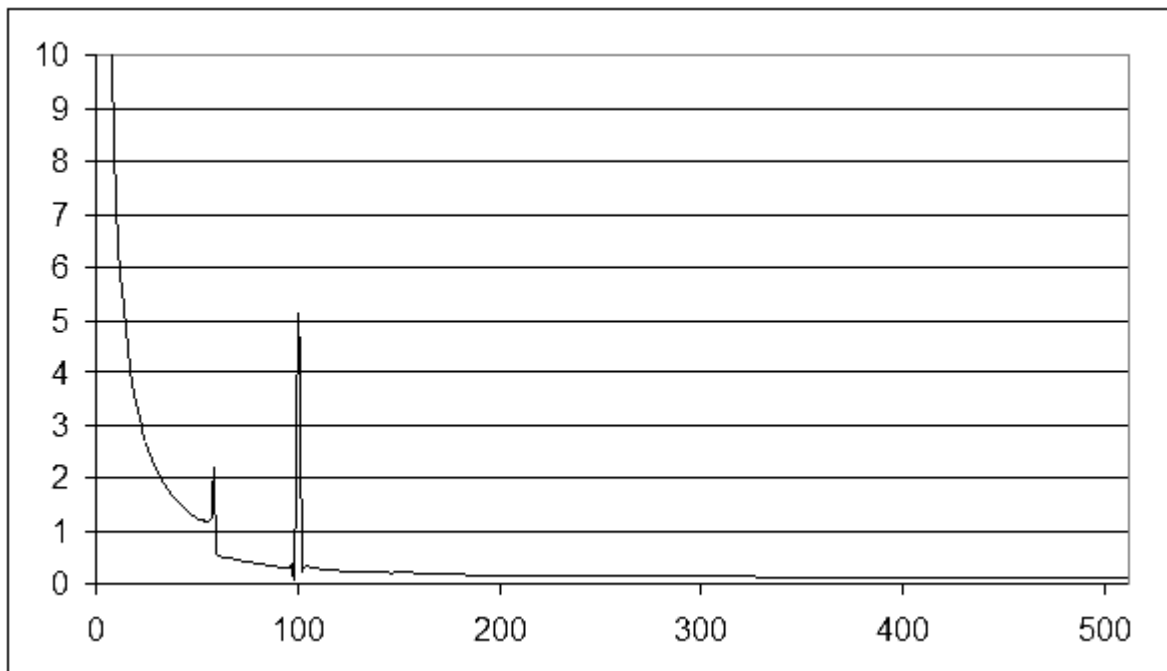


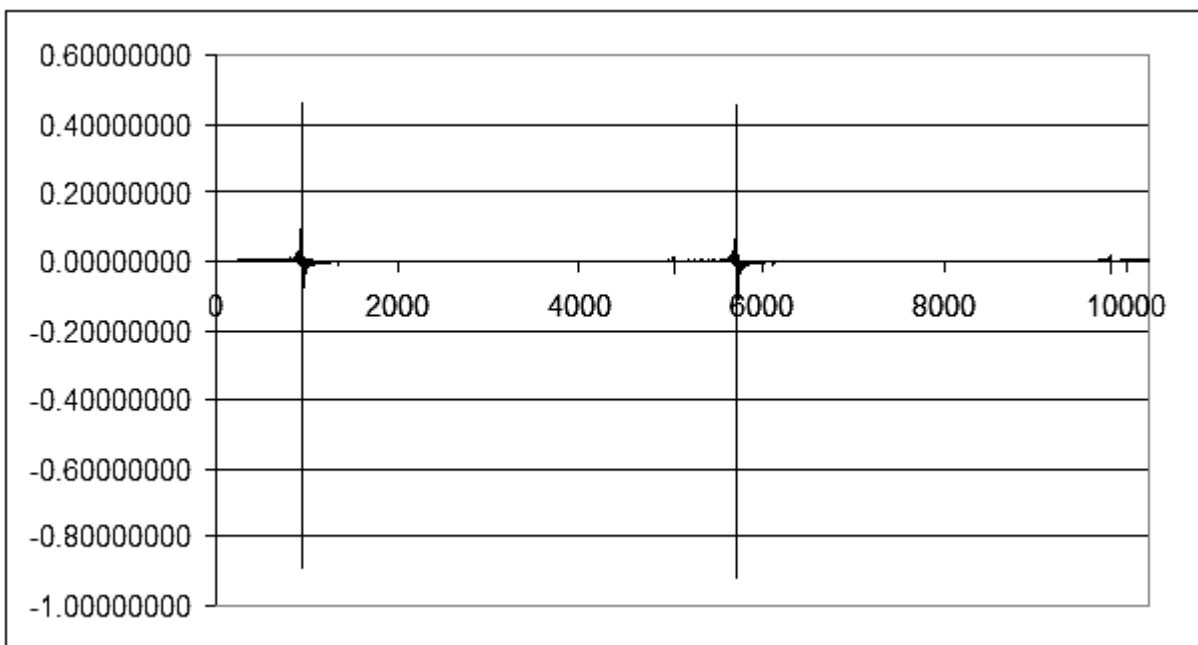
Рис.4. Спектрографическая рефлектограмма, полученная в эксперименте 1.

Расстояние от рефлектометра до отражающей неоднородности равно 50 м.

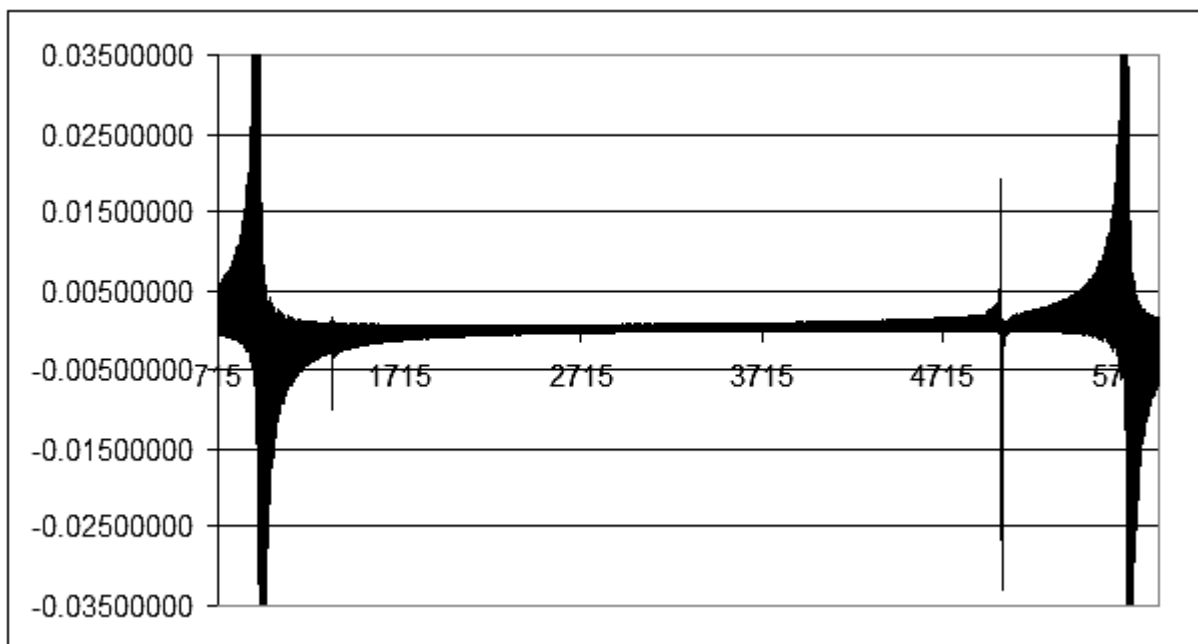
Первый отсчёт суммарного сигнала имеет номер 715

Здесь горизонтальная ось проградуирована в номерах отсчётов частоты. Пик на отметке 100 отсчётов соответствует неоднородности, расположенной на расстоянии 50 м. Поскольку общая длина оптического волокна равна 512 м, а количество отсчётов спектрографической рефлектограммы также составляет 512, то получение таких рефлектограмм для второй половины волокна требует принятия дополнительных мер, рассматриваемых в дальнейшем. Это является одной из причин того, что на рис.4 не может быть виден пик отражения от конца волокна.

На рис.5а и 5b изображена форма суммарного сигнала для всей принятой последовательности отсчётов.



а.



б.

Рис.5. Форма суммарного сигнала в первом эксперименте

Рис.5б демонстрирует участок графика, приведённого на рис.5а, в увеличенном виде. На графиках виден сложный колебательный процесс, имеющий остроконечную огибающую. Большие максимумы её амплитуды в позициях 940 и 5724 соответствуют передаваемому сигналу. На рис.5б хорошо видны ещё два максимума. Первый из них, находящийся в позиции 1340, соответствует отражающей неоднородности, расположенной на расстоянии 50 м. Второй (в позиции 5036) обусловлен концом волокна.

Ранее уже упоминался тот очевидный факт, что для получения спектрографической рефлектограммы должен быть выбран тот участок последовательности отсчётов суммарного сигнала, пики огибающей амплитуды на котором соответствуют всем интересующим неоднородностям, а также имеется пик огибающей амплитуды переданного зондирующего сигнала. Причём этот пик должен предшествовать пикам отражений. Для получения рефлектограммы, показанной на рис.4, был выбран участок длиной 4096 отсчётов, начиная с отсчёта номер 715. Этот участок не захватывает пик, соответствующий концу волокна, что является второй причиной невозможности его присутствия на рефлектограмме (рис.4).

На рис.6 изображена рефлектограмма, для получения которой был взят участок суммарной последовательности, начиная с отсчёта 1332, длиной 4096 отсчётов.

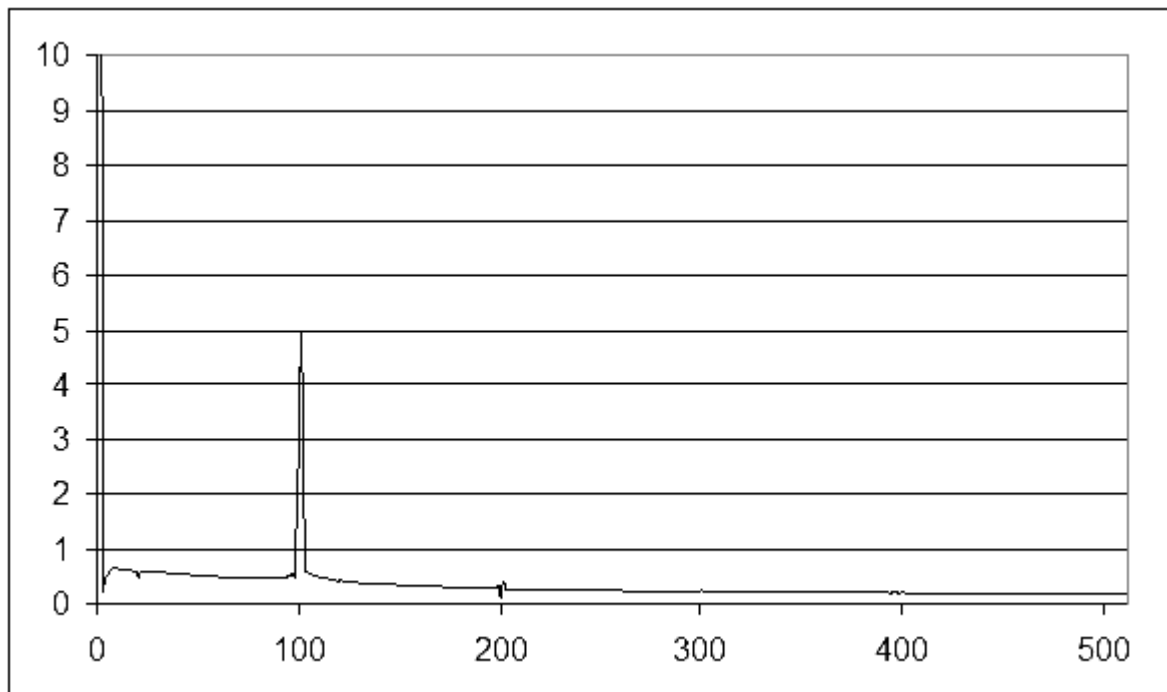
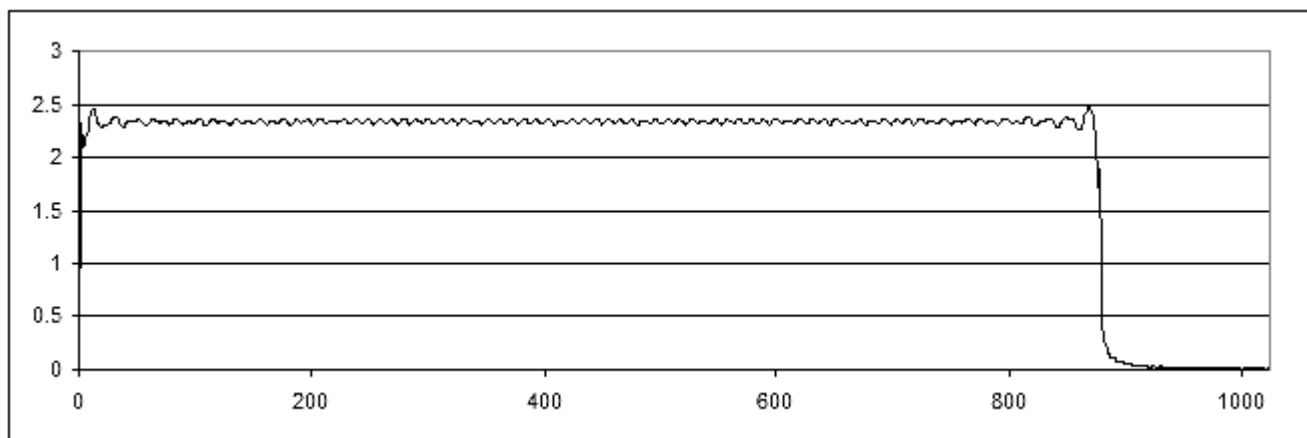


Рис.6. Спектрографическая рефлектограмма, полученная в эксперименте 1.
Расстояние от рефлектометра до отражающей неоднородности равно 50 м.
Первый отсчёт суммарного сигнала имеет номер 1332.

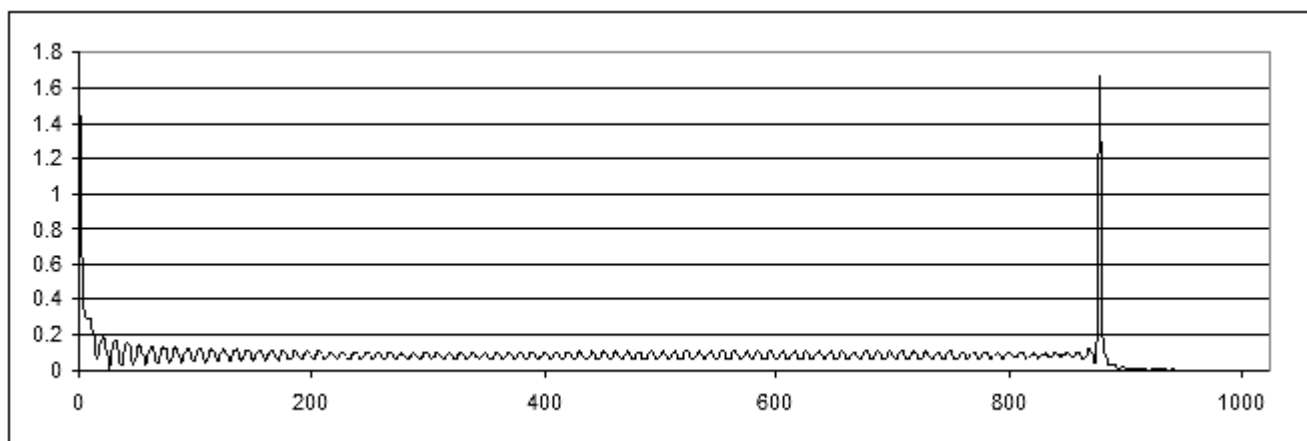
Этот участок не захватывает пик переданного зондирующего сигнала, но начинается с позиции, где его спадающая амплитуда ещё достаточно велика. Поэтому пик переданного сигнала на графике (рис.6) хотя и является сильно подавленным, но, тем не менее, присутствует. Этим обусловлен улучшенный вид рефлектограммы по сравнению с таковой, изображённой на рис.4.

Следует отметить, что небольшие пики, расположенные в позициях 200, 300 и 400 отсчётов, обусловлены не многократными отражениями сигнала от указанной неоднородности и начала волокна, поскольку для элемента в начале волокна не был задан повышенный коэффициент отражения (табл. 6) и соответствующие подпроцессы при моделировании не возникали. Происхождение этих пиков, а также небольших отрицательных пиков в начале рефлектограммы, связано с некоторыми погрешностями обработки данных. Спадающий характер «основания» рефлектограммы (рис.4, 6) обусловлен аналогичным ходом огибающей суммарного сигнала.

Спектры суммарного сигнала для фрагментов последовательности, начинающихся с отсчётов 715 и 1332, показаны на рис.7а и 7б соответственно.



а.



б.

Рис.7. Спектр суммарного сигнала

а) для фрагмента, начинающегося с отсчёта 715; б) с отсчёта 1332

Второй эксперимент

Отражающая неоднородность находится на расстоянии 250 м от рефлектометра. Таблица параметров волокна `f_param.dbf` заполняется следующим образом (табл. 7).

Таблица 7

№ элем.	K_FWD	T_FWD	KR_FWD	TR_FWD	K_BWRD	T_BWRD	KR_BWRD	TR_BWRD
1 – 999	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1000	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1001 – 2047	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
2048	0.99976125	0.00122292	0.10000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292

Рефлектограмма, полученная методом OTDR, представлена на рис.8.

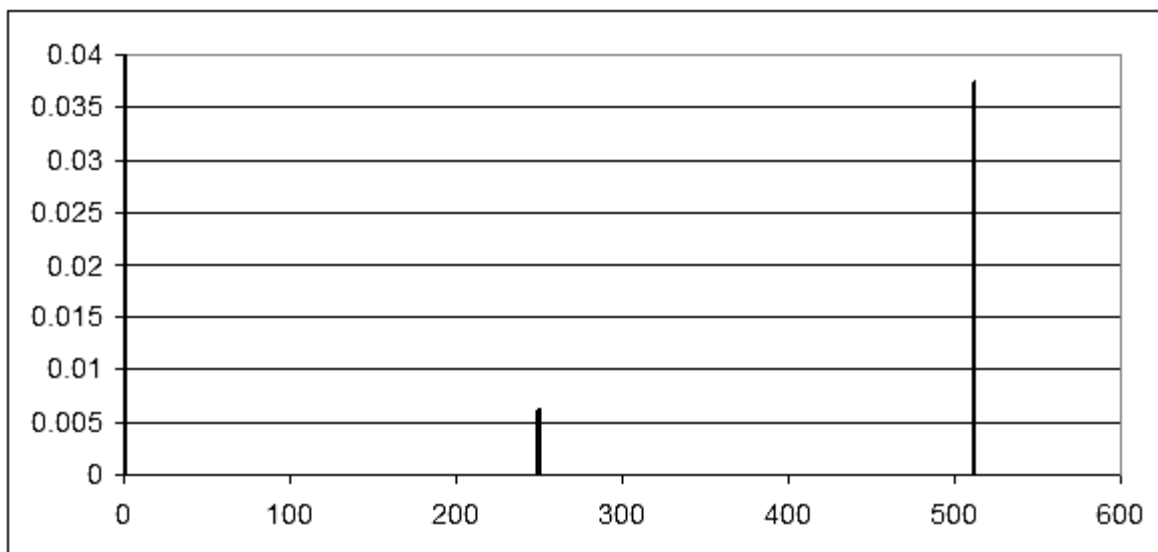


Рис.8. Рефлектограмма, полученная методом OTDR в эксперименте 2

На рис.9 показана спектрографическая рефлектограмма. Для её получения использован фрагмент последовательности суммарного сигнала длиной 4096 отсчётов, начиная с отсчёта номер 715.

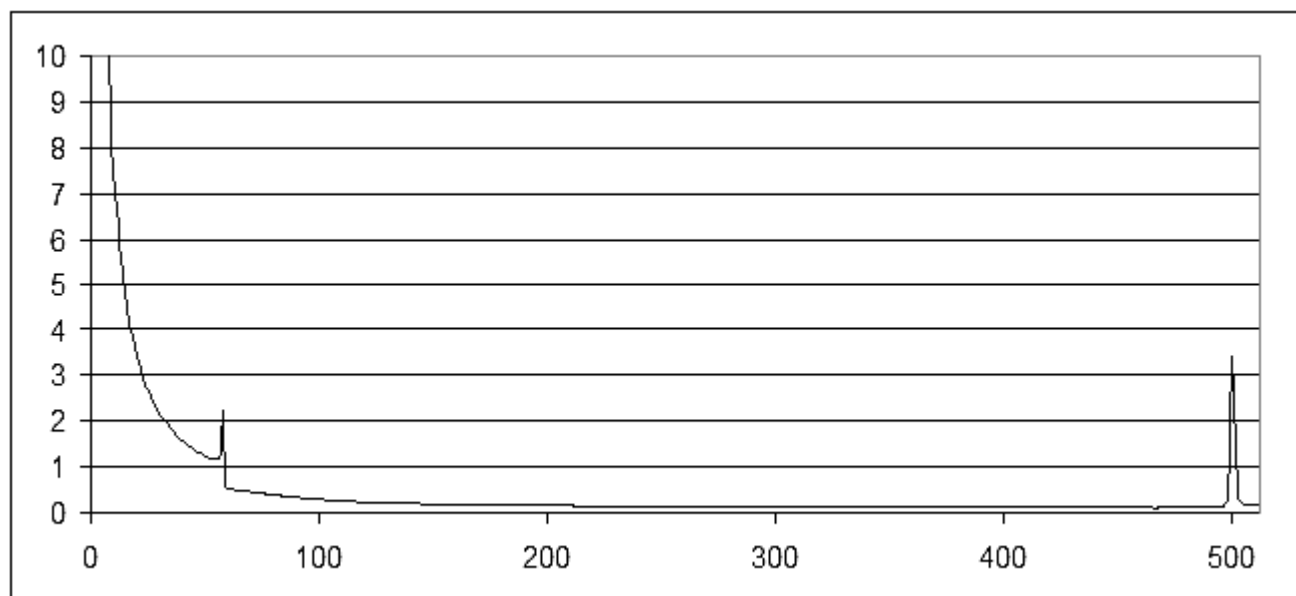


Рис.9. Спектрографическая рефлектограмма, полученная в эксперименте 2.
Использован фрагмент последовательности суммарного сигнала
длиной 4096 отсчётов, начиная с отсчёта номер 715

Третий эксперимент

Отражающие неоднородности находятся на расстояниях 250 и 400 метров от рефлектометра. Таблица параметров волокна f_param.dbf заполняется следующим образом (табл. 8).

Таблица 8

№ элем.	K_FWRD	T_FWRD	KR_FWRD	TR_FWRD	K_BWRD	T_BWRD	KR_BWRD	TR_BWRD
1 – 999	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1000	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1001 – 1599	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1600	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1601 – 2047	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
2048	0.99976125	0.00122292	0.10000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292

Рефлектограмма, полученная методом OTDR, представлена на рис.10. На этом рисунке горизонтальная ось проградуирована в метрах.

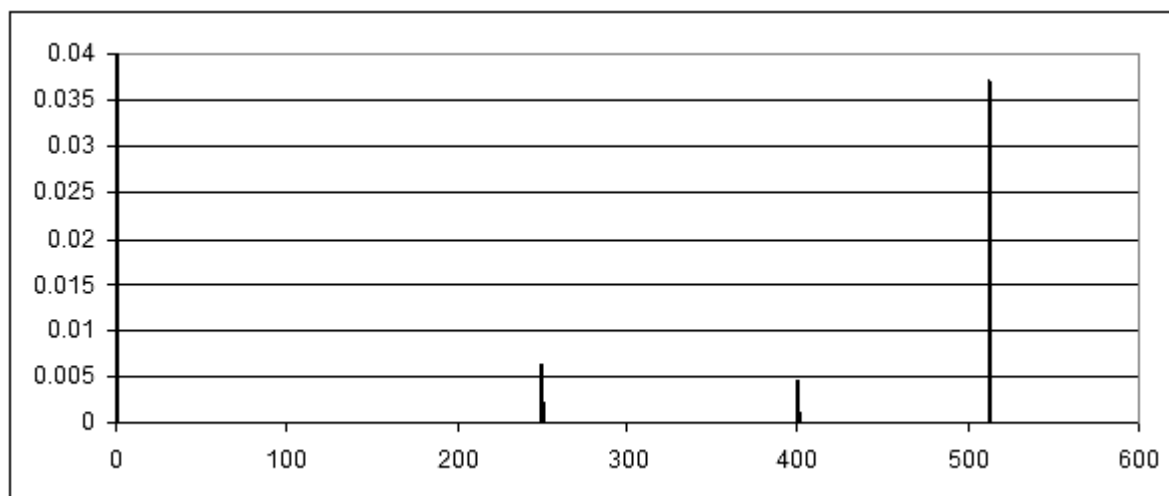
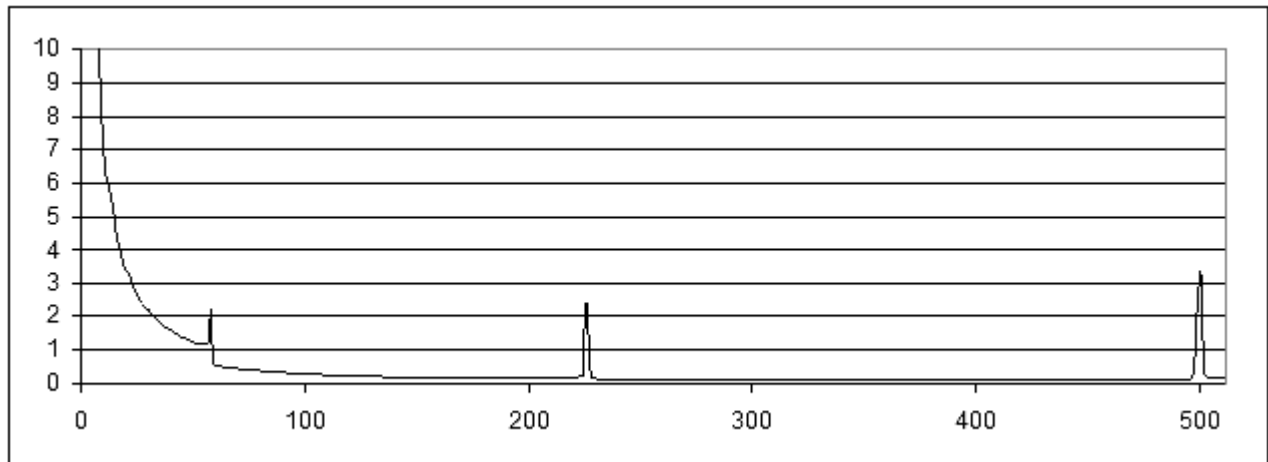
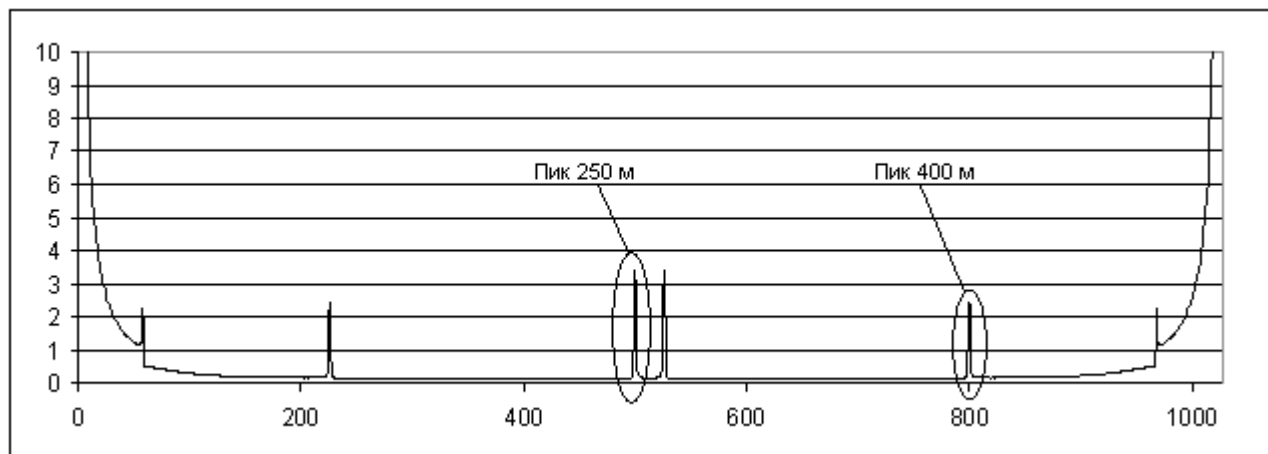


Рис.10. Рефлектограмма, полученная методом OTDR в эксперименте 3

На рис.11а и 11b показаны спектрографические рефлектограммы этого же волокна. Горизонтальная ось на графиках проградуирована в номерах спектральных отсчётов. Неоднородность, расположенная на расстоянии 400 м от начала, находится во второй половине волокна и на рис.11а виден лишь её фантомный пик в позиции 226. На рис.11b представлена рефлектограмма, построенная для всего набора выходных данных второго преобразования Фурье и содержащая «основную» и «зеркальную» области.



а.



б.

Рис.11. Спектрографические рефлектограммы, полученные в эксперименте 3 (первый отсчёт использованного фрагмента суммарной последовательности имеет номер 715)

а) для половины выходных отсчётов второго преобразования Фурье

б) для всех отсчётов

На вышеприведённом рисунке видны фантомные пики, являющиеся симметричными истинным пикам относительно центральной линии, делящей график пополам. Их идентификация представляет некоторую проблему и в реальном приборе может быть осуществлена по направлению сдвига пиков при небольшом изменении частоты дискретизации либо частот спектральных составляющих зондирующего сигнала. Допустим, что производится два измерения, причём во втором случае частота дискретизации немного увеличена по отношению к её значению при первом измерении. Тогда при втором измерении истинные пики окажутся сдвинутыми по шкале частот влево, а фантомные – вправо. Таким образом можно произвести их распознавание.

Четвёртый эксперимент

Отражающие неоднородности находятся на расстояниях 50, 52, 250 и 252 метра от рефлектометра. Таблица параметров волокна f_param.dbf заполняется следующим образом (табл. 9).

Таблица 9

№ элем.	K_FWRD	T_FWRD	KR_FWRD	TR_FWRD	K_BWRD	T_BWRD	KR_BWRD	TR_BWRD
1 – 199	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
200	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
201 – 207	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
208	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
209 – 999	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1000	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1001 – 1007	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1008	0.98976125	0.00122292	0.01000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
1009 – 2047	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292
2048	0.99976125	0.00122292	0.10000000	0.00122292	0.99976125	0.00122292	0.00000001	0.00122292

Рефлектограмма, полученная методом OTDR, представлена на рис.12, 13 и 14. На этих рисунках горизонтальная ось проградуирована в метрах.

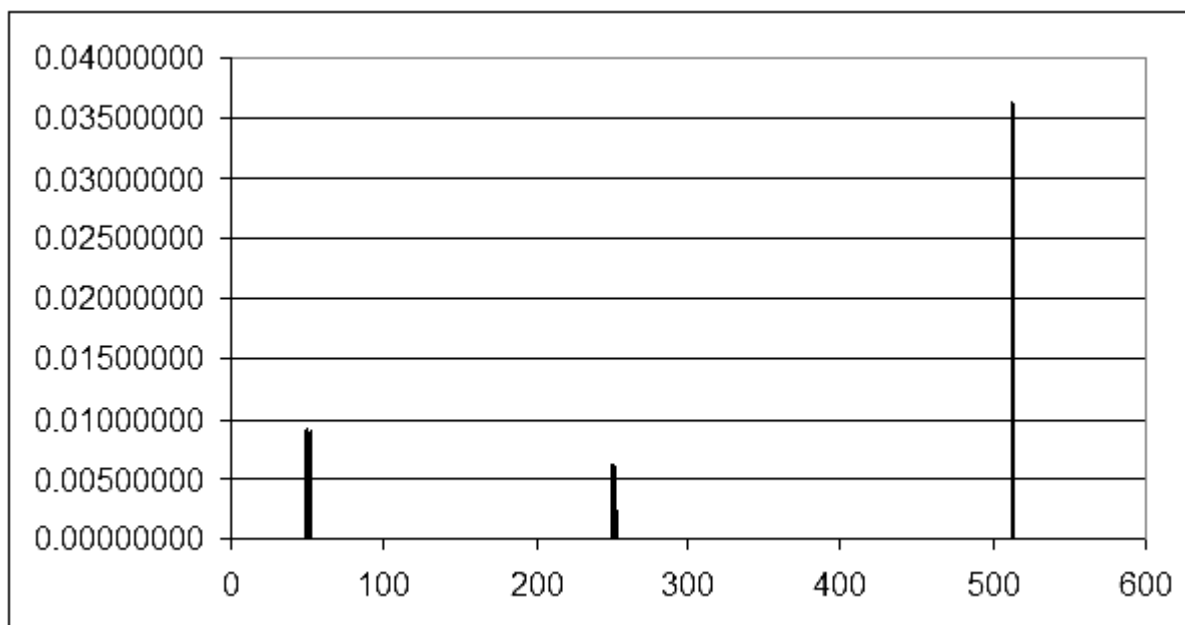


Рис.12. Рефлектограмма, полученная методом OTDR в эксперименте 4

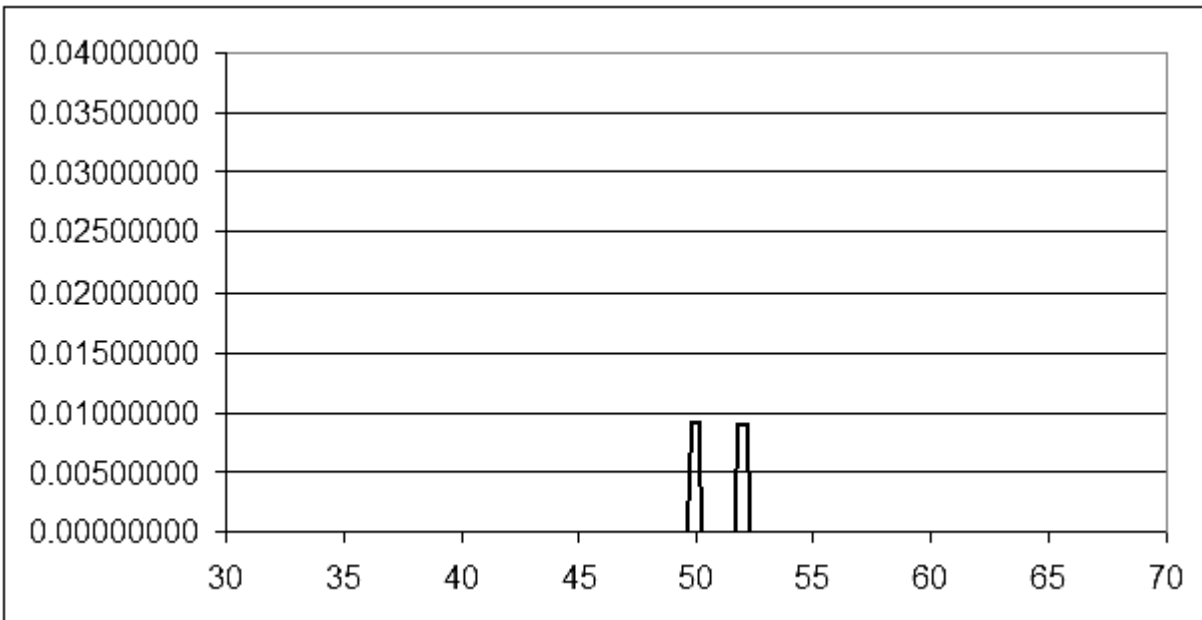


Рис.13. Участок рефлектограммы с отображением неоднородностей, расположенных на расстояниях 50 и 52 метров

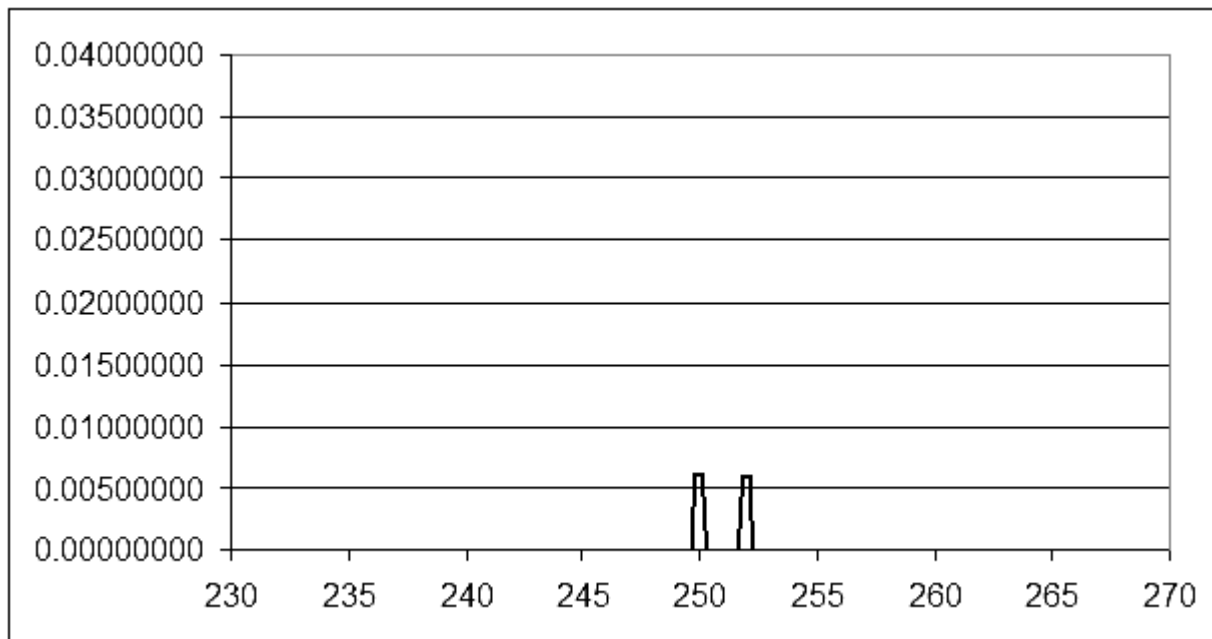
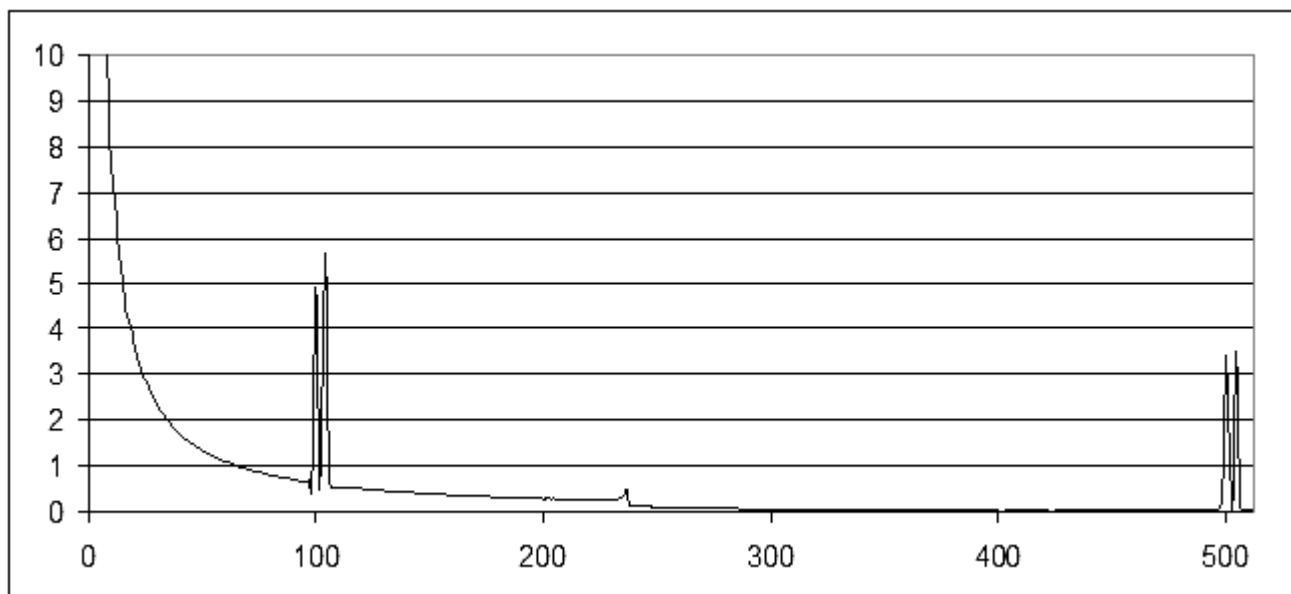


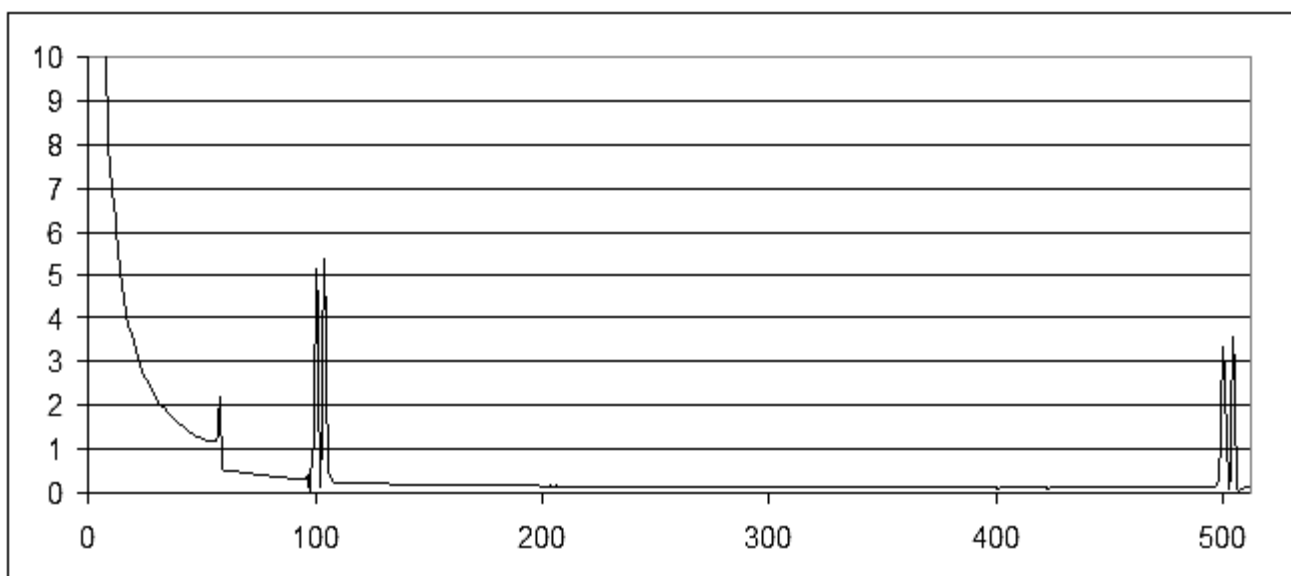
Рис.14. Участок рефлектограммы с отображением неоднородностей, расположенных на расстояниях 250 и 252 метров

На рис.15а показана рефлектограмма, являющаяся результатом применения исследуемого метода. Для её построения были взяты первые 4096 отсчётов суммарного сигнала. С целью сравнения на рис.15b представлена рефлектограмма, построение которой производилось с ис-

пользованием фрагмента последовательности суммарного сигнала, первый отсчёт которого имеет номер 715.



а.



б.

Рис.15. Спектрографическая рефлектограмма, полученная в эксперименте 4.
Использовались 4096 отсчётов, начиная с отсчёта номер 1 (а) и с отсчёта номер 715 (б)

На рис.16 изображена спектрограмма, которая получена в результате первого преобразования Фурье.

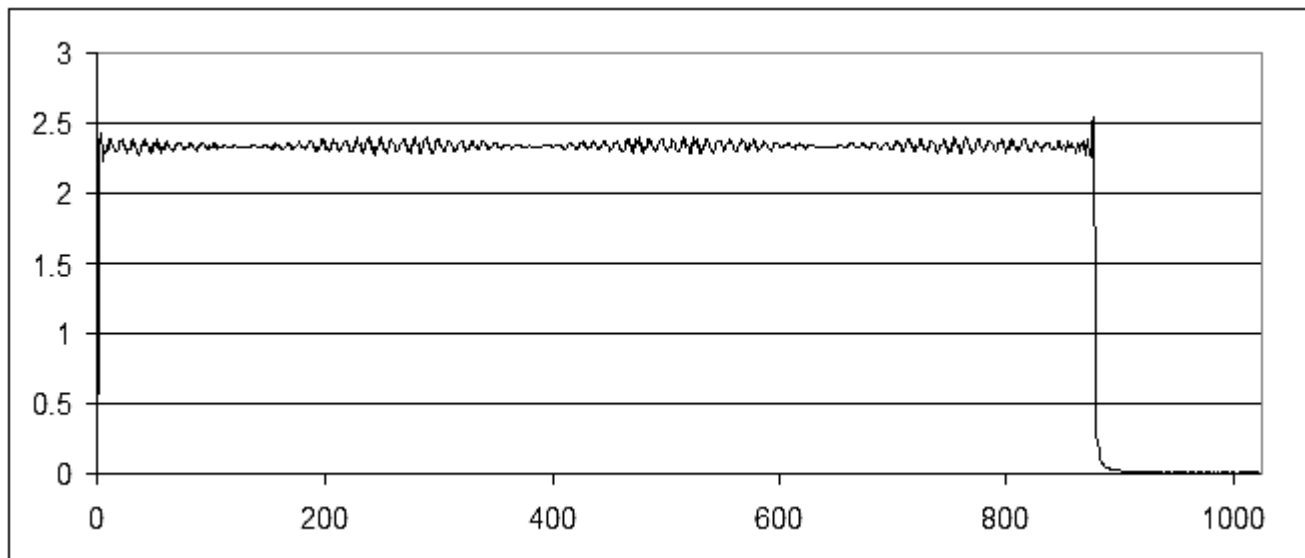


Рис.16. Спектрограмма, полученная в результате первого преобразования Фурье в эксперименте 4

8. Выводы

В результате проведенных экспериментов была продемонстрирована возможность получения спектрографических рефлектограмм, а также технология синтеза зондирующего сигнала и обработки полученных последовательностей отсчетов, представляющих отклик волокна на тестовое воздействие. Было произведено получение рефлектограмм волокон рассматриваемым методом и методом OTDR, что позволяет сравнить результаты и сделать вывод об их достаточно близком подобии.

В ходе экспериментальной работы обозначились некоторые сложности, связанные со спецификой рассматриваемого метода. К их числу следует отнести, например, рефлектометрический анализ данным методом волокон большой длины. Разработан метод частичного решения этой проблемы.

Если рассмотреть форму зондирующего сигнала и сигнала, представляющего собой его сумму с откликом тестируемого волокна, то становится особенно наглядной взаимосвязь исследуемого метода с методом OTDR. Может даже показаться бессмысленным проведение столь сложной обработки полученной последовательности для достижения результата, очевидно следующего из рассмотрения осциллограммы суммарного сигнала. Тем не менее, метод, изучению которого посвящена работа, имеет теоретическую и практическую значимость по следующим причинам.

Во-первых, примененный сигнал с сеткой частот является лишь частным случаем зондирующего сигнала. В общем случае последний должен быть широкополосным и иметь малые частотные интервалы между спектральными линиями. В частности, сигнал может представлять собой шум (в этом случае потребуются проведение ряда измерений с последующим усреднением). Также рассматривается возможность использования с данной целью сигналов систем передачи, переносящих трафик [1]. И в том, и в другом случае среди методов рефлектометрии временной области имеются такие, которые обладают некоторым подобием данному

методу [3, 4], однако последний предлагает альтернативный подход к обработке полученных данных, что может оказаться полезным для практики.

Во-вторых, как было показано в [1], применяемый в методе способ обработки сигнала даёт возможность использования узкополосного приёмного тракта рефлектометра. Это значит, что даже при зондировании волокна импульсным сигналом, используемым в OTDR, в приёмной части прибора может быть применена рассматриваемая технология, что позволит увеличить его динамический диапазон за счёт большего отношения сигнал/шум, обеспечиваемого узкополосным трактом приёма.

В-третьих, необходимо отметить, что метод является перспективным для применения в Brillouin-рефлектометрии. Однако рассмотрение этого аспекта выходит за рамки данной работы.

Литература

1. Ситнов Н.Ю., Горлов Н. И. Использование радиочастотных шумоподобных сигналов и сигнала трафика в оптической рефлектометрии // Телекоммуникации. 2009. №7. С. 30.
2. Ситнов Н.Ю. Исследование методов ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Новосибирск, 2011.
3. Jasenek J. Low correlation OTDR (LC-OTDR) // The theory and application of the fiber optic sensors with spread parameters / THEIERE project No. 10063-CP-1-2000-1-PT-ERASMUS-ETNE http://www.eaeeie.org/theiere_bratislava/4-3.html
4. Jasenek J. Correlation OTDR (C-OTDR) // The theory and application of the fiber optic sensors with spread parameters / THEIERE project No. 10063-CP-1-2000-1-PT-ERASMUS-ETNE http://www.eaeeie.org/theiere_bratislava/4-2.html

Статья поступила в редакцию 07.11.2011

Ситнов Николай Юрьевич

к.т.н. СибГУТИ, (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. 8-922-647-22-14,
e-mail: nsitnov@yandex.ru

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Линии связи» СибГУТИ, (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383)269-82-53, e-mail: gorlovnik@yandex.ru

Богачков Игорь Викторович

к.т.н., доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), (644050, Омск, пр. Мира, 11), тел. 8-913-619-96-02, e-mail: bogachkov@mail.ru

Experimental Check of the Reflectometry Frequency Domain with Broadband Probing Signal

N.U. Sitnov, N.I. Gorlov, I.V. Bogachkov

This article considers complex of experiments aimed at practical confirmation of one of the varieties of the frequency reflectometry method functionality based on the use of broadband probing signals with the spectrum presenting frequency spectrum with even pitch. The description of the experiment routine is presented. The results and conclusions are presented, perspectives for further development and usage of the method are outlined. The article is written in such a way as to enable

experimenters to get the same results with the described methods as well as to continue further research.

Keywords: reflectometry of frequency domain, probing signal, spectrographic reflectogramma, resolution, Fourier transform, simulation model, Hanna weight window.