

Научная статья

УДК 004.942

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-108-119



Моделирование корреляционного оптического рефлектометра с зондирующим сигналом в виде фрагментов псевдослучайных последовательностей

✉ Хричков Валентин Александрович, hrichkovv@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: Традиционно, наиболее информативным средством измерения параметров линейных оптических трактов волоконно-оптических систем связи является оптический рефлектометр во временной области с простым зондирующим сигналом. Недостатками такого рефлектометра являются известные ограничения на динамический диапазон и разрешающую способность. Для улучшения перечисленных характеристик в работе рассматривается возможность применения технологии корреляционных рефлектометров с зондирующим сигналом в виде фрагментов псевдослучайных последовательностей. Проведенное в работе исследование доказывает преимущества таких рефлектометров перед традиционными.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптическая рефлектометрия, сигнал обратного рассеяния, сложный зондирующий сигнал, корреляционный рефлектометр

Ссылка для цитирования: Хричков В.А. Моделирование корреляционного оптического рефлектометра с зондирующим сигналом в виде фрагментов псевдослучайных последовательностей // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 108–119. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-108-119

Modeling of Correlation Optical Reflectometer with a Probing Signal in the Form of Pseudo-Random Sequences Fragments

✉ Khrichkov Valentin, hrichkovv@gmail.com

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: Traditionally, the most informative means of measuring the parameters of linear optical paths of fiber-optic communication systems is an optical time domain reflectometer with a simple probing signal. The disadvantages of such a reflectometer are known limitations on the dynamic range and resolution. To improve the listed characteristics, the paper considers the possibility of using the technology of correlation reflectometers with a probing signal in the form of fragments of pseudo-random sequences. The study carried out in this work proves the advantages of such reflectometers over traditional ones.

Keywords: optical fiber, optical reflectometry, backscatter signal, complex probe signal, correlation reflectometer

Ссылка для цитирования: Khrichkov V. Modeling of Correlation Optical Reflectometer with a Probing Signal in the Form of Pseudo-Random Sequences Fragments. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(2):108–119. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-108-119

Введение

Наиболее информативным средством измерения параметров линейных оптических трактов (ЛОТ) волоконно-оптических систем связи (ВОСС) является оптический рефлектометр (ОР) во временной области (OTDR, аббр. от англ. Optical Time Domain Reflectometer) с простым зондирующим импульсом (ЗИ) [1–9]. Недостатками такого ОР являются известные ограничения на динамический диапазон и разрешающую способность. Динамический диапазон ограничен максимальной энергией ЗИ, которая определяется пиковой мощностью источника излучения, и максимальной длительностью ЗИ. Длительность ЗИ обычно выбирается в пределах от 10 нс до 10 мкс, разрешающая способность ОР при этом изменяется от 1 м до 1 км. Максимальная пиковая мощность ограничивается нелинейными явлениями в оптических волокнах (ОВ), особенно в одномодовых, и обычно не превышает 100–200 мВт.

Расширить динамический диапазон при высокой разрешающей способности можно за счет корреляционных ОР [10–17]. В них применяются сложные зондирующие сигналы (ЗС) и корреляционная обработка сигналов обратного рассеяния (СОР). В качестве ЗС могут использоваться последовательности импульсов с узкой автокорреляционной функцией (АКФ) без боковых лепестков. Такими свойствами обладают биполярные комплиментарные последовательности Голея [10–15] и псевдослучайные последовательности максимальной длины (М-ПСП).

Описание программы

О разработанной программе. В данной работе моделируется работа корреляционного ОР, использующего в качестве ЗС фрагменты М-ПСП [15–17]. Основными блоками разработанной программы являются: генератор ЗС, ЛОТ, фотоприемное устройство (ФПУ) и дисплей.

Основной экран разработанной на языке Visual Basic программы показан на рисунке 1. Программа позволяет исследовать методические и инструментальные погрешности измерений рефлектограмм с помощью корреляционного ОР сравнительно коротких ЛОТ с большим затуханием. Результаты моделирования могут быть полезными для разработчиков корреляционных ОР.

Рассмотрим блоки программы.

Генератор ЗС. В качестве ЗС могут использоваться фрагменты М-ПСП с периодом $M = 7, 13, 31, 63, 127$ и 255 импульсов (тактов) длительностью $t_u = 50$ нс (разрешающая способность 5 м). Длину фрагментов MP можно устанавливать равной от 1 до M импульсов, а также равной $MP = 0.125, 0.25, 0.5$ и $0.75 (M + 1)$ импульсов.

Отметим, что в реальном корреляционном ОР мощность ЗИ всегда положительна, а классические М-ПСП биполярны. Поэтому для получения рефлектограммы ЛОТ от одного фрагмента ПСП необходима последовательная посылка двух ЗС, состоящих только из положительных импульсов. Первый ЗС (прямой) формируется из положительных импульсов фрагмента ПСП, а второй (инверсный) формируется из отрицательных импульсов того же фрагмента. Рефлектограмма ЛОТ от одного фрагмента ПСП представляет собой разность прямой и обратной рефлектограмм. В данной работе с помощью моделирования в этой же программе строго доказано, что для упрощения моделирования можно использовать биполярные ЗС.

Линейный оптический тракт. ЛОТ состоит из двух одинаковых ОВ с коэффициентом затухания $\alpha = 2$ или 3 дБ/км, общей протяженностью $l = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ или 7.5 км, между которыми располагается отражающая неоднородность на расстоянии $60, 120, 400$ или 900 м с вносимыми потерями от 0 до 1 дБ и возвратными потерями от 40 до 60 дБ. Возвратные потери от конца ЛОТ можно изменять от 40 до 60 дБ.

Фотоприемное устройство. ФПУ характеризуется уровнем собственных шумов, который при исследованиях можно варьировать в диапазоне от -20 до -60 дБ. Изменяя коэффициент передачи (усиление) для СОР в ФПУ, можно смещать рефлектограмму вдоль оси СОР в пределах от $Y = -46$ до $+6$ дБ. В линейном масштабе изменению усиления на 6 дБ соответствует изменению сигнала в условных единицах (у. е.) в 4 раза.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ФПУ может оцифровывать СОР с дискретностью $10, 20, 30, 40$ и 50 нс при постоянной длительности 50 нс одного такта ЗС.

Дисплей. Результаты работы корреляционного ОР отображаются на дисплее, который занимает большую часть экрана программы. Дисплей работает в двух режимах: основном – регистрации рефлектограмм, и дополнительном, позволяющим отображать форму ЗС и их АКФ.

Регистрация рефлектограмм. При регистрации рефлектограмм на экран дисплея нанесена сетка с 10 делениями по оси расстояния и 7 делениями по оси СОР. Цена деления по оси расстояния составляет 0.25 км/дел при длине ЛОТ до 1 км, 0.5 км/дел при длине 2 км и 1 км/дел при длинах 5 и 7.5 км.

В реальном корреляционном ОР зондирующий сигнал перегружает ФПУ и в схеме предусмотрена возможность блокировки ФПУ на время его прохождения.

Рефлектограмма может отображаться на экране дисплея в линейном и логарифмическом масштабах. В первом случае СОР отсчитывается в у. е., а во втором – в дБ.

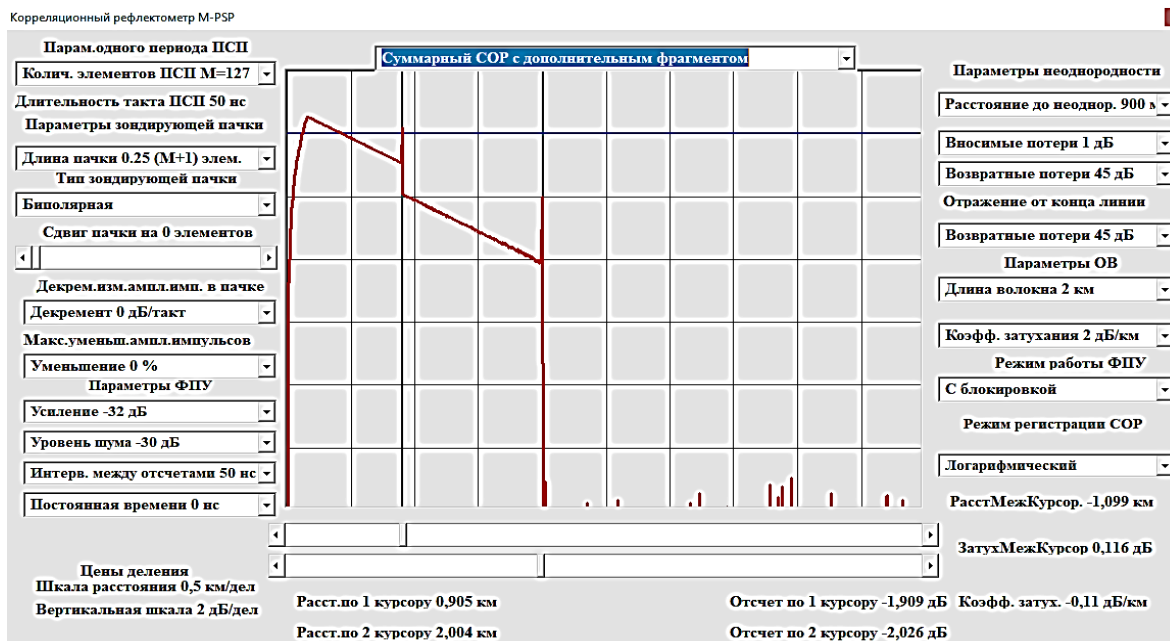


Рис. 1. Экран программы, моделирующей рефлектограмму корреляционного ОР

Fig. 1. Screen of the Program Simulating the Reflectogram of an Optical Correlation Reflectometer

Для удобства работы с рефлектограммой в программе предусмотрены два курсора, которые можно перемещать по экрану и считывать расстояния до них, а также между ними. Также можно считывать значения COP в точках расположения курсоров в линейном и логарифмическом масштабах. В логарифмическом масштабе выводится также рассчитанное по результатам измерения затухание между курсорами и значение коэффициента затухания. Для определения абсолютных значений COP необ-

ходимо учитывать усиление ФПУ в дБ. В логарифмическом масштабе от значения COP по курсору надо вычесть установленное значение усиления. В линейном масштабе значение COP в у. е. надо умножить на $10^{Y/10}$.

Режимы регистрации COP. Для всестороннего исследования процессов в корреляционном ОР в программе предусмотрены различные режимы регистрации COP.

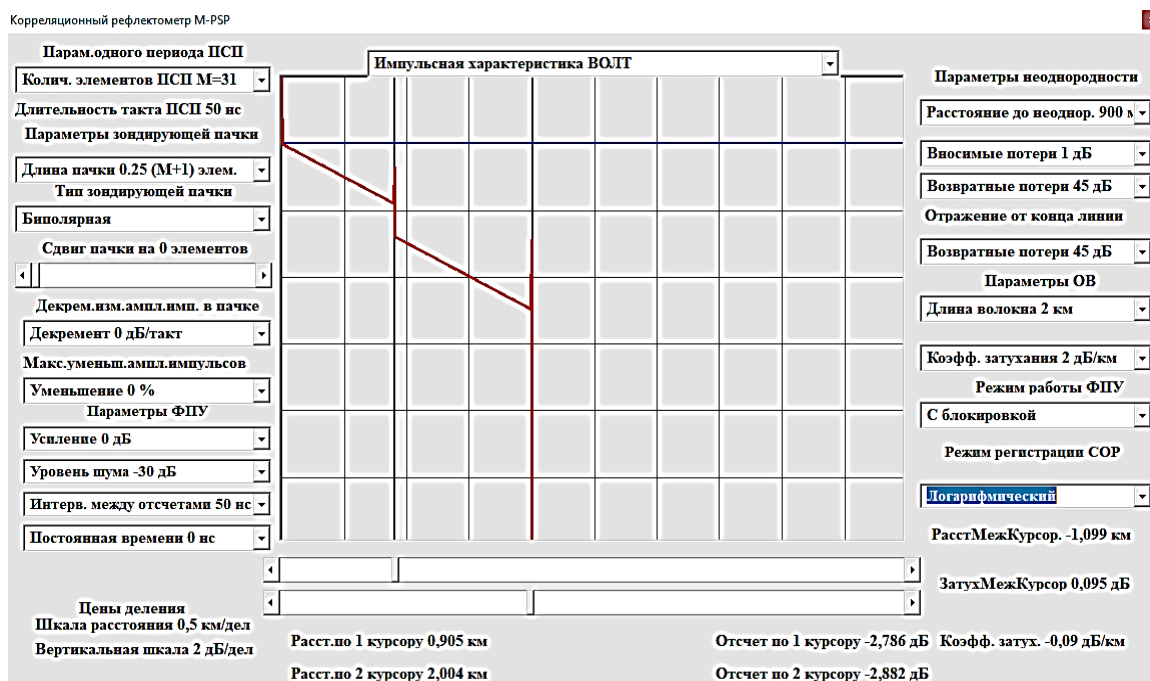


Рис. 2. Идеальная рефлектограмма линейного оптического тракта

Fig. 2. Ideal Reflectogram of a Fiber-Optic Communication Line

В режиме «Импульсная характеристика ЛОТ» можно наблюдать идеальную рефлектограмму от одиночного ЗИ длительностью 50 нс без учета шумов ФПУ (рисунок 2). Все погрешности реальных рефлектограмм определяются их отличием от идеальной.

В режиме «COP от произвольного ЗС» можно наблюдать рефлектограмму (рисунок 3) с учетом шумов ФПУ от ЗС в виде фрагмента длиной МР выбранной из ПСП длиной М с определенным сдвигом ПСП. Для наглядности на рисунке 3 (и последующем рисунке 4) шумы ФПУ были уменьшены на 20 дБ по сравнению с рисунками 1 и 5.

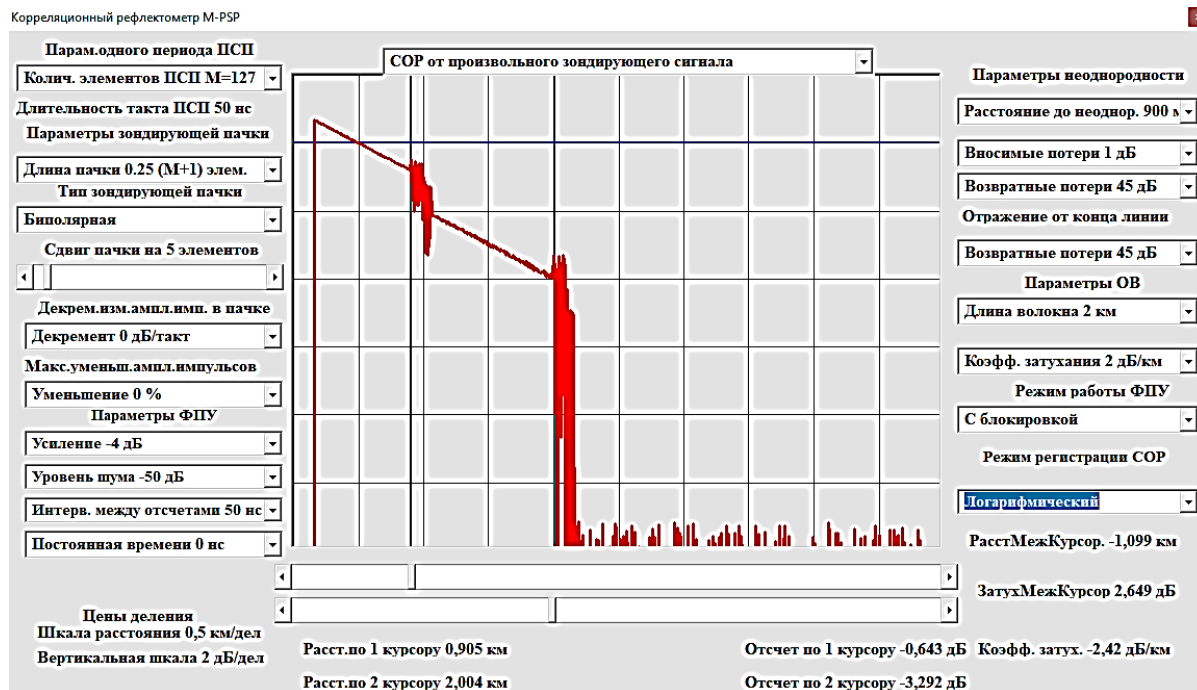


Рис. 3. Рефлектограмма от одной биполярной зондирующей пачки со сдвигом ПСП

Fig. 3. Reflectogram from One Bipolar Probing Fragment of a Pseudo-Random Sequence with a Shift



Рис. 4. Рефлектограмма от одной биполярной зондирующей пачки со сдвигом ПСП после корреляционной обработки

Fig. 4. Reflectogram from one Bipolar Probing Fragment of a Pseudo-Random Sequence with a Shift after Correlation Processing

Напомним, что суть классического корреляционного приема СОР состоит в том, что для получения результирующей рефлектограммы необходимо поочередно M раз посылать фрагменты ПСП одной длины MP . Причем каждый следующий зондирующий фрагмент выбирается из сдвинутой на один такт ПСП. Изменяя сдвиг ПСП, можно наблюдать все M возможных рефлектограмм. В режиме

«СОР от произвольного ЗС после корреляционной обработки» (см. рисунок 4) можно наблюдать результаты вычислений взаимно корреляционной функции (ВКФ) предыдущей рефлектограммы (см. рисунок 3) с ЗС. Эти ВКФ зависят от сдвига ПСП.

В режиме «Суммарный СОР без дополнительного фрагмента» (рисунок 5) можно наблюдать сумму всех рефлектограмм с корреляционной обработкой.

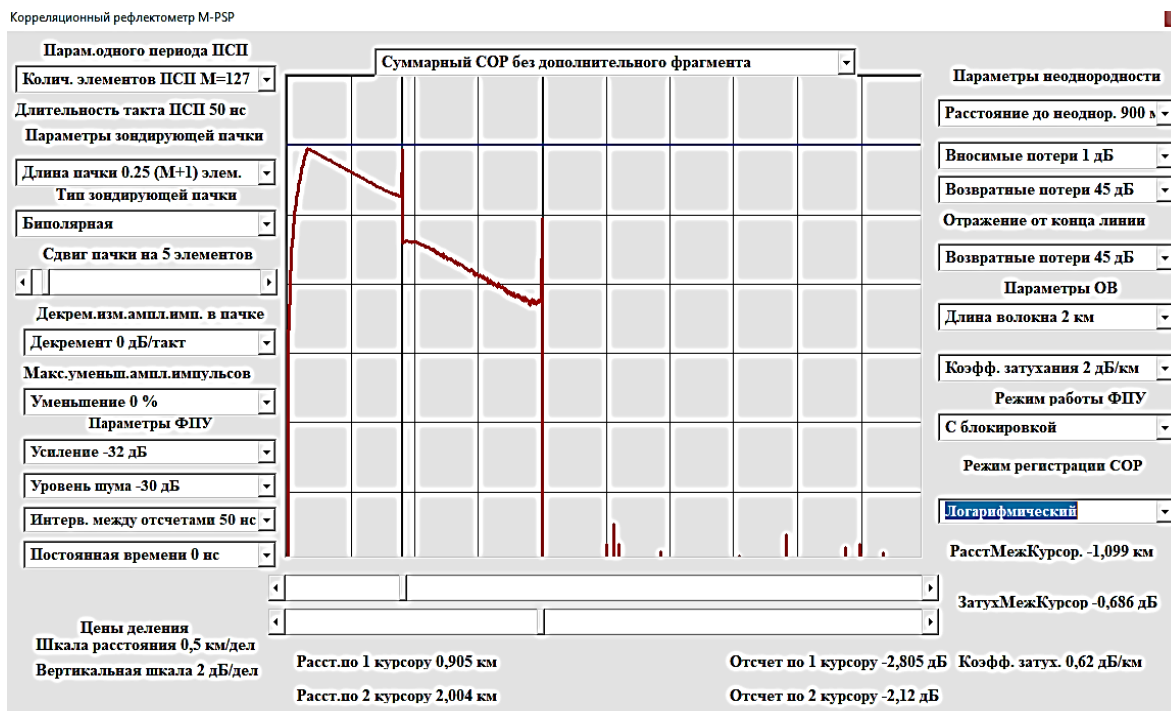


Рис. 5. Суммарная рефлектограмма от всех биполярных зондирующих пачек без учета дополнительного фрагмента

Fig. 5. The Total Reflectogram from All Bipolar Probing Fragments of a Pseudo-Random Sequence without Taking into Account an Additional Fragment

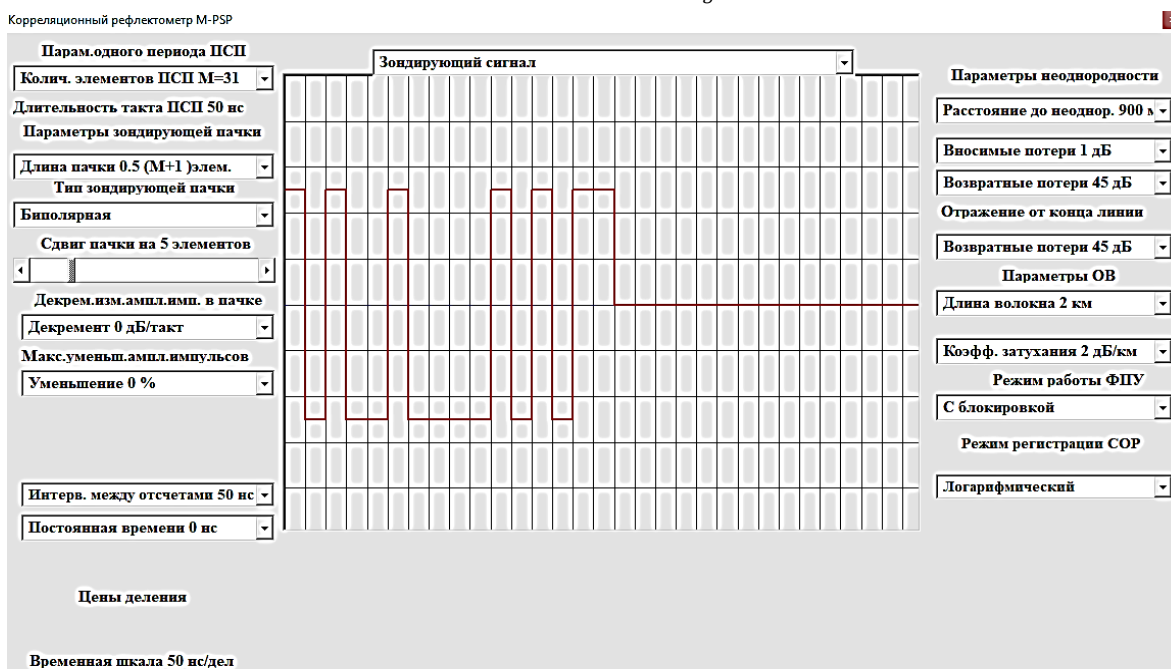


Рис. 6. Биполярный зондирующий сигнал в виде фрагмента пачки ПСП со сдвигом

Fig. 6. Bipolar Probing Signal in the Form of a Fragment of a Pseudo-Random Sequence with a Shift

Сумма всех рефлектограмм с корреляционной обработкой уже не зависит от сдвига ПСП. Это еще не окончательная рефлектограмма, для получения которой необходимо к ней присоединить рефлектограмму с корреляционной обработкой от ЗС в виде так называемого дополнительного фрагмента.

В режиме «Суммарный СОР с дополнительным фрагментом» наблюдается правильная рефлектограмма корреляционного ОР (см. рисунок 1), которую для оценки погрешностей необходимо сравнивать с идеальной рефлектограммой (см. рисунок 2). Для получения этой рефлектограммы программа формировала ЗС в виде дополнительного фрагмента, т.е. положительного прямоугольного импульса длительностью MP и рассчитывала СОР. Далее вычислялась ВКФ этой рефлектограммы и дополнительного фрагмента, и эта ВКФ складывалась с суммарным СОР без дополнительного фрагмента.

Отображение ЗС. В режиме «Зондирующий сигнал» можно наблюдать форму биполярных ПСП с разными периодами от 7 до 255 тактов и различными временными сдвигами и их фрагменты, а также отдельно прямые и инверсные фрагменты ПСП, а также форму дополнительных фрагментов ЗС. На рисунке 6 для примера показан фрагмент ЗС длительностью 16 тактов из ПСП с периодом 31 такт и сдвигом на 5 тактов.

АКФ биполярной ПСП. В режиме «АКФ одного периода биполярной ПСП» (рисунок 7) наблюдается АКФ с многочисленными боковыми лепестками, которые зависят от сдвига ПСП. В режиме «Суммар-

ная АКФ одного периода биполярной ПСП» (рисунок 8) боковые лепестки взаимно компенсируются. Из рисунка 8 также следует, что АКФ станет идеальной с одним пиком шириной, равной одному такту ПСП, если к ней добавить АКФ дополнительного фрагмента (прямоугольного импульса длительностью равной периоду ПСП).

Исследования корреляционного ОР

Исследование зависимости уровней сигнала и шумов, а также отношения сигнала к шуму от периода ПСП M и длины зондирующей пачки MP . В таблице 1 приведены значения максимального СОР в линейном и логарифмическом масштабе (суммарный СОР с дополнительным фрагментом) для различных значений периода ПСП M и длины зондирующей пачки MP . СОР возрастает с увеличением периода ПСП M и длительности пачки MP практически пропорционально их произведению. Например, при увеличении M и MP с 7 до 127 раз СОР возрос на 24.5 дБ (280 раз), а при расчете в у. е. в 294 раза.

В таблице 2 приведены значения размаха шумов в у. е. (в режиме суммарный СОР с дополнительным фрагментом) для различных значений периода ПСП M и длины зондирующей пачки MP . При измерении значений шума возникала большая погрешность, поэтому результаты измерений шумов и отношения сигнала к шуму, приведенные в таблице 2, скорее носят качественный характер.

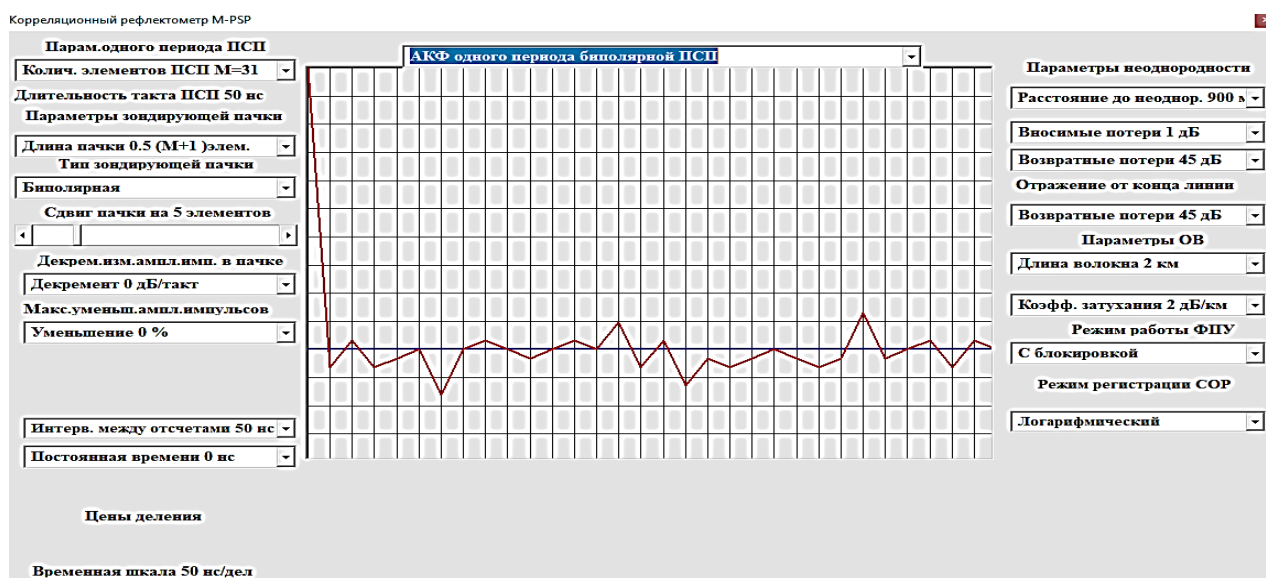


Рис. 7. АКФ одного периода биполярной ПСП со сдвигом

Fig. 7. Autocorrelation Function of one Fragment of a Bipolar Pseudo-Random Sequence with a Shift

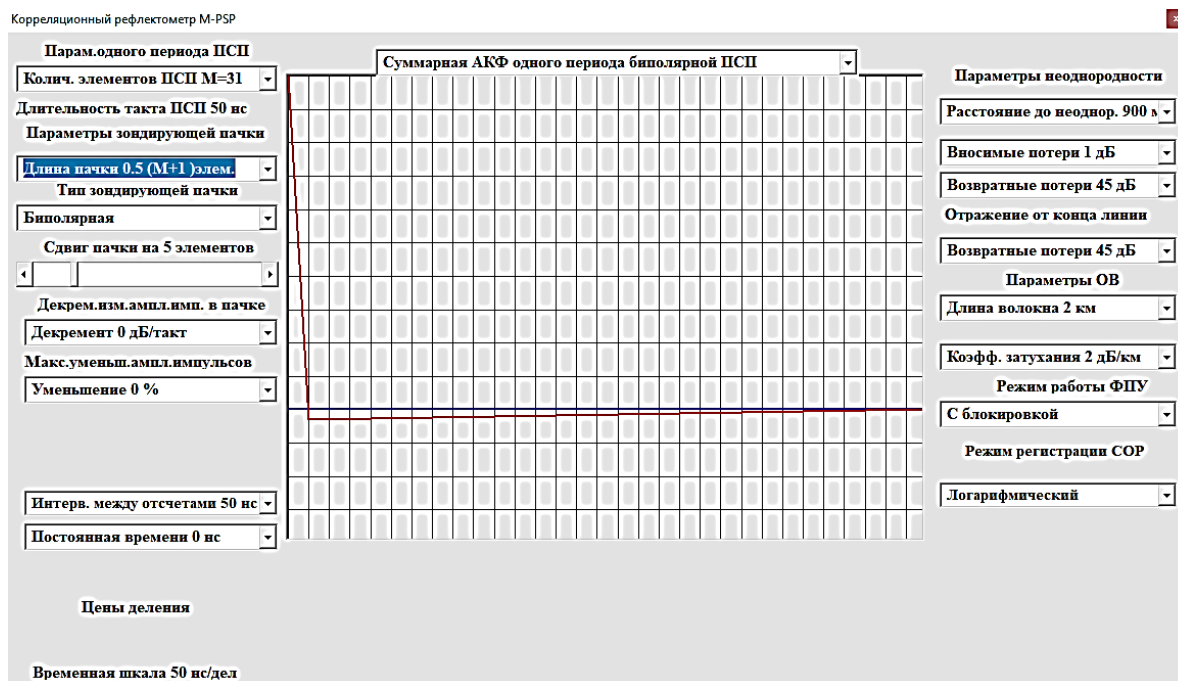


Рис. 8. Суммарная АКФ биполярной ПСП

Fig. 8. The Total Autocorrelation Function of all Fragments of the Bipolar Pseudo-Random Sequence

ТАБЛИЦА 1. Результаты исследования зависимости СОР от параметров зондирующего сигнала

TABLE 1. Results of Studying the Dependence of the Backscattering Signal on the Parameters of the Probing Signal

Период ПСП, <i>M</i>	Длина пачки, <i>MP</i>	Смещение, дБ	СОР _{max} , дБ	Коэффициент передачи	СОР, у. е.	Время регистрации для $L_{\max} = 5$ км, мкс
7	1	-10	9	0.10	7.5	70
7	2	-16	12	0.025	15.8	70
7	4	-16	15	0.025	30.6	70
7	7	-16	17.5	0.01	54.3	70
15	15	-26	23.8	$2.5 \cdot 10^{-3}$	240	150
31	31	-30	30	$1 \cdot 10^{-3}$	980	310
63	63	-40	36	$1 \cdot 10^{-4}$	4000	630
127	127	-46	42	$2.5 \cdot 10^{-5}$	16000	1270
127	64	-46	39	$2.5 \cdot 10^{-5}$	8000	1270

ТАБЛИЦА 2. Результаты исследования зависимости шумов от параметров зондирующего сигнала

TABLE 2. Results of Studying the Dependence of Noise on the Parameters of the Probing Signal

Период ПСП, <i>M</i>	Длина пачки, <i>MP</i>	Смещение, дБ	Пик. шума изм., дБ	Пик. шума корр., дБ	Коэффициент передачи	Размах шума изм., у. е.	СКО шума корр., у. е.	SNR
7	1	0	-3	-3	1	1	0.17	44
7	7	-6	-5	1	0.25	0.7	0.47	120
15	15	-6	-1.5	3.5	0.25	1.4	0.93	260
31	31	-10	-3	7	0.1	1.2	2	490
63	63	-16	-5	11	0.025	0.7	4.7	850
127	127	-16	-3	13	0.025	1.1	7.3	2200
127	64	-16	-5	-11	0.025	0.8	5.3	1500

Сокращения: Пик. шума изм., дБ – пиковое значение шума измеренное

Пик. шума корр., дБ – пиковое значение шума скорректированное

Размах шума изм., у. е. – размах шума измеренный

СКО шума корр., у. е. – СКО шума скорректированное

Шумы СОР возрастают с увеличением периода ПСП M и длительности пачки MP практически пропорционально корню квадратному из их произведения. Например, при увеличении M с 7 и MP с 1 до $M = MP = 127$ раз пиковое значение шума возросло на 16 дБ (в 40 раз), а СКО шума возросло в 42 раза. При этом отношение сигнала к шуму также возросло в 50 раз. Теоретически отношение сигнала к шуму $SNR_{\text{корреляционного ОР}}$ при использовании корреляционного ОР возрастает по сравнению с отношением сигнала к шуму $SNR_{\text{ОР}}$ обычного ОР (с одиночным ЗИ):

$$\frac{SNR_{\text{корреляционного ОР}}}{SNR_{\text{ОР}}} = \sqrt{M \cdot MP}. \quad (1)$$

Полагаем, время одного измерения обычным рефлектометром ОВ с показателем преломления сердцевины n и максимальной длиной L_{max} равно:

$$T_0 = \frac{2 \cdot L_{\text{max}}}{c}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме.

Тогда время одного измерения ОВ с помощью корреляционного ОР составит:

$$T_M = M \cdot T_0 \cdot \left(1 + \frac{MP}{M}\right). \quad (3)$$

Установлено, что корреляционный ОР имеет большее отношение сигнала к шуму по сравнению с обычным ОР (1) при существенно большем времени измерения (3). Отметим, что для повышения отношения сигнала к шуму $SNR_{\text{ОР}}$ в обычном ОР можно использовать накопление СОР, которое даст прирост отношения сигнала к шуму в $\sqrt{M \cdot (1 + MP/M)}$.

Таким образом, общий выигрыш от использования корреляционного ОР в отношении сигнала к шуму составит:

$$\frac{SNR_{\text{корреляционного ОР}}}{SNR_{\text{ОР}}} = \frac{\sqrt{M \cdot MP}}{\sqrt{M \cdot \left(1 + \frac{MP}{M}\right)}} = \sqrt{MP / \left(1 + \frac{MP}{M}\right)}. \quad (4)$$

Максимальный выигрыш составляет $\sqrt{M/2}$ при $MP = M$, при $MP = M/2$ выигрыш уменьшается до $\sqrt{M/3}$.

Погрешность регистрации рефлектограмм из-за искажения зондирующих пачек. В моделирующей программе для такого исследования предусмотрено регулируемое искажение по экспоненциальному закону огибающей амплитуд ЗС, состоящего из MP тактов. Огибающая неискаженного ЗС представляет собой прямоугольный импульс длительностью $T_{MP} = MP \cdot t_u$ и единичной амплитудой $A_0 = 1$.

Для огибающей искаженного ЗС, которая имеет ту же длительность, можно записать:

$$A = A_0 \cdot k \cdot \exp(-\tau), \quad (5)$$

где k – коэффициент, который определяет максимальное уменьшение огибающей ЗС и изменяется от 1 до 0.8 (20 %); τ – постоянная времени уменьшения амплитуды огибающей ЗС (в программе τ задается в виде декремента изменения амплитуды импульсов в ЗС, который изменяется от 0 до 0.2 дБ/такт).

Искаженный ЗС, состоящий из 31 элемента, показан на рисунке 9. В процессе исследования наблюдалась рефлектограмма (рисунок 10), по которой измерялось значение коэффициента затухания α и величина пика отражения от неоднородности, характеризующего возвратные потери.

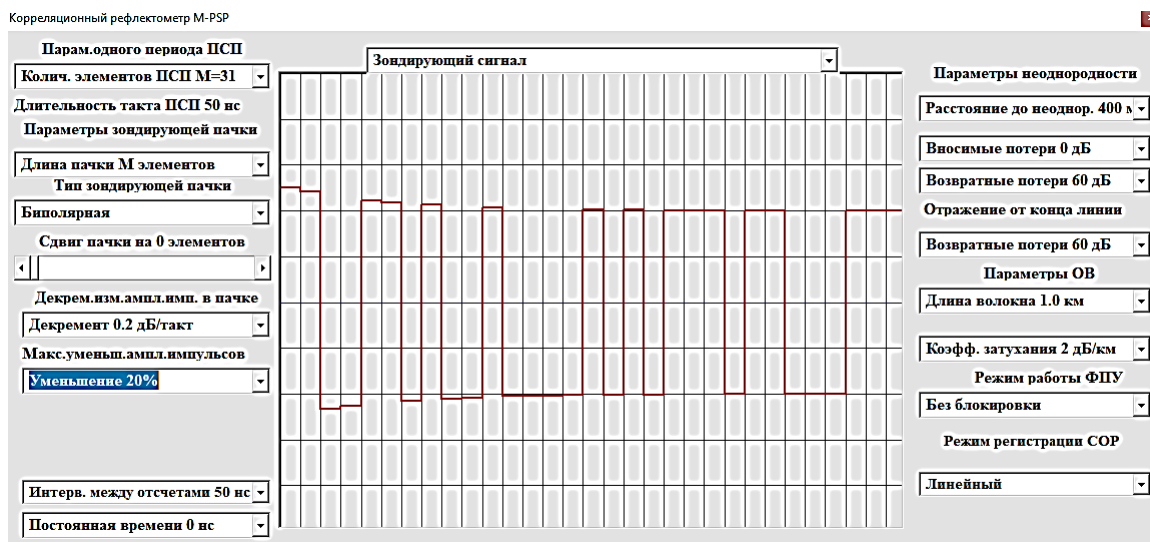


Рис. 9. Искаженный зондирующий сигнал

Fig. 9. Distorted Probing Signal

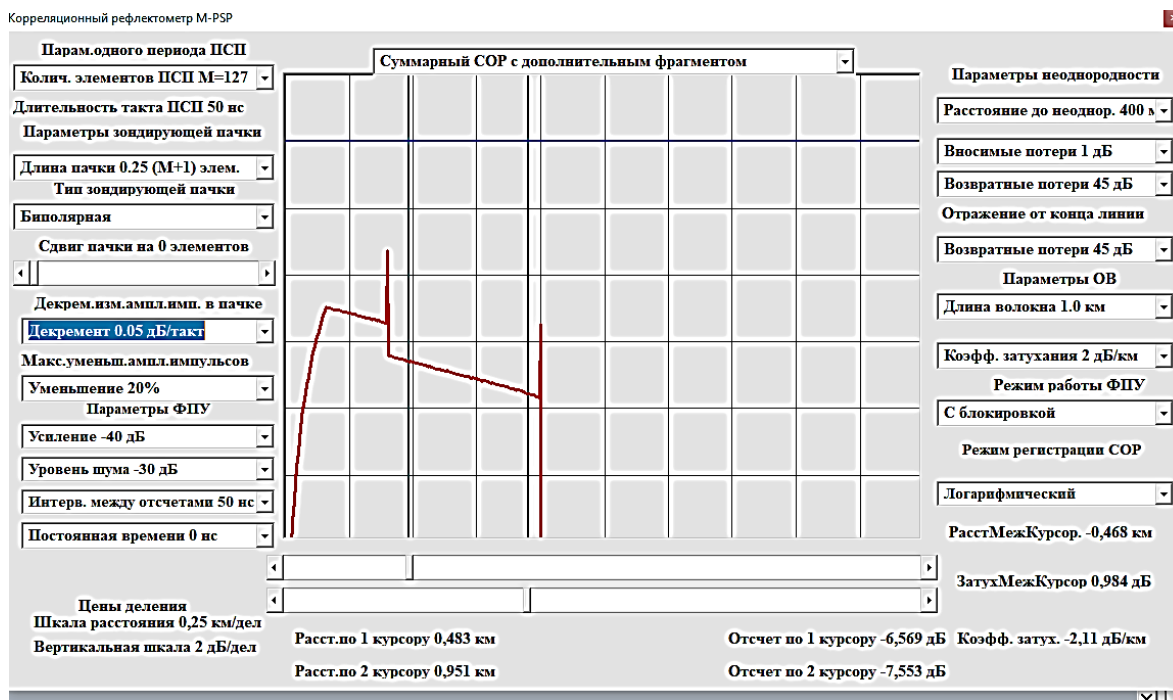


Рис. 10. Рефлектограмма при искажениях зондирующего сигнала

Fig. 10. Reflectogram with Distortions of the Probing Signal

В таблице 3 приведены измеренные значения коэффициента затухания и пика, отраженного от неоднородности СОР и рассчитанные значения погрешности измерения коэффициента затухания. Искажения огибающей ЗС в пределах 5 % мало влияют на форму рефлектограммы и не приводят к значительной погрешности измерения коэффициента затухания.

Исследование влияния искажений СОР за счет амплитудно-частотной характеристики ФПУ. Обычно предполагают, что ФПУ можно представить в виде фильтра нижних частот (ФНЧ) и характеризовать постоянной времени t_{ϕ} . В основной части про-

граммы предполагалось, что ФПУ является идеальным и $t_{\phi} = 0$.

Для исследования влияния амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в программе предусмотрен цифровой ФНЧ с изменяющейся постоянной времени t_{ϕ} . На рисунке 11 показаны искажения рефлектограммы за счет АЧХ ФПУ при сравнительно малой постоянной времени $t_{\phi} = 10$ нс. Видно, что возникают искажения отраженных сигналов из-за неполного подавления боковых лепестков при корреляционной обработке. В результате отраженный сигнал содержит несколько пиков.

ТАБЛИЦА 3. Результаты исследования погрешностей корреляционного ОР, возникающих из-за искажений ЗС

TABLE 3. The Results of the Study of the Errors of the Optical Correlation Reflectometer Arising from the Distortion of the Probing Signal

Макс. уменьш. ампл. ЗС, %	Декремент измен. ампл., дБ/такт	Коэф. затухания, дБ/км	Пик отражения от неоднородности, дБ	Погрешность измер. коэф. затухан., дБ/км
0	0	2.02	-2.2	0.02
1	0.01	1.97	-2.2	-0.03
1	0.05	2.04	-2.2	0.04
1	0.2	2.05	-2.2	0.05
5	0.05	2.05	-2.3	0.05
5	0.2	2.03	-3.0	0.03
10	0.01	2.04	-2.3	0.04
10	0.2	2.10	-3.0	0.1
20	0.05	2.11	-3.5	0.11

Сокращения: Макс. уменьш. ампл. ЗС, % – максимальное уменьшение амплитуды зондирующего сигнала

Декремент измен. ампл., дБ/такт – декремент изменения амплитуды

Коэф. затухания, дБ/км – коэффициент затухания

Погрешность измер. коэф. затухан., дБ/км – погрешность измерения коэффициента затухания

На рисунке 12 приведена рефлектограмма при большем значении $\tau_\Phi = 40$ нс. Видно, что пики на отражении сглаживаются и отраженный импульс расширяется. В таблице 4 приведены результаты исследования влияния постоянной времени ФПУ на погрешность измерения коэффициента затуха-

ния и амплитуды отраженных импульсов. Изменения постоянной времени ФПУ мало сказываются на результатах измерения коэффициента затухания, но существенно влияют на амплитуду отраженных от неоднородностей сигналов, т. е. на результаты измерения возвратных потерь.

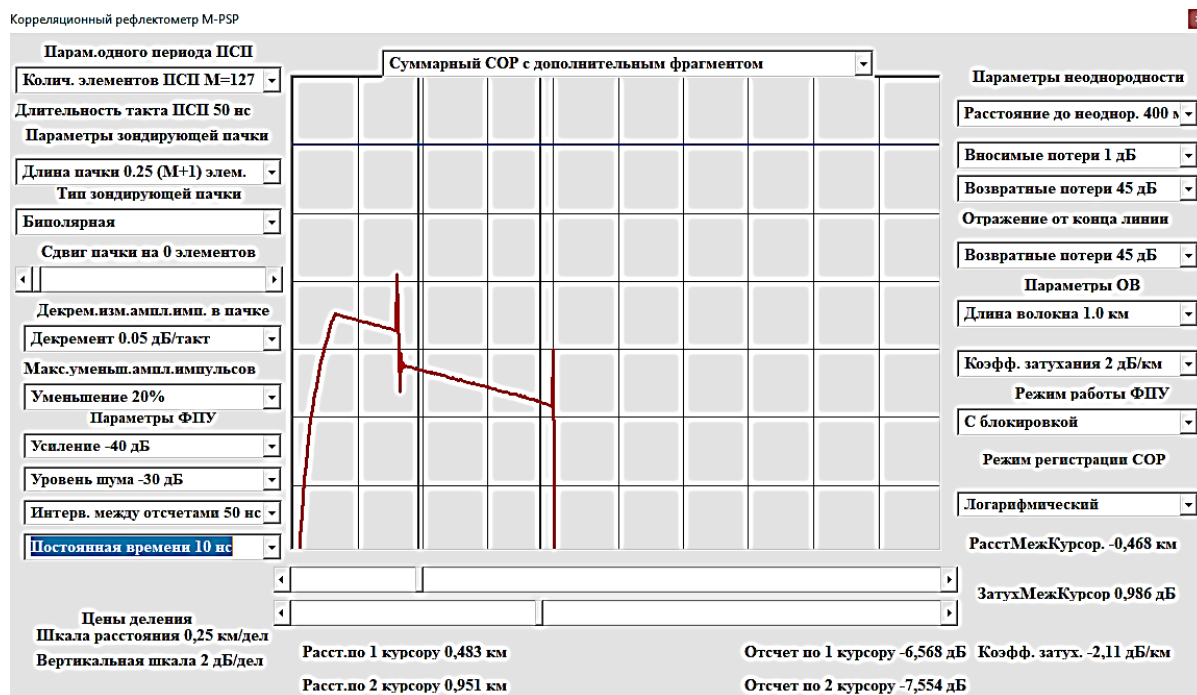


Рис. 11. Искажения рефлектограммы за счет АЧХ ФПУ при $\tau_\Phi = 10$ нс

Fig. 11. Reflectogram Distortion Due to the Amplitude-Frequency Characteristic of the Photodetector at $\tau_\Phi = 10$ ns

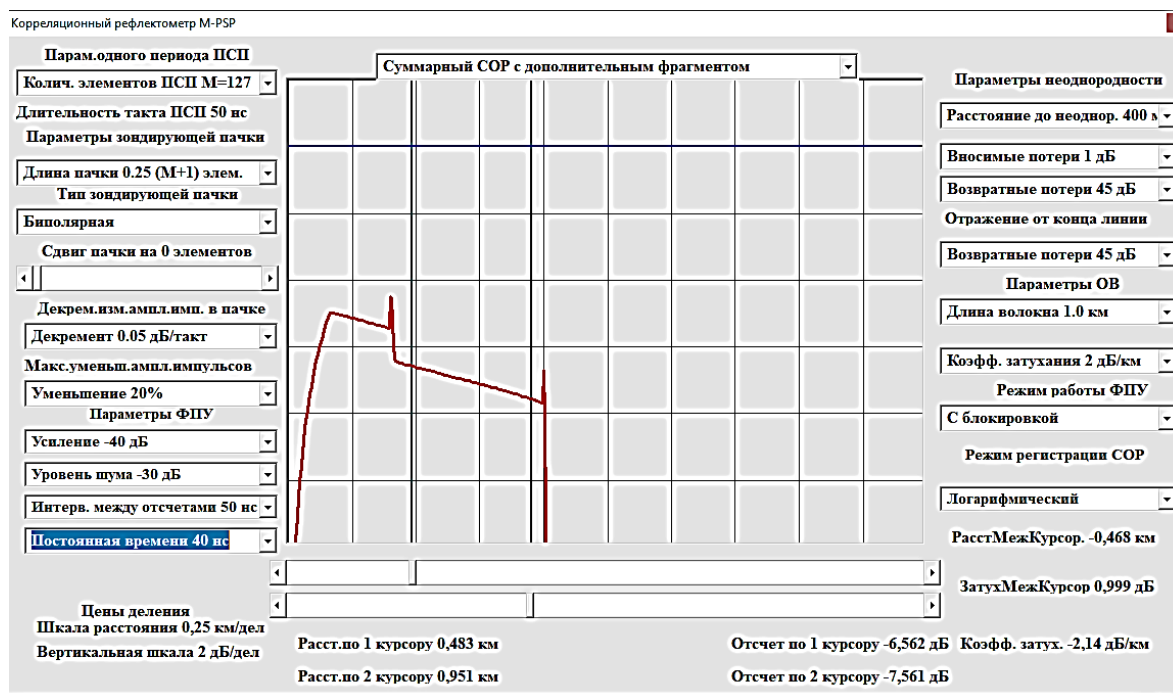


Рис. 12. Искажения рефлектограммы за счет АЧХ ФПУ при $\tau_\Phi = 40$ нс

Fig. 12. Reflectogram Distortion Due to the Amplitude-Frequency Characteristic of the Photodetector at $\tau_\Phi = 40$ ns

ТАБЛИЦА 4. Результаты исследования погрешностей корреляционного ОР, возникающих из-за АЧХ ФПУ

TABLE 4. The Results of the Study of the Errors of the Optical Correlation Reflectometer Arising Due to the Amplitude-Frequency Characteristic of the Photodetector

Постоянная времени ФПУ τ_f , нс	Коэффициент затухания α , дБ/км	Погрешность α , дБ/км	Амплитуда отраженного от неоднородности сигн., дБ	Погрешность определения отражения, дБ
0	2.09	0	-3.5	0
10	2.09	0	-3.9	0.4
20	2.11	0.02	-4.1	0.6
40	2.12	0.03	-4.3	0.8
60	2.12	0.03	-4.4	0.9

Заключение

В работе исследован корреляционный оптический рефлектометр с зондирующим сигналом в виде фрагментов псевдослучайных последовательностей. Разработано программное обеспечение, моделирующее процессы формирования и обработки сигнала обратного рассеяния из волоконно-оптической линии, состоящей из двух участков, между которыми может находиться отражающая неоднородность. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, доказана возможность корректного моделирования корреляционного ОР и исследова-

ния его характеристик в широком диапазоне изменения его параметров. Во-вторых, подтверждено, что корреляционный ОР обеспечивает определенные преимущества при сравнении с обычным ОР и простым зондирующим сигналом.

В дальнейшем авторы предполагают исследовать новый способ обработки сигналов корреляционным ОР, который значительно сократит время обработки, а также разработать структуру и программное обеспечение рефлектометра, сочетающего достоинства обычного и корреляционных ОР.

Список источников

1. Шикетанц Д. Теория измерений по методу обратного рассеяния в световодах // Зарубежная электроника. 1984. № 6. С. 87–94.
2. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Кочановский Л.Н., Пискунов В.В. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов: учебное пособие. СПб: СПбГУТ, 2002. 68 с.
3. Свинцов А.Г. Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС // Метрология и измерительная техника связи. 2002. № 5. С. 64–65.
4. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСА-Парт, 2005. 208 с.
5. Айбатов Д.Л., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Основы рефлектометрии: учебное пособие. Казань: ЗАО «Новое знание», 2008. 116 с.
6. Anderson D.R., Johnson L., Bell F.G. Troubleshooting Optical Fiber Networks. Understanding and Using Your Optical Time-Domain Reflectometer. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 437 p.
7. Hui R., O'Sullivan M. Fiber Optic Measurement Techniques. San Diego: Elsevier Academic Press, 2009. 630 p.
8. Былина М.С., Глаголев С.Ф. Оптические волокна в телекоммуникациях: учебное пособие. СПб: СПбГУТ, 2019. 108 с.
9. Андреев В.А., Бурдин В.А., Баскаков В.С., Косова А.Л. Измерения на ВОЛП методом обратного рассеяния: учебное пособие для ВУЗов. Самара: СРТТЦ ПГУТИ, 2000. 107 с.
10. Newton S. A new technique in OTDR // Electronics and Wireless World. 1988. Vol. 94. Iss. 627. PP. 496–500
11. Jones M.D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity // IEEE Photonics Technology Letters. 1993. Vol. 5. Iss. 7. PP. 822–824. DOI:10.1109/68.229819
12. Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф., Марченко К.В., Семин А.В. Корреляционный рефлектометр со сложным зондирующим сигналом // Фотон-экспресс. 2004. № 5(37).
13. Семин А.В., Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф. Оптический корреляционный рефлектометр. Патент на полезную модель RU 37209, 10.04.2004. Заявка № 2003137925/20 от 18.12.2003.
14. Семин А.В., Архангельский В.Б. Способы формирования сложных зондирующих сигналов для оптических рефлектометров // Труды учебных заведений связи. 2003. № 169. С. 200–213.
15. Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф., Хричков В.А. Оптический корреляционный рефлектометр. Патент на изобретение RU 2759785 C1, 17.11.2021. Заявка № 2021106103 от 09.03.2021.
16. Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф., Хричков В.А. Обработка сигнала в оптическом корреляционном рефлектометре, использующем для зондирования волоконно-оптического тракта фрагменты М-последовательности // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 3. С. 298–303. DOI:10.18469/ikt.2021.19.3.05
17. Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф., Хричков В.А. Аналого-цифровой накопитель с кольцевым регистром памяти // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 3. С. 303–309. DOI:10.18469/ikt.2021.19.3.06

References


1. Shiketants D. Theory of Measurements by the Method of Backscattering in Optical Fibers. *Zarubezhnaia elektronika*. 1984;6:87–94. (in Russ.)
2. Bylina M.S., Glagolev S.F., Kochanovsky L.N., Piskunov V.V. *Measurement of Parameters of Fiber-Optic Linear Paths*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2002. 68 p. (in Russ.)
3. Svintsov A.G. Reflectometric Methods for Measuring FOCL Parameters. *Metrologiia i izmeritelnaia tekhnika v sviazi*. 2002;5:64–65. (in Russ.)
4. Listvin A.V., Listvin V.N. *Reflectometry of Optical Fibers*. Moscow: LESA-Rart Publ.; 2005. 208 p. (in Russ.)
5. Aibatov D.L., Morozov O.G., Polsky Yu.E. *Fundamentals of Reflectometry*. Kazan: Novoe znanie Publ.; 2008 p. (in Russ.)
6. Anderson D.R., Johnson L., Bell F.G. *Troubleshooting Optical Fiber Networks. Understanding and Using Your Optical Time-Domain Reflectometer*. San Diego: Elsevier Academic Press; 2004. 437 p.
7. Hui R., O'Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. San Diego: Elsevier Academic Press; 2009. 630 p.
8. Bylina M.S., Glagolev S.F. *Optical Fibers in Telecommunications*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2019. 108 p. (in Russ.)
9. Andreev V.A., Burdin V.A., Baskakov V.S., Kosova A.L. FOCL Measurements by Backscattering Method. Samara: Samara Regional Telecommunications Training Center at the Povolzhskiy State University of Telecommunications & Informatics Publ.; 2000. 107 p. (in Russ.)
10. Newton S. A new technique in OTDR. *Electronics and Wireless World*. 1988;94(627):496–500
11. Jones M. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1993;5(7):822–824. DOI:10.1109/68.229819
12. Arkhangelsky V.B., Glagolev S.F., Marchenko K.V., Semin A.V. Correlation Reflectometer with a Complex-Probing Signal. *Foton-ekspress*. 2004;5(37). (in Russ.)
13. Semin A.V., Arkhangelsky V.B., Glagolev S.F. *Optical Correlation Reflectometer*. Patent RU 37209, 10.04.2004. (in Russ.)
14. Semin A.V., Arkhangelsky V.B. Methods for Forming Complex Probing Signals for Optical Reflectometers. *Proc. of Telecom. Universities*. 2003;169:200–213 (in Russ.)
15. Arkhangelsky V.B., Glagolev S.F., Khrichkov V.A. Optical Correlation Reflectometer. Patent RU 2759785 C1, 17.11.2021. (in Russ.)
16. Arkhangelsky V.B., Glagolev S.F., Khrichkov V.A. Signal Processing in an Optical Correlation Reflectometer Using Fragments of the M-Sequence for Probing a Fiber-Optic Path. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2021;19(3):298–303. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2021.19.3.05
17. Arkhangelsky V.B., Glagolev S.F., Khrichkov V.A. Analog-to-Digital Storage Ring with Memory Ring. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2021;19(3):303–309. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2021.19.3.06

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена после рецензирования 14.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was submitted 04.04.2022; approved after reviewing 14.04.2022; accepted for publication 18.04.2022.

Информация об авторе:

ХРИЧКОВ
Валентин Александрович

старший преподаватель кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-6221-0685>