

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФРАГМЕНТОВ
М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАЧАЛЬНОЙ
ФАЗОЙ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ**

Архангельский В.Б.¹, Глаголев С.Ф.², Хричков В.А.²

¹ ООО «Оптические технологии», Всеволожск, РФ

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ
E-mail: v.b.arh@mail.ru, glagolevsf@yandex.ru, hrichkovv@gmail.com

В современных оптических рефлектометрах в качестве зондирующего сигнала используется периодическая последовательность одиночных импульсов. Выведенная рефлектограмма представляет собой отклик волоконного тракта на одиночный импульс и сравнительно легко интерпретируется, позволяя получить информацию о распределении затухания и положении неоднородностей вдоль волоконно-оптического тракта. Для выделения сигнала обратного рассеяния из шумов фотоприемника необходимо увеличивать энергию зондирующего импульса за счет увеличения пиковой мощности и длительности импульса, а также проводить многократные измерения и усреднять значения сигнала обратного рассеяния в каждой точке волоконно-оптического тракта. Все перечисленные параметры, определяющие максимальный динамический диапазон рефлектометра, имеют ограничения. Пиковая мощность ограничена нелинейными явлениями в оптическом тракте, длительность импульса ограничена требованиями к разрешающей способности, а количество накоплений сигнала обратного рассеяния – максимальным временем измерения. В работе рассматривается возможность применения комбинации фрагментов М-последовательности для зондирования волоконно-оптического тракта. Зарегистрированный сигнал обратного рассеяния подвергается обработке, которая представляет собой вычисление взаимно корреляционной функции этого сигнала с порождающей его зондирующей последовательностью. Предлагается использовать такие комбинации фрагментов М-последовательности, суммарная автокорреляционная функция которых идеальная (имеет основной лепесток максимальной амплитуды и не имеет боковых лепестков). Предлагаемое усовершенствование позволит увеличить динамический диапазон при создании новых приборов.

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

Введение

В современных оптических рефлектометрах в качестве зондирующего сигнала используется периодическая последовательность одиночных импульсов. Выведенная рефлектограмма представляет собой отклик волоконного тракта на одиночный импульс и сравнительно легко интерпретируется, позволяя получить информацию о распределении затухания и положении неоднородностей вдоль волоконно-оптического тракта. Для выделения сигнала обратного рассеяния из шумов фотоприемника необходимо увеличивать энергию зондирующего импульса за счет увеличения пиковой мощности и длительности импульса, а также проводить многократные измерения и усреднять значения сигнала обратного рассеяния в каждой точке волоконно-оптического тракта. Все перечисленные параметры, определяющие максимальный динамический диапазон рефлектометра, имеют ограничения. Пиковая

мощность ограничена нелинейными явлениями в оптическом тракте, длительность импульса ограничена требованиями к разрешающей способности, а количество накоплений сигнала обратного рассеяния – максимальным временем измерения.

Увеличение динамического диапазона при сохранении разрешающей способности возможно в корреляционных оптических рефлектометрах, в которых для зондирования волоконно-оптического тракта используются непрерывные псевдослучайные последовательности или их фрагменты. Зарегистрированный сигнал обратного рассеяния подвергается обработке, которая представляет собой вычисление взаимно корреляционной функции этого сигнала с порождающей его зондирующей последовательностью. Анализ показывает, что отношение сигнала обратного рассеяния к шуму и динамический диапазон возрастают пропорционально корню из числа элементов в фрагменте псевдослучайной последовательности по

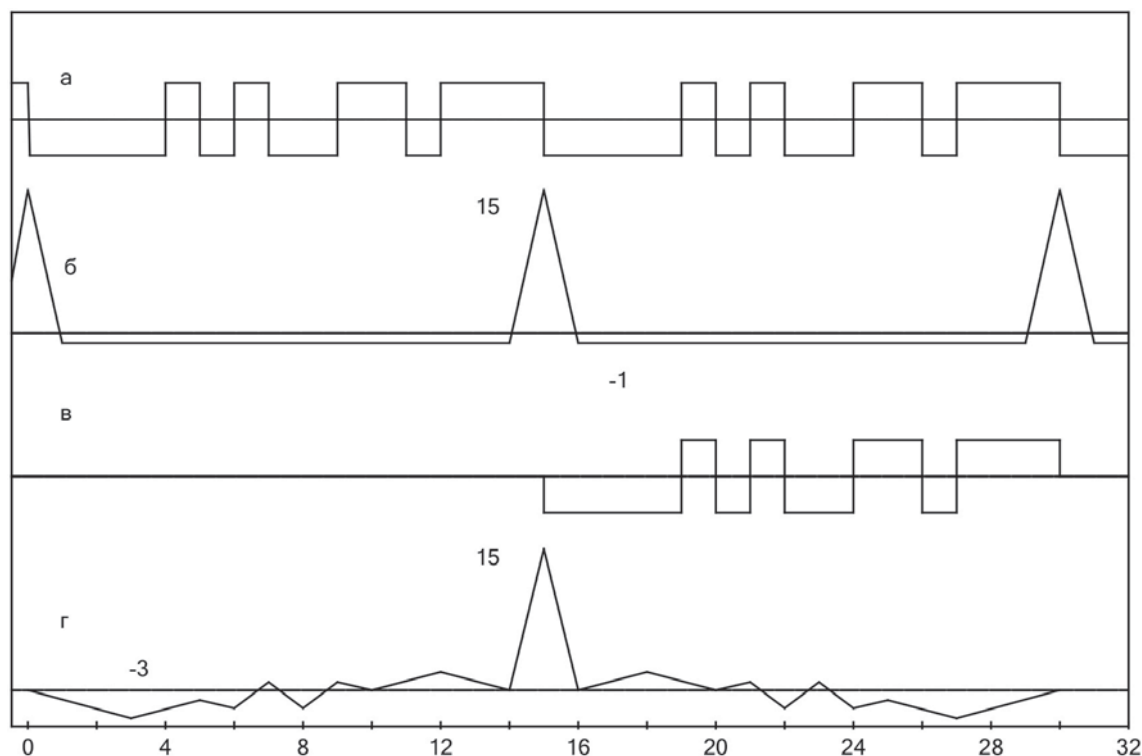


Рисунок 1. Автокорреляционные функции М-последовательностей

сравнению с рефлектометрами, использующими простой зондирующий сигнал.

Способы неискаженной регистрации рефлектограмм

Для неискаженной регистрации рефлектограмм корреляционным рефлектометром необходимо использовать зондирующие сигналы, представляющие собой пачку импульсов, с амплитудой, изменяющейся по закону кодовой последовательности, автокорреляционная функция которой имеет центральный лепесток максимальной амплитуды и минимальные боковые лепестки [1–3]. Такими свойствами обладает непрерывная М-последовательность (рисунок 1, а, б), но любой фрагмент этой последовательности имеет значительные боковые лепестки (рисунок 1, в, г).

Представляется интересным создать такую комбинацию фрагментов этой последовательности, чтобы автокорреляционная функция этой комбинации имела центральный лепесток максимальной амплитуды и минимальные боковые лепестки. Такая комбинация может быть получена перебором фрагментов М-последовательности одинаковой длины с изменяющимися начальными фазами и дополнительным фрагментом, все значения элементов которого равны (+1).

Выражение для аперидической М-последовательности:

$$A_m = \{a(k)\}, k = 1, 2, \dots, M,$$

где $M = (2^\gamma - 1)$ – число символов в М-последовательности; γ – любое целое число.

Фрагмент, вырезанный из этой М-последовательности:

$$E_{AM} = \begin{cases} \{a(k+m-1)\}, & (k+m-1) \leq M, \\ \{a(k+m-1-M)\}, & (k+m-1) > M, \end{cases} \\ k = 1, 2, \dots, K,$$

где $(m-1)$ – фазовый сдвиг m -го фрагмента относительно первого зондирующего сигнала; K – число импульсов в фрагменте.

Дополнительный фрагмент:

$$E_{A0} = \{c(k)\}, k = 1, 2, \dots, K,$$

где $c(k) = 1$.

Автокорреляционная функция фрагмента М-последовательности:

$$W_{AM} = \{w_{AM}(u)\} = \\ = \left\{ \sum_{k=1}^K a(k+m-1)a(k+m-1-u) \right\}, \\ u = (1-K), (2-K), \dots, (K-2), (K-1).$$

Автокорреляционная функция дополнительного фрагмента:

$$W_{A0} = \{w_{A0}(u)\} = \left\{ \sum_{k=1}^K c(k)c(k-u) \right\}, \\ u = (1-K), (2-K), \dots, (K-2), (K-1).$$

Сумма автокорреляционных функций:

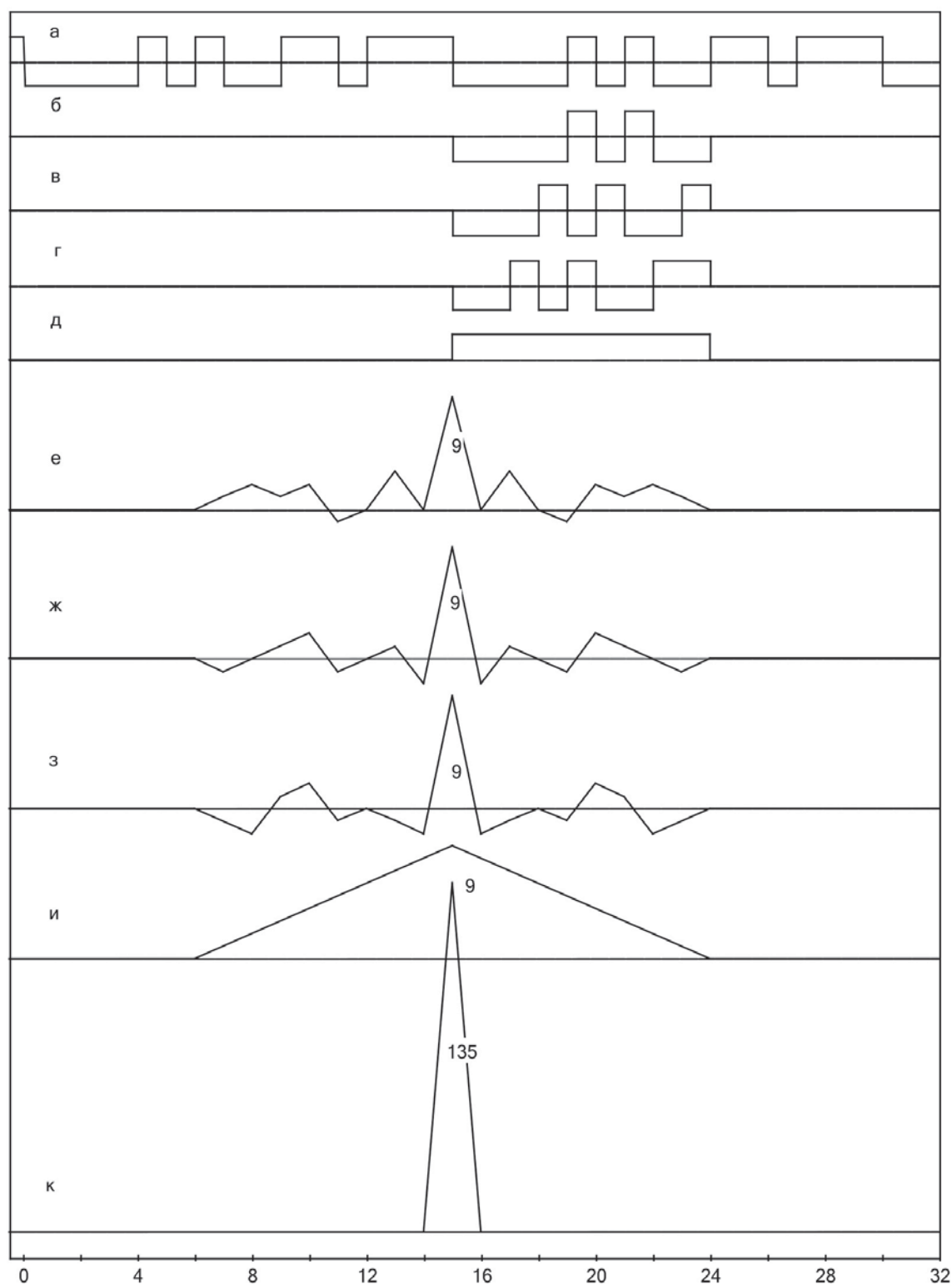


Рисунок 2. Автокорреляционные функции фрагментов
M-последовательностей с изменяющейся начальной фазой

$$\begin{aligned}
 W_{\Sigma A} = \{w_{\Sigma A}(u)\} &= \left\{ \sum_{k=1}^K W_{AM} + W_{A0} \right\} = \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{m=1}^M [a(k+m-1)a(k+m-1-u)] + \right. \\
 &= \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K a(k+m-1)a(k+m-1-u) + c(k)c(k-u) \Big\}. \\
 &\quad + \sum_{k=1}^K c(k)c(k-u) = \quad u = (1-K), (2-K), \dots, (K-2), (K-1).
 \end{aligned}$$

Из этого выражения видно, что если число $u \neq 0$, то символы $a(k+m-1)$ и $c(k+m-1-u)$ при изменении m от 1 до M образуют две сдвинутые на u друг относительно друга M -последовательности. Посимвольное перемножение двух M -последовательностей дает новую M -последовательность, сдвинутую относительно исходных. В полной M -последовательности символов со значением $(+1)$ на один меньше, чем со значением (-1) . Так как последний член в рассматриваемом выражении всегда равен $(+1)$, то при любом $u \neq 0$ выражение обращается в ноль.

Если $u = 0$, то сумма автокорреляционных функций:

$$w_{\Sigma A}(0) = K(M+1).$$

На рисунке, 2, a изображена M -последовательность, на рисунке 2, $b-g$ – первые три фрагмента этой M -последовательности, а на рисунке 2, d – дополнительный фрагмент. Автокорреляционные функции этих фрагментов приведены на рисунке 2, $e-u$, а на рисунке 2, k изображена суммарная автокорреляционная функция.

Видно, что эта функция идеальная, она имеет основной лепесток максимальной амплитуды и не имеет боковых лепестков. Если применяемая M -последовательность имеет значительное число элементов ($K > 100$), то вклад автокорреляционной функции каждого фрагмента в суммарную автокорреляционную функцию невелик.

Заключение

Использование M -последовательностей с изменяющимися начальными фазами позволяет формировать сложные зондирующие сигналы произвольной длительности, при этом их автокорреляционные функции остаются идеальными.

Архангельский Владимир Борисович, к.т.н., старший научный сотрудник ООО «Оптические технологии». 188643, Российская Федерация, г. Всеволожск, ул. Первомайская, 26а. Тел. +7 950 019-21-95. E-mail: v.b.arh@mail.ru

Глаголев Сергей Федорович, к.т.н., доцент кафедры фотоники и линий связи (ФилС) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1. Тел. +7 921 887-67-95. E-mail: glagolevsf@yandex.ru

Хричков Валентин Александрович, старший преподаватель кафедры ФилС СПбГУТ. 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1. Тел. +7 911 849-49-82. E-mail: hrichkovv@gmail.com

POSSIBILITIES OF USING FRAGMENTS OF M-SEQUENCES WITH A CHANGING INITIAL PHASE FOR CORRELATION OPTICAL REFLECTOMETERS

Arkhangelsky V.B.¹, Glagolev S.F.², Khrichkov V.A.²

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках договора № 3855ГС1/63276.

Литература

1. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Оптимальный алгоритм генерации и обработки шумоподобных сигналов в оптической рефлектометрии / В.Б. Архангельский [и др.] // Обработка сигналов в системах связи: сб. науч. тр. учебн. завед. связи. 1996. С. 36–39.
4. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
5. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов: учеб. пособие / М.С. Былина [и др.]. СПб.: СПбГУТ, 2002. 80 с.
6. Измерения на ВОЛП методом обратного рассеяния: учебное пособие / В.А. Андреев [и др.]. Самара: СРТТЦ ПГАТИ, 2001. 121 с.
7. Солонина А.И. Основы цифровой обработки сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 768 с.
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М.: SYRUS SYSTEMS, 1999. 671 с.
9. Гауэр Дж. Оптические системы передачи / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 501 с.
10. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and Using Optical Time. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. 437 p.
11. Бакланов И.Г. Тестирование и диагностика систем связи. М.: Эко-Трендз, 2001. 264 с.

Получено 12.04.2021

¹ *Optical Technologies LLC, Vsevolozhsk, Russian Federation*² *St. Petersburg State University of Telecommunications**named after Professor M.A. Bonch-Bruевич, Saint Petersburg, Russian Federation**E-mail: v.b.arh@mail.ru, glagolevsf@yandex.ru, hrichkovv@gmail.com*

In modern optical reflectometers, a periodic sequence of single pulses is used as a probe signal. The resulting reflectogram is the response of the fiber path to a single pulse and is relatively easy to interpret, making it possible to obtain information on the distribution of attenuation and the position of inhomogeneities along the fiber-optic path. To separate the backscattered signal from the noise of the photodetector, it is necessary to increase the probe pulse energy by increasing the peak power and pulse duration, as well as to carry out multiple measurements and average the values of the backscattered signal at each point of the fiber-optic path. All of the above parameters, which determine the maximum dynamic range of the OTDR, have limitations. Peak power is limited by nonlinear phenomena in the optical path, pulse duration is limited by resolution requirements, and the number of backscattered signal accumulations is limited by the maximum measurement time. The paper considers the possibility of using a combination of the M-sequence fragments for probing a fiber-optic path. The recorded backscatter signal, presented by the calculation of the cross-correlation function of this signal with the probe sequence that generates it is processed. It is proposed to use such combinations of the M-sequence fragments, the total autocorrelation function of which is ideal (has the main lobe of maximum amplitude and does not have side lobes). The proposed improvement will increase the dynamic range when creating new devices.

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

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.3.04

Arkhangelsky Vladimir Borisovich, LLC «Optical technology», 26a, Pervomayskaya Street, Vsevolozhsk, 188641, Russian Federation; Senior Researcher, PhD in Technical Science. Tel. +7 950 019-21-95. E-mail: v.b.arh@mail.ru

Glagolev Sergey Fedorovich, The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, 22, building 1, Bolshhevikov Avenue, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation; Associate professor at the department of Photonic and Telecommunication Lines, PhD in Technical Science. Tel. +7 921 887-67-95. E-mail: glagolevsf@yandex.ru

Khrichkov Valentin Alexandrovich, The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, 22, building 1, Bolshhevikov Avenue, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation; Senior Lecturer at the department of Photonic and Telecommunication Lines. Tel. +7 911 849-49-82. E-mail: hrichkovv@gmail.com

References

1. Finkel'shtejn M.I. *Radar Basics*. Moscow: Radio i svjaz', 1983, 536 p. (In Russ.)
2. Varakin L.E. *Communication Systems with Noise-Like Signals*. Moscow: Radio i svjaz', 1985, 384 p. (In Russ.)
3. Arkhangelskiy V.B. et al. Optimal algorithm for generating and processing noise-like signals in optical reflectometry. *Obrabotka signalov v sistemah svyazi: sb. nauch. tr. uchebn. zaved. svyazi*, 1996, pp. 36–39. (In Russ.)
4. Listvin A.V., Listvin V.N. *Optical Fiber Reflectometry*. Moscow: LESARart, 2005, 208 p. (In Russ.)
5. Bylina M.S. et al. *Measurement of Parameters of Fiber-Optic Line Paths*. A Tutorial. Saint Petersburg: SPbGUT, 2002, 80 p. (In Russ.)
6. Andreev V.A. et al. *Backscattering Fiber Optic Measurements*. A Tutorial. Samara: SRTTs PGATI, 2001, 121 p. (In Russ.)

7. Solonina A.I. *Fundamentals of Digital Signal Processing*. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2005, 768 p. (In Russ.)
8. Ivanov A.B. *Fiber Optics. Components, Transmission Systems, Measurements*. Moscow: SYRUS SYSTEMS, 1999, 671 p. (In Russ.)
9. Gauer J. *Optical Transmission Systems*. English trans. Moscow: Radio i svjaz', 1989, 501 p. (In Russ.)
10. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. *Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and Using Optical Time*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004, 437 p.
11. Baklanov I.G. *Testing and Diagnostics of Communication Systems*. Moscow: Eko-Trendz, 2001, 264 p. (In Russ.)

Received 12.04.2021

УДК 621.39

ОБРАБОТКА СИГНАЛА В ОПТИЧЕСКОМ КОРРЕЛЯЦИОННОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕМ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА ФРАГМЕНТЫ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Архангельский В.Б.¹, Глаголев С.Ф.², Хричков В.А.²

¹ ООО «Оптические технологии», Всеволожск, РФ

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

E-mail: v.b.arh@mail.ru, glagolevsf@yandex.ru, hrichkovv@gmail.com

В ранее проведенной работе была рассмотрена возможность применения комбинации фрагментов М-последовательности с изменяющимися начальными фазами для зондирования волоконно-оптического тракта. Предложенный способ позволяет регистрировать рефлектограмму волоконно-оптического тракта с высокой точностью, но при его реализации существенно увеличивается необходимый объем памяти и значительно увеличивается объем вычислений из-за необходимости проводить корреляционную обработку сигнала обратного рассеяния от каждого фрагмента М-последовательности по отдельности, а после обработки необходимо осуществить операцию суммирования всех полученных автокорреляционных функций. В данной статье рассматривается применение кольцевого регистра памяти для сокращения объема занимаемой памяти рефлектометра и количества вычислительных операций. Предлагается записывать значения сигналов обратного рассеяния от каждого фрагмента М-последовательности в один общий кольцевой регистр, после чего производить корреляционную обработку всего массива данных одновременно с использованием опорного сигнала в виде полной М-последовательности.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптическая рефлектометрия, сигнал обратного рассеяния, сложный зондирующий сигнал, корреляционный рефлектометр, кольцевой регистр, динамический диапазон

Введение

В предыдущей статье под названием «Возможности использования фрагментов М-последовательностей с изменяющейся начальной фазой для корреляционных оптических рефлектометров» показано, что зондирующие сигналы, сформированные по рассмотренному алгоритму, могут использоваться в корреляционных рефлектометрах, так как их суммарная автокорреляционная функция имеет основной лепесток максимальной амплитуды и не имеет боковых лепестков.

Алгоритм регистрации рефлектограммы

В предложенном корреляционном рефлектометре лазерный диод излучает пачки импульсов,

интенсивность которых изменяется по закону М-последовательности. Это излучение через направленный ответвитель вводится в исследуемый волоконно-оптический тракт, а сигнал обратного рассеяния тракта через этот же направленный ответвитель поступает на фотоприемник. Фотоприемник преобразует сигналы обратного рассеяния в электрические сигналы, а для исключения перегрузок блокируется на время излучения пачек. АЦП оцифровывает мгновенные значения каждого сигнала обратного рассеяния и заносит их в отдельный регистр памяти рефлектометра. После излучения полного набора фрагментов М-последовательности, и накопления в памяти рефлектометра мгновенных значений всех сигналов обратного рассеяния вычисляется взаимно