

Белов Сергей Павлович, д.т.н., профессор, декан Факультета информационных технологий и прикладной математики БелГУ. Тел. (8-472) 230-13-50. E-mail: belov@bsu.edu.ru

Старовойт Иван Александрович, к.т.н., старший преподаватель Кафедры ИСТ БелГУ. Тел. (8-472) 230-13-00. E-mail: starovoit@bsu.edu.ru

Ушаков Дмитрий Игоревич, к.т.н., старший преподаватель кафедры ИСТ БелГУ. Тел. (8-472) 230-13-00. E-mail: ushakov\_d@bsu.edu.ru

## ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.315

### МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИЗБЫТОЧНОЙ ДЛИНЫ ВОЛОКНА В ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАТУХАНИЯ ПРИ НИЗКИХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Бурдин В.А., Важдает М.А.*

Предложен метод измерений распределений локальной избыточной длины ОВ вдоль кабеля по результатам измерений характеристик обратного рассеяния импульсным оптическим рефлектометром в процессе климатических испытаний при нормальной и низкой отрицательной температуре. Представлены результаты апробации метода.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, оптический кабель, модульная трубка, избыточная длина волокна, кривизна, радиус изгиба, климатические испытания

#### Введение

Избыточная длина волокна (Excess Fiber Length – EFL) является одним из важнейших параметров, характеризующих качество и надежность оптических кабелей (ОК) [1-8]. Значение EFL определяется разностью между длиной ОВ, уложенного в модульной трубке кабеля, и длиной этой модульной трубки. В общем случае EFL должна быть относительно небольшой положительной величиной, что ограничивает нагрузки на ОВ при продольных воздействиях на кабель. Однако при этом важно, чтобы избыточная длина волокна не была слишком велика и равномерно распределялась по длине кабеля.

Неравномерность распределений EFL вдоль кабеля снижает стойкость к внешним воздействиям всей строительной длины. Для ограничения EFL в допустимых пределах и обеспечения ее равномерного распределения вдоль модульной трубки осуществляется мониторинг EFL в процессе наложения модульной трубки и производятся измерения избыточной длины волокон при послеоперационном контроле [9-12]. Но поскольку EFL в ОК зависит не только от выпол-

нения операции изготовления модулей ОК, но и от последующих технологических операций изготовления кабеля [3; 5-6], представляют интерес распределения вдоль кабеля оценок EFL в строительной длине ОК после ее изготовления.

В предлагаемой работе представлен новый метод измерений данных распределений, базирующийся на анализе потерь ОВ по характеристикам обратного рассеяния ОВ, полученных в процессе климатических испытаний строительной длины ОК при низких отрицательных температурах. Можно предположить, что данный метод будет также востребован для прогноза срока службы и локализации участков кабелей с деградирующими ОВ по результатам мониторинга ОВ при низких отрицательных температурах подвесных кабелей линий передачи, введенных в эксплуатацию.

#### Температурные зависимости потерь, избыточной длины и кривизны ОВ в модулях ОК

Известно, что зависимость избыточной длины волокна EFL от температуры описывается выражением [1]:

$$EFL = \Delta\alpha_T \cdot (T_0 - T), \quad (1)$$

где  $\Delta\alpha_T$  – разность коэффициентов линейного расширения материала модульной трубки и кварцевого стекла;  $T$  – текущее значение температуры;  $T_0$  – значение температуры, при котором EFL равна нулю. С учетом скрутки модулей в кабеле согласно [7]

$$EFL = \Delta\alpha_T \cdot (T_0 - T) - EFL_C, \quad (2)$$

где  $EFL_C$  поправка, определяемая конструкцией кабеля, в том числе внутренним радиусом модульной трубки  $r_m$ , ее радиусом изгиба  $R_m$  и т.д. Из (1) и (2) следует, что

$$EFL = EFL_n + \Delta\alpha_T \cdot (T_n - T), \quad (3)$$

где  $EFL$  – избыточная длина ОВ при температуре  $T$ ;  $EFL_n$  – избыточная длина ОВ при температуре  $T_n$ .

Избыточная длина ОВ приводит к микроизгибам ОВ в модульной трубке. Обычно полагают, что ОВ располагается по геликоиду. В этом случае длина ОВ на одном периоде геликоида определяется формулой [13-14]:

$$L_F = \sqrt{\bar{p}^2 + (2\pi \cdot r_m)^2}, \quad (4)$$

где  $\bar{p}$  – шаг скрутки ОВ. Отсюда, учитывая, что

$$EFL = (L_F - \bar{p}) / \bar{p}, \quad (5)$$

следует формула для оценки избыточной длины

$$EFL = \sqrt{1 + (2\pi \cdot r_m / \bar{p})^2} - 1. \quad (6)$$

Согласно [13-14], радиус изгиба для геликоида определяется формулой

$$R = r_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{p}}{2\pi \cdot r_m} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Тогда, с учетом (6), получаем

$$R = r_m \frac{1}{1 - 1/(1 + EFL)^2}. \quad (8)$$

При малых значениях  $EFL \ll 1$  из (6)-(8) следуют приближенные формулы [15-19]:

$$EFL = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi r_m}{\bar{p}} \right)^2; \quad (9)$$

$$R = \frac{r_m}{2 EFL}. \quad (10)$$

Согласно [17-19], в (6)-(10) вместо радиуса модульной трубки следует подставлять его эквивалентное значение, равное

$$\bar{r}_m = r_m - 2r_F, \quad (11)$$

где  $r_F$  – внешний радиус ОВ. Кривизна ОВ в буферной модульной трубке обратно пропорциональна радиусу изгиба [7]:

$$Cur = 1/R. \quad (12)$$

Вследствие деформаций волокна на изгибе в световоде, выполненном из кварцевого стекла, создаются механические напряжения, оценки которых могут быть рассчитаны по формуле [20]:

$$\sigma_a = \frac{E \cdot b}{R}, \quad (13)$$

где  $b$  – радиус кварцевого волоконного световода;  $E$  – величина модуля упругости кварцевого стекла при  $\chi \rightarrow 0$ , равная 7,4 ГПа;  $\chi$  – деформация растяжения наружного слоя кварцевого волокна;  $R$  – радиус изгиба ОВ.

Таким образом, если известна избыточная длина ОВ в модуле ОК, то, воспользовавшись формулами (8) и (12)-(13), можно получить соответствующие оценки среднего значения радиуса изгиба ОВ в модульной трубке, кривизны ОВ, механических напряжений в ОВ на изгибах. Если же известны температурная зависимость и распределения этой величины по длине кабеля, то можно определить и соответствующие температурные зависимости и распределения по длине ОК для указанных выше параметров, включая радиус изгиба ОВ. В свою очередь, изгибы ОВ увеличивают потери ОВ. Для расчета дополнительных потерь в ступенчатом ОВ, обусловленных его изгибом, применяются известные выражения [21]:

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} k^2 \exp\left[-\frac{2}{3} \frac{w^3}{\beta_g^2} R\right]}{e_v w^{3/2} V^2 \sqrt{R} K_{\nu-1}(wa) K_{\nu+1}(wa)}; \quad (14)$$

$$e_v = \begin{cases} 2, & \nu = 0 \\ 1, & \nu \neq 0 \end{cases} \quad V^2 = k^2 a^2 (n_0^2 - n_C^2),$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $a$  – радиус сердцевины световода;  $n_0, n_C$  – показатели преломления, соответственно, сердцевины и оболочки световода;  $\beta_g$  – постоянная распространения моды;  $w$  – волноводный параметр;  $K_\nu(z)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода порядка  $\nu$  от аргумента  $z$ ;  $\lambda$  – длина волны.

Учитывая зависимость радиуса изгиба ОВ в модульной трубке от избыточной длины (8), запишем (14) в следующем виде

$$\alpha = C_g \frac{\exp(-gX)}{\sqrt{X}}; \quad (15)$$

$$X = \frac{1}{1 - 1/(1 + EFL)^2}. \quad (16)$$

Согласно [7], увеличение затухания ОВ в ОК при низких отрицательных температурах обусловлено в основном микроизгибами ОВ в модульной трубке из-за увеличения избыточной длины волокна. Тогда постоянные  $C_g, g$ , которые характеризуют свойства конструкции ОВ и ОК, могут быть определены в результате обработки данных климатических испытаний строительной длины ОК при низких отрицательных температурах следующим образом.

Пусть в нормальных условиях при температуре  $T_n$  среднее значение коэффициента затухания ОВ на строительной длине равно  $\alpha_n$ , а при понижении температуры до значения  $T_i - \alpha_i$ . Тогда из (15)-(16) получаем, что приращение потерь при понижении температуры от  $T_n$  до  $T_i$  составит

$$\Delta\alpha_{i,n} = \alpha_i - \alpha_n = C_g \left[ \frac{\exp(-gX_i)}{\sqrt{X_i}} - \frac{\exp(-gX_n)}{\sqrt{X_n}} \right]. \quad (17)$$

Полагаем, что среднее значение избыточной длины волокна в ОК при нормальной температуре окружающей среды известно. Например, по результатам измерений, выполняемых в процессе производства ОК. Тогда средние значения аргумента  $X_i$  для исследуемого ОВ строительной длины ОК при заданной отрицательной температуре могут быть рассчитаны по формулам (3) и (16). Пусть в процессе климатических испытаний строительной длины ОК выполняются измерения средних значений коэффициента затухания ОВ при нескольких отрицательных значениях температуры окружающей среды ( $i > 2$ ) и при нормальной температуре. Это позволяет, по результатам измерений  $\alpha_n, \alpha_i$ , где  $i > 2$ , зная соответствующие значения  $X_i$ , из (17), используя метод наименьших квадратов, найти постоянные  $C_g, g$  для испытуемого ОК.

### Метод измерений распределений EFL вдоль кабеля, базирующийся на результатах анализа данных климатических испытаний ОК

Согласно предлагаемому методу измерений распределений EFL вдоль кабеля по результатам измерений в процессе послеоперационного контроля качества изготовления модулей ОК

определяют средние значения  $\overline{EFL}_n$  для модулей исследуемой конструкции ОК при нормальной температуре окружающей среды. Затем по формуле (3) рассчитывают температурную зависимость  $\overline{EFL}_i$ . После чего проводят климатические испытания строительной длины ОК, для чего испытуемую строительную длину ОК помещают в климатическую камеру и в соответствии с графиком изменения температуры выдерживают в течение заданного интервала времени при заданных значениях температуры. В том числе и при низкой отрицательной температуре, и при положительной температуре, соответствующей нормальным условиям. В процессе климатических испытаний в конце каждого интервала времени, в течение которого температуру в климатической камере поддерживают постоянной, импульсным оптическим рефлектометром обратного рассеяния выполняют измерения характеристик обратного рассеяния ОВ кабеля.

В результате обработки измеренных характеристик обратного рассеяния ОВ в модуле определяют средние значения коэффициентов затухания волокон  $\bar{\alpha}_i(T_i)$  для значений температуры, при которой производились измерения. По описанной в предыдущем разделе методике из (17) находят оценки постоянных  $g, C_g$  для волокон каждого из модулей испытуемой длины кабеля.

На следующем шаге рассчитывают распределения прироста затухания ОВ по длине ОК. Применяется метод скользящего окна. Длину скользящего окна выбирают из условия  $10 l_{pulse} < l_w < 0,5 l_s$ ; где  $l_{pulse}$  — длина, соответствующая длительности зондирующего импульса;  $l_s$  — длина испытуемого ОК;  $l_w$  — длина скользящего окна. Сдвигая окно на характеристике обратного рассеяния, рассчитывают значения коэффициента затухания для каждого положения окна и получают распределения коэффициентов затухания вдоль кабеля  $\alpha(z, T_i)$ , где  $z$  — расстояние вдоль кабеля от ближнего конца;  $T_i$  — температура, при которой выполнялись измерения.

Затем, используя значения EFL для нормальных условий и распределения  $\alpha(z, T_i)$ , найденные по формулам (16)-(17), рассчитываются распределения вдоль кабеля  $EFL(z, T_i)$  при низких отрицательных температурах. По этим распределениям, согласно (8) и (13), вычисляются распределения вдоль кабеля радиусов изгиба волокон в модуле и механических напряжений на изгибах ОВ, соответственно.

### Экспериментальная апробация метода

Порядок и условия проведения испытаний. Испытаниям подвергалась строительная длина самонесущего ОК модульной конструкции типа ОКЛЖ с оптическими волокнами SMF-28e. Конструкция кабеля включает четыре модульные трубки, в трех из которых уложено по четыре ОВ. Длина испытуемого ОК на барабане – 577 м. Барабан со строительной длиной ОК помещали в климатическую камеру. С одного конца кабеля волокна в оптической муфте МТОК-96 собирались в шлейф. Другой конец кабеля выводился через шлюз климатической камеры. Волокна с этого конца кабеля в cassette оптической муфты также собирались в шлейф, к которому подключался импульсный оптический рефлектометр (OTDR). В течение всего процесса испытаний рефлектометр на отключался. Температура в климатической камере в процессе испытаний изменялась от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  с погрешностью менее  $2^{\circ}\text{C}$  в течение трех циклов. Характеристики обратного рассеяния ОВ измерялись на каждом цикле при температурах  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $-60^{\circ}\text{C}$  и  $+70^{\circ}\text{C}$ , соответственно.

Результаты измерений избыточной длины волокон в модулях ОК. В данном разделе представлены результаты анализа данных измерений избыточной длины волокна в модулях ОК исследуемой конструкции. Данные измерения выполняются в целях послеоперационного контроля качества изготовления модулей. Измерения выполнялись при температуре  $T_n$ , которая составляла  $22 \pm 4^{\circ}\text{C}$ . В ОК рассматриваемой конструкции модульные трубки выполнены из полибутилентерефталата с номинальным внутренним диаметром 1,4 мм и номинальным внешним диаметром 2,0 мм. В таблице 1 приведены результаты вычислений оценок средних значений EFL отдельно для модулей и ОВ разного цвета. Разброс значений относительно невелик, что позволяет объединить данные в один массив.

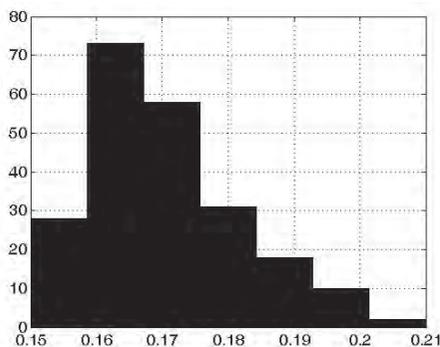


Рис. 1. Гистограмма данных измерений EFL

Таблица 1. Среднее значение EFL для ОВ в модуле

ОВ	Модуль		
	Розовый	Синий	Белый
Белый	0,166429	0,162500	0,165000
Оранжевый	0,162857	0,163750	0,161000
Коричневый	0,159286	0,167500	0,165000
Зеленый	0,165000	0,164375	0,166000

На рис. 1 приведен пример гистограммы значений EFL для выборки данных, в которой были объединены результаты измерений для модулей и ОВ разных расцветок. Объем выборки составил 220 значений. При этом, было получено среднее значение EFL – 0,1689%, и среднеквадратическое отклонение – 0,0136. Это позволило в первом приближении полагать, что значения EFL в модулях исследуемой конструкции ОК в нормальных условиях с надежностью 0,9 лежат в пределах от 0,13% до 0,21%.

Результаты расчета постоянных  $C_g$  и  $g$ . Постоянные  $C_g$  и  $g$  для испытуемого кабеля были рассчитаны по описанной выше методике с использованием формулы (17). Данные о температурных коэффициентах линейного расширения и других характеристиках материалов ОК, сведения о конструкциях ОК и их элементов были взяты из справочников [22-23].

Средние значения коэффициентов затухания ОВ исследуемой строительной длины ОК определяли по стандартной методике обработки характеристик обратного рассеяния, измеренных при заданных значениях температуры в климатической камере с помощью OTDR [24]. Расчеты были выполнены для трех оценок среднего значения ОВ на строительной длине кабеля 0,12%; 0,169% и 0,22%, соответственно.

При  $EFL_n = 0,12\%$  было получено  $C_n = 35068 \text{ дБ} \cdot \text{м}^{1/2}/\text{км}$ ,  $g = 0,22 \text{ 1/м}$ . При  $EFL_n = 0,22\%$  аналогичным образом  $C_n = 16428 \text{ дБ} \cdot \text{м}^{1/2}/\text{км}$ ,  $g = 0,26 \text{ 1/м}$ . Для среднего в рассмотренной выборке значения избыточной длины  $EFL_n = 0,169$  имело место  $C_n = 23872 \text{ дБ} \cdot \text{м}^{1/2}/\text{км}$ ,  $g = 0,237 \text{ 1/м}$ .

На рис. 2 в качестве примера для одного из ОВ испытуемой длины ОК приведены экспериментальные оценки увеличения коэффициента затухания ОВ при понижении температуры до  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$  и  $-60^{\circ}\text{C}$ , соответственно, в зависимости от EFL и аппроксимирующая согласно (17) кривая.

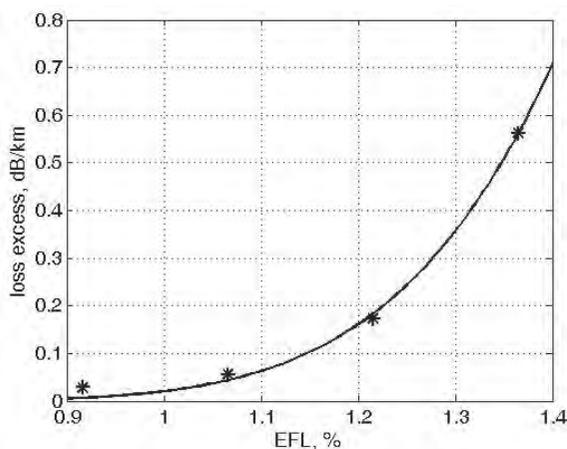


Рис. 2. Экспериментальные оценки увеличения потерь с понижением температуры и аппроксимирующая согласно (17) кривая в зависимости от EFL

Расчет распределений EFL вдоль строительной длины кабеля. В данном разделе представлены результаты обработки характеристик обратного рассеяния, измеренных в процессе климатических испытаний длины ОК, по которым, при известных постоянных  $C_g$  и  $g$ , используя скользящее окно, рассчитывали распределения вдоль кабеля избыточной длины волокна, кривизны (радиусов изгиба) и механических напряжений. Длина скользящего окна принималась равной 200 м. При анализе характеристик обратного рассеяния исключали «мертвую зону» на ближнем конце и конец кабеля. Ниже в качестве примера представлены результаты, полученные для одного из ОВ испытываемой длины ОК.

На рис. 3 представлены рассчитанные по данным характеристикам с применением типовой методики для OTDR распределения вдоль кабеля оценок увеличения потерь в ОВ при понижении температуры до  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$  и  $-60^{\circ}\text{C}$ , соответственно.

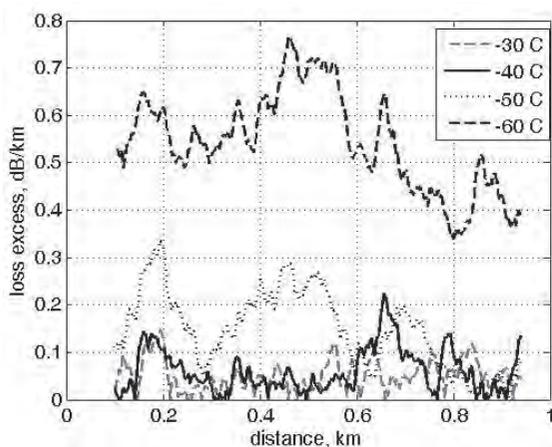


Рис. 3. Увеличение потерь ОВ при понижении температуры

На рис. 4 представлены распределения локальных оценок EFL вдоль кабеля в зависимости от температуры.

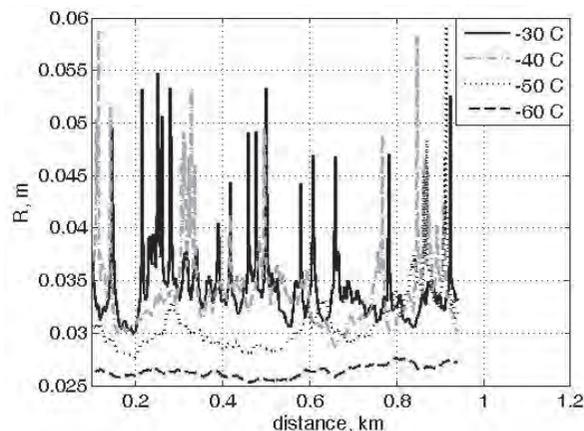


Рис. 4. Распределение локальных оценок EFL вдоль кабеля

### Заключение

Предложен метод оценивания распределений избыточной длины волокна по длине кабеля по результатам его климатических испытаний при низких отрицательных температурах. Описан алгоритм реализации метода и представлены результаты его экспериментальной апробации. В целом, полученные результаты демонстрируют корректность применения предложенного метода для оценивания распределений локальных оценок избыточной длины волокна по длине кабеля при низких отрицательных температурах.

Метод может быть использован для исследования статистических законов распределения избыточной длины и кривизны ОВ, механических напряжений на изгибах ОВ в модульных трубках, а также локализации проблемных участков в строительных длинах ОК. Эти возможности представляют интерес как с точки зрения разработки и испытаний новых конструкций кабелей, так и с точки зрения совершенствования технологии производства ОК.

Авторы полагают, что представленный в данной работе метод может представлять интерес с точки зрения мониторинга волоконно-оптических линий передачи с подвесными ОК, поскольку он позволяет по результатам мониторинга ОВ кабелей в зимнее время при низких температурах выявлять проблемные участки и оценивать не усредненные, а максимальные значения напряжений ОВ на изгибах в модульных трубках, что, в свою очередь, позволяет осуществлять прогноз срока службы кабеля с большей достоверностью.

Вместе с тем необходимо отметить, что для практического применения метода необходимо дополнить ряд исследований, связанных, в том числе,

с исследованиями погрешностей, разрешающей способности и условий его применения.

### Литература

1. Ларин Ю.Т. Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы. Надежность и стойкость к ионизирующему излучению // М.: Престиж, 2006. – 304 с.
2. Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели // Corning Cable Systems, 2001. – 352 с.
3. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле. // Деп. в «Информэлектро», №6-эт-2001.
4. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Оптический модуль – основа волоконно-оптического кабеля // Кабели и провода. №1(272), 2002. – С. 22-25.
5. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК // Кабели и провода. №3(274), 2002. – С. 32-34.
6. Марьенков А.А., Гринштейн М.Л., Каменская Е.А., Деков В.Н. Измерения удлинения оптического волокна при испытании оптического кабеля на стойкость к растягивающей нагрузке // Lightwave RE, No.2, 2003. – С. 38-41.
7. Stueflotten S. Low temperature excess loss of loose tube fiber cables // Applied Optic. Vol. 21, No. 23, 1982. – P. 4300-4307.
8. Singh S., Shankar R.R., Bhattacharya S., Blumsack H. Quality aspects in the optical unit of OPWG the smart energy solution // sterlitetechnologies.com
9. Patent US4921413 // D.J. Blew. Apparatus for controlling excess fiber length in a loose tube optical fiber buffer tube, 1990.
10. Patent US4983333// D.J. Blew. Method for controlling excess fiber length in a loose tube optical fiber buffer tube, 1991.
11. Patent CN101105559 // Xiaohong Chen et al. Optical fiber secondary coating excess length tester, 2008.
12. Patent US2012/0189255 // L.S. Casals et al. Method and apparatus for manufacturing an optical cable and cable so manufactured, 2012.
13. Начертательная геометрия. Под ред. Н.Н. Крылова. М.: ВШ, 2002. – 224 с.
14. Гордон В.О., Семенов-Огневский М.А. Курс начертательной геометрии. М.: Наука, 1988. – 272 с.
15. Резак Е.В., Прокопович М.Р., Учет погрешности измерения длины оптического волокна // Вестник ТОГУ. Т.4, №11, 2008. – С. 167-172.
16. Lee S. H., Hwang J. J., Lee S. Y., Kang E. Determination of size and stranding pitch of loose tube in fiber optic ribbon cables // 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. Columbia University, NY, 2002. – P. 1-6.
17. Гозман Н.Я., Семенов Н.А., Шитов В.В. Дополнительные потери от микроизгибов, возникающих при покрытии оптического волокна полимерами // Электросвязь. № 4, 1984. – С. 25-26.
18. Шитов В. В., Чупраков В. Ф. Температурно-временные воздействия на оптические волокна и кабели // Электросвязь. № 11, 1988. – С. 50-53.
19. Кононова Н. М., Нехорошева Р. А., Шитов В.В., Чупраков В. Ф. Воздействия отрицательных температур на волоконные световоды в полимерных покрытиях // Электросвязь. № 8, 1989. – С. 37-40.
20. Glaesemann G.S. Optical fiber failure probability predictions from long-length strength distributions // International Wire&Cable Symposium Proceedings, 1991. – P. 819- 825.
21. Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers // J. Opt. Soc. Am. Vol. 66, No.3, 1976. – P. 216-220.
22. Воронцов А.С., Гурин О.И., Мифтяхетдинов С.Х. и др. Оптические кабели связи российского производства. Справочник. // М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
23. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи // М.: ЛЕСА-Парт, 2003. – 288 с.
24. Anderson D.R., Johnson L., Bell F.G. Troubleshooting optical-fiber networks. Understanding and using your optical time-domain reflectometer // Elsevier, Academic Press, 2004. – 437 p.

### METHOD OF ESTIMATION OF DISTRIBUTIONS ALONG OPTICAL CABLE OF EXCESS FIBER LENGTH BY RESULTS OF LOSS MEASUREMENT BY USING OTDR UNDER LOW SUBZERO TEMPERATURE

Burdin V.A., Vazhdaev M.A.

Method for measuring the distributions of the local excess fiber length along the cable by the results of measurements of the characteristics backscattering OTDR under climatic tests at normal and low subzero temperatures are proposed. The test results of the are represented.

**Keywords:** *optical fiber, optical cable, modular tube, excess fiber length, curvature, bend radius climatic test.*

Бурдин Владимир Александрович, проректор по науке и инновациям, д.т.н., профессор Кафедры линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 332-21-61; E-mail: burdin-va@psuti.ru

Важдаев Михаил Александрович, аспирант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. 8-917-817-64-51; E-mail: rip86rs@mail.ru

УДК 621.393

## ОБОБЩЕННЫЙ ИНВАРИАНТНЫЙ МЕТОД ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ И ОЦЕНКА ЕГО ИНФОРМАЦИОННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ

*Лебедев В.В.*

В работе синтезирован обобщенный инвариант линейных каналов связи в виде сохраняемого каналами отношения объемов  $m$ -мерных параллелепипедов, образуемых в сигнальном пространстве соответствующими группами передаваемых сигналов. Разработан алгоритм передачи сообщений, использующий данный инвариант. Дана оценка информационной защищенности обобщенного инвариантного метода передачи сообщений.

**Ключевые слова:** группа преобразований, инвариант, обобщенный инвариантный метод передачи, информационная защищенность.

### Введение

Так называемые системы связи с инвариантными характеристиками помехоустойчивости в систематизированном виде впервые были описаны в [1]. В этой работе рассматривалась проблема обеспечения инвариантности (нечувствительности) систем связи к воздействию аддитивных и неаддитивных помех, введены понятия абсолютной и относительной инвариантности. Относительная инвариантность означает, что при наличии в канале флуктуационной помехи вероятность ошибки при воздействии основной помехи не превышает определенной, обусловленной влиянием флуктуационной помехи, величины.

Для обеспечения инвариантности к аддитивным помехам предложено несколько способов, базирующихся либо на выборе сигнала, либо на выборе демодулятора, а также на применении адаптивных методов приема. Инвариантность к неаддитивной (мультипликативной) помехе обеспечивалась применением соответствующего метода модуляции.

Более общий подход к решению проблемы инвариантной относительно свойств канала передачи сообщений предложен в [2], а промежуточные итоги исследований приведены в [3]. Этот подход базируется на представлении преобразований

сигналов в канале связи элементами аппаратуры, средой распространения и разнообразными помехами соответствующими группами преобразований. Группы преобразований обладают набором инвариантов – некоторыми соотношениями между параметрами сигналов, остающимися неизменными при изменениях самих сигналов. В силу этого свойства инварианты являются идеальной формой представления элементов сообщений для их безыскаженной передачи по каналу связи. Разумеется, при наличии в канале флуктуационной помехи можно обеспечить лишь относительную инвариантность.

Как показано в [3], преобразование сигналов элементами аппаратуры и средой распространения линейного канала связи описывается аффинной группой преобразований с одним из инвариантов в виде отношения длин векторов сигналов, имеющих одинаковое направление (в геометрической интерпретации – отношения длин отрезков, лежащих на одной прямой).

Влияние аддитивных помех описывается группой преобразований типа сдвигов векторов сигналов в направлении векторов помехи. У этой группы преобразований инвариантом является расстояние в сигнальном пространстве, измеряемое вдоль прямой, перпендикулярной направлению векторов помехи. Сочетая инварианты аффинной группы преобразований и группы сдвигов, можно получить инвариантную амплитудную модуляцию для линейных каналов с аддитивными помехами [3]. Преимуществом нового способа описания каналов связи является наличие в теории групп преобразований универсального метода синтеза инвариантов для любой группы. Для этого используются так называемые инфинитезимальные операторы [4]. Это обстоятельство существенно облегчает синтез инвариантных систем связи.