*ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2023, № 5, с. 114–120*

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*УДК 621.372.81*

# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В РЭЛЕЕВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ[1]

**© 2023 г. И. В. Фролов[a,*]**

*[a]ООО "Саранскккабель-Оптика"*

*Россия, Республика Мордовия, 430001, Саранск, ул. Строительная, 3Г, стр. 1*

**e-mail: frolov@sarko.ru*

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.
После доработки 31.03.2023 г.
Принята к публикации 24.04.2023 г.

Представлены результаты исследования влияния флуктуаций амплитуд сигнала на погрешность измерения коэффициента затухания оптических волокон небольшой длины, выполненных рэлеевскими некогерентными рефлектометрами. На основе анализа обработки сигнала в рефлектометре с использованием методов статистической радиотехники и с привлечением экспериментальных данных и эмпирических методик показано, что величина погрешности измерения коэффициента затухания определяется числом некоррелированных отсчетов рефлектограммы, используемых для усреднения, с учетом характера флуктуаций, при ограничениях, наложенных на отношение сигнал/шум на входе приемника. Предложена методика учета влияния замираний при флуктуациях двулучепреломления на основе аналогии с задачей радиолокации об оценке параметров обнаружения флуктуирующей цели.

**DOI:** 10.31857/S0032816223050099, **EDN:** ZJFVDX

## ВВЕДЕНИЕ

Общепринятым считается, что измерение коэффициента затухания оптических волокон (ОВ) методом обратного рэлеевского рассеяния проводится на достаточно протяженных участках ОВ (не менее нескольких километров), при этом погрешность измерения коэффициента затухания определяется систематической ошибкой, обусловленной нелинейностью шкалы рефлектометра [1]. Дополнительно, среди иных составляющих погрешности имеются шумовая, поляризационная, интерференционная [1].

Однако погрешность измерения при небольших измеряемых участках ОВ (1 км и менее) может быть существенно больше указанной, что обусловлено влиянием составляющих погрешности на точность измерений коэффициента затухания ОВ [2–4].

В работах [2, 3] даются оценки шумовой составляющей погрешности измерения в виде прямой зависимости погрешности измерения коэффициента затухания от ширины шумовой дорожки рефлектограммы или связанной с ней величиной среднеквадратического отклонения мощности шума для методов измерения по двум точкам и наименьших квадратов (МНК) в предположении независимости отсчетов рефлектограммы.

В работах [1, 2, 4] приводятся оценки интерференционной составляющей погрешности рефлектометра (шумы когерентности) как определяющей при измерении малых длин ОВ, при этом отсчеты рассматриваются как частично коррелированные с интервалом корреляции, определяемым длиной когерентности лазерного излучения.

На практике же погрешности измерения коэффициента затухания могут не иметь строгой связи с величиной шумов [3, 5] и применение рефлектометров с большим динамическим диапазоном, а также использование произвольного изменения состояния поляризации хоть обычно и уменьшает флуктуации [1, 3, 4], однако может кардинально не улучшать ситуацию.

Согласно работе [2] ошибка измерения на участке ОВ зависит от длины измеряемого участка и снижается при увеличении длины участка с показателем степени 1.5, ошибка измерения зависит также от длины волны и ширины спектра импульса и ведет себя монотонно.

Все указанные выше результаты получены, главным образом, методами статистической фи-

[1] Международная конференция "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023", Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference "Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023", Russia, Perm, 24–26, May 2023).

зики и экспериментально, они не используют понятие случайного сигнала и его статистические свойства.

Нормативная документация [6] при определении методов испытаний предписывает проводить измерения коэффициента затухания при длине ОВ не менее 1 км. На практике минимальная длина ОВ для достоверных (но не вполне точных) измерений представляется равной ориентировочно 0.6 км. При меньших длинах участков ошибка не представляется монотонной функцией, а имеет значительные флуктуации. Кроме того, на рефлектограммах наблюдаются участки с интервалом корреляции, сопоставимым с пространственной длительностью излучаемого импульса (10–30 м).

В данной работе рассмотрено влияние флуктуаций на основе их статистических свойств на основании оценок, полученных в теории радиотехнических систем, исходя из аналогии имеющейся задачи обработки импульсного сигнала в рефлектометре с задачей обработки сигнала импульсного радиолокатора от движущейся цели. При этом аналогия проводится на основании общности как статистических свойств сигнала на входе устройства обработки, так и структурной схемы устройства его обработки. Для получения точечных оценок погрешности измерения коэффициента затухания использовались как значимые только статистически независимые отсчеты рефлектограммы с учетом экспериментальных данных о длине интервала корреляции. Для оценки влияния поляризационных флуктуаций сигнала, обусловленных двулучепреломлением, использовались аналогия с “медленными” флуктуациями радиолокационного сигнала от движущейся цели и эмпирическая методика Бартона [8] учета этих флуктуаций.

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Все виды погрешностей измерения коэффициента затухания рефлектометра обусловлены флуктуациями амплитуд отсчетов рефлектограммы, образующих так называемую “шумовую дорожку”, статистические свойства которой и определяют погрешность. Согласно работе [1], ширина шумовой дорожки зависит от отношения сигнал/шум и определяет погрешность измерения величин точечных неоднородностей и в результате их усреднения по длине – коэффициента затухания.

Полуширина шумовой дорожки $\Delta\mathbf{B}$ связана с отношением сигнал/шум $\mathbf{B} = 5\lg(P_s/P_n)$ при достаточно большом его значении ($\mathbf{B} > 5$) простым соотношением (здесь и далее жирным шрифтом выделены величины, выраженные в децибелах):

$$\Delta\mathbf{B} = 5\lg\left(\frac{P_s + P_n}{P_n}\right) \approx 2.17\frac{P_s}{P_n} \approx 2\cdot 10^{-\mathbf{B}/5}, \qquad (1)$$

где $P_s$ и $P_n$ – мощности сигнала и шума соответственно, в абсолютных единицах. При этом, в предположении нормального закона распределения шума ширина шумовой дорожки с вероятностью 98% составляет $4.6\sigma_R$, где $\sigma_R$ – среднеквадратическое отклонение шума.

Далее, отношение сигнал/шум $\mathbf{B}(z)$ в точке рефлектограммы с продольной координатой $z$ и коэффициентом затухания $\boldsymbol{\alpha}$ зависит от динамического диапазона рефлектометра $\mathbf{D}_{\text{rms}}$ (индекс rms указывает на определение относительно среднеквадратического значения шума) как

$$\mathbf{B}(z) = \mathbf{D}_{\text{rms}} - \boldsymbol{\alpha}\cdot z. \qquad (2)$$

Динамический диапазон для заданной длительности импульса $\tau$ и времени усреднения $t$ определяется мощностью передатчика в импульсе $\mathbf{p}_p$, пороговой чувствительностью приемника $\mathbf{p}_r$, потерями в ответвителе $\boldsymbol{\eta}$, коэффициентом обратного рэлеевского рассеяния $\mathbf{q}$ и выигрышем в отношении сигнал/шум $\mathbf{b}$ при некогерентном усреднении отраженных импульсов в точке отсчета рефлектограммы при периоде их следования $T$ соотношением

$$\mathbf{D}_{\text{rms}} = \left(\mathbf{p}_p - \boldsymbol{\eta} + \mathbf{q} - \mathbf{p}_r + \mathbf{b}\right)/2 = \left(\boldsymbol{\rho}_1 + \mathbf{b}\right)/2, \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{\rho}_1$ – отношение сигнал/шум для одного отсчета (импульса) в одной точке рефлектограммы без накопления:

$$\mathbf{b} = 10\lg\sqrt{N} = 5\lg\left(0.9\frac{t}{T}\right); \quad T = 2\frac{L_R}{v_r}, \qquad (4)$$

где $N$ – количество отсчетов за время усреднения $t$ при периоде следования зондирующих импульсов $T$, $L_R$ – верхняя граница диапазона измеряемой длины, $v_r$ – скорость распространения света в волокне.

Для коэффициента рэлеевского рассеяния обычно используется оценка

$$\mathbf{q} = -80\ \text{дБ} + 10\lg\left(\frac{\tau\,[\text{ns}]}{1\,[\text{ns}]}\right). \qquad (5)$$

При этом с учетом формул (2)–(4) динамический диапазон будет определяться через максимальный динамический диапазон рефлектометра, являющийся его паспортным параметром, по формуле

$$\mathbf{D}_{\text{rms}} = \mathbf{D}_{\text{rms max}} - 5\lg\left(\frac{\tau_{\max}}{\tau}\right) - 2.5\lg\left(\frac{t_{\max}}{t}\right), \qquad (6)$$

где $\tau_{\max}$ и $t_{\max}$ – максимальные значения длительности импульса и времени усреднения соответ-

ственно, при которых обычно специфицировано $\mathbf{D}_{\text{rms max}}$.

Пользователю доступен только выбор длительности импульса, времени усреднения и длины измеряемого участка, что меняет период следования импульсов, при этом считается, что соотношение (5) не зависит от $L_R$, поскольку считается, что число точек пространственной выборки за период $T$ не меняется за счет изменения шага выборки.

Далее, при вычислении на основании данных отсчетов рефлектограммы значений коэффициента затухания его среднеквадратического отклонения будут определяться для методов двух точек (2PA) и наименьших квадратов (LSA) следующими формулами [2]:

$$\sigma_{\text{2PA}} = \frac{\sigma_R\sqrt{2}}{L}; \quad \sigma_{\text{LSA}} = \frac{\sigma_R 2\sqrt{3}}{L\sqrt{N_L}}, \tag{7}$$

где $N_L$ – число пространственных точек отсчета рефлектограммы, участвующих в усреднении на измеряемом участке трассы длиной $L$.

Ввиду малости отношения $\Delta\mathbf{B}/\mathbf{B}$, с учетом близкого к нормальному распределению шума, равенство (6) можно записать в виде

$$\Delta\boldsymbol{\alpha}_{\text{2PA}} = \frac{2\Delta\mathbf{B}\sqrt{2}}{L}; \quad \Delta\boldsymbol{\alpha}_{\text{LSA}} = \frac{2\Delta\mathbf{B}2\sqrt{3}}{L\sqrt{N_L}}. \tag{8}$$

Таким образом, формулы (1), (2), (6), (8), используемые в совокупности, позволяют определить шумовую погрешность измерения коэффициента затухания по заданным параметрам измерения.

Кроме шумовой погрешности необходимо рассмотреть иные составляющие погрешности, в частности, шумы когерентности, которые, согласно работе [1], определяются как результат взаимодействия импульса рефлектометра с неоднородностями волокна.

Длина когерентности лазерного излучения определяется через длину волны излучения $\lambda$ и ширину спектральной линии $\Delta\lambda$ с учетом показателя преломления $n$ формулой $L_{\text{c}} = \lambda^2/\Delta\lambda n$. Число некогерентных центров рассеяния в волокне для одномодового лазера для импульса света с длительностью $\tau$ равно отношению полуширины длительности импульса в волокне $l_p/2 = \tau v_r/2$ к длине когерентности $L_{\text{c}}$ излучения лазера. Для многомодового лазера Фабри–Перо, излучающего на $m$ продольных модах, число таких центров будет в $m$ раз больше: $N = m\tau v_r/2L_{\text{c}}$. При относительной флуктуации мощности порядка $1/\sqrt{N}$ амплитуда когерентных шумов по шкале рефлектометра будет равна

$$\Delta\mathbf{B} = 5\lg\left(\frac{P_{\text{s}} + P_{\text{n}}}{P_{\text{s}}}\right) = 5\lg\left(1 + \frac{1}{\sqrt{N}}\right) \approx \frac{2}{\sqrt{N}}. \tag{9}$$

Заметим, что данное соотношение также выполняется для достаточной величины отношения сигнал/шум.

Обозначая через $\Delta\mathbf{B}_1$ спонтанные шумы и через $\Delta\mathbf{B}_2$ когерентные шумы, в предположениях, предваряющих равенства (8), получим результирующую полуширину шумовой дорожки:

$$\Delta\mathbf{B} = \sqrt{\Delta\mathbf{B}_1^2 + \Delta\mathbf{B}_2^2}. \tag{10}$$

Далее используем формулу (8) для нахождения общей погрешности.

## УТОЧНЕНИЕ ОЦЕНОК ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Рассмотрим суть используемых формул, условия их применения и ограничения, которые действуют при измерении, на основании теории оптимального приема радиосигналов.

Начнем с самого важного: число точек $N_L$, участвующих в усреднении и улучшающих погрешность измерения, по сути – число статистически независимых отсчетов рефлектограммы. Это является прямым следствием свойства стационарных эргодических процессов [7], согласно которому дисперсия среднего значения процесса за период наблюдения (усреднения) $\sigma^2(T)$ определяется в общем случае характером корреляции между отсчетами. При продолжительном времени наблюдения $T \gg \tau_c$, где $\tau_c$ – интервал корреляции, зависимость выражается оценкой

$$\sigma^2(T) \le \sigma_R^2 \frac{2\tau_c}{T} = \frac{\sigma_R^2}{N_e}, \tag{11}$$

где $N_e = T/2\tau_c$ – число некоррелированных отсчетов случайного процесса, интервал корреляции определяется как

$$\tau_c = \int_0^\infty |\rho(\tau)|\, d\tau,$$

где $\rho(\tau)$ – коэффициент автокорреляции.

При этом, если $T \ll \tau_c$, то $\sigma^2(T) \approx \sigma_R^2$, т.е. усредненная оценка равна точечной и усреднения на коррелированном отрезке за время наблюдения не происходит. При промежуточных значениях в соотношении интервала корреляции и интервала наблюдения дисперсия оценки при усреднении зависит от характера корреляционной функции.

Что касается числа некоррелированных отсчетов, то, как следует из построенных по экспериментальным данным значений коэффициентов




**Рис. 1.** Коэффициенты автокорреляции рефлектограмм в зависимости от относительного расстояния, нормированного к пространственной длительности зондирующего импульса, для значений длительности импульса 30 нс, 100 нс, 275 нс.

автокорреляции рефлектограмм $\rho(x)$, где $x = L/l_p$, $l_p$ – пространственная длительность импульса, для $\tau$ равных 30 нс, 100 нс, 275 нс (рис. 1) пространственный интервал корреляции $l_c$ близок к $l_p$, при этом выполняется соотношение $l_c = (0.5 - 2)l_p$ для разных длительностей импульсов. Число независимых отсчетов рефлектограммы при усреднении

$$N_e = \frac{L}{2l_c}, \tag{12}$$

где $l_c \approx l_p$ (интервал корреляции принят равным длительности импульса), при этом корректное вычисление погрешности требует подстановки в формулу (8) $N_L = N_e$, что существенно увеличивает погрешность оценки коэффициента затухания с учетом уменьшения количества отсчетов.

Согласно теории оптимального приема [7], взаимодействие двух и более гармонических сигналов со случайными фазами порождает узкополосный случайный процесс, флуктуирующий по амплитуде и фазе, с огибающей, амплитуда которой распределена по закону Рэлея–Райса [7], с параметром сигнал/шум, при больших значениях последнего переходящему в нормальный закон. Амплитудное детектирование такого сигнала является эффективным при значении сигнал/шум (по амплитуде) большем 3, т.е. минимальное значение $\rho_1 \approx 10$ дБ.

Оптимальной оценкой амплитуды такого сигнала при его измерении является оценка, полученная на основании максимума функции правдоподобия для сигнала со случайной начальной фазой [7]:

$$a^* = \frac{2Z}{\alpha}\frac{I_1(2a^*Z/N_0)}{I_0(2a^*Z/N_0)}, \tag{13}$$

где $Z$ – значение огибающей,

$$\alpha = \int_0^T S_1^2(t)\,dt$$

– удвоенная энергия сигнала с единичной амплитудой, $I_0(x)$ и $I_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно, а $2a^*Z/N_0 = \rho$ – отношение сигнал/шум. Множитель $k = I_1(x)/I_0(x)$ нелинейно зависит от аргумента и изменяется от 0 до $\infty$, причем при $x \gg 1$ мы имеем $k \approx 1$, а при значениях $x < 1$ имеем $k \approx x/2$. Таким образом, при больших отношениях сигнал/шум для оценки справедливо равенство $a^* \approx 2Z/\alpha$, при этом оценка совпадает с оценкой нефлуктуирующего сигнала. Это, собственно, позволяет предполагать коррелированность отсчетов рефлектограммы в пределах импульса при достаточных отношениях сигнал/шум. При небольших отношениях сигнал/шум оценка зависит от самого параметра, а при $x < 1$ она полностью теряет достоверность и смысл. Границей приближения множителя к единице можно считать значение $x = \rho > 10$ ($k \approx 0.95$), что для отношения сигнал/шум приводит к следующему требованию превышения сигнала над шумом: $\boldsymbol{\rho}_1 \geq 10$ дБ. Важно также отметить и зависимость характера корреляции от отношения сигнал/шум.

Рассмотрим типовые параметры рефлектометра, входящие в указанные выше формулы, и ограничения, которые действуют при измерении на коротких длинах волокон на основании теории оптимального приема. Типовыми параметрами для рефлектометра с максимальным динамическим диапазоном 42 дБ являются $\mathbf{p}_p = 20$ дБм; $\boldsymbol{\eta} = 6$ дБ; $\mathbf{p}_r = -80$ дБм [1], при этом для непротяженных трасс (без учета затухания) превышение сигнала над шумом для единичного импульса (без учета накопления) согласно формуле (3) составит

$$\boldsymbol{\rho}_1 = 14 \text{ дБ} + 10\lg\left(\frac{\tau\,[\text{ns}]}{1\,[\text{ns}]}\right), \tag{14}$$

что даже для коротких импульсов соответствует оптимальным условиям приема таких сигналов. При этом, например, для типично применяемого импульса $\tau = 100$ нс и времени усреднения $t = 15$ с для указанных значений с учетом того, что максимальный динамический диапазон указывается при значениях длительности импульса и времени усреднения $\tau_{\max} = 20$ мкс, $t_{\max} = 180$ с, в начале трассы отношение сигнал/шум, согласно формуле (2) составит $\mathbf{B} = \mathbf{D}_{\text{rms}} = 27.8$ дБ, при этом ширина шумовой дорожки $2\Delta\mathbf{B}$ согласно формуле (1) будет на два порядка меньше, чем 0.001 дБ (как

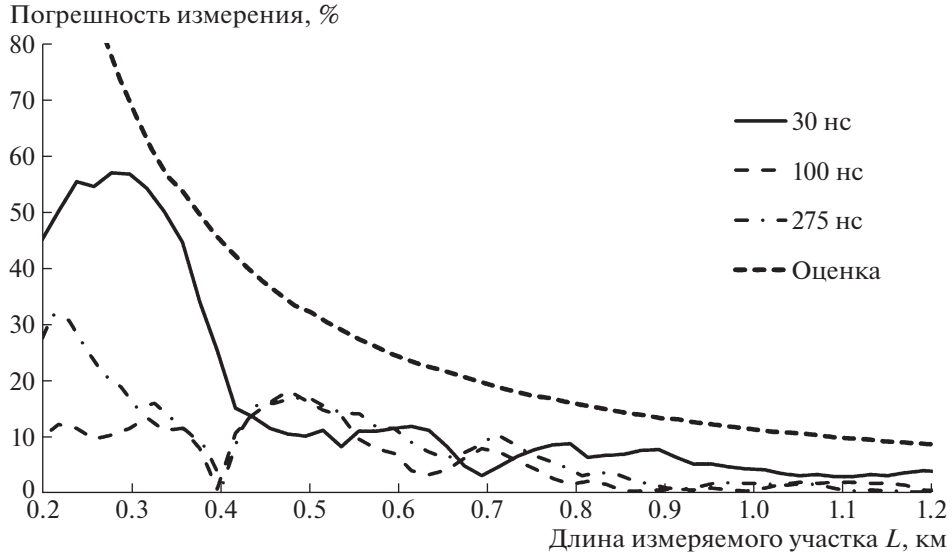



**Рис. 2.** Зависимость относительной ошибки измерения коэффициента затухания по МНК от длины измеряемого участка для рефлектограмм при длительностях импульса 30 нс, 100 нс, 275 нс и оценка погрешности.

минимально фиксируемого значения), что на порядок меньше наблюдаемого практически.

Для измерений участка протяженностью $L = 1$ км при длительности импульса $\tau = 100$ нс, соответствующей пространственной длине импульса $l_p = 10$ м, получим, согласно формуле (12), $N_e = 50$, что хоть и существенно меньше общего числа отсчетов $N_L$ (следующих через интервал в единицы метров и даже менее в зависимости от измеряемой длины), но является достаточным для усреднения. Однако на практике подобного не наблюдается.

Следовательно, шумовая погрешность при измерении коротких участков не является основной (в отличие от протяженных трасс).

Для оценки шумов когерентности согласно формуле (9) для $n \approx 1.46$ (показатель преломления кварцевого стекла) при $\lambda = 1550$ нм и $\Delta\lambda \approx 0.2$ нм получаем, что $L_c = 8.2$ мм, и при количестве мод $m = 10$, $v_r/2 = 10$ м/нс, для $\tau = 100$ нс получим $N = 12500$ и $2\Delta\mathbf{B} \approx 0.04$ дБ, что сопоставимо с практически наблюдаемыми величинами.

Что касается верности формулы (12), то, осуществляя подстановку вычисленных значений $2\Delta\mathbf{B} = 0.04$ дБ, получим для $L = 1$ км с учетом числа некоррелированных расчетов $N_e = 50$, $\Delta\boldsymbol{\alpha}_{\text{LSA}} = 0.019$ дБ/км, что дает сопоставимую оценку относительно фактической для большинства случаев $\Delta\boldsymbol{\alpha}_{\text{LSA}} \le 0.02$ дБ/км. Отметим, что несмотря на то, что наблюдаются и большие значения $2\Delta\mathbf{B}$, вычисленная оценка, тем не менее, выполняет роль предельной погрешности. Это можно наблюдать на экспериментально полученных зависимостях ошибки измерения от измеряемой длины, на которых также отображена оценка погрешности, исходя из учета когерентных шумов (рис. 2). Важно отметить, что данная оценка не зависит от длительности импульса $\tau$, поскольку это значение при его увеличении, с одной стороны, увеличивает величину шумов когерентности, а с другой стороны, также увеличивает число отсчетов усреднения.

Вытекающее из условия (13) ограничение на отношение сигнал/шум $\boldsymbol{\rho}_1 \ge 10$ дБ, согласно формулам (3), (5), (6), при недостаточном динамическом диапазоне накладывает ограничение на выбор импульса приемлемой длительности, который, например, для рефлектометра с этим параметром не более 30 дБ должен быть не менее 10–20 нс. Верхний же предел длительности импульса определяется достаточным количеством пространственных интервалов для получения независимых отсчетов при усреднении и оценивается в 100 нс.

Таким образом, данная модель достаточно адекватно описывает практическую ситуацию для измеряемых длин от 0.5 км и позволяет по специфицированным характеристикам рефлектометра и выбранным режимам измерения для заданной длины дать оценку погрешности измерения коэффициента затухания при условии наложенных ограничений на выбор параметров измерения.

## УТОЧНЕНИЕ ОЦЕНОК С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ

Исследование практической погрешности измерений для более коротких (менее 0.5 км) длин

измеряемых участков для одномодовых волокон на длине волны 1550 нм в то же время показывает, что приведенная выше модель не в полной мере учитывает флуктуации ошибки и скорее описывает поведение огибающей кривой зависимости ошибки от расстояния (рис. 2). На экспериментально полученных зависимостях ошибки измерения от измеряемой длины наблюдается немонотонное поведение ошибки, обусловленное наличием флуктуаций сигнала, при этом имеется зависимость от длительности зондирующих импульсов. Также можно обратить внимание на нестрогую зависимость величины интервала корреляции от длительности импульса (рис. 1).

С целью объяснения этих флуктуаций можно предположить, что они обусловлены явлениями биений при двулучепреломлении в оптическом волокне [1, 5], при этом их влияние может быть снижено путем использования произвольного изменения состояния поляризации, позволяющего практически вдвое снизить ширину шумовой дорожки и, следовательно, погрешность измерения [2, 4]. Тем не менее, наличие флуктуаций ошибки и их зависимость от длительности импульса это не объясняет. Объяснение можно получить, если дополнить модель флуктуаций из следующих соображений, известных в теории радиотехнических систем.

Можно полагать, что данная задача имеет по своей природе прямую аналогию с задачей радиолокации по накоплению и обнаружению импульсного сигнала от движущейся цели, сигнал от которой представляет собой совокупность так называемых блестящих точек со случайно меняющимися фазами [8]. При этом применительно к нашему случаю блестящими точками являются рэлеевские центры рассеяния в пределах разрешаемого участка волокна, обусловленные неоднородностями его структуры. Результирующий сигнал на выходе детектора в данном случае представляет собой вектор со случайно изменяющимися амплитудой и фазой, и эта ситуация в принципе описана выше. Однако данная модель не применима адекватно при наличии в сигнале замираний (медленных флуктуаций), поскольку нарушаются на продолжительное время допущения модели (значительное превышение сигнала над шумом). В радиолокационном случае замирания вызваны медленным изменением ракурса цели, в нашем случае они могут быть обусловлены влиянием двулучепереломления. Биения двулучепреломления имеют период 5–30 м и сопоставимы с пространственной длительностью измерительных импульсов (2–10 м для наиболее широко используемых импульсов в диапазоне 20–100 нс). Также возможен и вклад в явление периодических вариаций модового пятна. При этом предлагаемые статистические модели описания таких явлений замирания в радиолокации достаточно сложны, и они не нашли широкого применения.

Для решения задачи-прототипа (определения требуемого отношения сигнал/шум для радиолокационного обнаружения цели в условиях приема пачки некогерентных флуктуирующих импульсов (от когерентных, в общем случае, импульсов локатора) Бартоном была предложена сравнительно простая эмпирическая методика расчетов [8], доказавшая хорошую точность и эффективность на практике. В соответствии с ней требуемое для обнаружения отношение сигнал/шум $\boldsymbol{\rho}_e$ зависит от параметров (вероятности правильного обнаружения $D$ и ложной тревоги $F$), и для обнаружения пачки импульсов оно рассчитывается на основе требуемого соотношения для одного импульса $\boldsymbol{\rho}_1(D,F)$ с учетом эффекта накопления импульсов и наличия дополнительных потерь (флуктуационных и интегрирования).

Потери некогерентного интегрирования $\mathbf{L}_i(\boldsymbol{\rho}_1, N)$ зависят как от $\boldsymbol{\rho}_1(D,F)$, так и от общего числа импульсов $N$. Флуктуационные потери зависят от числа независимых значений сигнала $N_e$ из общего числа $N$:

$$\mathbf{L}_f(D,F,N_e) = \mathbf{L}_{f0}(D,F)[\text{дБ}]/N_e; \qquad (15)$$

где $N_e = [1 + T_1/\tau_c]$, $T_1$ – время обнаружения, $\tau_c$ – интервал корреляции сигнала, $T_1 = (1+N)T_{pr}$, $T_{pr}$ – период следования импульсов.

При этом все функционально зависимые величины определяются по номограммам, представляющим собой семейства кривых, построенных расчетно-эмпирическим путем.

Представляется, что наличие потерь интегрирования и флуктуационных потерь, а также подход к их расчету в системах накопления импульсных флуктуирующих сигналов в целом носит универсальный характер, поскольку охватывает все степени когерентности сигнала и коррелированности флуктуаций. Подход соответствует решаемой задаче измерения амплитуды сигнала, поскольку задача обнаружения сигнала по критерию максимума апостериорной плотности его вероятности эквивалентна с точностью до постоянного члена задаче измерения энергетического параметра сигнала [7] и может быть расценена как задача интервального оценивания параметра при заданной вероятности ложных тревог (шумовых выбросов). Таким образом, требования учета необходимой добавки к отношению сигнал/шум для сигнала с замираниями относительно сигнала без флуктуаций в задаче обнаружения полностью распространяются на нашу задачу измерения с требуемой интервальной оценкой.

В нашем случае, поскольку речь идет об изначально некогерентных импульсах, потери интегри-

рования когерентного (накопления некогерентного) сигнала в первом приближении не зависят от отношения сигнал/шум и имеют простую линейную форму в логарифмическом масштабе, что соответствует формуле (9); потери выглядят как $\mathbf{L}_i(N) = 5\lg N$ и уже учтены в модели. В общем случае, вероятно, следует рассматривать модель с частичной когерентностью импульса, это может уточнить оценку по формуле (9) за счет уменьшения потерь интегрирования.

Флуктуационные потери могут быть ориентировочно учтены в свете того, что нас интересуют случаи высокой достоверности измерения (обнаружения) с вероятностью в интервале не менее 0.95–0.98 при относительно невысокой вероятности ложных тревог 0.01. При этом флуктуационные потери составляют $\mathbf{L}_{f0}(D,F) = 9$–$12$ дБ. Число независимых импульсов, очевидно, в этом случае надо определять на интервале биений двулучепреломления как $N_e = L_c/2l_c$, и оно будет варьироваться в широких пределах для указанных параметров от 1 до 15. Принимая для худшего случая $N_e = 1$, получим, что добавка к отношению сигнал/шум, позволяющая нивелировать влияние флуктуаций при замираниях сигнала, составляет до 12 дБ, что является весьма существенным и уже накладывает жесткие ограничения на величину динамического диапазона рефлектометра и минимальную длительность импульса.

Так, для заданного примера с рефлектометром с динамическим диапазоном 42 дБ, согласно формуле (14), уже требуется ограничить длительность импульса снизу величиной 20 нс, что обеспечит расчетное значение $\boldsymbol{\rho}_1 = 27$ дБ, что с запасом больше требуемого расчетного значения 22 дБ. Увеличение длительности импульса, в свою очередь, уменьшает число точек усреднения. Для рефлектометров с меньшими динамическими диапазонами придется довольствоваться большими длительностями импульсов и, соответственно, меньшим числом импульсов измерения. Таким образом, выбор оптимальной длительности импульса обусловлен компромиссом между увеличением отношения сигнал/шум и уменьшением числа независимых отсчетов усреднения. Исходя из сказанного, желательно использовать наименьшую из возможных длительностей импульсов при наибольшем динамическом диапазоне, обеспечиваемом рефлектометром, т.е. вопреки расхожему мнению применять такие рефлектометры для измерения параметров не только протяженных трасс, но и для их коротких участков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью методов статистической радиотехники и экспериментальных данных показано, что величина погрешности измерения коэффициента затухания определяется числом некоррелированных отсчетов рефлектограммы, используемых для усреднения, с учетом ограничений на отношение сигнал/шум на входе приемника. Приведены формулы, выражающие погрешность измерения через параметры прибора и режимы измерения.

Указано на коррелированность отсчетов рефлектограммы как на принципиальную причину увеличения погрешности измерения – как в пределах измерительного импульса, так и в пределах биений двулучепреломления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Листвин А.В., Листвин В.Н.* Рефлектометрия оптических волокон. Москва. ЛЕСАРарт. 2005.
2. *Таранов М.А., Горшков Б.Г., Жуков К.М., Гринштейн М.Л.* // ПТЭ. 2020. № 4. С. 90. https://doi.org/10.31857/S0032816220040199
3. *Фролов И.В.* II Всероссийская научно-практическая конференция “Оптическая рефлектометрия 2018”, презентации секционных докладов. Пермь. 2018. С. 48. https://or-2018.permsc.ru/assets/files/presentations2018.rar
4. *Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М.* // КЭ. 2019. Т. 49. С. 581
5. *Тараскин Е.А., Фролов И.В.* // ВКВО-2021. Сборник тезисов докладов. Пермь. 2021. С. 357. https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-357-358
6. ГОСТ Р 52266-2020. Оптические кабели. Общие технические условия.
7. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. Москва: Советское Радио. 1966.
8. *Barton D.K.* Simple Procedures for Radar Detection Calculations. IEEE Trans. 1969. AES-5. № 5. P. 837. *Бартон* // Зарубежная радиоэлектроника. 1970. № 5. С. 3.