

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК: 681.787+535.41+535.391

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ
КОГЕРЕНТНОГО ПРИЕМА¹**

© 2026 г. Д. П. Куничкин*, М. Ю. Плотников

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики (ИТМО)*

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49

**E-mail: dpkunichkin@itmo.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026 г.

После доработки 10.06.2026 г.

Принята к публикации 09.07.2026 г.

Представлены теоретические и экспериментальные результаты оценки дальности работы распределенной акустооптической системы на основе схемы когерентного приема с балансным фотодетектором с различным пространственным разрешением. Представлен метод расчета предельной дальности работы распределенной акустооптической системы с учетом длительности зондирующих импульсов оптического излучения и квантового предела чувствительности балансного фотодетектора. Экспериментально показано, что для конфигурации распределенной акустооптической системы на основе схемы когерентного приема с балансным фотодетектором предельная дальность работы распределенной акустооптической системы составляет от 87.9 до 116 км при длительностях импульсов оптического излучения от 1 до 10 мкс.

Ключевые слова: распределенная акустооптическая система, когерентный прием, дальность работы, рассеяние Рэлея, гетеродинный прием, демодуляция фазы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные акустооптические системы (Distributed Acoustic Systems – DAS) используются для мониторинга протяженных инфраструктурных объектов, таких как мосты, трубопроводы и волоконно-оптические линии связи [1, 2]. Подобные системы также активно используются для построения систем охраны периметра [3]. Они могут использовать существующие телекоммуникационные оптоволоконные кабели в качестве распределенного

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

чувствительного элемента, обеспечивая акустический мониторинг протяженных инфраструктурных объектов в режиме реального времени на больших расстояниях [4].

Распределенные акустооптические системы работают по принципу фазочувствительной оптической рефлектометрии во временной области (ф-OTDR), обнаруживая акустические и вибрационные воздействия на чувствительное оптическое волокно путем демодуляции фазы обратного рассеяния Рэлея [4, 5]. Это позволяет подобным системам регистрировать и идентифицировать такие события, как утечки из трубопроводов, попытки разрушения инфраструктуры или движение грунта с заданным пространственным разрешением.

Одним из наиболее важных параметров распределенных акустооптических систем является дальность их работы, которая определяет максимальную возможную протяженность распределенных акустических систем мониторинга. В настоящее время существует множество конфигураций распределенных акустооптических систем, каждая из которых обладает своими особенностями и областями применения [5]. В настоящей статье исследуется конфигурация распределенной акустооптической системы на основе схемы когерентного приема с балансным фотодетектором [6]. При таком подходе на фотоприемнике регистрируется результат интерференции оптических сигналов локального осциллятора и обратного рассеяния Рэлея, что позволяет реализовать гетеродинный прием и демодуляцию фазы оптического излучения от исследуемого оптического волокна.

Еще одним важным параметром распределенных акустооптических систем является пространственное разрешение. Оно определяет минимальное расстояние между двумя независимыми точками измерения вдоль исследуемого оптического волокна, на котором система может различить два отдельных события или зарегистрировать изменение фазового сигнала. Пространственное разрешение в такой схеме регулируется за счет изменения длительности зондирующих импульсов оптического излучения. В свою очередь, уровень обратного рэлеевского рассеяния, определяющий дальность работы распределенных акустооптических систем, зависит от длительности зондирующих импульсов оптического излучения.

Таким образом, дальность работы и пространственное разрешение распределенных акустооптических систем являются связанными параметрами, а исследование дальности работы исследуемой распределенной акустооптической системы при различных длительностях импульсов оптического излучения является актуальной задачей.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Структурная схема экспериментального макета DAS-системы изображена на рис. 1. Схема работает следующим образом. Непрерывное когерентное оптическое излучение, генерируемое источником излучения (ИИ) 1, поступает на волоконный X-разветвитель. За источником излучения располагается оптический изолятор (ОИ) 2, препятствующий попаданию паразитных обратных отражений в источник излучения. Далее оптическое излучение делится на два оптических пути: один путь, функционирующий в качестве локального осциллятора (ЛО), заводит оптическое излучение непосредственно на X-разветвитель перед балансным фотоприемником 6. Перестраиваемый оптический attenuator 4 позволяет при необходимости обеспечивать регулировку среднего уровня мощности оптического излучения локального осциллятора. Параллельно второй путь направляет оптическое излучение на акустооптический модулятор (АОМ) 5, в котором оно преобразуется в импульсную последовательность с регулируемыми временными параметрами, заданными длительностью и периодом следования, который, в свою очередь, определяется длиной исследуемого оптического волокна. Одновременно АОМ осуществляет сдвиг частоты проходящего через него оптического излучения на десятки мегагерц относительно исходной частоты оптического излучения. В результате сформированные оптические импульсы со смещенной оптической частотой проходят через выходной X-разветвитель и направляются в исследуемое оптическое волокно. В процессе распространения по оптическому волокну 9 каждый импульс взаимодействует с микроскопическими флуктуациями показателя преломления, что приводит к возникновению сигнала обратного рэлеевского рассеяния 8 [7].

Рис. 1. Структурная схема действующего образца распределенного волоконно-оптического датчика

Оптический сигнал обратного рэлеевского рассеяния поступает назад в схему через X-разветвитель и интерферирует с оптическим излучением от локального осциллятора на X-разветвителе перед балансным фотоприемником [8]. В результате интерференционный сигнал, выдаваемый балансным фотоприемником после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 7, можно представить следующим образом [8, 9] :

$$P(t) = P_o + P_r + 2\sqrt{P_o P_r} \cos(\Delta\phi(t)), \quad (1)$$

где t [с] – время, $P(t)$ [Вт] – мощность сигнала, пришедшего на балансный, P_o [Вт] – мощность локального осциллятора схемы гетеродинного приема, P_r [Вт] – мощность рассеяния Рэлея, $\Delta\phi(t)$ [рад] – фазовый сдвиг интерференционных сигналов.

В этом выражении под косинусом записана разность фаз между оптическим излучением локального осциллятора и обратным рэлеевским рассеянием, которую можно представить следующим образом:

$$\Delta\varphi(t)[\text{рад}] = 2\pi f_{\text{aom}}t + \theta(t), \quad (2)$$

где f_{aom} [Гц] – сдвиг частоты оптического излучения, обусловленный акустооптической модуляцией, $\theta(t)$ [рад] – разность фаз, содержащая измеряемый сигнал, которую требуется восстановить для анализа и дальнейшей обработки.

В качестве алгоритма демодуляции интерференционного сигнала в рассматриваемой измерительной системе используется метод гетеродинной демодуляции [10,11], схема которого представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема демодуляции распределенного волоконно-оптического датчика

При демодуляции сигнала согласно рис. 2 осуществляется ряд математических преобразований, при которых выделяется разность фаз между оптическим излучением локального осциллятора и обратным рэлеевским рассеянием следующим образом:

$$\theta(t)[\text{рад}] = \arctg \frac{S_1(t)}{S_2(t)}, \quad (3)$$

где $S_1(t)$ и $S_2(t)$ – квадратурные компоненты, получаемые из интерференционного сигнала (1) в результате перемножения на сигналы от опорного генератора ОГ 2 после фильтрации низких частот 3.

Поскольку в качестве измеряемых сигналов нас интересуют только локальные сигналы фазы обратного рэлеевского рассеяния с различных участков оптического волокна, для их определения необходимо дополнительно рассчитать разницы между соседними временными отсчетами фазы:

$$\Delta\varphi(t_1, t_2)[\text{рад}] = \theta(t_1) - \theta(t_2). \quad (4)$$

Также следует отметить, что поскольку изображенная на рис. 1 схема представляет собой распределенный волоконно-оптический интерферометр, все его части подвержены влиянию внешних акустических и вибрационных шумов и помех. По этой причине волоконно-оптические компоненты распределенной акустооптической системы, расположенные в приемной части оборудования, желательно изолировать от внешних воздействий [12, 13].

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваемая распределенная акустооптическая система построена на основе схемы когерентного приема, и для расчета дальности ее работы можно воспользоваться формулой одностороннего динамического диапазона (SWDR – Single Way Dynamic Range) когерентного оптического рефлектометра [9, 14]:

$$\text{SWDR} = \frac{[P_0 + R_R - L_c - P_{\min} + \frac{\text{SNIR}_{\text{ave}}}{2}]}{2} - M_p \quad (5)$$

где P_0 [дБм] – пиковая (выходная) мощность зондирующих импульсов, R_R [дБ] – коэффициент обратного рэлеевского рассеяния, L_c [дБ] – потери в оптической схеме рефлектометра, $P_{\min}$ [дБм] – минимальная детектируемая мощность фотоприемника при отношении сигнал/шум, равном единице, SNIR_{ave} – выигрыш в отношении сигнал/шум за счет многократного усреднения одиночных рефлектограмм, M_p [дБ] – запас за счет использования пикового значения шума рефлектограмм.

Односторонний динамический диапазон SWDR показывает, какое затухание оптический сигнал может преодолеть в прямом направлении (от прибора до точки измерения). С учетом этого определения дальность работы когерентного оптического рефлектометра можно определить по формуле

$$L[\text{км}] = \text{SWDR}/\alpha, \quad (6)$$

где SWDR [дБ] – односторонний динамический диапазон, α [дБ/км] – оптические потери в исследуемом оптическом волокне.

Принцип работы распределенной акустооптической системы не предусматривает усреднения рефлектограмм [15] и не требует учета пикового значения шума [16], поэтому для расчета дальности работы распределенной акустооптической системы формулу (5) можно упростить:

$$\text{SWDR}_{\text{DAS}} [\text{дБ}] = \frac{[P_0 + R_R - L_c - P_{\min}]}{2}. \quad (7)$$

Кроме того, необходимо учитывать, что устойчивая работа алгоритма демодуляции фазы распределенной акустооптической системы требует достаточного уровня отношения сигнал/шум интерференционного сигнала. При низком отношении сигнал/шум интерференционного сигнала значительно возрастет уровень шумов в демодулированных фазовых сигналах, вследствие чего измеряемые виброакустические воздействия становятся неразличимыми. В литературе [17, 18] приводятся следующие оценки: для устойчивой

фазовой демодуляции отношение сигнал/шум интерференционного сигнала должно составлять не менее 10 дБ. Таким образом, в выражение (3) можно внести запас по отношению сигнал/шум интерференционного сигнала (SNR_{add}) следующим образом:

$$SWDR_{DAS} [дБ] = \frac{[P_0 + R_R - L_c - P_{min} + SNR_{add}]}{2}. \quad (8)$$

Для расчета коэффициента обратного рэлеевского рассеяния можно воспользоваться выражением [7]

$$R_R [дБ] = 80 + 10 \lg(\tau [нс]/1 нс). \quad (9)$$

С учетом гетеродинного приема, увеличивающего полосу B регистрируемых сигналов оптического излучения в два раза, квантовый предел чувствительности балансного фотодетектора определяется следующим образом [9, 14]:

$$P_{min} [Вт] = 2Bh\nu/\eta, \quad (10)$$

где $h \approx 6.6265 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, ν [Гц] — частота оптического сигнала, B [Гц] — полоса пропускания фотоприемника, $\eta=0.8$ — квантовая эффективность фотодетектора.

Полоса пропускания фотодетектора, требуемая для регистрации импульсов оптического излучения заданной длительности τ , определяется как $1/\tau$ [9, 14]. В распределенной акустооптической системе она может как подстраиваться под текущую длительность зондирующих импульсов, так и быть фиксированной, настроенной под их минимальную длительность. В рассматриваемой распределенной акустооптической системе полоса пропускания фотодетектора была фиксирована для длительности зондирующих импульсов, равных 1 мкс. В этом случае квантовый предел чувствительности балансного фотодетектора, достигаемый при установке оптимальной мощности оптического излучения локального осциллятора, составляет около 95 дБм.

Таким образом, при параметрах измерений $P_0 = 10$ дБм, $L_c = 11.5$ дБ, $SNR_{add} = 10$ дБ при длительностях импульсов оптического излучения 1, 3 и 10 мкс в соответствии с формулой (8) можно получить расчетные значения одностороннего динамического диапазона, равные 16.7, 19.2 и 21.7 дБ соответственно. При уровне потерь оптического излучения в оптическом волокне, равном 0.18 дБ/км, в соответствии с выражением (6) можно оценить теоретическую дальность работы DAS-системы как 92.9, 106.2 и 120.7 км соответственно для длительностей зондирующих импульсов, составляющих 1, 3 и 10 мкс.

4. ОПИСАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В действующем макетном образце распределенной акустооптической системы в качестве источника излучения использовался одночастотный эрбиевый волоконный лазер CoSF-D Connet с шириной полосы около 1 кГц и длиной волны $\lambda=1558.98$ нм. В схеме макета использовалось два спаренных АОМ (CSRayzer), сдвигающих оптическую частоту проходящего излучения суммарно на 10 МГц. Это позволяло существенно снизить требования к полосе пропускания балансного фотоприемника и быстродействию АЦП благодаря относительно невысокой разностной частоте в интерференционном сигнале. Пиковая мощность импульсов оптического излучения на входе в исследуемую линию составляла 10 дБм, в то же время мощность оптического сигнала локального осциллятора была установлена на уровне –6.46 дБм для достижения квантового предела чувствительности балансного фотодетектора и обеспечения максимальной дальности работы распределенной акустооптической системы [14]. Интерференционный сигнал регистрировался балансным фотодетектором (Femto HBPR) и АЦП AD9656 с частотой дискретизации 120 МГц (производитель Analog Devices).

Схема экспериментального стенда для оценки дальности работы распределенной акустооптической системы представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальной установки распределенного волоконно-оптического датчика

Для оценки дальности работы распределенной акустооптической системы была собрана экспериментальная установка, которая включала в себя блок опроса линии: распределенную акустооптическую систему, ПК, на который записывались полученные данные, и исследуемое оптическое волокно, размещенное в непосредственной близости от динамика, который использовался для создания виброакустических сигналов. В качестве волоконной линии была использована катушка с оптическим волокном (стандарта ITU-T G.652) длиной 150 км, волоконная катушка и блок опроса распределенной акустооптической системы были разнесены между собой на расстояние в 50 м для исключения влияния акустических сигналов на измерительную систему. В ходе эксперимента записывалось по 256 рефлектограмм без виброакустического сигнала для оценки уровня собственных шумов системы и по 256 рефлектограмм при воздействии на волокно виброакустического сигнала с частотой 60 Гц. Все измерения проводились для длительностей зондирующих импульсов 1, 3 и 10 мкс, что эквивалентно пространственному разрешению распределенной акустооптической системы 100, 300 и 1000 м.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

После прохождения всех этапов демодуляции согласно схеме, представленной на рис. 2, и вычисления измеряемых фазовых сигналов по формуле (4) были сформированы временные и частотные зависимости измеряемых фазовых сигналов. На рис. 4 полученные фазовые сигналы представлены в единой фазовой диаграмме “водопад” – графической последовательности горизонтально расположенных рефлектограмм [19].

Рис. 4. Измеряемые фазовые сигналы для длительности импульсов оптического излучения 1

Линия 2 показывает теоретическую оценку дальности работы распределенной акустооптической системы, полученную ранее в настоящей работе в соответствии с формулой (8). Она составляет 92.9 км при длительности импульсов оптического излучения 1 мкс. Линия 1 показывает экспериментальную оценку дальности работы РАС, полученную после анализа спектров измеряемых фазовых сигналов (рис. 5). Согласно рис. 5, частота измеряемого фазового сигнала 60 Гц прослеживается в спектре измеряемых фазовых сигналов вплоть до длины волокна порядка 87.9 км при длительности импульсов оптического излучения 1 мкс, что свидетельствует о работоспособности рассматриваемой измерительной системы на этой дистанции. На больших длинах измеряемый сигнал смешивается с собственными шумами исследуемой системы.

Дополнительные спектральные компоненты на более высоких частотах предположительно обусловлены неидеальной передаточной характеристикой динамика, используемого для создания виброакустических сигналов.

Рис. 5. Спектр измеряемых фазовых сигналов для длительности импульса оптического излучения 1 мкс:

На рис. 6 приведены результаты оценки среднего уровня собственных шумов распределенной акустооптической системы в диапазоне от 1 до 240 Гц в зависимости от длины исследуемого оптического волокна.

Рис. 6. Результаты оценки среднего уровня собственных шумов распределенной акустооптической системы

При всех длительностях зондирующих оптических импульсов (1, 3 и 10 мкс) на участке до 50 км уровень шумов составляет в среднем около $10 \text{ мрад/Гц}^{1/2}$. Далее при превышении этой дальности работы наблюдается рост уровня собственных шумов до максимальных значений около $60 \text{ мрад/Гц}^{1/2}$. Поскольку это значение уровня собственных шумов одинаково для всех длительностей импульсов и достигается на дальнем конце исследуемого оптического волокна, можно утверждать, что при такой дальности работы отношение сигнал/шум регистрируемых интерференционных сигналов не позволяет проводить виброакустические измерения, т.е. распределенная акустооптическая система не работоспособна. Если

ограничить уровень шумов значением $50 \text{ мрад/Гц}^{1/2}$, как это показано на рис. 5, то дальность работы распределенной акустооптической системы для длительностей зондирующих оптических импульсов 1 мкс, 3 мкс и 10 мкс составит 87.9 км, 103.4 км, 116.8 км.

На рис. 7 приведены результаты оценки теоретической дальности работы распределенной акустооптической системы, полученные в соответствии с формулой (4), а также результаты экспериментальных измерений.

Рис. 7. Теоретические и экспериментальные результаты оценки дальности работы распределенной акустооптической системы

Согласно рис. 7, полученные значения дальности работы отличаются от теоретического расчета не более чем на 5 км. Указанное расхождение теоретических и экспериментальных оценок дальности работы распределенной акустооптической системы может быть обусловлено условностью выбранного запаса по отношению сигнал/шум интерференционного сигнала SNR_{add} , а также неравномерными или отличными от теоретического значения оптическими потерями в исследуемом оптическом волокне.

При необходимости оценки дальности работы распределенной акустооптической системы при меньшем уровне шумов теоретическая оценка дальности работы по формуле (4) может быть скорректирована за счет использования большего запаса по отношению сигнал/шум.

Для подтверждения дальности работы измерительной системы было исследовано отношение сигнал/шум измеряемых фазовых сигналов. Для этого оценивалось отношение амплитуды спектральной составляющей измеряемого фазового сигнала на частоте 60 Гц к уровню шумов системы. Было выявлено, что отношение сигнал/шум было равно единице (0 дБ) на дальностях работы 88.14 км, 105.49 км и 116.25 км при длительностях импульсов оптического излучения 1 мкс, 3 мкс и 10 мкс соответственно. На большем расстоянии шумы уже превышали измеряемый фазовый сигнал, и он становился неразличим на их фоне (рис. 5).

Дальнейшим направлением работ по улучшению эксплуатационных и шумовых параметров распределенных акустооптических систем является использование в таких системах схемы поляризационного разнесения для подавления поляризационного затухания [20].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были представлены результаты исследования дальности работы распределенной акустооптической системы. При выходной пиковой мощности зондирующих импульсов $P_0 = 10 \text{ дБм}$, потерях в оптической схеме рефлектометра $L_c = 11.5 \text{ дБ}$ и запасе по отношению сигнал/шум интерференционного сигнала $\text{SNR}_{\text{add}} = 10 \text{ дБ}$ теоретическая оценка

дальности работы приведенной системы показала, что максимальная дальность такой системы составляет 92.9, 106.2 и 120.7 км для длительностей импульсов оптического излучения 1, 3 и 10 мкс соответственно.

Экспериментальная оценка дальности работы распределенной акустооптической системы составила 87.9, 103.4 и 116.8 км для длительностей импульсов оптического излучения 1, 3 и 10 мкс соответственно. При этом собственные шумы системы составляли от 10 до 60 мрад/Гц^{1/2} в зависимости от длины исследуемой линии.

Полученная экспериментальная дальность работы также подтверждается количественной оценкой отношения сигнал/шум измеряемого фазового сигнала, по которой дальность работы распределенной акустооптической системы составила 88.14, 105.49 и 116.25 км для длительностей импульсов оптического излучения 1, 3 и 10 мкс соответственно.

Расхождение теоретической и экспериментальной оценок дальности работы системы составило не более 5 км, что может быть связано с условностью выбранного запаса по отношению сигнал/шум интерференционного сигнала SNR_{add} , а также отличием реальных потерь в исследуемом оптическом волокне от теоретически используемого для расчетов значения.

Сравнение дальности работы исследуемой измерительной системы с существующими аналогами распределенных акустооптических систем производителей Silixa “iDAS” и T8 “Периметр” показывает, что при одинаковых длительностях импульсов оптического излучения 100 нс дальность работы аналогов составляет 45 и 75 км соответственно, а дальность для исследуемой измерительной системы равна 62.3 км. Таким образом, полученные результаты соответствуют существующему уровню технологий в рассматриваемой области.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hartog A.H. An introduction to distributed optical fibre sensors. CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
2. Грознов Д.И., Леонов А.В., Наний О.Е., Нестеров Е.Т., Трещиков В.Н. Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 4. С. 51. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21953327>
3. Хачев А.С., Климов Д.А. Системы синхронизации и обработки сигналов. 2021. Т. 12. № 6. С. 84. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47288582>

4. *Chen X., Zou N., Liang L. et al.* Opt. Express. 2021. V. 29. № 9. P. 13115. <https://doi.org/10.1364/OE.418920> .
5. *Shatalin S., Parker T., Farhadiroushan M.* In: Distributed Acoustic Sensing in Geophysics: Methods and Applications, part 1. Ed. by Li.Y., Karrenbach M., Ajo-Franklin J.B. Wiley, 2021. C. 1. <https://doi.org/10.1002/9781119521808.ch1> .
6. *Yang G., Fan X., Wang S., Wang B., Liu Q., He Z.* IEEE Photon. J. 2016. V. 8. № 3. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2552820> .
7. *Листвин А.В., Листвин В.Н.* Рефлектометрия оптических волокон. Москва: ЛЕСАРпт, 2005. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19584432>
8. *Lu Q., Shen Q., Cao Y., Liao S., Peng C.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 2018. V. 66. № 7. P. 1048. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2885364> .
9. *Izumita H.* Highly developed coherent detection OTDR technology and its applications to optical fiber networks monitoring: PhD Thesis. Waseda University, 2008.
10. *Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H.* Proc. SPIE, Smart Structures and Materials. 1994. V. 2191. P. 324. <https://doi.org/10.1117/12.173962> .
11. *Wang C., Qu Y., Tang Y. P.T.* Infrared Phys. Technol. 2015. V. 72. P. 191. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.08.003> .
12. *Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Aleinik A.S., Varlamov A.V.* J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1326. № 1. P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1326/1/012010> .
13. *Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Volkovsky S.A. et al.* Opt. Fiber Technol. 2020. V. 57. P. 102241. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102241> .
14. *Ushanov S.A., Plotnikov M.Y., Volkov A.V. et al.* J. Opt. Technol. 2025. V. 92. № 4. P. 241. <https://doi.org/10.1364/JOT.92.000241> .
15. *Плотников М.Ю., Ушанов С.А., Куничкин Д.П., Волков А.В., Подчуфаров А.Ю.* Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 8. С. 51–61. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-08-51-61> [*Plotnikov M.Yu., Ushanov S.A., Kunichkin D.P., Volkov A.V., Podchufarov A.Yu.* J. Opt. Technol. 2025. V. 92(8). P. 513. <https://doi.org/10.1364/JOT.92.000513> .]
16. *Сандровский А.А., Шарков И.А., Плотников М.Ю., Ушанов С.А., Гончаров Д.Б., Карпов Е.Е.* Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 6. С. 907. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-6-907-912>
17. *Du S., Chen T., Guo C., Duan Y., Wu S., Liang L.* Sensors. MDPI, 2025. Т. 25, № 10. С. 3218. <https://doi.org/10.3390/s25103218>.
18. *Mesiya M.F.* Contemporary communication systems. McGraw-Hill New York, NY, 2013.

19. Наний О.Е., Никитин С.П., Трещиков В.Н. Автометрия. 2023. Т. 59. № 1. С. 87.
<https://doi.org/10.15372/AUT20230109>.
20. Ушанов С.А., Плотников М.Ю., Куничкин Д.П., Волков А.В. Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 8. С. 40. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-08-40-50>
[Ushanov S.A., Plotnikov M.Yu., Kunichkin D.P., Volkov A.V, J. Opt. Technol. 2025. V. 92(8). P. 506. <https://doi.org/10.1364/JOT.92.000506>.]

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структурная схема действующего образца распределенного волоконно-оптического датчика: 1 – источник излучения (ИИ), 2 – оптический изолятор (ОИ), 3 – путь локального осциллятора (ЛО), 4 – перестраиваемый аттенюатор, 5 – акустооптический модулятор (АОМ), 6 – балансный фотодетектор, 7 – аналого-цифровой преобразователь, 8 – обратное рассеяние Рэлея, 9 – исследуемое оптическое волокно
- Рис. 2.** Схема демодуляции распределенного волоконно-оптического датчика: 1 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 2 – опорный генератор (ОГ), 3 – фильтр низких частот, 4 – операция деления, 5 – операция вычисления значений функции арктангенса, 6 – операция нахождения разности смежных значений сигнала фазы, 7 – блок доворачивания фазы, 8 – фильтр высоких частот
- Рис. 3.** Схематическое изображение экспериментальной установки распределенного волоконно-оптического датчика: 1 – распределенная акустооптическая система, 2 – персональный компьютер, 3 – катушка с оптическим волокном длиной 150 км, 4 – динамик с частотой сигнала 60 Гц, 5 – расстояние между элементами схемы 50 м.
- Рис. 4.** Измеряемые фазовые сигналы для длительности импульсов оптического излучения 1 мкс, временная зависимость “водопад”: 1 – результат экспериментальной оценки дальности работы РАС, 2 – результат теоретической оценки дальности работы распределенной акустооптической системы
- Рис. 5.** Спектр измеряемых фазовых сигналов для длительности импульса оптического излучения 1 мкс: 1 – результат экспериментальной оценки дальности работы РАС, 2 – результат теоретической оценки дальности работы РАС
- Рис. 6.** Результаты оценки среднего уровня собственных шумов распределенной акустооптической системы: 1 – дальность работы 87.9 км, 2 – дальность работы 103.4 км, 3 – дальность работы 116.8 км.
- Рис. 7.** Теоретические и экспериментальные результаты оценки дальности работы распределенной акустооптической системы

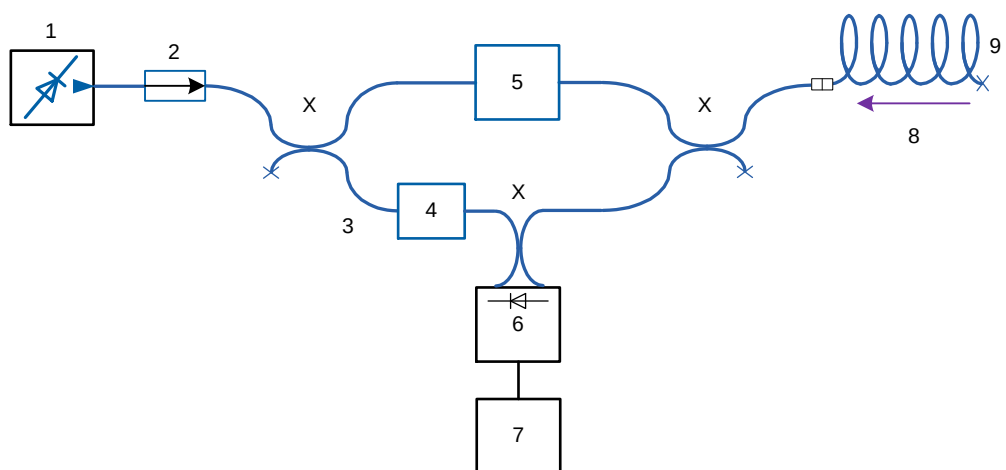


Рис. 1.

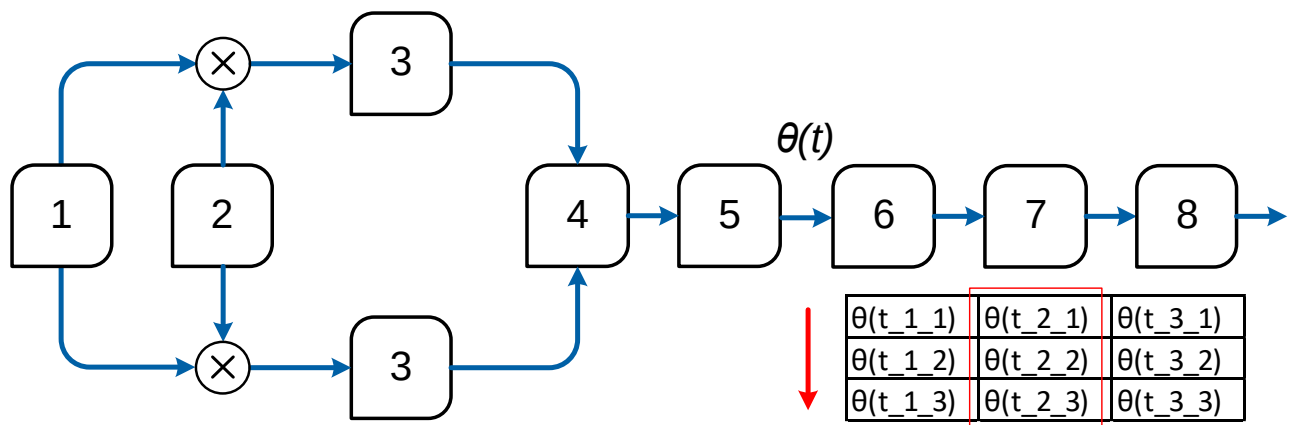


Рис. 2.

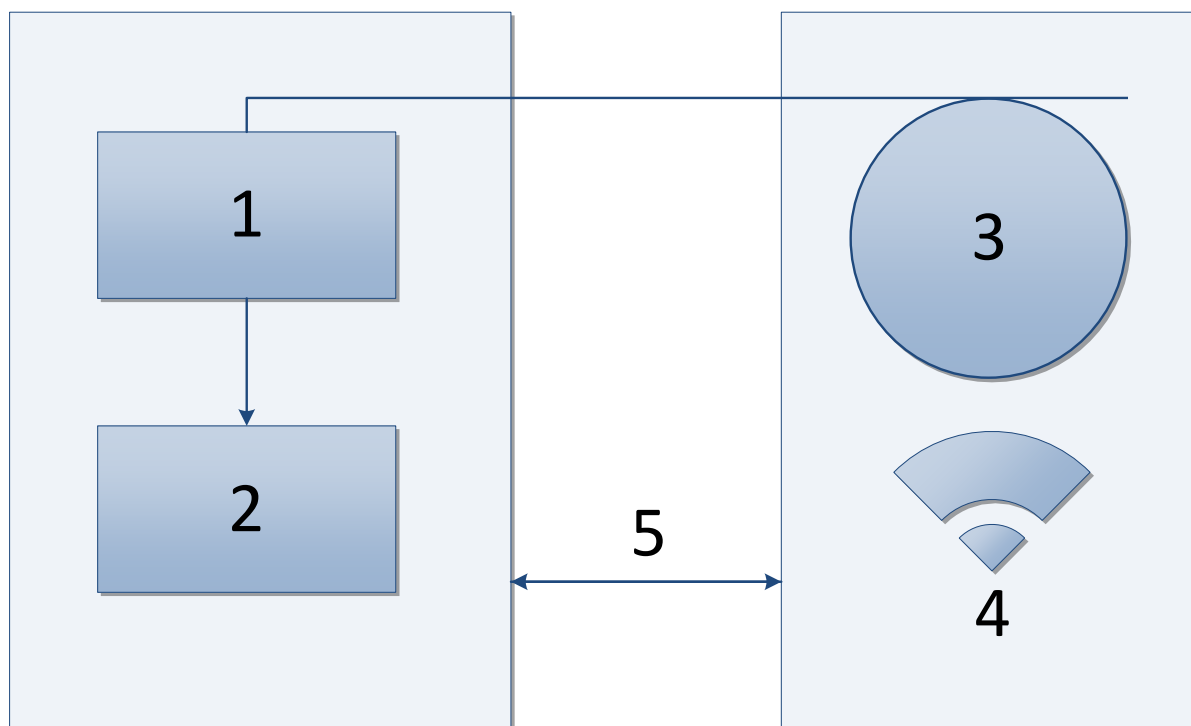


Рис. 3.

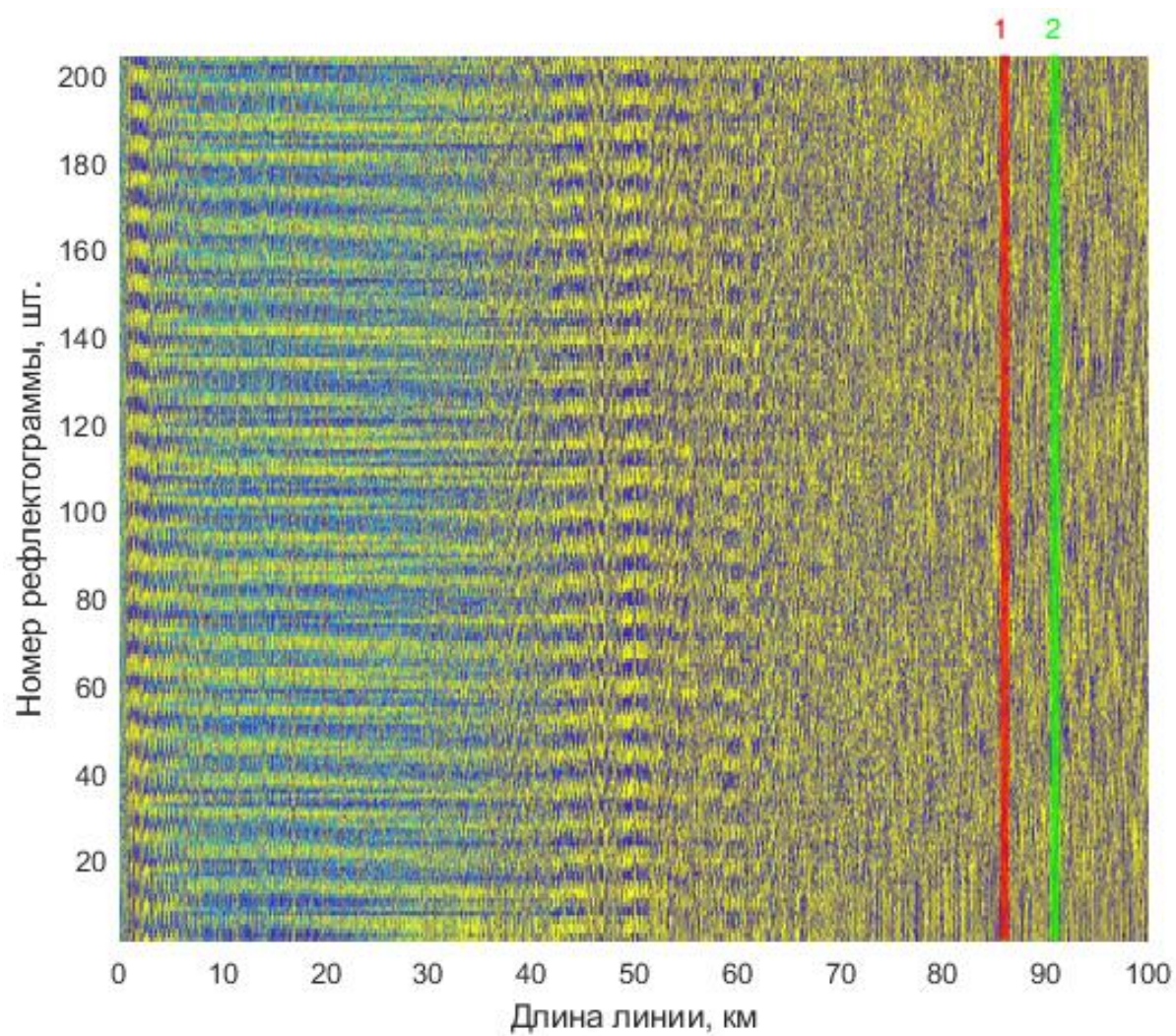


Рис. 4.

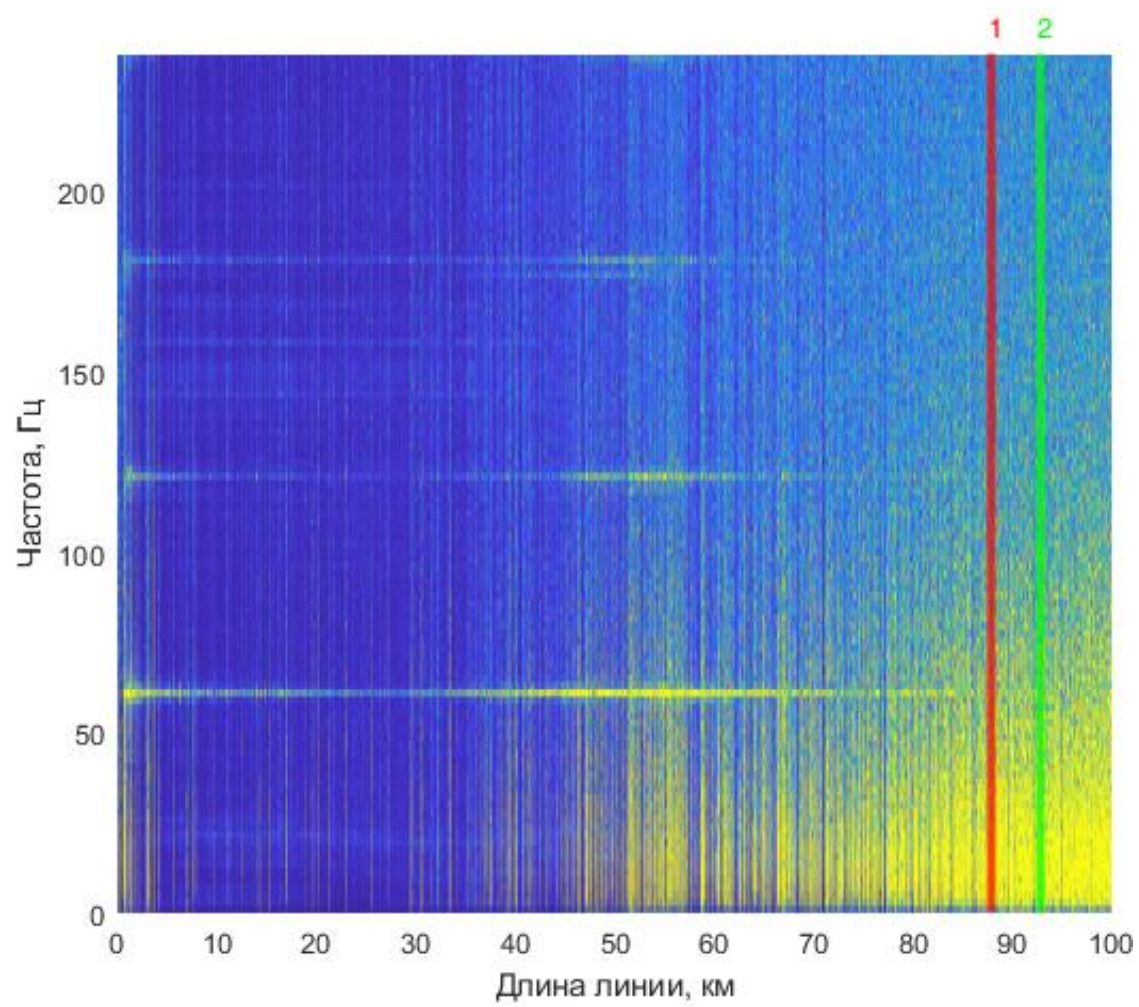


Рис. 5.

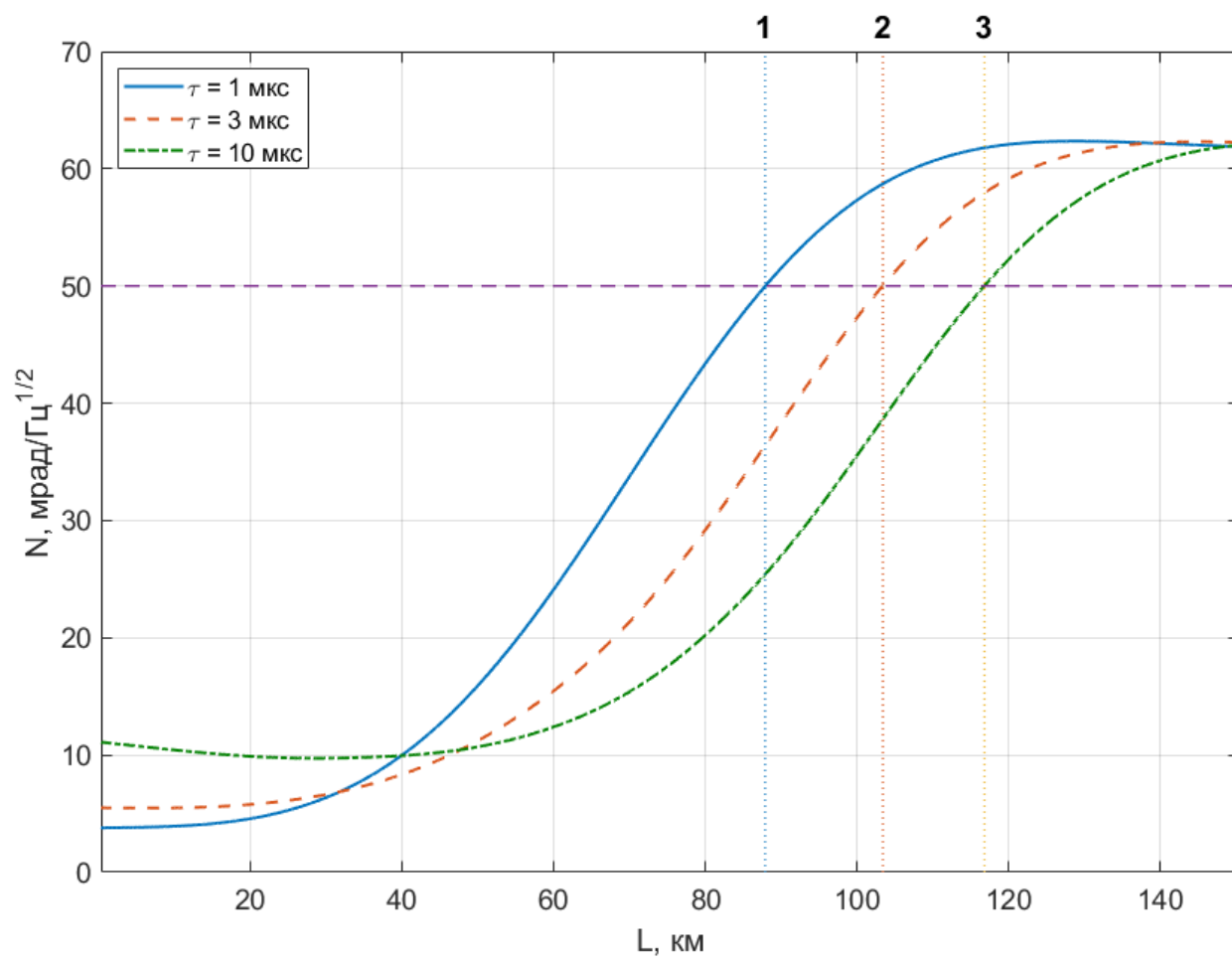


Рис. 6.

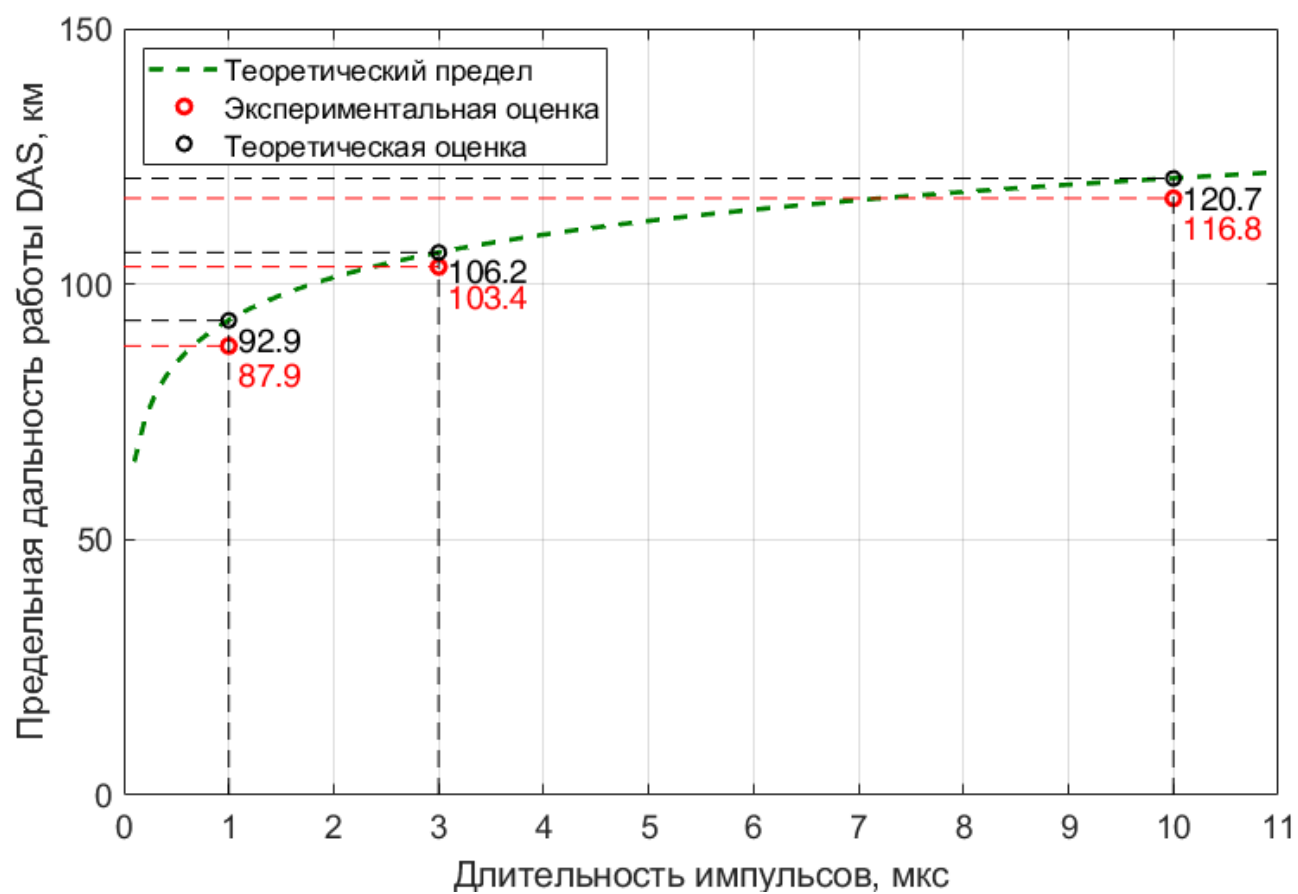


Рис. 7.