

~~ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ~~ Без рубрики!
~~ТЕХНИКА~~

УДК 681.586.586.5; 681.518.3

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППАРАТНЫХ И
АЛГОРИТМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА
ПРИНЦИПЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-
БРИЛЛЮЭНА¹**

(обзор)

© 2026 г. И. В. Богачков^{a, *}, Н. И. Горлов^{b, **}, Э. В. Гармаева^c,
Е. Т. Китова^d

^aОмский государственный технический университет

Россия, 644050, Омск, просп. Мира, 11

^bСибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Россия, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86

^cБурятский институт инфокоммуникаций (филиал Сибирского государственного
университета телекоммуникаций и информатики)

Россия, 670031, Улан-Удэ, ул. Трубочеева, 152

^dНовосибирский государственный технический университет

Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

*e-mail: bogachkov@mail.ru

**e-mail: gorlovnik@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Рассматриваются физические основы взаимодействия Мандельштама–Бриллюэна в кварцевом оптическом волокне. Особое внимание уделяется аппаратным и алгоритмическим подходам к повышению пространственного разрешения бриллюэновских датчиков, включая методы тёмного импульса, предварительной накачки, пар импульсов с дифференциальной длительностью, переходных дифференциальных пар, бриллюэновского эха, корреляционные методы, а также подходы, основанные на формировании динамической бриллюэновской решётки в поляризационно-сохраняющих волокнах.

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

Рассматриваются также кодовые архитектуры, обеспечивающие сохранение высокого отношения сигнал/шум при локализации измерения. Отдельный раздел посвящён семейству алгоритмов, направленных на повышение эффективного пространственного разрешения датчиков на основе бриллюэновского анализа и рефлектометрии во временной области. В частности, анализируются методы дифференциальной реконструкции, деконволюции и регуляризованной инверсии, современные методы спектральной оценки и цифровой фильтрации, а также алгоритмические подходы, опирающиеся на машинное обучение.

Ключевые слова: кварцевое оптическое волокно, взаимодействие Мандельштама–Бриллюэна, бриллюэновские датчики, бриллюэновское эхо, бриллюэновские решётки, бриллюэновский анализ, методы дифференциальной реконструкции, методы спектральной оценки, машинное обучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенное волоконно-оптическое измерение на основе обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна занимает особое место в измерительной технике. Обычное телекоммуникационное волокно одновременно выступает чувствительным элементом, линией передачи и магистралью мультиплексирования. В отличие от дискретных датчиков, распределенный бриллюэновский подход дает непрерывную продольную карту деформации и температуры вдоль оптического волокна. Именно это свойство и делает технологию ценной для мониторинга технического состояния сооружений, геотехнического контроля, энергетических сетей, подводной инфраструктуры, авиационно-космических конструкций и «умных» материалов.

Современные распределённые бриллюэновские датчики обычно реализуются в конфигурациях BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry) и BOTDA (Brillouin Optical Time-Domain Analysis), а также в частотной и корреляционной областях.

- BOTDR использует регистрацию спонтанного бриллюэновского рассеяния при односточечном доступе к волокну; пространственная привязка реализуется по времени пролёта импульса, аналогично стандартной рефлектометрии.

- BOTDA базируется на вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (РМБ), возбуждаемом встречными волнами накачки и зондирующего сигнала; это обеспечивает высокую мощность бриллюэновского отклика и, как правило, более высокое отношение сигнал/шум.

Корреляционные и комбинированные схемы (например, фазо-модулированный корреляционный анализатор с временной селекцией) позволяют достигать миллиметрового уровня пространственного разрешения при сохранении протяжённости в десятки километров.

Измеряемая величина в бриллюэновских датчиках не формируется в локализованном твердотельном преобразователе, а извлекается из слабого нелинейного взаимодействия, которое необходимо возбудить, локализовать и спектрально проанализировать непосредственно внутри волокна. В классических схемах BOTDA и BOTDR локализация создается оптическим импульсом конечной длительности, который

задает номинальное пространственное разрешение.

Обычно цитируемое время жизни акустического фонона порядка 10 нс в стандартном кварцевом волокне соответствует естественной ширине линии примерно 30 МГц. Когда длительность импульса становится сравнимой с этим временем или меньше его, взаимодействие уже нельзя считать квазистационарным, и интуиция, лежащая в основе метровых схем BOTDA, перестает работать.

С инженерной точки зрения задача формулируется просто: как опросить очень короткий участок волокна, сохранив при этом узкий и измеримый бриллюэновский резонанс? Почти все важные аппаратные разработки в этой области представляют собой прямой ответ именно на этот вопрос. Одни методы специально разделяют возбуждение акустической волны и ее локальное считывание, другие синтезируют узкую эффективную область поддержки вычитанием двух «длинных» откликов, третьи вообще уходят от временного стробирования и локализуют взаимодействие за счет корреляции. Существуют также решения на основе фазового кодирования, динамических решеток и кодовых последовательностей, предназначенных для сохранения отношения сигнал/шум при чрезвычайно малой зоне взаимодействия.

Тема увеличения разрешающей способности волоконно-оптических датчиков на основе бриллюэновского рассеяния является одной из самых актуальных в этой области. За последние годы исследователи предложили множество методов, которые условно можно разделить на две большие категории: аппаратные (связанные с модификацией схемы и параметров зондирования) и алгоритмические (методы цифровой обработки и машинного обучения).

Настоящий обзор специально сосредоточен на аппаратных методах повышения пространственного разрешения. Цифровая обработка и методы машинного обучения действительно способны дополнительно улучшать оценку параметров, но они вторичны по отношению к физическому механизму локализации. Поэтому основное внимание уделено архитектурам, в которых эффективная длина взаимодействия изменяется непосредственно оптическим или электрооптическим трактом.

Целью настоящей работы является проведение комплексного сравнительного анализа современных методов и алгоритмов увеличения разрешающей способности с формулировкой рекомендаций по их оптимальному применению в зависимости от технических требований к системе. Обсуждения опираются на оригинальные журнальные и конференционные публикации, в которых результаты были впервые предложены и экспериментально подтверждены.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна представляет собой процесс неупругого рассеяния света на тепловых (спонтанное рассеяние) или индуцированных (вынужденное рассеяние) акустических волнах в среде [1]. Физически этот процесс можно представить как дифракцию оптического излучения на динамической решетке показателя преломления, создаваемой акустической волной.

При распространении интенсивного оптического излучения (накачки) с частотой ω_p в волокне возникает электрострикционная сила, приводящая к возбуждению акустической волны с частотой Ω_B . Эта акустическая волна модулирует показатель преломления среды, создавая периодическую решетку, на которой происходит рассеяние света накачки. В результате генерируется стоксова компонента с пониженной частотой $\omega_B = \omega_p - \Omega_B$, распространяющаяся в обратном направлении [2].

Бриллюэновский сдвиг частоты $\nu_B = \Omega_B / (2\pi)$ определяется условием синхронизма (фазового согласования) между оптическими и акустическими волнами:

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda_p}, \quad (1)$$

где n – эффективный показатель преломления волокна, V_a – скорость звука в материале сердцевины, λ_p – длина волны излучения накачки в вакууме.

Для стандартного кварцевого одномодового волокна при длине волны накачки $\lambda_p = 1550$ нм типичное значение бриллюэновского сдвига составляет $\nu_B \approx 10.8$ ГГц [3]. Данная частота линейно зависит от температуры (коэффициент около 1 МГц/°С) и деформации (коэффициент примерно 500 МГц/‰), что и определяет сенсорные возможности системы.

Спектральное распределение коэффициента усиления Бриллюэна $g_B(\nu)$ имеет лоренцеву форму [3]:

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B / 2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B / 2)^2}, \quad (2)$$

где g_0 – пиковое значение коэффициента усиления, зависящее от материальных параметров волокна (электрострикционной постоянной, показателя преломления, плотности):

$$g_0 = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 \rho_0 V_a \Delta v_B}. \quad (3)$$

Здесь p_{12} – электрострикционная постоянная, ρ_0 – плотность среды, c – скорость света.

Типичное значение g_0 для кварцевого волокна составляет примерно 2×10^{-11} м/Вт [4].

Температурная и деформационная зависимости имеют вид [5]

$$v_B(z) = v_{B0} + C_T \Delta T(z) + C_\varepsilon \Delta \varepsilon(z), \quad (4)$$

где v_{B0} — базовый бриллюэновский сдвиг при номинальных условиях, C_T и C_ε — коэффициенты чувствительности к температуре и деформации, имеющие размерности МГц/°С и МГц/мкε.

3. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Пространственная разрешающая способность волоконно-оптического датчика на основе обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна — это минимальная длина участка волокна, по которой датчик еще способен различить локальное изменение температуры или деформации. В системах BOTDR и BOTDA пространственное разрешение Δz непосредственно связано с длительностью зондирующего импульса τ_p следующим соотношением:

$$\Delta z = \frac{v_g \tau_p}{2} = \frac{c \tau_p}{2n}. \quad (5)$$

Для волокна с показателем преломления $n = 1.47$ пространственное разрешение составляет

$$\Delta z \approx 10^8 \cdot \tau_p.$$

Казалось бы, уменьшая длительность импульса, можно достичь сколь угодно высокого пространственного разрешения. Однако существует фундаментальное физическое ограничение, связанное с процессом взаимодействия импульса с акустической волной.

При ограниченной полосе приёма и ширине бриллюэновской линии Δv_B эффективное разрешение ухудшается по сравнению с идеальным [6]:

$$\Delta z_{eff} \approx \sqrt{\left(\frac{v_g \tau_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_g}{2\pi \Delta v_B}\right)^2}. \quad (6)$$

Первый член отвечает за «геометрическое» разрешение по времени пролёта, второй — за ограничение, связанное с конечным временем бриллюэновского взаимодействия. При больших τ_p доминирует первый член, при экстремально коротких — второй.

Ключевой механизм ограничения разрешающей способности связан с тем, что акустическая волна, индуцированная импульсом накачки, продолжает существовать и после прохождения импульса в течение времени жизни фонона τ_B . Это означает, что даже если длительность импульса τ_p меньше времени жизни фонона, эффективная длина области взаимодействия определяется величиной [7]

$$L_{eff} = v_g (\tau_p + \tau_B). \quad (7)$$

Локальное бриллюэновское взаимодействие и лоренцевская форма спектра усиления представлены на рис. 1.

Рис. 1. Бриллюэновское взаимодействие и лоренцевская форма спектра усиления

При $\tau_p < \tau_B$ эффективная длина взаимодействия ограничена снизу величиной

$$L_{min} \approx v_g \tau_B = \frac{c \tau_B}{n}. \quad (8)$$

Для кварцевого волокна с $\tau_B \approx 10$ нс и $n = 1.47$: $L_{min} \approx 2.04$ м. С учетом двунаправленного распространения (обратное рассеяние) минимальное пространственное разрешение составляет $\Delta z_{min} = 0.5 L_{min} \approx 1$ м. Это значение представляет собой фундаментальный физический предел для методов BOTDA и BOTDR, представленный графически на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость пространственного разрешения от длительности импульса

Дополнительное ограничение связано с уширением спектра бриллюэновского усиления при уменьшении длительности импульсов. Для импульса конечной длительности τ_p спектральная ширина определяется соотношением

$$\Delta \nu_{pulse} \propto \frac{1}{\tau_p}. \quad (9)$$

Рис. 3 демонстрирует зависимость эффективной ширины спектра обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна от длительности зондирующего импульса.

Рис. 3. Зависимость эффективной ширины спектра обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна от длительности зондирующего импульса

При длительности импульса, значительно превышающей время жизни фонона ($\tau_p \gg \tau_B$), ширина спектра стремится к естественному значению около 30 МГц. При коротких импульсах ($\tau_p \ll \tau_B$) ширина определяется спектральной шириной импульса $\Delta \nu \approx 1/\tau_p$, она может достигать 1 ГГц при $\tau_p = 1$ нс.

4. СПЕКТРАЛЬНАЯ (ЧАСТОТНАЯ) РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Под спектральной (частотной) разрешающей способностью в распределённых датчиках на основе РМБ будем понимать минимальное изменение бриллюэновского частотного сдвига $\delta\nu_{B,\min}$, которое может быть статистически достоверно зарегистрировано системой при заданных отношении сигнал/шум и времени усреднения. Соответствующие минимальные приращения деформации и температуры определяются следующим образом:

$$\delta\varepsilon_{\min} \approx \frac{\delta\nu_{B,\min}}{c_\varepsilon}, \quad \delta T_{\min} \approx \frac{\delta\nu_{B,\min}}{c_T}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что уменьшение $\delta\nu_{B,\min}$ напрямую повышает чувствительность датчика к слабым деформационным и температурным возмущениям.

При параметрическом оценивании максимума лоренцевой линии в условиях аддитивного гауссовского шума граница Крамера–Рао для дисперсии оценки ν_B может быть представлена в виде [9]

$$\sigma_{\nu_B}^2 \geq \frac{K\Delta\nu_B^2}{\text{SNR} \cdot N}, \quad (11)$$

где $\Delta\nu_B$ — ширина спектральной линии на уровне 0.5, SNR — отношение сигнал/шум в максимуме спектра, N — число измеренных спектральных отсчётов в окрестности резонанса, K — коэффициент, зависящий от используемой модели и метода оценивания (для аппроксимации Лоренца по методу наименьших квадратов он составляет величину порядка единицы). Соответственно, частотное разрешение можно оценить следующим образом [9]:

$$\delta\nu_{B,\min} \approx \delta_{\nu_B} \propto \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{\text{SNR} \cdot N}}. \quad (12)$$

Из выражения следует, что для повышения частотной разрешающей способности необходимо уменьшать ширину бриллюэновской линии $\Delta\nu_B$, увеличивать отношение сигнал/шум и использовать максимально информативные алгоритмы оценивания, эффективно использующие все спектральные отсчёты.

В системах BOTDA/BOTDR бриллюэновский спектр в измерении является свёрткой истинного (материального) спектра и спектра источника излучения, а при импульсном зондировании — дополнительно свёрткой со спектром зондирующего импульса. Эффективная ширина линии определяется следующим образом:

$$\Delta\nu_{B,\text{eff}}^2 \approx \Delta\nu_{B,\text{mat}}^2 + \Delta\nu_L^2 + \Delta\nu_{\text{imp}}^2, \quad (13)$$

где $\Delta\nu_{B,mat}$ — собственная ширина бриллюэновской линии в волокне, $\Delta\nu_L$ — спектральная ширина лазера, $\Delta\nu_{imp}$ — эквивалентное уширение вследствие конечной длительности импульса и особенностей детектирования.

В системах BOTDA существует компромисс между пространственным и частотным разрешениями: короткие импульсы обеспечивают высокую пространственную разрешающую способность, но приводят к уширению спектра и снижению частотного разрешения. При увеличении длительности импульса спектральная линия стремится к истинному лоренцеву профилю, однако пространственное разрешение ухудшается.

На рис. 4 представлено обобщённое сравнение достигнутых значений разрешающей способности различных методов бриллюэновского зондирования.

Рис. 4. Сравнение методов по разрешающей способности

На рисунке представлены результаты для стандартных методов BOTDR и BOTDA, усовершенствованных методов DPP-BOTDA и BOCDA, а также методов с рамановским усилением (Raman-BOTDA). Штриховая линия обозначает общую линию компромисса — улучшение пространственного разрешения, как правило, достигается за счёт уменьшения дальности измерения. Особо следует отметить результат метода TABS (Transient Acoustic Wave Based Sensing, 2025 г.): пространственное разрешение 37 см на дистанции 50 км, что представляет существенный прорыв в данной области.

5. АППАРАТНЫЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В последние два десятилетия разработан ряд методов, позволяющих преодолеть фундаментальное ограничение на пространственное разрешение, обусловленное временем жизни акустического фонона. Рассмотрим основные подходы.

5.1. Метод дифференциальных пар импульсов

Дифференциальная пара длительностей импульсов (Differential Pulse-width Pair - DPP-BOTDA) стала одной из самых ранних и влиятельных стратегий выхода за пределы разрешения, задаваемого одним длинным импульсом. Классическим примером является принцип DPP-BOTDA, предложенный Li, Bao, Li и Chen в 2008 году [10]. Для улучшения пространственного разрешения при сохранении приемлемой точности используются пары импульсов с различными длительностями, представленные на рис. 5.

Рис. 5. Дифференциальная пара импульсов

Вместо измерения на одном очень коротком импульсе система выполняет два измерения на длинных импульсах с чуть различающимися длительностями и затем

вычитает полученные отклики. В результате общая «широкая» часть отклика взаимно компенсируется, а остается лишь узкая дифференциальная область поддержки, по длительности приблизительно равная разности длительностей двух импульсов.

Если используются импульсы с ширинами τ_1 и τ_2 , где $\tau_1 > \tau_2$, то эффективное дифференциальное пространственное разрешение оценивается следующим образом:

$$\Delta z_{DPP} \approx 0.5v_g(\tau_1 - \tau_2). \quad (14)$$

Критически важно, что каждый из двух составляющих импульсов может оставаться длиннее акустического времени жизни, поэтому каждое отдельное измерение все еще дает узкий и хорошо сформированный бриллюэновский спектр. Узкая поддержка появляется только после операции вычитания.

DPP-BOTDA удобно трактовать как пространственный оператор производной, действующий на накопление бриллюэновского усиления. Длинный импульс возбуждает и интегрирует усиление на протяженном участке. Другой, лишь немного более короткий импульс, делает почти то же самое, кроме узкой зоны возле одного края этого участка. Разность между двумя откликами и изолирует недостающий «срез». Именно поэтому метод обеспечивает высокое разрешение, сохраняя при этом спектральное качество, свойственное длинноимпульсному режиму.

С этим связан и еще один плюс: амплитуда усиления, возникающая при длинных импульсах, может быть существенно выше, чем амплитуда при прямом отклике на действительно коротком импульсе. Дифференциальное бриллюэновское усиление способно одновременно улучшать пространственное разрешение и температурную точность в дальнобойном распределенном сенсоре. Метод DPP-BOTDA позволяет достичь пространственного разрешения 20–25 см при дальности измерений 50–60 км, хотя это достигается ценой усложнения схемы и обработки сигналов [11].

Семейство DPP стало особенно привлекательным для инженерных систем, потому что метод концептуально прозрачен и использует знакомую электрооптическую аппаратную базу. Его главные достоинства таковы:

- высокая спектральная достоверность, так как оба составляющих импульса могут быть достаточно длинными;
- совместимость со стандартными BOTDA-компоновками и рабочим процессом частотного сканирования;
- прямая управляемость эффективным разрешением через разность длительностей импульсов.

Основной недостаток - дифференциальный характер сигнала. Любая амплитудная флуктуация, временной перекося, частотный дрейф, изменение поляризации или

нелинейность фотоприемника между двумя измерениями попадает в вычитание. Поэтому DPP-системам часто требуются тщательная нормализация, синхронное усреднение или фазорные варианты реконструкции, повышающие устойчивость. Именно этой проблемой объясняется появление фазорной DPP-техники для дальнобойной BOTDA.

5.2. Метод предварительной накачки

Метод предварительной накачки (Pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis PPP-BOTDA), предложенный Kishida, Li и Nishiguchi в 2005 году, стал прямым путем к сантиметровому разрешению в BOTDA [12]. В этом методе сначала подается сравнительно длинный и относительно слабый преднакачивающий импульс, возбуждающий акустическую волну заранее. Затем в оптическое волокно подается более сильный короткий импульс, который опрашивает уже сформированное акустическое поле на узком участке. Ключевое различие состоит во временном разделении процессов возбуждения и считывания.

В обычной BOTDA один и тот же импульс должен одновременно создать акустическую волну и локализовать ее. В PPP-BOTDA эти функции распределены во времени. Акустическая волна набирает амплитуду в ходе преднакачки длительностью около 10–50 нс, совместимой с естественной шириной бриллюэновской линии, а короткий хвостовой импульс задает положение измерения. Поскольку к моменту прихода короткого импульса акустическое поле уже достаточно развито, можно использовать длительности, соответствующие сантиметровому пространственному разрешению, не сталкиваясь с тем тяжелым спектральным штрафом, который возникает в BOTDA на сверхкоротком одиночном импульсе.

Биение накачки и зонда формирует акустическую решетку, амплитуда которой подчиняется релаксационному уравнению первого порядка. В упрощенной локальной модели комплексная амплитуда акустической волны $Q(t)$ описывается соотношением [13]

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{T_A} Q = \kappa E_p E_s^*,$$

где T_A - длительность считывающего импульса; κ - коэффициент, учитывающий материал оптического волокна и эффект перекрытия мод; E_p и E_s^* - поля накачки и зондирования.

Короткий яркий импульс сам по себе не дает $Q(t)$ приблизиться к стационарному значению. Длинная преднакачка, напротив, заранее разгоняет акустическое поле, после чего короткое окно считывания опрашивает уже существующую акустическую популяцию на коротком пространственном срезе. Практически это означает, что

пространственное разрешение определяется коротким считывающим импульсом, а спектральная добротность сохраняется за счет предшествующего длительного возбуждения.

PPP-BOTDA стал влиятельным подходом потому, что сохранял знакомую геометрию и философию BOTDA: система оставалась временной, с встречным распространением волн, и естественно встраивалась в уже существующие аппаратные платформы распределенного контроля. Метод оказался особенно полезен для задач поиска трещин, швов, локальных переходов жесткости и других событий, где сантиметровая локализация важнее экстремально большой дальности.

Ограничения PPP связаны прежде всего с деталями реализации. Задержка между преднакачкой и окном считывания должна контролироваться очень тщательно. Мощность преднакачки должна быть достаточной для формирования акустической волны, но не чрезмерной, чтобы не провоцировать нежелательные нелокальные эффекты, истощение и паразитные нелинейности в других участках линии. Разрешение, точность по частоте и дальность остаются взаимосвязанными величинами. Тем не менее, именно метод PPP-BOTDA показал, что высокое пространственное разрешение не обязано достигаться ценой экстремально малого времени взаимодействия [14].

5.3. Метод «тёмных импульсов»

Методы темного импульса (Dark Pulse) переворачивают привычную логику «яркого» импульсного опроса. Вместо того чтобы запускать изолированный положительный импульс на темном фоне, система поддерживает оптический уровень фона и вставляет в него короткий провал интенсивности. Акустическое поле при этом успевает сформироваться за счет фона, а короткий темный сегмент возмущает только локальную область. В результате измеряемый отклик соответствует разности между стационарным бриллюэновским взаимодействием и временно прерванным взаимодействием внутри темного интервала.

Сила этой логики в том, что она разделяет набор акустической амплитуды и пространственную локализацию. Фоновая волна поддерживает узкий спектральный режим, а «темная выемка» задает локальную область поддержки. Brown и Colpitts ввели этот подход в 2005 году, а позже показали датчик темного импульса с пространственным разрешением 20 мм [15]. Позднее Wang и соавторы развили концепцию в виде импульса на темном основании, снова нацеливаясь на одновременное достижение высокой пространственной и частотной разрешающих способностей [16].

Если представить ответ волокна как пространственную свертку локальной

бриллюэновской линии и формы опросного сигнала, то архитектура темного импульса создает, по сути, дифференциальный отклик. Длинный фон предварительно формирует акустическое поле по всему участку перекрытия, тогда как короткий темный интервал «вычитает» усиление на узком срезе. Поэтому зарегистрированное возмущение наследует узкую пространственную поддержку именно от провала, а не от широкого фона.

По смыслу это близко к конечной разности по координате. Очень узкая темная выемка может обеспечивать сантиметровую и даже миллиметровую локализацию, тогда как спектр в значительной мере сохраняет узость, характерную для длительного взаимодействия. Цена за это - повышенные требования к коэффициенту гашения, стабильности базового уровня и динамическому диапазону приемника. Полезный сигнал является малой разностью двух больших оптических состояний, поэтому остаточная амплитудная шумовая модуляция и несовершенство модулятора становятся заметными источниками ошибки.

Преимущества метода [17]:

- высокое пространственное разрешение;
- концептуально простая электрооптическая реализация при наличии стабильного оптического фона;
- важная историческая роль — именно эти схемы наглядно показали, что ограничение акустическим временем жизни не является абсолютно фундаментальным.

Недостатки:

- жесткие требования к коэффициенту гашения модуляторов и качеству формирования импульсов;
- высокая чувствительность к остаточной модуляции интенсивности, дрейфу базовой линии и ошибкам вычитания;
- ограниченная устойчивость на больших дальностях, где дифференциальный сигнал может теряться на фоне флуктуаций мощности и распределенных потерь.

Поэтому темно-импульсные концепции оказались чрезвычайно важны с научной точки зрения, но во многих практических промышленных системах со временем их вытеснили PPP, DPP и бриллюэновское эхо, которые обеспечивают более управляемый компромисс между разрешением, сложностью и точностью.

5.4. Распределенное зондирование бриллюэновским эхо

Метод распределенного зондирования бриллюэновским эхо (Brillouin Echo Distributed Sensing-BEDS), наиболее тесно связанный с работами Foaleng, Tur, Beugnot и Thévenaz, стал одним из решающих концептуальных прорывов в этой области [18]. Метод

показал, что короткое локализованное возмущение ранее возбужденного акустического поля можно создавать не только прямой амплитудной локализацией, но и фазовым управлением. Тем самым, метод BEDS позволил совместить высокое пространственное и высокое спектральное разрешение и окончательно убедил сообщество, что метровое ограничение временных бриллюэновских сенсоров не является неизбежным.

Длинный импульс накачки сначала создает акустическую волну по всей области перекрытия с зондом. Затем вводится очень короткий участок с фазовым сдвигом. Поскольку бриллюэновское взаимодействие чувствительно к фазе, такое локальное фазовое изменение способно обратить или возмутить перенос энергии между оптическим и акустическим полями. Зонд регистрирует эхоподобный сигнал, локализованный в области фазового переключения, но несущий спектральную информацию уже подготовленного акустического возбуждения.

С системной точки зрения BEDS напоминает PPP тем, что разделяет подготовку акустического поля и локальное считывание. Однако принципиальное отличие состоит в том, что локализация достигается не только коротким ярким или темным сегментом интенсивности, а фазоинженерным возмущением уже записанного взаимодействия. Это дает чрезвычайно узкую эффективную область поддержки при сравнительно мало искаженной спектральной линии.

Foaleng и соавторы в 2010 году показали дальнобойное измерение с высоким пространственным и спектральным разрешениями, использующее бриллюэновские эхо [18]. Метод обеспечивал сантиметровый класс локализации при сохранении мегагерцевого класса частотной селективности на километровых дальностях. Важность результата не только в цифрах, но и в физической ясности архитектуры: длительное взаимодействие отвечает за качество линии, а короткое фазовое событие — за локализацию.

Позднее были предложены варианты на основе дифференциальной фазовой манипуляции, позволявшие получать эхосигнал чище либо при более простой модульной реализации. Эта линия исследований естественным образом связалась с динамическими бриллюэновскими решетками и когерентным фазовым управлением, сделав BEDS своего рода интеллектуальным мостом между BOTDA временной области, фазовым кодированием и решеточными подходами [19].

BEDS дает превосходный компромисс между пространственным разрешением и качеством спектра, но аппаратная нагрузка здесь выше, чем у обычной BOTDA. Требуется стабильное быстрое фазовое управление, а полезный сигнал все равно может представлять собой малое дифференциальное возмущение на фоне более крупного базового уровня.

Кроме того, метод чувствителен к несовершенным фазовым переходам и вторичным эхо-артефактам, которые подробно анализировались в последующих работах. Тем не менее, BEDS остается одной из эталонных архитектур там, где сантиметровая локализация должна сочетаться с надежной оценкой бриллюэновского пика.

5.5. Корреляционные методы: BOCDА и BOCDR

Во временной области локализация создается конечной длительностью импульса. В корреляционной области локализация определяется когерентностными свойствами модулированных волн. Это гораздо более глубокое изменение, чем простая подстройка формы импульса. Вместо запуска короткого импульса в длинное волокно оптическую частоту или фазу модулируют так, чтобы насос и зонд оказывались сильно коррелированными только в одной или нескольких дискретных точках. Следовательно, бриллюэновское взаимодействие избирательно усиливается именно там.

Поскольку локализация задается синтезированным корреляционным пиком, а не только акустическим временем жизни, корреляционные методы способны обеспечивать удивительно высокое пространственное разрешение, вплоть до сантиметров и миллиметров. Компромисс здесь заключается в дальности: корреляционный пик периодически повторяется, так что однозначная измерительная дальность обычно существенно меньше, чем в BOTDA, если не применять специальные схемы увеличения диапазона.

Song, He и Notate в 2006 году продемонстрировали распределенное измерение деформации с миллиметровым порядком пространственного разрешения на основе Brillouin Optical Correlation Domain Analysis [20]. Эта работа считается основополагающей, поскольку она убедительно показала: если локализация создается синтезированным корреляционным максимумом, то можно уйти далеко ниже метрового барьера, характерного для прямого временного стробирования.

В стандартной формулировке с синусоидальной модуляцией измерительная дальность оценивается следующим образом [21]:

$$d_m \approx c / (2nf_m), \quad (15)$$

где f_m - частота модуляции. При типичных предположениях пространственное разрешение часто записывают в виде

$$\Delta z_{corr} \approx c\Delta\nu_B / (2\pi n f_m \Delta f). \quad (16)$$

Здесь Δf - амплитуда частотной модуляции, а $\Delta\nu_B$ - ширина бриллюэновской линии. Это выражение ясно показывает центральный компромисс: увеличение амплитуды

модуляции заостряет корреляционный пик, тогда как увеличение частоты модуляции сокращает однозначную дальность. В отличие от классической BOTDA, разрешение здесь задается уже не напрямую длительностью оптического импульса.

В 2008 году Mizuno, Zou, He и Hotate предложили метод Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry [22]. BOCDR сохраняет корреляционный принцип локализации, но работает в рефлектометрической, то есть фактически односторонней конфигурации. Это особенно привлекательно для сценариев, где доступ к одному концу волокна невозможен или затруднен. Плата за это - более деликатный баланс между динамическим диапазоном, выделением полезного сигнала и управлением шумом.

Корреляционные методы не имеют равных там, где требуется экстремально высокое пространственное разрешение на коротких или умеренных дистанциях: лабораторные механические испытания, наблюдение локальных трещин, динамическая деформация в выбранных точках, исследование микроструктурированных волокон. Позднее группа Hotate и другие исследователи предложили схемы увеличения дальности и многоточечного доступа, расширившие практическое окно применимости метода. Но базовый компромисс сохраняется: превосходная локализация достигается за счет некоторой простоты использования, которая сделала BOTDA такой привлекательной.

Поэтому корреляционные методы не следует воспринимать как универсальную замену BOTDA. Скорее, это наиболее мощная ветвь высокоразрешающего семейства бриллюэновских сенсоров, особенно когда случайный доступ к выбранным координатам или миллиметровая локализация важнее дальности в десятки километров.

5.6. Динамические бриллюэновские решетки и подходы на сохраняющих поляризацию волокнах

Существуют и отдельные, но тесно связанные с предыдущими подходы, в которых высокая локализация достигается за счет динамических бриллюэновских решеток в сохраняющих поляризацию волокнах. Song, Chin, Primerov и Thévenaz в 2010 году продемонстрировали BOTDA с высоким разрешением на основе трассировки профиля бриллюэновского усиления [3]. В системах этого класса акустические волны, возбужденные в одной поляризации, формируют движущуюся решетку, которую затем можно считывать коротким ортогонально поляризованным импульсом в другом канале.

Привлекательность динамических решеток в том, что здесь разделяются сразу три функции: запись акустической структуры, хранение локальной информации в течение конечного времени и ее считывание в отдельном поляризационном канале. Такой подход способен обеспечивать более чистый и иногда более сильный локализованный отклик,

чем базовые интенсивностные схемы. По сути, эти методы близки к PPP и BEDS: во всех случаях акустическая информация сначала подготавливается, а затем считывается. Недостатки очевидны - специализированное волокно или сложное управление поляризацией, а значит, повышенная стоимость аппаратуры и большая нагрузка на юстировку.

5.7. Кодовые и гибридные аппаратные методы

Как только эффективная зона взаимодействия становится очень малой, следующим узким местом становится отношение сигнал/шум. Целое семейство кодовых методов адресует именно эту проблему, не изменяя непосредственно физический механизм локализации. Например, Zan, Masui, Peng и Li предложили в 2012 году использовать двойную комплементарную пару Голэя для BOTDA с высоким разрешением [23]. Цель здесь состояла не в создании локализации как таковой, а в том, чтобы сохранить или восстановить отношение сигнал/шум тогда, когда сантиметровая эффективная поддержка уже была обеспечена другим аппаратным способом.

Это различие принципиально. На практике высокая пространственная разрешающая способность имеет ценность только тогда, когда бриллюэновский сдвиг частоты еще можно надежно оценить. Поэтому кодовые архитектуры следует понимать как усилители жизнеспособности PPP, DPP, BEDS и родственных схем. Они повышают вводимую оптическую энергию, уменьшают необходимое время усреднения и стабилизируют метрологическую неопределенность [24].

Параллельно возникали и гибридные решения. Одни совмещают идеи временной и корреляционной областей. Другие объединяют дифференциальные формы импульсов с когерентным приемом, фазорной обработкой или чирпированным оптическим возбуждением. Хотя такие системы часто описывают языком цифровой обработки, многие из них по существу являются аппаратными методами, потому что выигрыш возникает из оптического дизайна формы волны, а не только из последующей численной обработки. Общая тенденция очевидна: наиболее совершенные современные сенсоры все чаще соединяют пространственную локализацию, когерентное считывание и кодирование в единой архитектуре. Формы типичных аппаратных сигналов, используемых для сужения эффективной зоны взаимодействия, представлены на рис. 6 ниже.

Рис. 6. Формы типичных аппаратных сигналов

5.8. Сравнительный анализ основных аппаратных стратегий

Ниже приведена сводная таблица по основным аппаратным семействам. Значения являются репрезентативными для цитируемых первичных демонстраций, а не абсолютными физическими пределами.

Таблица 1. Сравнение типичных аппаратных методов повышения пространственного разрешения в распределенном зондировании Бриллюэна [25, 26]

Метод	Механизм локализации	Типичное разрешение	Основные преимущества/ограничения
Обычный BOTDA / BOTDR	Прямое перекрытие импульсов	Сантиметровый класс	Простой и надежный, но ограниченный временем жизни акустических волн и переходным спектральным расширением
Dark-pulse / dark-base	Локальное снижение интенсивности на фоне уже установленного взаимодействия	До 20 мм	Преодолевает прямой предел ширины импульса, но чувствителен к коэффициенту затухания, дрейфу базовой линии и ошибкам вычитания
PPP-BOTDA	Длинный импульс возбуждения плюс короткий импульс считывания	Сантиметровый класс	Сохраняет узкий спектральный отклик при использовании привычной геометрии BOTDA; оптимизация по времени и мощности имеет решающее значение
DPP-BOTDA	Разница между двумя откликами длинных импульсов	От сантиметрового до субметрового, в зависимости от разницы в ширине	Отличная спектральная точность и совместимость с BOTDA; основным недостатком является дифференциальный шум
BEDS	Короткое фазовое возмущение предварительно возбужденного акустического поля	Сантиметровый класс	Одновременно высокое пространственное и спектральное разрешения; требует точного контроля фазы и тщательного управления артефактами эхо-сигнала
BOCDA	Синтезированный корреляционный пик между встречными волнами	Миллиметровый класс	Отличная локализация и произвольный доступ; однозначный диапазон ограничен периодичностью корреляции

BOCDR	Рефлектометрическая локализация в корреляционной области	От сантиметрового до миллиметрового класса	Достоинство – односторонний доступ к волокну; дальность действия и уровень шума остаются проблематичными
Методы динамических решеток	Считывание данных с сохраненной акустической решетки в ортогональной поляризации или специализированной геометрии	Сантиметровый класс и выше	Позволяют преодолеть фундаментальный физический предел, связанный со временем жизни фоонов, и достичь сантиметрового и даже субсантиметрового разрешения; требуют сохранения поляризации или специализированной реализации
Использование кодирования BOTDA	Увеличение энергии кодированного сигнала; разрешение определяется другим методом	Зависит от базового метода	Повышает отношение сигнал/шум (SNR) и снижает нагрузку на усреднение; само по себе кодирование не является механизмом локализации

Из этой сводки видно, что ни один метод не является безусловно лучшим. Темные импульсы и бриллюэновское эхо продемонстрировали, что метровое ограничение можно преодолеть физически. Методы PPP и DPP наиболее органично встраиваются в традиционную BOTDA-платформу, поэтому они особенно привлекательны для практических приборов. Корреляционные методы обеспечивают наилучшую локализацию, но платят за нее дальностью и системной сложностью. Кодовые методы почти всегда выступают «усилителями» базовой архитектуры, а не отдельными механизмами локализации.

6. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

6.1. Постановка задачи алгоритмического улучшения разрешающей способности

При наличии априорных сведений о структуре распределения (например, кусочно-постоянный профиль деформации, наличие ограниченного числа локальных неоднородностей) целесообразно рассматривать измерительную систему как линейный дискретный канал с известной импульсной характеристикой и шумом и решать задачу

восстановления искомого профиля по результатам измерения свёртки. В одномерном приближении по координате z измеренный сигнал $s(z)$ можно записать в виде [27]

$$s(z) = (h \cdot x)(z) + n(z) = \int h(z - \zeta)x(\zeta)d\zeta + n(z), \quad (17)$$

где $x(z)$ – искомое "истинное" распределение (например, профиль температуры или деформации), $h(z)$ – эффективная импульсная характеристика, определяемая длительностью импульса, акустическим откликом и оконной функцией, а $n(z)$ – шум измерения.

Задача повышения пространственного разрешения сводится к оцениванию $x(z)$ по известному $s(z)$ при наличии априорной информации о $h(z)$ и статистике шума. Поскольку свёрточный оператор, как правило, сильно сглаживает высокочастотные компоненты, задача является некорректно обусловленной и требует регуляризации. При этом интерес представляют как повышение разрешения в пространственной области (восстановление более узких неоднородностей), так и улучшение точности оценки бриллюэновской частоты в каждой точке, определяющей измеряемые деформации и температуру.

6.2. Применение деконволюционных алгоритмов

Одним из наиболее разработанных подходов к улучшению разрешения является использование деконволюционных алгоритмов, опирающихся на априорную модель линейной свёртки и допускающих включение регуляризующих членов для подавления шума. В работе [28] предложен подход на основе деконволюции с регуляризацией полной вариацией, позволяющий существенно улучшить пространственное разрешение за счёт постобработки измерений, полученных с использованием длинных импульсов и дифференциальных пар импульсов.

В частотной области свёртка переходит в произведение: $S(\omega) = H(\omega)X(\omega) + N(\omega)$. При отсутствии шума формальное решение для восстановленного спектра $X(\omega)$ имеет вид $X(\omega) = S(\omega)/H(\omega)$, однако при реальном шуме малые значения $|H(\omega)|$ приводят к неконтролируемому усилению шума.

Оптимальной в смысле минимизации среднеквадратической ошибки при известных спектрах сигнал/шума является фильтрация Винера [29]:

$$\hat{X}(\omega) = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \frac{\Phi_N(\omega)}{\Phi_X(\omega)}} S(\omega), \quad (18)$$

где $\Phi_x(\omega)$ и $\Phi_N(\omega)$ — спектральные плотности мощности сигнала и шума. На практике их оценивают эмпирически, а параметр Φ_N/Φ_x часто аппроксимируется постоянной величиной, подбираемой по критерию компромисса между разрешением и усилением шума.

Альтернативным подходом является деконволюция с регуляризацией по Тихонову, в которой искомое распределение находится из задачи минимизации функционала:

$$J(x) = \|h \cdot x - s\|_2^2 + a \|L \cdot x\|_2^2 \rightarrow \min_x, \quad (19)$$

где L — оператор сглаживания (например, первая или вторая разностная производная), a — параметр регуляризации, определяющий степень подавления высокочастотных компонент. Такой подход позволяет устойчиво восстанавливать резкие границы "горячих точек" при умеренном росте шума [30].

В ряде работ предложены алгоритмы повышения эффективного разрешения, основанные на спектральном декомпозировании измеренного BGS внутри одной разрешающей ячейки. Если в пределах ячейки локальная деформация занимает лишь часть длины Δz , то измеренный спектр представляет собой взвешенную сумму двух (или более) лоренцевых линий, соответствующих деформированному и недеформированному участкам.

Восстанавливая параметры нескольких лоренцевых компонент путём нелинейной аппроксимации, можно определить фактическую долю деформированного участка и, следовательно, оценить "подразрешающую" структуру распределения. Такой подход, по сути, реализует спектральное сверхразрешение по координате за счёт использования априорной модели BGS.

6.3 Подпространственные и интерполяционные методы сверхразрешения

Подпространственные методы, такие как MUSIC и ESPRIT, изначально разработанные для задач радиолокации и спектрального анализа, могут быть адаптированы для высокоточного оценивания бриллюэновской частоты смещения, если рассматривать измеренный спектр BGS как сумму нескольких синусоидальных (или лоренцевых) компонент на фоне шума [31].

В простейшем случае, когда на каждом участке волокна доминирует одна бриллюэновская линия, подпространственные методы позволяют оценивать ν_B с точностью, существенно превосходящей шаг дискретизации по частоте, при условии достаточного отношения сигнал/шум и корректной модели шума. Это повышает эффективное частотное разрешение без увеличения количества частотных отсчётов.

Другим направлением является использование нелинейной интерполяции BGS по частоте и по координате на основе обучаемых моделей — полиномиальных аппроксиматоров, сплайновых функций и (в последнее время) глубоких нейронных сетей, специально оптимизированных для восстановления гладких спектров из малочисленных отсчётов.

Нелинейная интерполяционная глубокая сеть (Nonlinear Interpolation Deep Neural Network, NIDNN) была предложена для одновременной интерполяции и подавления шума BGS, что позволяет уменьшать число частотных точек и время измерения при сохранении точности извлечения бриллюэновской частоты смещения. Аналогичным образом сети сверхразрешения могут восстанавливать более детализированный профиль распределения по координате на основе малочисленных исходных измерений.

6.4 Нейросетевые и физико-информированные алгоритмы сверхразрешения

Сверточные нейронные сети (CNN) продемонстрировали высокую эффективность при прямом извлечении распределения бриллюэновской частоты смещения из двумерных массивов измеренных BGS (координата–частота) без явной процедуры спектрального подбора. В одной из работ предложена полно-сверточная сеть для оценки BFS, обученная на синтезированных данных с различными уровнями шума и параметрами спектра [31].

Полученные результаты показали, что CNN обеспечивает более высокую точность оценивания $v_B(z)$ по сравнению с традиционной лоренцевой аппроксимацией, особенно при низком отношении сигнал/шум, а также существенно снижает вычислительные затраты при обработке больших массивов данных. Тем самым, нейросетевой оценщик фактически повышает эффективное частотное разрешение измерителя.

Недавние работы предлагают рассматривать задачу повышения пространственного разрешения как задачу деконволюции с участием глубокой нейросетевой архитектуры, в которой априорная модель свёрточного отклика (импульсной характеристики) явно встраивается в структуру сети.

Одним из ключевых вопросов для применения нейросетевых методов в распределённых датчиках является переносимость обученных моделей между различными установками, типами волокон и спектральными характеристиками. Для решения этой задачи развиваются схемы обучения без учителя (unsupervised) и самоконтролируемого обучения, в которых сеть оптимизируется по критерию согласия с физической моделью и статистикой шума и не требуется разметка в виде "истинного" распределения температуры или деформации.

В современных системах распределённых бриллюэновских волоконно-оптических датчиках всё более распространены гибридные архитектуры, в которых традиционная физическая часть измерителя сочетается с облачным или встроенным модулем машинного обучения. Типичная структурная схема такой системы включает следующие компоненты.

- Базовый BOTDA- / BOCDA-измеритель с оптимизированным импульсным или корреляционным формированием зондирующего сигнала.
- Модуль предварительной обработки (усреднение, нормировка, фильтрация по частоте и координате).
- Нейросетевой модуль, реализующий либо прямое извлечение $v_B(z)$ из двумерных данных, либо восстановление высокоразрешённого распределения спектра бриллюэновского усиления вдоль всей длины оптического волокна.
- Модуль контроля качества, оценивающий доверительные интервалы, проверяющий непротиворечивость результатов и при необходимости переключающийся на более консервативные алгоритмы (например, лоренцеву аппроксимацию) в условиях выхода параметров за пределы области обучающей выборки.

Такая архитектура позволяет постепенно внедрять методы машинного обучения в существующие измерительные комплексы, не требуя кардинальной переработки аппаратной части и обеспечивая обратную совместимость с традиционными алгоритмами обработки.

Рассмотренные выше подходы позволяют реализовать алгоритмы сверхразрешения, которые легко адаптируются к новой аппаратной конфигурации, изменению длины волокна или к новым спектральным свойствам среды, сохраняя при этом высокую точность восстановления тонких пространственных деталей.

6.4 Сравнительный анализ алгоритмов и рекомендации по выбору

На этапе практического проектирования анализируемых волоконно-оптических датчиков важна не только максимальная достижимая разрешающая способность, но и комплекс факторов: устойчивость к шуму, вычислительная сложность, требования к объёму обучающих данных и совместимость с существующей аппаратурой. В таблице ниже приведено качественное сравнение основных классов алгоритмов [32, 33].

Таблица 2. Качественное сравнение основных классов алгоритмов

Класс алгоритма	Повышение пространственного разрешения	Требования к модели/априори	Вычислительная нагрузка	Зависимость от отношения сигнал/шум

Класс алгоритма	Повышение пространственного разрешения	Требования к модели/априори	Вычислительная нагрузка	Зависимость от отношения сигнал/шум
Линейная деконволюция (Винер, Тихонов)	Субметровое, зависит от качества модели $h(z)$	Необходима модель импульсной характеристики и спектра шума	Средняя–высокая	Чувствительна к неточностям модели
Спектральная декомпозиция BGS внутри ячейки	Подразрешающее выделение долей деформированных участков	Априорная модель BGS (сумма лоренцевых линий)	Средняя (нелинейная аппроксимация)	Хорошая устойчивость при высоком отношении сигнал/шум
Подпространственные методы (MUSIC/ESPRIT)	Высокое частотное сверхразрешение	Требуются стационарность и модель шума	Средняя	Чувствительны к отклонению от модели
CNN–оценщики BFS	Повышенное частотное разрешение и устойчивость к шуму	Необходима обучающая выборка (симуляции/эксперимент)	Высокая при обучении, низкая–средняя при применении	Хорошая устойчивость к шуму, но возможна деградация при выходе за пределы области обучения

Из таблицы следует, что наибольший потенциал с точки зрения сверхразрешения имеют гибридные подходы, сочетающие физическое моделирование и методы машинного обучения. Однако для задач промышленного мониторинга с жёсткими требованиями к надёжности и воспроизводимости по-прежнему сохраняют значение более консервативные методы — импульсное кодирование, линейная деконволюция и лоренцева аппроксимация при повышенном отношении сигнал/шум.

Практические рекомендации по выбору алгоритмов можно сформулировать следующим образом.

- Для протяжённых линий (до 100 км) с умеренными требованиями к разрешению (1–2 м) целесообразно применять импульсное кодирование (Golay, биполярные коды) и

CNN-оценщики BFS, обеспечивающие повышение точности без радикального усложнения аппаратуры.

- Для средних протяжённостей (10–30 км) и требований к разрешению порядка 0.5–1 м оптимально сочетание DPP/Golay-кодирования с линейной деконволюцией и/или подпространственными методами оценивания частоты.

- Для задач, требующих сантиметрового и субсантиметрового разрешений на умеренных длинах (до нескольких километров), наиболее перспективны BOFDA-схемы с корреляционным сверхразрешением в сочетании физико-информированными алгоритмами.

7. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Если проследить эволюцию развития анализируемых датчиков, то можно выделить несколько крупных тенденций. Во-первых, центр инноваций сместился от простого демонстраирования все более тонкого пространственного разрешения к повышению системной полезности высокоразрешающего измерения. Это означает меньшую неопределенность при том же разрешении, более быстрое сканирование, меньшую потребность в усреднении, лучшую иммунность к поляризации и более управляемую сложность оптического тракта.

Во-вторых, постепенно стирается граница между идеологией временной и корреляционной областей. Современные системы все чаще заимствуют идеи из обеих школ. Появляются гибридные генераторы волн, когерентный прием, кодовые сигналы и фазорные реконструкции, объединенные в архитектуры, которые раньше относили бы к разным классам.

В-третьих, практический спрос одновременно тянет технологию в противоположные стороны: к увеличению дальности для инфраструктурных приложений и к уменьшению разрешающей ячейки для высокоточных материаловедческих задач. Из-за этой бифуркации одна универсальная архитектура, вероятно, не будет доминировать во всей области, скорее, высокодальнобойные BOFDA-системы и ультравысокоразрешающие корреляционные системы продолжают развиваться параллельно.

При этом остаются и нерешенные проблемы. Скорость измерения: многие высокоразрешающие методы по-прежнему завязаны на частотное сканирование и значительное усреднение. Для статических температурных карт это приемлемо, но для динамической деформации и вибрации это является ограничением. Сложность: фазокодовые и корреляционные схемы обеспечивают великолепную локализацию, однако

требуемая микроволновая и электрооптическая точность пока слишком обременительна для массовой коммерциализации. Перенос калибровки: результаты, полученные в лабораторных условиях, далеко не всегда напрямую переходят на полевые кабели, покрытые волокна, составные участки со сварками или волокна, встроенные в композиты, где локальный бриллюэновский спектр может заметно отклоняться от идеальной однолоренцевской формы.

Наконец, высокая локализация обостряет влияние ранее второстепенных эффектов. Неполное гашение, частотный чирп, дрейф поляризации, остаточные отражения и паразитные интерференции способны генерировать артефакты, сравнимые с тем сигналом, который система пытается измерить. Поэтому дальнейший прогресс будет зависеть не только от рекордов по разрешению, но и от того, насколько инженерно устойчивыми окажутся соответствующие решения.

Перспективы развития алгоритмических методов для повышения разрешающей способности распределённых бриллюэновских датчиков связаны с интеграцией классических методов инверсных задач с современными подходами машинного обучения и глубинных нейронных сетей. Обучаемые модели могут использоваться как для прямого восстановления распределения деформаций и температуры по измеренным BOTDA- / BOTDR-данным, так и для аппроксимации решения вариационных задач деконволюции с явной или неявной регуляризацией.

Представляет интерес разработка гибридных архитектур, в которых физически информированные нейронные сети (Physics – Informed Neural Networks, PINN) или сверточные сети в одномерном и двумерном вариантах используют в качестве априорной информации модель бриллюэновского рассеяния и структуру ядра свёртки. Такие подходы потенциально позволяют реализовать быстрые и устойчивые восстановления профилей с высоким разрешением при ограниченном числе частотных отсчётов и низком SNR.

Важным направлением также является совместная оптимизация зондирующих сигналов, архитектуры измерительной системы и алгоритмов обработки, что в телекоммуникациях и радиолокации реализуется в концепции «совместного дизайна сигнал–приёмник». Применительно к бриллюэновским датчикам это означает синтез форм импульсов, кодов, режимов усиления и алгоритмов декодирования, ориентированных на максимизацию информационной пропускной способности по распределению деформаций и температуры при заданных ограничениях по мощности и длине линии.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Историю повышения пространственного разрешения в распределенном бриллюэновском зондировании можно трактовать как постепенное разрешение двух величин, которые когда-то казались неразделимыми: длины зоны взаимодействия и узости бриллюэновского спектра. В классической BOTDA, основанной на импульсном стробировании, обе величины привязаны к одной и той же длительности импульса, а значит, неизбежно сталкиваются с акустическим временем жизни среды. Высокоразрешающие аппаратные методы успешны тогда, когда находят способ обойти эту привязку.

По мере развития технологии передний край определяется уже не вопросом «насколько малым может стать пространственное разрешение», а вопросом «насколько малым оно может стать при сохранении спектральной точности, долговременной стабильности, приемлемой дальности и реализуемой аппаратной сложности». Ответ на него, вероятнее всего, и дальше будет приходить из той же инженерной логики, которая породила основные прорывы, рассмотренные в этом обзоре: из все более тонкого управления самим оптико-акустическим взаимодействием.

Алгоритмические методы существенно изменили само понимание пространственного разрешения в волоконно-оптических датчиках на основе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. То, что раньше трактовалось главным образом как ограничение по длительности импульса, сегодня корректнее описывается как восстанавливаемое размытие в присутствии шума, ограниченной полосы и несовпадения модели. Дифференциальные методы реконструкции используют управляемые изменения прямого ядра. Методы деконволюции обращают пространственное размытие при явных предположениях о шуме. Регуляризованная инверсия вводит физически осмысленные априоры, особенно полезные для кусочно-гладких полей измеряемой величины. Продвинутой спектральной оценке извлекает информацию о событиях, длительности которых меньше длительности импульса из уширенных или смешанных спектров. Подавление шума определяет, насколько далеко можно зайти в заострении, прежде чем проявится неустойчивость. Методы на основе данных обещают дальнейший прогресс, но они должны быть ограничены физикой и метрологией.

Несмотря на наличие практических ограничений, связанных с точностью моделей, вычислительной сложностью и влиянием реальных неоднородностей, алгоритмический подход представляет собой мощный инструмент, позволяющий на базе существующей аппаратуры реализовывать новые режимы измерений и расширять функциональные возможности бриллюэновских распределённых датчиков. Перспективным направлением

дальнейших исследований являются интеграция алгоритмов инверсных задач с методами машинного обучения и совместный синтез зондирующих сигналов и процедур обработки для заданных приложений мониторинга.

Полученные результаты формируют количественную основу для инженеров и исследователей, развертывающих распределенные бриллюэновские датчики, и позволяют обоснованно выбирать компромиссы между разрешающей способностью, точностью, вычислительной эффективностью, надежностью и метрологической прозрачностью. Представленная сравнительная база закладывает фундамент для дальнейшего развития методологий обработки сигналов в волоконно-оптическом зондировании в направлении увеличения дальности мониторинга и снижения погрешности измерений в задачах контроля состояния распределенной инфраструктуры.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Фотоники в телекоммуникациях» Сибирского Государственного университета телекоммуникаций и информатики за ценные рекомендации, способствующие повышению научного уровня настоящей статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках Государственного задания Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, утвержденного Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, соглашение № 071-03-2026-011, 29.01.2026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thevenaz L., Foaleng Mafang S. and Nikles M.* Frontiers of Optoelectronics in China. 2010. V. 3. № 1. P. 13. <https://doi.org/10.1007/s12200-009-0086-9>.
2. *Nikles M., Thevenaz L. and Robert P.A.* Journal of Lightwave Technology. 1997. V. 15. № 10. P. 1842.
3. *Song K.-Y., Chin S., Primerov N. and Thevenaz L.* 2010. Optics Letters. V. 35. № 1. P. 52. <https://doi.org/10.1364/OL.35.000052>.
4. *Horiguchi T., Shimizu K., Kurashima T., Tateda M. and Koyamada Y.* Journal of Lightwave Technology. 1995. V. 13. № 7. P. 1296. <https://doi.org/10.1109/50.400684>.
5. *Bai Q., Yang M., Wang D., Zhang M. and Li X.* Sensors. 2019. V. 19. № 8. P. 1862. <https://doi.org/10.3390/s19081862>.

6. *Sperber T., Eyal A., Tur M. and Thevenaz L.* Optics Express. 2010. V. 18. № 8. P. 8671. <https://doi.org/10.1364/OE.18.008671>.
7. *Bao X., Webb D.J. and Jackson D.A.* Optics Letters. 1993. V. 18. P. 552.
8. *Merklein M., Kabakova I.V., Zarifi A. and Eggleton B.J.* Applied Physics Reviews. 2022. V. 9. P. 041306. <https://doi.org/10.1063/5.0095488>.
9. *Li M., Zhao H., Yuan T., Cui X., Yu X. and Han Y.* IET Optoelectronics. 2022. V. 16. № 6. P. 238. <https://doi.org/10.1049/ote2.12081>.
10. *Li W., Bao X., Li Y. and Chen L.* Optics Express. 2008. V. 16. № 26. P. 21616. <https://doi.org/10.1364/oe.16.021616>.
11. *Dong Y., Zhang H., Chen L., Bao, X.* Applied Optics. 2012. V. 51. № 9. P. 1229. <https://doi.org/10.1364/ao.51.001229>.
12. *Kishida K., Li C.-H. and Nishiguchi K.* Proceedings of SPIE, 17th International Conference on Optical Fiber Sensors. 2005. V. 5855. P. 559. <https://doi.org/10.1117/12.624259>
13. *Minardo A., Bernini R. and Zeni L.* Optics Express. 2011. V. 19. № 20. P. 19233. <https://doi.org/10.1364/OE.19.019233>.
14. *Okawa Y., Yamashita R.K., Kishi M. and Hotate K.* Journal of the Optical Society of America B. 2020. V. 37. № 7. P. 1961. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2019.STh4A.3>.
15. *Brown A.W., Colpitts B.G. and Brown K.* IEEE Photonics Technology Letters. 2005. V. 17. № 7. P. 1501. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.848400>.
16. *Wang F., Bao X., Chen L., Li Y., Snoddy J. and Zhang X.* Optics Letters. 2008. V. 33. P. 2707. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002707>.
17. *Brown A.W., Colpitts B.G. and Brown K.* Journal of Lightwave Technology. 2007. V. 25. P. 381. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.886672>.
18. *Foaleng S.M., Tur M., Beugnot J.-C. and Thevenaz L.* Journal of Lightwave Technology. 2010. V. 28. № 20. P. 2993.
19. *Bao X. and Chen L.* Sensors. 2012. V. 12. № 7. P. 8601. <https://doi.org/10.3390/s120708601>.
20. *Song K.-Y., He Z. and Hotate K.* Optics Letters. 2006. V. 31. № 17. P. 2526. <https://doi.org/10.1364/OL.31.002526>.
21. *Garus D., Krebber K., Schliep F. and Gogolla T.* Optics Letters. 1996. V. 21. № 17. P. 1402.
22. *Mizuno Y., Zou W., He Z. and Hotate K.* Optics Express. 2008. V. 16. № 16. P. 12148. <https://doi.org/10.1364/OE.16.012148>.
23. *Zan M.S.D.B., Masui M., Peng F. and Li W.* Journal of Lightwave Technology. 2012. V. 30. № 21. P. 3338. <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2215578>.
24. *Soto M. A., Bolognini G. and Di Pasquale F.* Optics Express. 2012. V. 20. № 7. P. 6860. <https://doi.org/10.1364/OE.20.006860>.
25. *Yu Z., Zhang M., Dai H., Liu L., Zhang J., Jin X. and Wang G.* Optics and Laser Technology. 2018. V. 105. P. 89. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.037>.
26. *Urricelqui J., Sagues M. and Loayssa A.* Optics Express. 2014. V. 22. № 14. P. 17403. <https://doi.org/10.1364/OE.22.017403>.

27. *Barkov F.L, Krivosheev A.I., Konstantinov Y.A., and Davydov A.R.* *Fibers.* 2023. V. 11. № 6. P. 51. <https://doi.org/10.3390/fib11060051>.
28. *Wu H., Guo N., Feng D., Yin G. and Zhu T.* *Optics Express.* 2022. V. 30. № 11. P. 19652. <https://doi.org/10.1364/OE.459519>.
29. *Shen L., Zhao Z., Zhao C., Wu H., Lu C. and Tang M.* *Journal of Lightwave Technology.* 2021. V. 39. № 7. P. 2215. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3047504>.
30. *Ryu G., Song K.-Y., Zou W., He Z. and Hotate K.* *Journal of Lightwave Technology.* 2017. V. 35. № 24. P. 5311. <https://doi.org/10.1007/s13320-013-0130-7>.
31. *Dong Y., Zhang H., Chen L. and Bao X.* *Applied Optics.* 2012. V. 51. № 9. P. 1229. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001229>.
32. *Brown A. W., DeMerchant M. D., Bao X. and Bremner T. W.* *Journal of Lightwave Technology.* 1999. V. 17. № 7. P. 1179.
33. *Haodi Z., Qi W.* *Intelligent Perception Engineering.* 2025. V. 2. № 2. P. 31. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-4965.2025.02.003>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Бриллюэновское взаимодействие и лоренцевская форма спектра усиления

Рис. 2. Зависимость пространственного разрешения от длительности импульса

Рис. 3. Зависимость эффективной ширины спектра обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна от длительности зондирующего импульса

Рис. 4. Сравнение методов по разрешающей способности

Рис. 5. Дифференциальная пара импульсов

Рис. 6. Формы типичных аппаратных сигналов

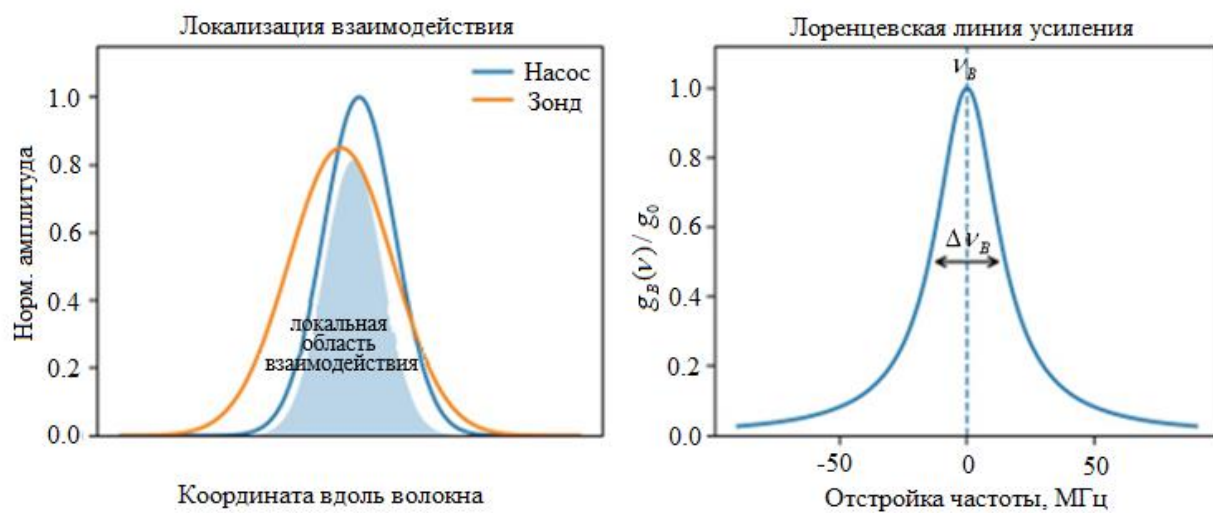


Рис. 1.

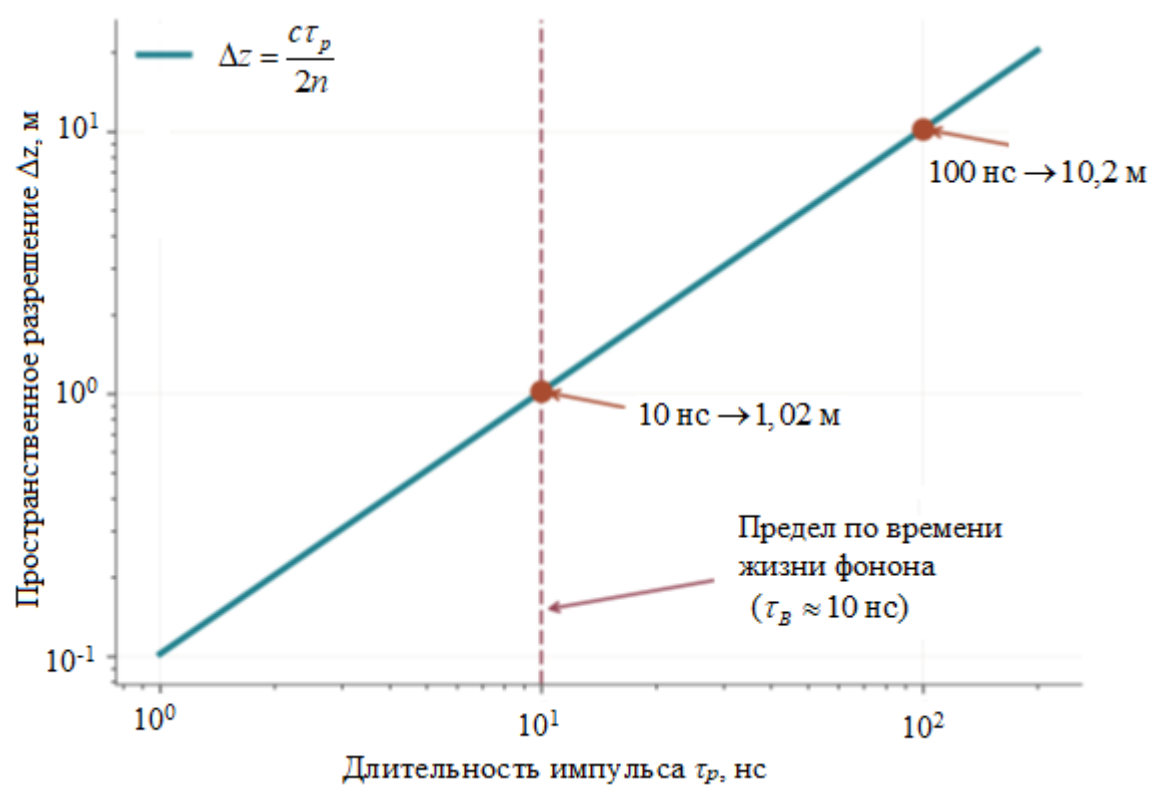


Рис. 2.

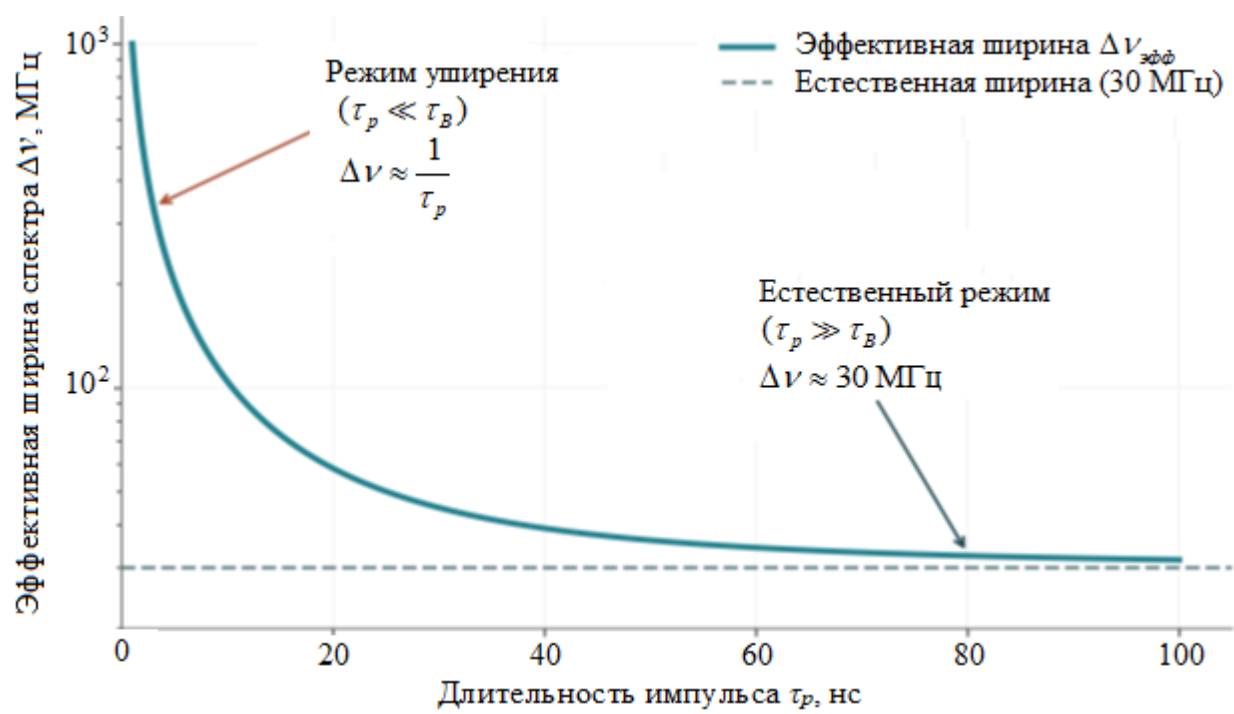


Рис. 3.

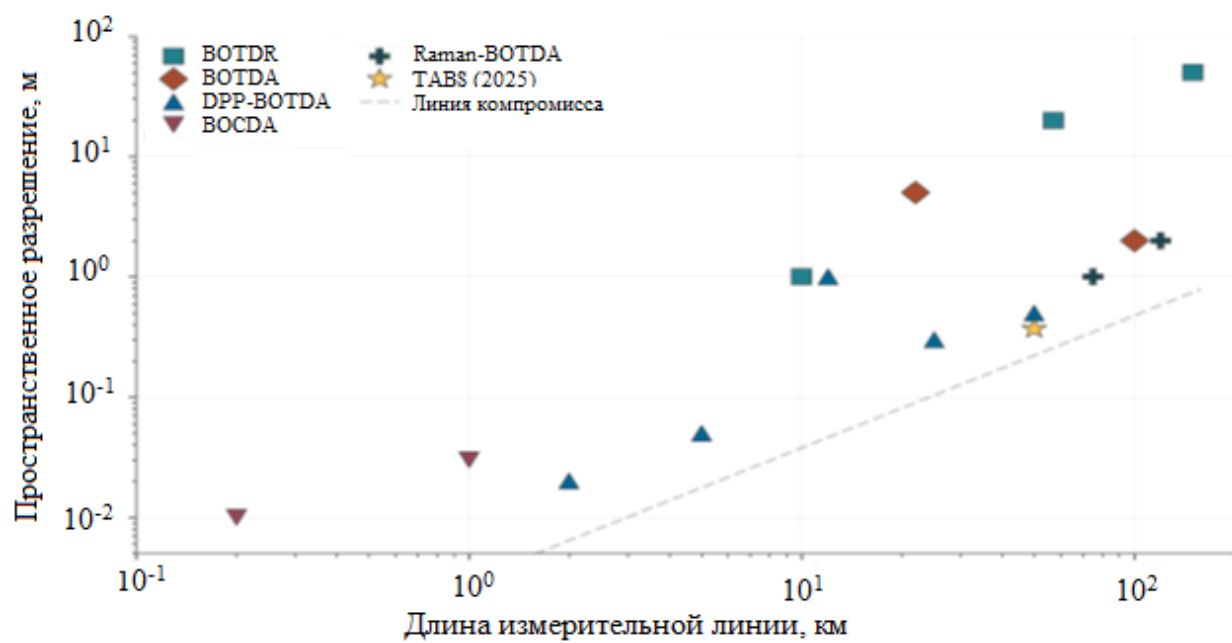


Рис. 4.



Рис. 5.

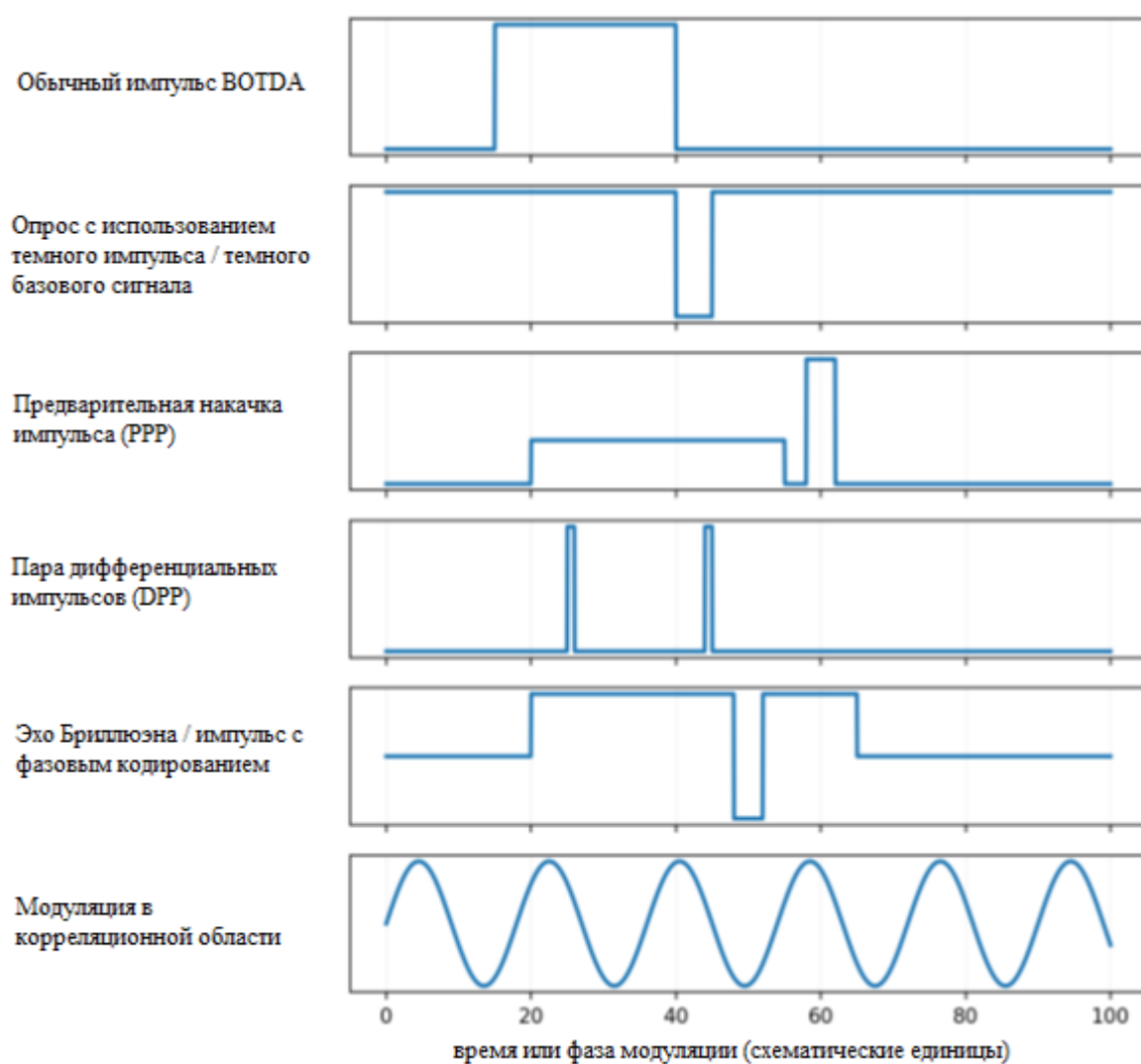


Рис. 6.