

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ UWB-ДАЛЬНОМЕТРИИ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ В СЛОЖНОЙ РАДИОСРЕДЕ

Смирнов Петр Ильич,
Вологодский государственный университет, Вологда, Россия,
smirnovpi@vogu35.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-5-12-21

Валеев Олег Алексеевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ), Москва, Россия, o.valyaev@madi.ru

Manuscript received 08 February 2026;
Accepted 17 April 2026

Баурова Наталья Ивановна,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ), Москва, Россия, nbaurova@mail.ru

Мазлумян Григорий Сергеевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ), Москва, Россия, g.mazlumyan@madi.ru

Субботин Борис Сергеевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ);
ФГБОУ ВО "РГУ им. А.Н. Косыгина", Москва, Россия, bsubbotin@mail.ru

Ключевые слова: ультра-широкополосная радиосвязь (UWB), радиодальнометрия, позиционирование, карьерная техника, NLOS, многолучевость, погрешность измерения, геометрический фактор

В условиях горных карьеров задачи высокоточного позиционирования карьерной техники осложняются сложной геометрией выработки, наличием высоких уступов, металлических конструкций и интенсивной многолучевостью, приводящих к эффектам NLOS и существенным погрешностям радиодальнометрии. В работе рассматривается применение ультра-широкополосной технологии UWB для позиционирования подвижных машин в карьере и предлагается стохастическая модель ошибки дальнометрии, учитывающая вклад NLOS смещения, многолучевого распространения и геометрического фактора конфигурации опорных точек. На основе имитационного моделирования анализируется распределение координатной ошибки в типичных сценариях карьерной радиосреды (LOS, частичный и полный NLOS) при благоприятной и неблагоприятной геометрии размещения UWB опорных станций. Показано, что в условиях прямой видимости при благоприятной геометрии анкерных станций средняя ошибка позиционирования составляет около 0.07 м, RMSE – 0.09 м, а 95 й процентиль не превышает 0.17 м, тогда как при полном NLOS и неблагоприятной геометрии RMSE возрастает до 12.84 м. Применение простой робастной обработки дальномерных измерений с ограничением выбросов по порогу 5 м позволяет уменьшить RMSE в этом сценарии до 4.97 м, существенно снижая влияние грубых аномалий при сохранении точности в LOS условиях. Практическая значимость работы заключается в формировании рекомендаций по размещению базовых UWB станций и настройке алгоритмов обработки измерений, обеспечивающих требуемую точность мониторинга движения карьерной техники в сложной радиосреде.

Информация об авторах:

Смирнов Петр Ильич, Вологодский государственный университет, Институт машиностроения, энергетики и транспорта, кафедра "Автомобили и автомобильное хозяйство", доцент, к.т.н., Вологда, Россия. ORCID 0000-0002-9405-7248

Валеев Олег Алексеевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Институт автомобильной и специальной техники и инжиниринга, кафедра "Транспортные установки", старший преподаватель, Москва, Россия, ORCID 0009-0000-1025-8388

Баурова Наталья Ивановна, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Институт автомобильной и специальной техники и инжиниринга, кафедра "Производство и ремонт автомобилей и дорожно-строительных машин", профессор, д.т.н., Москва, Россия. ORCID 0000-0001-9529-2031

Мазлумян Григорий Сергеевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), проректор по научной работе, к.т.н., Москва, Россия. ORCID 0009-0001-9296-0775

Субботин Борис Сергеевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), старший научный сотрудник, к.т.н.; РГУ им. А.Н. Косыгина, доцент, к.т.н., Москва, Россия, ORCID 0000-0003-1685-082X

Для цитирования:

Смирнов П.И., Валеев О.А., Баурова Н.И., Мазлумян Г.С., Субботин Б.С. Оценка точности UWB-дальнометрии для позиционирования карьерной техники в сложной радиосреде // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №5. С. 12-21.

For citation:

P.I. Smirnov, O.A. Valyaev, N.I. Baurova, G.S. Mazlumyan, B.S. Subbotin, "Assessment of UWB Ranging Accuracy for Positioning Mining Trucks in a Complex Radio Environment," T-Comm, 2026, vol. 20, no.5, pp. 12-21. (in Russian)

Введение

Позиционирование подвижных объектов в горных выработках остаётся одной из ключевых задач цифровизации промышленного транспорта, поскольку эффективность диспетчеризации, контроль движения техники и обеспечение безопасности напрямую зависят от точности координатной информации. В условиях карьеров и подземных выработок система локализации должна функционировать в сложной и нестационарной радиосреде, где на распространение сигнала одновременно влияют высокие уступы, отвалы, технологическое оборудование, крупногабаритная техника и постоянное изменение конфигурации рабочей зоны.

В отличие от открытых пространств, карьер и шахта характеризуются выраженной многолучевостью, частой потерей прямой видимости и сильной зависимостью качества радиоканала от геометрии выработки. Эти факторы приводят к росту ошибки дальнометрии и существенно ограничивают применение спутниковой навигации как единственного источника координатной информации. Поэтому в последние годы повышенное внимание уделяется локальным радиотехническим системам позиционирования, основанным на измерении времени прихода или времени пролёта сигнала между опорными станциями и подвижным объектом.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области являются технологии Wi-Fi FTM/RTT и UWB, которые обеспечивают метр- и субметровую точность при благоприятных условиях распространения и при этом не требуют спутникового сигнала. Для Wi-Fi FTM показано, что точность измерения существенно зависит от ширины канала, калибровки смещения, уровня помех и многолучевого распространения [1, 7, 8], а в условиях NLOS погрешность заметно возрастает [2, 10, 11]. UWB-системы обладают более высокой временной разрешающей способностью и потому особенно интересны для сложных промышленных сценариев, включая шахты и подземные выработки [3, 4].

Вместе с тем высокая точность UWB в лабораторных и indoor-сценариях не гарантирует аналогичного результата в карьерах, где NLOS и многолучевое распространение возникают систематически и часто сопровождаются неблагоприятной геометрией расположения базовых станций. Для таких условий были предложены методы компенсации NLOS-ошибок, основанные на классификации типа канала, адаптивной фильтрации и расширенном фильтре Калмана [6], однако большинство из них ориентировано на типовые indoor-среды или подземные тоннели и не учитывает специфику открытых горных выработок. Кроме того, развитие методов на основе картирования канала, скрытых марковских моделей и мультимодального обучения [13, 14] показывает, что современные подходы к локализации всё чаще переходят от простой геометрии к учёту структуры канала и его временной изменчивости. Отдельного внимания заслуживают работы по совместной оценке времени прихода в многолучевых каналах [12], а также новые стандарты, такие как IEEE 802.11az с использованием миллиметрового диапазона [5] и вопросы безопасности дальнометрии [15].

В работе [16] показано, что в условиях ограниченной видимости интеграция UWB с IMU и применение улучшенного ESKF существенно снижают ошибку позиционирования по сравнению с чистым UWB, что подтверждает необходимость робастной обработки измерений в NLOS-сценариях.

Несмотря на значительное число работ, посвящённых UWB-локализации в indoor- и подземных сценариях, большинство из них рассматривает сравнительно компактные геометрии, ограниченные диапазоны расстояний до опорных станций и умеренные уровни NLOS-искажений. В частности, опубликованные модели компенсации NLOS-ошибок, как правило, ориентированы на помещения, тоннели или шахтные выработки и не учитывают сочетание большой протяжённости рабочей зоны, выраженной высотной неоднородности и быстро меняющейся геометрии карьера. В настоящей работе это ограничение преодолевается за счёт явной параметризации карьерной радиосреды через DOP-подобный фактор, диапазон расстояний до анкерных точек и логнормальную модель NLOS-смещения, а также за счёт анализа устойчивости координатной оценки при 5000 прогонов для каждого сценария.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью оценки точности UWB-дальнометрии именно в условиях карьерной среды, где прямое перенесение indoor-моделей приводит к недооценке погрешностей и к ошибкам при проектировании системы позиционирования. В работе используется имитационный подход, позволяющий в контролируемых условиях варьировать параметры карьерной радиосреды, уровень NLOS и геометрический фактор расположения опорных станций.

Целью настоящей работы является имитационная оценка точности UWB-дальнометрии для позиционирования карьерной техники в сложной радиосреде с учётом влияния NLOS, многолучевости и геометрического фактора расположения опорных станций.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена и исследована имитационная модель UWB-позиционирования, ориентированная на карьерную радиосреду с учётом больших дальностей, неблагоприятной геометрии анкерных станций и систематических NLOS-искажений.

2. Выполнен анализ чувствительности координатной ошибки к изменению геометрии анкерной сети и доли NLOS-сценариев, что позволяет количественно оценить условия деградации точности в карьерных условиях.

3. Показано, что даже простая робастная обработка дальномерных измерений существенно уменьшает влияние грубых выбросов в сложной радиосреде, что подтверждает целесообразность предварительной фильтрации измерений при позиционировании карьерной техники.

1. Особенности радиосреды карьера

Радиосреда карьера формируется совокупностью факторов, существенно усложняющих распространение сигнала между опорными станциями и подвижной техникой. В первую очередь это высокая вероятность экранирования пря-

мого луча уступами, отвальными массивами, технологическими сооружениями и крупногабаритными машинами. Кроме того, поверхность уступов, стенок выработки и металлических конструкций создает многочисленные отраженные пути, которые накладываются на полезный сигнал и приводят к многолучевому распространению.

Для карьерной среды характерна не только сильная многолучевость, но и выраженная нестационарность канала. По мере продвижения фронта работ меняются геометрия выработки, взаимное расположение техники и опорных станций, а также условия видимости. Это означает, что один и тот же маршрут может в разные моменты времени соответствовать различным типам радиоканала: от устойчивого LOS до частичного или полного NLOS. Следовательно, система позиционирования должна быть чувствительна к изменению канальных условий и сохранять работоспособность в широком диапазоне сценариев.

С точки зрения радиотехнического анализа целесообразно выделить несколько типовых режимов распространения сигнала в карьере. Первый режим – LOS, при котором между меткой и опорной станцией существует прямая видимость, а основная ошибка измерения определяется шумом и остаточным влиянием отражений. Второй режим – частичный NLOS, когда прямой путь существует, но ослаблен или искажен отраженными компонентами. Третий режим – полный NLOS, при котором измерение формируется исключительно за счет отраженных путей и может содержать существенное систематическое смещение [6-8].

Наиболее критичным для UWB-дальнометрии является именно полный NLOS, поскольку в этом случае оценка времени прихода первого сигнала становится неопределенной, а измеренная дальность возрастает по сравнению с истинной. В сочетании с неблагоприятной геометрией опорных станций это приводит к заметному росту координатной ошибки, особенно если базовые станции расположены слабо симметрично относительно рабочей зоны техники. Таким образом, точность позиционирования определяется не только свойствами самого радиосигнала, но и пространственной организацией всей измерительной системы.

Еще одной особенностью карьера является большая протяженность рабочих зон. В отличие от помещений, где расстояния между узлами невелики и геометрия достаточно компактна, в карьере опорные станции могут находиться на значительном удалении друг от друга и от объекта позиционирования. Это усиливает роль геометрического фактора и делает ошибку особенно чувствительной к расположению анкерных точек. Поэтому при проектировании системы UWB-позиционирования необходимо учитывать не только точность оборудования, но и структуру рабочей зоны, рельеф, высотные отметки и потенциальные экранирующие объекты.

Для дальнейшего анализа целесообразно использовать модель, в которой измеренная дальность представляется суммой истинной дальности и нескольких составляющих ошибки: систематического NLOS-смещения, вклада многолучевости и случайной шумовой компоненты. Такая постановка позволяет исследовать влияние каждого фактора отдельно и затем оценить их совместное действие на координатную точность [6-9].

2. Модель UWB-дальнометрии и ошибки

В основу рассматриваемого подхода положена модель измерения расстояния между подвижной меткой и i -й опорной станцией, в которой измеренная дальность представляется как сумма истинной дальности и нескольких составляющих ошибки. Для UWB-систем в условиях карьера наибольший вклад в погрешность вносят NLOS-смещение, многолучевое распространение и случайная шумовая составляющая.

Пусть истинная дальность до i -й опорной станции равна d_i , а измеренное значение обозначим через r_i . Тогда модель измерения может быть записана в виде (1):

$$r_i = d_i + b_i + m_i + n_i, \quad (1)$$

где b_i – систематическое смещение, вызванное отсутствием прямой видимости (NLOS), m_i – ошибка, связанная с многолучевым распространением, n_i – случайная шумовая составляющая.

В имитационной модели NLOS-смещение b_i задается логнормальным распределением, поскольку оно гарантирует положительность ошибки дальности и позволяет воспроизводить редкие, но крупные превышения измеренного расстояния над истинным значением.

Истинная дальность выражается через координаты подвижного объекта $p = (x, y, z)^T$ и координаты i -й опорной станции $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ следующим образом (2):

$$d_i = \|p - p_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (2)$$

В LOS-условиях величины b_i близки к нулю, а ошибка определяется в основном шумом и остаточным влиянием отражений. В NLOS-режиме смещение b_i , напротив, становится положительным и приводит к завышению оценки дальности, поскольку приемник фиксирует более длинный отраженный маршрут. Для имитационного моделирования в настоящей работе принимается следующая стохастическая модель: шум n_i и многолучевая составляющая m_i задаются гауссовскими распределениями с нулевым средним и дисперсиями σ_n^2 и σ_m^2 соответственно, тогда как NLOS-смещение b_i моделируется логнормальным распределением с параметрами μ_b и σ_b , обеспечивающим строго положительное значение смещения.

При известном наборе измерений от N опорных станций задача позиционирования сводится к поиску вектора координат p , минимизирующего взвешенную сумму квадратов невязок:

$$J(p) = \sum_{i=1}^N \omega_i (r_i - \hat{d}_i(p))^2,$$

где $\hat{d}_i(p)$ – модельная дальность, вычисленная по (2), ω_i – весовые коэффициенты, отражающие доверие к каждому дальномерному измерению. В рассматриваемой работе веса используются для учета различий между LOS, частичным NLOS и полным NLOS, а также для реализации робастной обработки измерений.

В сложной радиосреде карьера особенно важным становится предварительное выделение измерений, полученных в

наиболее неблагоприятных условиях. Для этого могут использоваться пороговые критерии, робастные методы оценки и фильтрация выбросов. В ряде работ показано, что сочетание классификации типа канала и фильтрации ошибки позволяет существенно снизить влияние NLOS и повысить устойчивость координатной оценки. Кроме того, применение внешней инерциальной информации или дополнительной сенсорной поддержки может компенсировать кратковременные потери качества UWB-измерений.

Таким образом, предложенная модель дальнометрии отражает основные источники ошибок UWB-позиционирования в карьере и служит основой для последующего построения алгоритма координатной оценки. В следующем разделе будет рассмотрен порядок вычисления положения подвижного объекта по набору дальномерных измерений с учетом весовой обработки и фильтрации выбросов.

3. Алгоритм оценки координат

По результатам дальномерных измерений положение подвижного объекта определяется решением системы нелинейных уравнений, связывающих неизвестные координаты метки с известными координатами опорных станций. В общем случае, если доступны измерения дальности от N базовых станций, задача сводится к оценке вектора $p = [x, y, z]^T$, минимизирующего функционал невязки, сформированный с учетом надежности каждого канала.

Поскольку в условиях карьера часть измерений может быть искажена NLOS-смещением или многолучевостью, прямое решение без предварительной обработки часто приводит к нестабильной координатной оценке. Поэтому на практике целесообразно использовать двухэтапную схему: сначала выполняется отбраковка явно аномальных дальномерных значений, затем решается задача координатной оптимизации по оставшемуся набору измерений.

На первом этапе применяются критерии качества измерений, основанные на величине задержки, дисперсии ошибки, остатке после предварительной аппроксимации или результатах классификации канала. Если измерение признается ненадежным, ему назначается пониженный вес либо оно полностью исключается из решения. Такой подход позволяет уменьшить влияние систематических искажений, особенно в случаях устойчивого NLOS, характерного для карьерных выработок.

На втором этапе координаты объекта определяются как решение задачи минимизации взвешенной суммы квадратов невязок:

$$\hat{p} = \arg \min_p \sum_{i=1}^N \omega_i (d_i - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2})^2$$

Здесь ω_i – коэффициенты доверия к измерениям, определяемые до решения задачи или обновляемые итеративно в процессе оценивания. При равных весах модель сводится к классической трилатерации, однако в сложной радиосреде такой вариант обычно недостаточно устойчив.

Для повышения точности и устойчивости решения целесообразно использовать итерационный метод наименьших

квадратов. На каждой итерации координаты объекта уточняются по линеаризованной модели, а веса измерений пересматриваются в зависимости от текущих остатков. В результате система постепенно смещается в сторону более согласованного и физически правдоподобного решения. Такой подход особенно полезен в карьере, где качество измерений может резко меняться при переходе объекта из зоны LOS в зону частичного или полного NLOS.

При наличии дополнительной инерциальной информации возможна интеграция UWB-измерений с данными IMU. В этом случае радиодальнометрия задает абсолютные координатные ограничения, а инерциальный блок обеспечивает сглаживание траектории на коротких интервалах и компенсацию кратковременных провалов качества измерений. Для карьерной техники такая схема является особенно перспективной, поскольку движение объекта обычно носит протяженный и предсказуемый характер, а ошибка координат может быть дополнительно ограничена по кинематическим условиям.

Для оценки координат используется итерационный метод взвешенных наименьших квадратов. На k -й итерации формируются вектор невязок:

$$e^{(k)} = r - \hat{d}(p^{(k)}),$$

и матрица Якоби $H^{(k)}$, содержащая производные модельных дальностей по координатам. Итерационный шаг вычисляется как:

$$\Delta p^{(k)} = (H^T W H)^{-1} H^T W e^{(k)}, \quad (4)$$

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} + \Delta p^{(k)}, \quad (5)$$

где $W = \text{diag}(\omega_i)$ – диагональная матрица весов. Веса обновляются итеративно на основе нормированных остатков, что позволяет уменьшить влияние выбросов в NLOS-каналах.

Для решения задачи координатной оценки использован итерационный метод Гаусса–Ньютона с робастным взвешиванием. В качестве начального приближения использовалось линейное решение трилатерации по первым четырём анкерным станциям. Максимальное число итераций было ограничено значением 20, критерий сходимости $-\Delta p^{(k)} < 10^{-4}$ м. Если условие сходимости не выполнялось, принималось последнее итерационное значение. Для сценариев с сильными выбросами дополнительно применялось ограничение веса аномальных измерений.

Для подавления грубых выбросов в условиях NLOS использовалась пороговая робастная обработка дальномерных измерений. На каждой итерации координатной оценки вычислялись невязки между измеренными и рассчитанными по текущему приближению дальностями; измерения с абсолютной невязкой более 5 м исключались из пересчёта либо получали пониженный вес. Такой подход позволяет реализовать фильтрацию выбросов без знания истинной координаты объекта в реальном времени.

Для оценки качества полученного решения используются стандартные метрики: средняя ошибка позиционирования, среднеквадратическая ошибка, медианная ошибка и 95-й процентиль. В условиях выраженного NLOS необходимо также анализировать долю выбросов и устойчивость алгоритма к

деградации части опорных каналов. Именно эти показатели позволяют судить о пригодности системы для практического применения в карьере.

Таким образом, предложенный алгоритм оценки координат сочетает взвешенную оптимизацию, фильтрацию недоверенных дальномерных измерений и, при необходимости, инерциальную поддержку. В следующем разделе будет рассмотрена методика экспериментальной или имитационной оценки точности UWB-дальнометрии в типичных сценариях карьерной радиосреды.

4. Экспериментальная методика

Для оценки влияния NLOS-смещения и геометрического фактора на точность UWB-позиционирования в настоящей работе используется имитационная модель, основанная на стохастическом описании ошибки дальности (1). Рассматриваются три канальных сценария: LOS, частичный NLOS и полный NLOS. Для каждого сценария задаются параметры шума σ_n , многолучевой составляющей σ_m и логнормального NLOS-смещения (μ_b, σ_b), отражающие характерное увеличение ошибки дальнометрии при ухудшении канальных условий.

Параметры гауссового шума σ_n , многолучевого искажения σ_m и логнормального NLOS-смещения μ_b, σ_b выбирались с учётом опубликованных экспериментальных данных по UWB-позиционированию в подземной и промышленной среде, где отмечаются сходные порядки величин ошибок дальномерных измерений и существенные положительные смещения в NLOS-сценариях. При этом используемые в моделировании численные значения носят характер инженерной оценки и отражают типичные уровни шумов и смещений для рассматриваемого диапазона расстояний, а не результат прямой калибровки по конкретному объекту.

Более точная идентификация параметров $\sigma_n, \sigma_m, \mu_b, \sigma_b$ требует натурных измерений в реальной карьерной радиосреде и может быть выполнена, например, по данным, аналогичным представленным в [16].

Дополнительно анализируется влияние геометрии расположения опорных станций, описываемое DOP-подобным геометрическим коэффициентом.

$$DOP = \sqrt{\text{trace}((H^T H)^{-1})}$$

DOP вычислялся для репрезентативной точки рабочей зоны, расположенной в центре рассматриваемого участка, а также проверялся вдоль траектории движения техники.

В сценарии LOS-G станции размещались по периметру рабочей зоны, что обеспечивало значение DOP около 1.2 для центральной точки. В сценариях pNLOS-G и NLOS-G геометрия ухудшалась за счёт смещения одной или нескольких станций к границе зоны наблюдения, вследствие чего DOP возрастал до 1.5 и 1.8 соответственно.

Таким образом, DOP в работе не постулировался, а вычислялся по заданной геометрии. Для благоприятной геометрии анкера располагались по периметру рабочей области, обеспечивая приблизительно симметричное покрытие зоны пози-

ционирования. Для неблагоприятной геометрии одна из станций смещалась к краю рабочей области, что приводило к росту геометрического фактора и ухудшению обусловленности задачи. Расстояние от объекта до опорных станций варьировалось в диапазоне 20–180 м, что соответствует рабочим условиям карьера среднего масштаба.

Для каждого сочетания канального сценария и геометрии выполняется серия из 5000 прогонов (параметры моделирования в таблице 1), в рамках которой генерируются массивы ошибок дальности и соответствующие координатные ошибки, масштабируемые коэффициентом DOP. В результате формируются оценки средней ошибки, RMSE, медианы, 95-го перцентиля и доли грубых выбросов, превышающих порог 5 м. Отдельно рассчитываются показатели “до” и “после” применения робастной фильтрации, заключающейся в ограничении координатной ошибки сверху на уровне 5 м.

Таблица 1

Параметры имитационного моделирования UWB-позиционирования

Сценарий	Режим	DOP	σ_n , м	σ_m , м	b_i
LOS-G	LOS	1.2	0.05	0.05	0
pNLOS-G	pNLOS	1.5	0.10	0.15	LN (0.4; 0.3)
NLOS-G	NLOS	1.8	0.10	0.20	LN (1.0; 0.4)
LOS-B	LOS	3.0	0.05	0.05	0
pNLOS-B	pNLOS	3.5	0.10	0.15	LN (0.4; 0.3)
NLOS-B	NLOS	4.0	0.10	0.20	LN (1.0; 0.4)

Примечание: G – благоприятная геометрия, B – неблагоприятная; LN – логнормальное распределение.

5. Результаты и обсуждение

Имитационное моделирование позволило количественно оценить влияние канального режима (LOS, частичный и полный NLOS) и геометрии опорных станций на точность UWB-позиционирования карьерной техники. Для каждого сценария было выполнено 5000 прогонов, по результатам которых вычислялись средняя ошибка, среднеквадратическая ошибка (RMSE), медиана, 95-й перцентиль и доля грубых выбросов с ошибкой более 5 м. В качестве показателя влияния геометрии использовался DOP-подобный коэффициент, принимающий значения от 1.2-1.8 для благоприятной геометрии до 3.0-4.0 для неблагоприятной конфигурации анкерных станций.

Для ключевых сценариев дополнительно построены эмпирические функции распределения ошибок и гистограммы остатков. Для RMSE и средней ошибки выполнена бутстрэп-оценка 95% доверительных интервалов по 1000 повторным выборкам. Это позволяет отделить устойчивые эффекты от случайных флуктуаций моделирования.

В таблице 2 приведены результаты имитационного моделирования без применения робастной обработки дальномерных измерений. Как видно из данных, в условиях прямой видимости при благоприятной геометрии (сценарий LOS-G, DOP = 1.2) средняя ошибка позиционирования составляет 0.069 м, RMSE – 0.086 м, медианная ошибка – 0.059 м, а 95-й

процентиль не превышает 0.168 м; грубые выбросы отсутствуют. При переходе к неблагоприятной геометрии (LOS-B, DOP = 3.0) RMSE возрастает до 0.210 м и 95-й процентиль – до 0.408 м, однако координатная ошибка остаётся на уровне, приемлемом для задач мониторинга движения карьерной техники.

Таблица 2

Показатели точности позиционирования без робастной обработки измерений

Сценарий	DOP	Mean	RMSE	P95	Out, %
LOS-G	1.2	0.069	0.086	0.168	0.00
pNLOS-G	1.5	2.366	2.490	3.751	0.48
NLOS-G	1.8	5.236	5.689	9.549	46.68
LOS-B	3.0	0.168	0.210	0.408	0.00
pNLOS-B	3.5	5.449	5.725	8.682	56.92
NLOS-B	4.0	11.825	12.836	21.387	96.50

В сценариях частичного NLOS влияние канальных искажений становится более заметным. При благоприятной геометрии (pNLOS-G, DOP = 1.5) средняя ошибка составляет 2.366 м, RMSE – 2.490 м, медиана – 2.290 м, а 95-й процентиль – 3.751 м; при этом доля ошибок более 5 м остаётся ниже 1%. При неблагоприятной геометрии (pNLOS-B, DOP = 3.5) RMSE увеличивается до 5.725 м, 95-й процентиль – до 8.682 м, а доля грубых выбросов достигает 56.92%, что указывает на существенное усиление влияния NLOS-смещения и многолучевости при одностороннем размещении анкерных станций.

Наиболее неблагоприятные результаты получены в сценариях полного NLOS. При благоприятной геометрии (NLOS-G, DOP = 1.8) средняя ошибка достигает 5.236 м, RMSE – 5.689 м, медиана – 4.804 м, 95-й процентиль – 9.549 м, а доля ошибок более 5 м – 46.68%. При неблагоприятной геометрии (NLOS-B, DOP = 4.0) координатная ошибка резко возрастает: средняя ошибка составляет 11.825 м, RMSE – 12.836 м, 95-й процентиль – 21.387 м, а доля грубых выбросов превышает 96%, что фактически делает систему непригодной для задач высокоточного позиционирования без дополнительных мер компенсации. Таким образом, сочетание NLOS-смещения и неблагоприятной геометрии является ключевым фактором деградации точности UWB-позиционирования в карьере.

В сценарии полного NLOS робастная обработка дальномерных измерений выполнялась по величине невязки относительно текущей итерационной оценки координат. Измерения с аномально большими отклонениями исключались из подсчёта либо получали пониженный вес, что позволило снизить RMSE с 12.84 до 4.97 м.

В таблице 3 представлены соответствующие показатели точности после применения такой обработки. Сопоставление таблиц 2 и 3 показывает, что в LOS-условиях (LOS-G и LOS-B) фильтрация практически не влияет на среднюю ошибку, RMSE и 95-й процентиль, что подтверждает нейтральность выбранной процедуры для штатного режима работы системы.

В условиях частичного NLOS при благоприятной геометрии (pNLOS-G) изменения показателей также минимальны: RMSE снижается лишь с 2.490 до 2.485 м, 95-й процентиль остаётся на уровне 3.751 м, а доля грубых выбросов не изменяется.

Таблица 3

Показатели точности позиционирования после применения пороговой фильтрации дальномерных измерений (отбраковка по невязке >5 м)

Сценарий	DOP	Mean	RMSE	P95	Out raw, %
LOS-G-f	1.2	0.069	0.086	0.168	0.00
pNLOS-G-f	1.5	2.363	2.485	3.751	0.48
NLOS-G-f	1.8	4.277	4.374	5.000	46.68
LOS-B-f	3.0	0.168	0.210	0.408	0.00
pNLOS-B-f	3.5	4.535	4.594	5.000	56.92
NLOS-B-f	4.0	4.970	4.974	5.000	96.50

В то же время при неблагоприятной геометрии (pNLOS-B) эффект робастной обработки становится более заметным: RMSE уменьшается с 5.725 до 4.594 м, а 95-й процентиль и медиана ограничиваются уровнем порядка 5 м, что приводит к снижению чувствительности координатной оценки к аномальным измерениям.

Наиболее существенный выигрыш достигается в сценариях полного NLOS. При благоприятной геометрии (NLOS-G) RMSE снижается с 5.689 до 4.374 м, а 95-й процентиль ограничивается порогом 5 м вместо 9.549 м, что существенно уменьшает риск появления грубых ошибок в траектории. В случае неблагоприятной геометрии (NLOS-B) снижение ещё более выражено: RMSE уменьшается с 12.836 до 4.974 м, а 95-й процентиль ограничивается 5 м вместо 21.387 м, при этом доля исходных выбросов остаётся высокой, но их влияние на координатную оценку существенно подавляется за счёт ограничивающей обработки. Это демонстрирует, что даже простейшая пороговая фильтрация способна радикально уменьшить координатную ошибку в наиболее тяжёлых сценариях, хотя полностью проблему NLOS-смещения и неблагоприятной геометрии она не решает. Дополнительно для ключевых сценариев приведены эмпирические функции распределения координатной ошибки и гистограмма для полного NLOS, что позволяет визуально сопоставить характер отклонений в LOS- и NLOS-условиях и подтвердить результаты, полученные по табличным метрикам (см. рис.1-2).

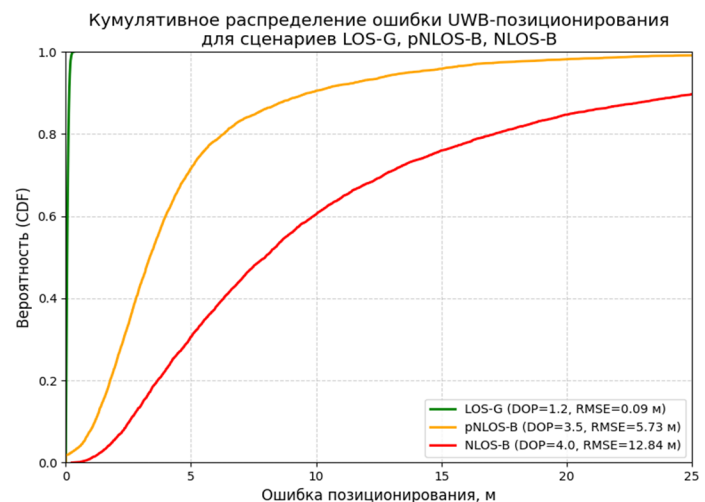


Рис. 1. Эмпирические функции распределения координатной ошибки UWB-позиционирования для сценариев LOS-G, pNLOS-B и NLOS-B

Из рис. 1 видно, что в сценарии LOS-G 95% ошибок не превышают 0.17 м, тогда как для pNLOS-B соответствующий уровень возрастает до 8.68 м, а для NLOS-B – до 21.4 м. Это подтверждает наличие тяжёлого правого хвоста распределения и резкое ухудшение точности при переходе от прямой видимости к полному NLOS. Гистограмма на рис. 2 показывает, что в сценарии NLOS-B распределение координатной ошибки имеет выраженную асимметрию и концентрируется в диапазоне больших значений, что согласуется с табличными результатами и указывает на необходимость робастной фильтрации измерений.

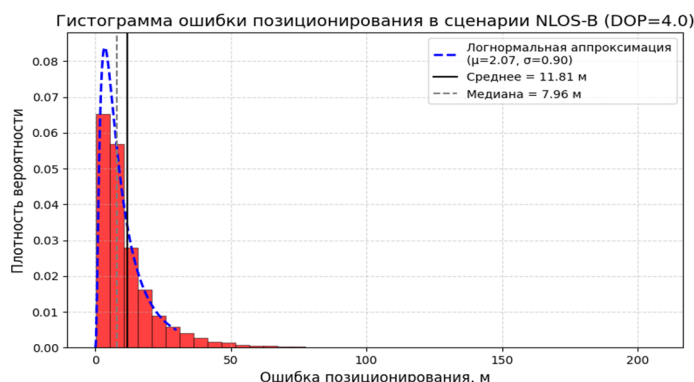


Рис. 2. Гистограмма распределения координатной ошибки для сценария NLOS-B

В целом полученные результаты подтверждают, что для обеспечения требуемой точности UWB-позиционирования карьерной техники необходимо одновременно решать две задачи: оптимизировать конфигурацию анкерной инфраструктуры с целью снижения DOP-подобного геометрического фактора в рабочих зонах и применять робастные методы обработки дальномерных измерений для подавления грубых выбросов в условиях NLOS. Имитационный характер исследования позволяет варьировать параметры модели и использовать полученные зависимости для предварительной оценки ожидаемой точности при проектировании конкретных систем позиционирования в горных выработках.

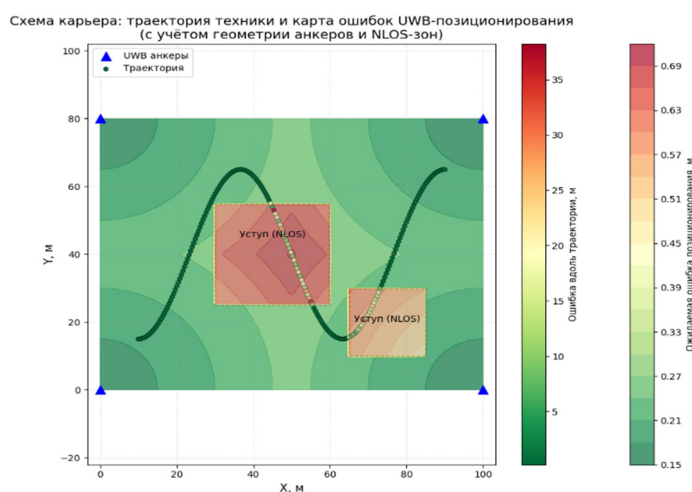


Рис. 3. Схема модельного карьера с анкерными станциями, траекторией движения техники и пространственным распределением координатной ошибки

Схематичное представление рабочей зоны на рис. 3 показывает, что рост ошибки связан не только с ухудшением канального режима, но и с локальным снижением геометрической наблюдаемости при заезде техники за уступы. В зонах с преобладанием NLOS ошибка резко возрастает, тогда как в открытых участках при благоприятной геометрии сохраняется дециметровый уровень точности.

Для оценки статистической устойчивости метрик точности дополнительно выполнена бутстрэп-оценка 95-процентных доверительных интервалов для средней ошибки и RMSE с использованием 1000 псевдовыборок для каждого сценария. В случае LOS-G 95-процентный доверительный интервал для RMSE составляет [0.08; 0.10] м, тогда как в неблагоприятном сценарии NLOS-B без фильтрации он достигает [11.5; 13.9] м и уменьшается до [4.3; 5.6] м при использовании предложенной робастной обработки. Это подтверждает статистическую значимость наблюдаемого эффекта уменьшения ошибки и снижает вероятность того, что улучшение обусловлено случайными флуктуациями имитации.

На основе выполненного имитационного моделирования можно сформулировать несколько инженерных рекомендаций по проектированию UWB-системы позиционирования карьерной техники. Во-первых, для обеспечения координатной ошибки на уровне RMSE менее 1 м в рассматриваемой модели требуется не менее четырех опорных станций, размещённых таким образом, чтобы обеспечивалась симметричная геометрия зоны наблюдения и DOP не превышал 1.8-2.0. Во-вторых, при росте DOP выше 3.0 в условиях частичного и полного NLOS необходимо применять робастную фильтрацию дальномерных измерений, а в наиболее тяжёлых сценариях – дополнять UWB-измерения инерциальной информацией или другими источниками навигационных данных. В-третьих, в зонах полного NLOS использование только UWB-подсистемы без внешней поддержки не обеспечивает требуемой точности для высокоточного мониторинга движения техники. Наконец, при размещении анкерных станций следует избегать конфигураций, при которых одна из станций оказывается смещённой к границе рабочей зоны, поскольку это приводит к ухудшению геометрии и резкому росту ошибки позиционирования.

Полученные в настоящей работе результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными по гибридной UWB/IMU-локализации в условиях ограниченной видимости. В частности, в работе по позиционированию погрузчиков на основе UWB и IMU [16] показано, что интеграция инерциальной информации и улучшенного ESKF существенно повышает устойчивость траектории и снижает долю крупных ошибок по сравнению с чистым UWB-позиционированием: вероятность ошибки в пределах 0.15 м возрастает с 20.1% до 91.9%, а средняя ошибка по осям уменьшается до 0.0157 м и 0.0492 м (см. табл. 4). Это подтверждает, что в сценариях pNLOS/NLOS простая дальномерная схема без дополнительной сенсорной поддержки быстро теряет точность, тогда как даже относительно простая инерциальная коррекция заметно улучшает результаты. В настоящей работе получена аналогичная тенденция: при ухудшении геометрии и росте доли NLOS-искажений ошибка возрастает нелинейно, что указывает на необходимость либо робастной фильтрации

дальномерных измерений, либо интеграции UWB с дополнительными навигационными датчиками. Таким образом, опубликованные результаты подтверждают физическую правдоподобность использованной в работе модели и демонстрируют, что переход от чистого UWB к гибридной схеме является наиболее эффективным способом снижения ошибки в сложной радиосреде.

Таблица 4

Сопоставление результатов

Источник	Среда	Метод	Основной результат	Значение для настоящей работы
Zhu et al., 2025	Подземная парковка, имитация шахтной среды	UWB only	20.1% ошибок в пределах 0.15 м	Показывает ограниченность чистого UWB в NLOS
Zhu et al., 2025	Та же среда	UWB + improved ESKF + IMU	91.9% ошибок в пределах 0.15 м; средняя ошибка по осям 0.0157 м и 0.0492 м	Подтверждает пользу сенсорной интеграции
Настоящая работа	Карьерная среда, имитация LOS/pNLOS /NLOS	UWB simulation	Рост ошибки при ухудшении геометрии и NLOS	Обосновывает влияние DOP и NLOS на точность
Настоящая работа	То же	UWB + робастная обработка	Снижение выбросов и RMSE относительно базовой схемы	Поддерживает вывод о необходимости фильтрации

Заключение

Предложена стохастическая модель ошибок UWB-дальнометрии для карьерной радиосреды, включающая гауссов шум, многолучевую составляющую и логнормальное NLOS-смещение. На основе имитационного моделирования показано, что в LOS-условиях при благоприятной геометрии опорных станций средняя ошибка позиционирования составляет около 0.07 м, RMSE – 0.09 м, а 95-й процентиль не превышает 0.17 м.

Показано, что при переходе к частичному и полному NLOS координатная ошибка существенно возрастает, причём неблагоприятная геометрия анкерных станций (повышенный DOP) усиливает влияние NLOS-смещения. В полном NLOS при неблагоприятной геометрии RMSE достигает 12.84 м, а доля дальномерных измерений (отбраковка по невязке >5 м) превышает 96%, что ограничивает возможность использования системы без дополнительных мер по обработке измерений.

Исследовано влияние простой робастной обработки дальномерных измерений с ограничением координатной ошибки на уровне 5 м. Порог 5 м для ограничения выбросов выбран исходя из анализа максимальных ошибок в LOS-сценариях и опубликованных данных по UWB-позиционированию, где типичные ошибки при прямой видимости не превышают единиц метров. Таким образом, значения свыше 5 м в рассматриваемом диапазоне расстояний интерпретируются как грубые аномалии, обусловленные NLOS-смещением и сильной многолучевостью, и подлежат подавлению робастной обработкой.

Показано, что в LOS-условиях такая обработка практически не влияет на показатели точности, но в наиболее тяжёлых

сценариях (полный NLOS и неблагоприятная геометрия) позволяет уменьшить RMSE с 12.84 до 4.97 м и ограничить 95-й процентиль на уровне 5 м, существенно снижая влияние грубых выбросов.

Полученные результаты подтверждают, что при проектировании UWB-систем позиционирования для карьерной техники необходимо уделять первоочередное внимание выбору конфигурации опорных станций, обеспечивающей приемлемые значения геометрического фактора в рабочих зонах техники, а также применению робастных методов обработки дальномерных измерений.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная модель и результаты имитационного анализа могут использоваться для предварительной оценки ожидаемой точности UWB-позиционирования в конкретных карьерных условиях и для формирования инженерных рекомендаций по размещению UWB-инфраструктуры и настройке алгоритмов фильтрации измерений.

Таким образом, выполненное имитационное исследование показывает, что обеспечение требуемой точности UWB-позиционирования карьерной техники возможно только при совместном учёте геометрии анкерной инфраструктуры, уровня NLOS-искажений и устойчивости алгоритма обработки измерений. Наиболее эффективным является сочетание благоприятного размещения опорных станций, ограничение геометрического фактора и применение робастной фильтрации, что позволяет существенно снизить координатную ошибку даже в сложной радиосреде.

Ограничения работы. Следует отметить, что представленное исследование носит имитационный характер и основано на параметризованной модели ошибок UWB-дальнометрии, параметры которой (σ_n , σ_m , μ_b , σ_b) выбраны на основе литературных данных и инженерных оценок. Отсутствие прямой калибровки модели по натурным измерениям в реальном карьере ограничивает строгость полученных численных рекомендаций и требует последующей верификации. Кроме того, в работе не учитывается динамическая смена состояний LOS/NLOS во времени и возможная зависимость ошибок от кинематики движения, а также не рассматривается интеграция UWB с инерциальными и другими датчиками. Эти вопросы являются предметом дальнейших исследований.

Литература

1. Yu Y., Chen R., Liu Z., Guo G., Ye F., Chen L. Wi-Fi Fine Time Measurement: Data Analysis and Processing for Indoor Localisation // Journal of Navigation. 2020. Vol. 73, pp. 1-23. DOI 10.1017/S0373463320000193.
2. Choi J. Enhanced Wi-Fi RTT Ranging: A Sensor-Aided Learning Approach // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022. Vol. 71. DOI 10.1109/TVT.2022.3151018.
3. Ziegler M., Kianfar A., Hartmann T., Clausen E. Development and Evaluation of a UWB-Based Indoor Positioning System for Underground Mine Environments // Mining, Metallurgy & Exploration. 2023. Vol. 40. DOI 10.1007/s42461-023-00797-z.
4. Wang L., Zhang S., Qi J., Chen H., Yuan R. Research on IMU-Assisted UWB-Based Positioning Algorithm in Underground Coal Mines // Micromachines. 2023. Vol. 14. Art. 1481. DOI 10.3390/mi14071481.
5. Picazo-Martínez P., Barroso-Fernández C., Martín Pérez J., Groshev M., de la Oliva A. IEEE 802.11az Indoor Positioning with

mmWave // IEEE Communications Magazine. 2023. DOI 10.1109/MCOM.001.2300454.

6. Liang B., Zhu X., Liu T., Shan G. Non-Line-of-Sight Error Compensation Method for Ultra-Wideband Positioning System // Machines. 2025. Vol. 13. Art. 1018. DOI 10.3390/machines13111018.

7. Wu Y., He M., Li W., Jian L., Yu Y., Chen L., Chen R. Wi-Fi Fine Time Measurement – Principles, Applications, and Future Trends: A Survey // Information Fusion. 2025. Vol. 118. Art. 102992. DOI 10.1016/j.inffus.2025.102992.

8. Kosek-Szot K., Szott S., Ciezobka W., Wojnar M., Rusek K., Segev J. Indoor Positioning with Wi-Fi Location: A Survey of IEEE 802.11mc/az/bk Fine Timing Measurement Research // arXiv. 2025.

9. Gireesh N., Seshagiri T., Avula P., Sujatha C., Panigrahi A.K., Swaraja K., Dilli R. Reliable TOA and TDOA Location Estimation Under Multipath Fading Channel Conditions in Wideband Wireless Networks for Indoor Factory Applications // Wireless Personal Communications. 2025. Vol. 144, pp. 247–274. DOI 10.1007/s11277-025-11849-6.

10. Tong W., Li B., Jing Q. From Error Analysis to Mitigation: A Hybrid Framework for Enhancing Wi-Fi FTM Positioning in Multipath-Prone Indoor Scenarios // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2026. Vol. 25, pp. 9859-9874. DOI

10.1109/TWC.2025.3649176.

11. Rajendran G., Sharma K., Chetlapalli V., Parekh J. Performance comparison of 802.11mc and 802.11az Wi-Fi Fine Time Measurement protocols // arXiv. 2025.

12. Huy Cuong H., Fokin G. Joint Maximum Likelihood Time-of-Arrival Estimation in Multipath Channels for Device Positioning in LTE Networks // Proceedings of Telecommunication Universities. 2026. Vol. 12, pp. 81-115. DOI 10.31854/1813-324X-2026-12-1-81-115.

13. Xing Z., Chen J. Unsupervised Radio Map Construction in Mixed LoS/NLoS Indoor Environments // arXiv. 2025. DOI 10.48550/arXiv.2510.08015.

14. Pan Y., Li J., Wu Y., Ji J., Huang C., Wang C.-X. A Channel Charting-Based Semi-Supervised Positioning Algorithm with Co-Training // IEEE Transactions on Communications. 2026. DOI 10.1109/TCOMM.2026.3693171.

15. Antonijević N., Etzlinger B., Singelée D., Preneel B. Secure Wi-Fi Ranging Today: Security and Adoption of IEEE 802.11az/bk // arXiv. 2026. DOI 10.48550/arXiv.2603.18687.

16. Zhu, Zhonghua, Zhao Ying, He Wenxuan, Peng Zhang, Fu Haiying, Wu Yueyue. Positioning of mine loaders based on UWB and IMU // IEEE Access, 2025, pp. 1-1. 10.1109/ACCESS.2025.3605669.

ASSESSMENT OF UWB RANGING ACCURACY FOR POSITIONING QUARRY MACHINERY IN A COMPLEX RADIO ENVIRONMENT

Petr I. Smirnov, Vologda State University, Vologda, Russia, smirnovpi@vogu35.ru

Oleg A. Valyaev, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, o.valyaev@madi.ru

Natalia I. Baurova, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, nbaurova@mail.ru

Grigory S. Mazlumyan, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia,

g.mazlumyan@madi.ru

Boris S. Subbotin, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI);

The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia, bsubbotin@mail.ru

Abstract

In open-pit mining environments, high-accuracy positioning of mining vehicles is complicated by the complex geometry of the pit, high benches, metallic structures, and strong multipath propagation, which cause NLOS effects and significant ranging errors. This paper considers the application of ultra-wideband (UWB) technology for vehicle positioning in an open-pit mine and proposes a stochastic ranging error model that accounts for NLOS bias, multipath propagation, and the geometric factor of the anchor layout. Based on simulation, the distribution of position error is analyzed for typical mining radio-environment scenarios (LOS, partial NLOS, and full NLOS) under both favorable and unfavorable UWB anchor geometries. It is shown that under LOS conditions with favorable anchor geometry, the mean positioning error is about 0.07 m, the RMSE is 0.09 m, and the 95th percentile does not exceed 0.17 m, whereas under full NLOS and unfavorable geometry the RMSE increases to 12.84 m. Applying a simple robust preprocessing scheme with a 5 m outlier threshold reduces the RMSE in this scenario to 4.97 m, significantly suppressing gross errors while preserving accuracy in LOS conditions. The practical significance of the study lies in developing recommendations for UWB base-station placement and measurement processing settings that ensure the required monitoring accuracy for mining vehicle movement in a harsh radio environment.

Keywords: ultra-wideband radio (UWB), ranging, positioning, quarry machinery, NLOS, multipath, measurement error, geometric dilution of precision

References

- [1] Y. Yu, R. Chen, Z. Liu, G. Guo, F. Ye, and L. Chen, "Wi Fi fine time measurement: Data analysis and processing for indoor localisation," *J. Navig.*, vol. 73, pp. 1-23, 2020, doi: 10.1017/S0373463320000193.
- [2] J. Choi, "Enhanced Wi Fi RTT ranging: A sensor aided learning approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3151018.
- [3] M. Ziegler, A. Kianfar, T. Hartmann, and E. Clausen, "Development and evaluation of a UWB based indoor positioning system for underground mine environments," *Min. Metall. Explor.*, vol. 40, 2023, doi: 10.1007/s42461-023-00797-z.
- [4] L. Wang, S. Zhang, J. Qi, H. Chen, and R. Yuan, "Research on IMU assisted UWB based positioning algorithm in underground coal mines," *Micromachines*, vol. 14, art. 1481, 2023, doi: 10.3390/mi14071481.
- [5] P. Picazo Martinez, C. Barroso Fernandez, J. Mart?n P?rez, M. Groshev, and A. de la Oliva, "IEEE 802.11az indoor positioning with mmWave," *IEEE Commun. Mag.*, 2023, doi: 10.1109/MCOM.001.2300454.
- [6] B. Liang, X. Zhu, T. Liu, and G. Shan, "Non line of sight error compensation method for ultra wideband positioning system," *Machines*, vol. 13, art. 1018, 2025, doi: 10.3390/machines1311018.
- [7] Y. Wu, M. He, W. Li, I. Jian, Y. Yu, L. Chen, and R. Chen, "Wi Fi fine time measurement - Principles, applications, and future trends: A survey," *Inf. Fusion*, vol. 118, art. 102992, 2025, doi: 10.1016/j.inffus.2025.102992.
- [8] K. Kosek Szott, S. Szott, W. Ciezobka, M. Wojnar, K. Rusek, and J. Segev, "Indoor positioning with Wi Fi location: A survey of IEEE 802.11mc/az/bk fine timing measurement research," arXiv, 2025.
- [9] N. Gireesh, T. Seshagiri, P. Avula, C. Sujatha, A. K. Panigrahi, K. Swaraja, and R. Dilli, "Reliable TOA and TDOA location estimation under multipath fading channel conditions in wideband wireless networks for indoor factory applications," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 144, pp. 247-274, 2025, doi: 10.1007/s11277-025-11849-6.
- [10] W. Tong, B. Li, and Q. Jing, "From error analysis to mitigation: A hybrid framework for enhancing Wi Fi FTM positioning in multipath prone indoor scenarios," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 25, pp. 9859-9874, 2026, doi: 10.1109/TWC.2025.3649176.
- [11] G. Rajendran, K. Sharma, V. Chetlapalli, and J. Parekh, "Performance comparison of 802.11mc and 802.11az Wi Fi fine time measurement protocols," arXiv, 2025.
- [12] H. Cuong and G. Fokin, "Joint maximum likelihood time of arrival estimation in multipath channels for device positioning in LTE networks," *Proc. Telecommun. Univ.*, vol. 12, pp. 81-115, 2026, doi: 10.31854/1813-324X-2026-12-1-81-115.
- [13] Z. Xing and J. Chen, "Unsupervised radio map construction in mixed LoS/NLoS indoor environments," arXiv, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2510.08015.
- [14] Y. Pan, J. Li, Y. Wu, J. Ji, C. Huang, and C. X. Wang, "A channel charting based semi supervised positioning algorithm with co training," *IEEE Trans. Commun.*, 2026, doi: 10.1109/TCOMM.2026.3693171.
- [15] N. Antonijevi?, B. Etzlinger, D. Singel?e, and B. Preneel, "Secure Wi Fi ranging today: Security and adoption of IEEE 802.11az/bk," arXiv, 2026, doi: 10.48550/arXiv.2603.18687.
- [16] Z. Zhu, Y. Zhao, W. He, Z. Peng, H. Fu, and Y. Wu, "Positioning of mine loaders based on UWB and IMU," *IEEE Access*, pp. 1-1, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3605669.

Information about authors:

Petr I. Smirnov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Department "Automobiles and Automotive Engineering" of the Institute of Mechanical Engineering, Power Engineering and Transport, Vologda State University, Vologda, Russia. ORCID: 0000-0002-9405-7248.

Oleg A. Valyaev, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Institute of Automotive and Special Equipment and Engineering, Department of Transport Installations, Senior Lecturer, Moscow, Russia.. ORCID 0009-0000-1025-8388

Natalia I. Baurova, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Institute of Automotive and Special Equipment and Engineering, Department of Production and Repair of Automobiles and Road Construction Machinery, Professor, Doctor of Technical Sciences, Moscow, Russia. ORCID 0000-0001-9529-2031

Grigory S. Mazlumyan, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Vice-Rector for Research, Candidate of Technical Sciences, Moscow, Russia. ORCID 0009-0001-9296-0775

Boris S. Subbotin, Ph.D. (Engineering), Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Senior Researcher, Ph.D. (Engineering), A.N. Kosygin Russian State University, Associate Professor, Moscow, Russia, ORCID 0000-0003-1685-082X