ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

Павлов Виталий Александрович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия, ***pavlov_va@spbstu.ru***

Орлова Анна Сергеевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия, ***ovsyannikova_as@spbstu.ru***

Шариати Фаридоддин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия, ***Shariaty3@gmail.com***

Завьялов Сергей Викторович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия, ***zavyalov_sv@spbstu.ru***

Лиокумович Леонид Борисович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия, ***leonid@spbstu.ru***

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-10-4-14

Manuscript received 20 July 2026;
Accepted 22 September 2026

Ключевые слова: *компьютерное зрение, локализация, адаптивная форма импульса, многолучевое распространение, Индустрия 4.0, межсимвольная интерференция*

В работе предложена интеллектуальная архитектура для снижения вычислительной сложности приёмного тракта беспроводных систем передачи данных в индустриальных помещениях. Ключевая инновация заключается в замкнутом контуре, объединяющем подсистему компьютерного зрения для пространственной локализации и технологию адаптивного выбора формы импульса. Детекция промышленной техники реализована на базе YOLOv11x с двухэтапным трансферным обучением, что обеспечило точность обнаружения Precision ≈ 0,998 и Recall ≈ 0,997. Валидация локализации на двух типах траекторий показала медианную евклидову ошибку 0,148 при движении вдоль оптической оси и 0,568 – при латеральном смещении, причём выявленная анизотропия погрешности допускает компенсацию калибровочными коэффициентами. Полученные координаты используются для предварительного выбора оптимального импульса с ограничением на уровень искажений (EVM < 0,14), что гарантирует подавление межсимвольной интерференции в многолучевой среде. Экспериментально подтверждено, что точности локализации достаточно для надёжной привязки приёмника к зоне канала с предсказуемыми искажениями, обеспечивая корректную демодуляцию ФМ-2/ФМ-4 при упрощённой обработке сигнала.

Информация об авторах:
Павлов Виталий Александрович, *доцент, к.т.н., доцент, Институт электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет, Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. Orcid: 0000-0003-0726-6613*
Орлова Анна Сергеевна, *к.т.н., ассистент, Институт электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет, Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. Orcid:0000-0002-3401-2718*
Шариати Фаридоддин, *старший преподаватель, Институт электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия. Orcid: 0000-0002-7060-8826*
Завьялов Сергей Викторович, *доцент, к.т.н., доцент, Институт электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. Orcid: 0000-0003-3398-3616*
Лиокумович Леонид Борисович, *профессор, д.ф.-м.-н., профессор, Институт электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. Orcid: 0000-0001-5988-1429*

Для цитирования:
Павлов В. А., Орлова А. С., Шариати Ф., Завьялов С. В., Лиокумович Л. Б. Применение компьютерного зрения для адаптивного выбора сигналов в условиях многолучевого распространения на промышленных объектах // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №10. С. 4-14.
For citation:
V. A. Pavlov, A. S. Orlova, F. Shariaty, S. V. Zavjalov, L. B. Liokumovich, "Application of computer vision for adaptive signal selection in multipath propagation conditions in industrial environments," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 10, pp. 4-14. (*in Russian*)

Введение

В последние годы интеграция алгоритмов компьютерного зрения и искусственного интеллекта в системы беспроводной связи получила широкое распространение [1, 2]. Данные, собираемые камерами, лидарами и другими устройствами могут применяться для решения актуальных задач беспроводных сетей, в частности для проактивного управления диаграммой направленности и прогнозирования блокировок сигнала, что особенно актуально для высокочастотных диапазонов.

Одной из наиболее перспективных областей практического применения подобной интеграции являются промышленные сценарии, реализуемые в парадигме «Индустрии 4.0». Следует отметить, что инфраструктура видеонаблюдения и средства компьютерного зрения уже повсеместно развёрнуты на современных производственных площадках для мониторинга оборудования, контроля безопасности и логистики, что создаёт готовую основу для извлечения пространственной информации. Условия, характерные для производственных цехов и складских комплексов и отличающиеся обилием металлических поверхностей, порождают проблему искажений радиосигналов, обусловленных многолучевым распространением и глубокими замираниями.

В отличие от типичного офисного окружения, индустриальные сценарии характеризуются значительными размерами помещений, увеличенной высотой потолков (от 5 до 25 метров) и высокой концентрацией металлических объектов, порождающих многочисленные переотражения. Вследствие этого рассеяние задержки при распространении сигнала в промышленных условиях может достигать 600 нс, тогда как в офисных сценариях при отсутствии прямой видимости типичное значение составляет порядка 10 нс [3]. Значительное временное рассеяние свидетельствует о сильной межсимвольной интерференции, приводящей к существенным искажениям сигнала. Следует отметить, что характеристики канала могут кардинально различаться в пределах одного помещения: в зависимости от конфигурации препятствий расстояние когерентности варьируется от 1-3 см до нескольких десятков сантиметров [4].

Традиционные методы компенсации многолучевого распространения, такие как эквалайзеры, обладают высокой вычислительной сложностью, что затрудняет их реализацию в ресурсно-ограниченных промышленных устройствах. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является снижение вычислительной сложности приёмного тракта передачи сигналов в индустриальных сценариях на основе применения алгоритмов компьютерного зрения. Поскольку камеры и алгоритмы обнаружения объектов уже функционируют в индустриальной среде, представляется целесообразным использовать получаемую от них информацию о пространственном положении приёмопередающих модулей непосредственно для адаптивного выбора формы передаваемого импульса.

Целью настоящей работы является снижение вычислительной сложности приёмного тракта систем передачи информации в промышленных условиях за счёт использования компьютерного зрения для адаптивного управления формой импульсов.

1 Обзор существующих работ

Эксплуатация беспроводных инфокоммуникационных систем в индустриальных средах сопровождается деградацией сигналов вследствие интенсивного многолучевого распространения радиоволн, что при использовании классических методов модуляции и обработки обусловливает необходимость применения вычислительно ёмких алгоритмов детектирования. Проблема синтеза вычислительно-эффективных демодуляторов исследуется в ряде фундаментальных работ [5-12]. Значительный прогресс достигнут в области минимизации сложности итеративных процедур турбо-эквалайзинга [5-8]; вместе с тем применимость данных методов в индустриальных сценариях, критичных к величине задержки, ограничена высокой латентностью обработки и существенными ресурсными затратами.

Альтернативный подход, развиваемый в [9-12], предполагает использование модифицированных алгоритмов приёма с адаптивной вычислительной сложностью, определяемой текущим уровнем межсимвольной интерференции (МСИ). Несмотря на достигаемую гибкость, необходимость аппаратной реализации нескольких алгоритмов для компенсации нестационарности канала приводит к неоправданному росту габаритов и усложнению приёмопередающей аппаратуры. Анализ известных решений показывает, что независимость сложности алгоритмов приёма от интенсивности МСИ достижима лишь при условии учёта текущего состояния канала связи на передающей стороне. Одним из методов, реализующих данный принцип, является прекодирование Томлинсона–Харашимы [13], обеспечивающее предварительную коррекцию символов на основе импульсной характеристики канала. Однако этот метод вызывает неконтролируемое расширение энергетического спектра сигнала, что создаёт риски нарушения электромагнитной совместимости с устройствами, функционирующими в смежных частотных диапазонах.

Другим направлением упрощения приёмного тракта систем передачи служит синтез оптимальных форм импульсов [14-16]. Указанные формы получают как решение оптимизационной задачи по различным критериям (заданная скорость спада внеполосных излучений, концентрация энергии в заданной полосе частот и т.д.) при соответствующих ограничениях [17, 18]. В число ограничений может быть включено требование к помехоустойчивости приёма в условиях многолучевого распространения. В этом случае допустимо применение простых быстродействующих алгоритмов поэлементного приёма без значимого снижения помехоустойчивости.

В качестве перспективного решения задачи снижения сложности приёмной обработки в индустриальных сценариях предлагается интеграция подсистем компьютерного зрения и технологии оптимальных сигналов для проактивного управления формой импульса. Такой подход позволяет упростить архитектуру приёмного тракта при сохранении высокой достоверности передачи данных.

2 Системная модель

На рисунке 1 представлена блок-схема замкнутой интеллектуальной системы, предназначенной для динамической адаптации параметров сигналов к перемещениям промышленной техники.

Стационарная камера, размещённая на несущих конструкциях склада, осуществляет непрерывную видеорегистрацию заданной области интереса (проезды, зоны погрузки-разгрузки), формируя исходный поток визуальных данных о пространственном расположении погрузочно-разгрузочной техники и иных объектов.

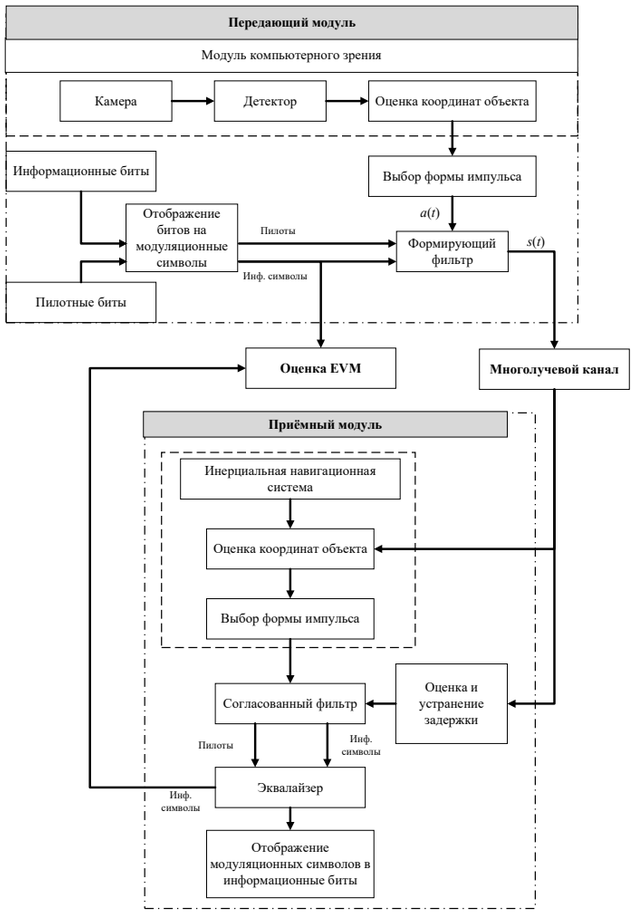


Рис. 1. Блок-схема замкнутой интеллектуальной системы, предназначенной для динамической адаптации параметров радиоканала к перемещениям промышленной техники

Полученный видеопоток в реальном масштабе времени обрабатывается нейросетевой моделью обнаружения объектов. Модель идентифицирует и классифицирует объекты, выделяя на изображении ограничивающие прямоугольники вокруг каждого автопогрузчика, что обеспечивает переход от пиксельного представления к семантически значимым элементам сцены.

На основе координат ограничивающих прямоугольников и априорно известных внутренних (матрица K) и внешних (положение и ориентация в пространстве) параметров камеры для каждого обнаруженного погрузчика вычисляются его трёхмерные координаты (X, Y, Z) на поверхности складской площадки. Получаемая пространственная локализация является ключевой предпосылкой для последующей адаптивной коррекции параметров радиосигнала.

Рассчитанные координаты в реальном времени передаются в блок выбора формы импульса. Последовательность из N информационных битов преобразуется в символы ФМ-2 c_k, а затем поступает на формирующий фильтр с импульсной характеристикой $a(t)$. Выходной сигнал формирующего фильтра представляет собой комплексную огибающую $s(t)$:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k a(t - kT) .$$

Параметры многолучевого канала рассчитываются с помощью метода трассировки лучей. На стороне приемника оценивается и устраняется задержка сигнала, вызванная его передачей по каналу.

Форма импульса выбирается на основе локальной навигационной системы (на основе оценки многолучевой обстановки на уровне сигналов или на основе инерциальной системы). Затем вычисляется свертка принятого сигнала с импульсной характеристикой согласованного фильтра. Значения на выходе согласованного фильтра дискретизируются с интервалами, кратными длительности символа T, и подаются на вход эквалайзера. В простейшем случае процедура эквалайзинга сводится к умножению принятых символов $\hat{c}_k$ на комплексный коэффициент ξ:

$$\tilde{c}_k = \hat{c}_k / \xi , \; k = N_p \ldots N_p + N - 1 ,$$

где $\tilde{c}_k$ – k-й принятый символ после коррекции. Коэффициент ξ можно определить с помощью N_p опорных символов (пилотов):

$$\xi = \frac{1}{N_p} \sum_{k=0}^{N_p - 1} \frac{\hat{c}_k}{c_k} .$$

В качестве метрики искажений предлагается использовать модуль вектора ошибки (error vector magnitude, EVM). EVM представляет собой разницу e_k между идеальными символами $c_k = I_k + jQ_k$ и оценками принятых символов на выходе эквалайзера. Для k-го символа величина вектора ошибки EVM_k может быть определена по следующей формуле:

$$\mathrm{EVM}_k = \sqrt{e_k} = \sqrt{\frac{\left(\tilde{I}_k - I_k\right)^2 + \left(\tilde{Q}_k - Q_k\right)^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=N_p}^{N_p + N - 1} \left(I_k^2 + Q_k^2\right)}} .$$

В исследовании предлагается определять максимальное значение показателя $\mathrm{EVM}_{\max}$ за время длительности одного кадра:

$$\mathrm{EVM}_{\max} = \max_{k = N_p \ldots N_p + N - 1} \left\{ \mathrm{EVM}_k \right\}$$

и выполнить усреднение по реализациям N_{av}:

$$\mathrm{EVM} = \frac{1}{N_{av}} \sum_{i=1}^{N_{av}} \mathrm{EVM}_{\max}^{(i)} .$$

Чем выше значение EVM, тем больше расстояние между идеальными символами и их оценками, что приводит к более высокому проценту битовых ошибок [19]. В этой статье используются следующие параметры: $N_p = 10$, $N_{av} = 100$ и $N = 1000$.

В данной работе предполагается, что на приёмном модуле выбор формы импульса осуществляется идеально. Таким образом, представленная схема иллюстрирует принцип работы системы, в которой модуль компьютерного зрения напрямую управляет параметрами сигналов (выбирает заранее рассчитанные формы импульсов), создавая интеллектуальную петлю обратной связи для надёжной передачи данных в индустриальной среде при упрощённой обработке на приёмной стороне.

3 Обнаружение и локализация объектов

Анализ существующих исследований в области компьютерного зрения [20, 21] указывает на высокий потенциал современных одностадийных архитектур детектирования. В частности, нейронная сеть YOLOv11 [21] демонстрирует эффективность при решении задач, критичных к производительности в реальном времени и точности локализации объектов. Её ключевым преимуществом для поставленной задачи локализации техники на складе является сочетание высокой частоты кадров и улучшенной точности обнаружения небольших и средних объектов на относительно статичном, но потенциально загромождённом фоне (стеллажи, паллеты, другие объекты). YOLOv11 демонстрирует высокую среднюю точность (mAP) и вычислительную эффективность по сравнению с предыдущими версиями, сохраняя баланс между размером модели и точностью. Например, для версии YOLOv11x средняя точность (mAP) составляет 54,7% [21] при размере входного изображения 640×640 пикселей на наборе данных COCO.

Процесс локализации объекта на опорной плоскости включает в себя три основных этапа: моделирование внутренних параметров камеры, определение ее ориентации в пространстве и расчет точки пересечения сформированного луча с заданной плоскостью.

Математическая модель камеры описывается матрицей внутренних параметров K, которая связывает координаты пикселей (u, v) с нормализованными координатами в системе отсчета камеры. Данная матрица учитывает фокусное расстояние f (масштабированное под размер сенсора и разрешение матрицы) и координаты оптического центра (c_x, c_y).

Внешняя ориентация системы описывается матрицей вращения R и вектором трансляции T. Для перехода от локального вектора направления в системе координат камеры к глобальному вектору направления в мировой системе используется преобразование, основанное на углах Эйлера. Важным аспектом является приведение локальных осей сенсора (где ось Z направлена вдоль оптической оси, а Y – вниз) к правой декартовой системе координат, принятой в классической геометрии.

Связь между пиксельными координатами и вектором направления луча в мировом пространстве описывается следующими выражениями [22]:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \; K^{-1} = \begin{bmatrix} 1/f_x & 0 & -c_x/f_x \\ 0 & 1/f_y & -c_y/f_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где f_x и f_y – нормализованные фокусные расстояния по оси X и Y, соответственно; c_x, и c_y – координаты оптического центра; K^{-1} – обратная матрица.

Для произвольной точки на изображении с координатами $\mathbf{p} = [u, v, 1]^T$ локальный вектор направления $\mathbf{d}_{cam}$ вычисляется как:

$$\mathbf{d}_{cam} = K^{-1}\mathbf{p}.$$

Для перевода вектора в мировую систему координат применяется матрица вращения R_{world}, полученная путем композиции элементарных матриц поворота вокруг осей X, Y, Z и последующей коррекции базиса:

$$\mathbf{d}_{world} = R_{world} \cdot \mathbf{d}_{cam}.$$

Финальные координаты объекта $\mathbf{P}_{obj}$ определяются как точка пересечения луча, исходящего из оптического центра камеры $\mathbf{C}$, с плоскостью, заданной уравнением $Z = Z_{plane}$. Параметрическое уравнение луча имеет вид:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{C} + t \cdot \mathbf{d}_{world}.$$

Решая уравнение относительно параметра t для условия $P_z(t) = Z_{plane}$, получаем:

$$t = \frac{Z_{plane} - C_z}{d_{world,z}}.$$

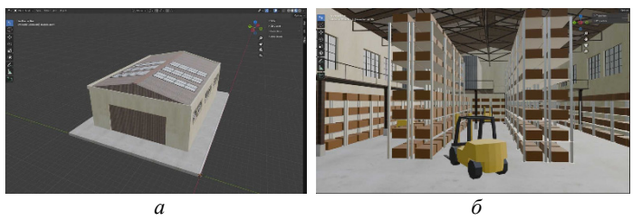
Следовательно, искомые мировые координаты точки:

$$\mathbf{P}_{obj} = \mathbf{C} + \left(\frac{Z_{plane} - C_z}{d_{world,z}} \right) \mathbf{d}_{world}.$$

Данный метод предполагает отсутствие оптических искажений или их предварительную коррекцию. Точность локализации напрямую зависит от корректности оценки углов наклона камеры и высоты её установки относительно опорной плоскости.

4 Моделирование

На рис. 2 изображена трёхмерная модель складского помещения, смоделированная в программной среде Blender. Геометрические размеры модели соответствуют реальному объекту и составляют 36,4 м в длину, 27,9 м в ширину и 12,6 м в высоту. Для достижения реалистичности моделирования были заданы типичные для индустриальных объектов свойства материалов: основные конструкции (пол и стены) выполнены из бетона, а второстепенные элементы (лестница, опоры, гаражная дверь, крыша и стены кабинета) – из металла. Внутреннее пространство оснащено характерными металлическими стойками высотой 7 м [23], на которых размещены картонные коробки, имитирующие деревянную тару стандартного размера (1,2×0,8×0,5 м) [24].



а *б*

Рис. 2. 3D-модель склада в Blender: а – вид снаружи; б – вид внутри

4.1 Обучение нейросетевого детектора

Обучение нейросетевого детектора осуществлялось в два последовательных этапа, что позволило сочетать преимущества обучения на крупном открытом наборе данных с последующей тонкой настройкой на целевом наборе данных.

Начальный этап обучения осуществлялся на наборе данных TalTech Object Detection Dataset [25]. Для обучения были выбраны изображения с камеры 1. Для обучения использовалась предобученная на наборе COCO модель YOLOv11x, обладающая наибольшим количеством параметров среди доступных версий, что обеспечивает высокую обобщающую способность модели. Размер входных изображений 640×640 пикселей, размер пакета 16, количество эпох 50. Размер набора данных: 1642 изображения для обучения, 384 для валидации и 496 для тестирования. Обучение проводилось с использованием GPU NVIDIA RTX 2080 TI.

После завершения первого этапа обучения была проведена дополнительная процедура дообучения с использованием весов, полученных на первом этапе. Данный подход, известный как трансферное обучение, был применен для адаптации модели к специфике целевого домена – детекции погрузчиков и связанных с ними объектов в текущей трёхмерной модели. Размер набора данных: 160 изображений для обучения, 30 для валидации и 30 для тестирования. Количество эпох 30, размер пакета 16.

Результаты производительности модели, полученные после описанного двухэтапного обучения, демонстрируют её высокую эффективность (табл. 1).

Таблица 1

Результаты производительности модели

mAP_{50}	mAP_{50-95}	Precision	Recall
0,995	0,995	0,998	0,997

Значения метрик mAP_{50} (0,995) и mAP_{50-95} (0,995) указывают на высокую точность детекции как при стандартном пороге IoU = 0,5, так и при его усреднённом значении в диапазоне от 0,5 до 0,95, что является наиболее строгим критерием. Столь же высокие показатели Precision (0,998) и Recall (0,997) подтверждают, что модель минимизирует как ложные срабатывания, так и пропуски объектов. Достижение подобных результатов на целевом наборе данных ограниченного объёма (160 обучающих изображений) является прямым следствием применения стратегии трансферного обучения. Предварительная инициализация весов на крупном датасете TalTech позволила модели освоить обобщённые признаки, а последующая тонкая настройка эффективно адаптировала их к специфике домена, что в совокупности обеспечило выдающуюся обобщающую способность и устойчивость к переобучению.

4.2 Моделирование и валидация системы локализации

Моделирование и валидация системы проводились для двух типов траекторий, отличающихся геометрией проецирования на плоскость изображения (рис. 3):

• Движение по глубине (вдоль оптической оси камеры) – объект приближается или удаляется от сенсора, что приводит к изменению масштаба проекции при неизменных координатах её центра (рис. 3а).

• Движение в латеральной плоскости (перпендикулярно оптической оси) – объект смещается поперёк поля зрения, вызывая линейное изменение координат центра проекции при незначительном изменении масштаба (рис. 3б).



а *б*

Рис. 3. Примеры траекторий объектов. а – движение вдоль оптической оси камеры, б – движение в латеральной плоскости

На рисунке 4 представлена Евклидова ошибка локализации объекта при движении вдоль оптической оси камеры (движение по глубине).

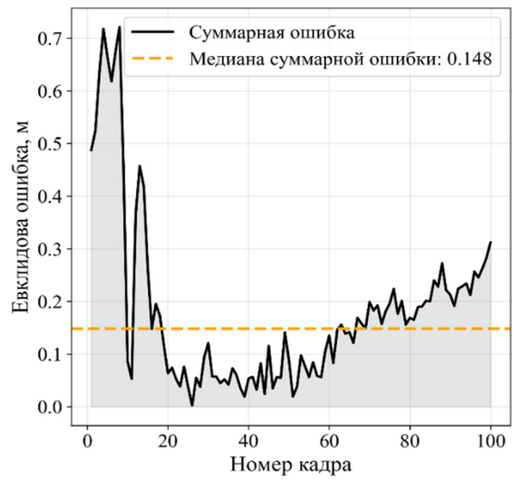


Рис. 4. Евклидова ошибка локализации объекта при движении вдоль оптической оси камеры (движение по глубине)

Анализ показывает высокую устойчивость метода к изменению масштаба объекта. Медианные значения ошибок по координатам X и Y составили −0,092 и −0,012 соответственно, что указывает на незначительное систематическое смещение предсказаний. Медианная евклидова ошибка локализации равна 0,148, что подтверждает пригодность алгоритма для задач, требующих точного позиционирования при изменении дистанции до объекта. Максимальное отклонение (0,721) фиксируется на крайних точках траектории, что, вероятно, обусловлено частичным выходом объекта из зоны резкости или проявлением краевых оптических искажений. При этом низкое стандартное отклонение общей ошибки (0,164) свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов на основном участке траектории.

Принципиально иная динамика погрешностей наблюдается при латеральном перемещении объекта (рис. 5). В данном случае выявлена выраженная анизотропия точности: ошибка по оси X сохраняется на приемлемом уровне (медиана −0,1), тогда как по оси Y она возрастает до −0,556.

В результате медианная евклидова ошибка увеличивается до 0,568, превышая показатель для осевого движения более чем в три раза. Максимальная зафиксированная общая ошибка достигла 0,929. Данное явление объясняется геометрией перспективного проецирования: при боковом смещении даже незначительные погрешности в определении границ детектируемого объекта приводят к существенным ошибкам при обратном проецировании в реальные координаты, особенно по одной из осей. Относительно небольшое стандартное отклонение общей ошибки (0,135) указывает на систематический характер смещения, что потенциально позволяет компенсировать его путём введения калибровочных коэффициентов.

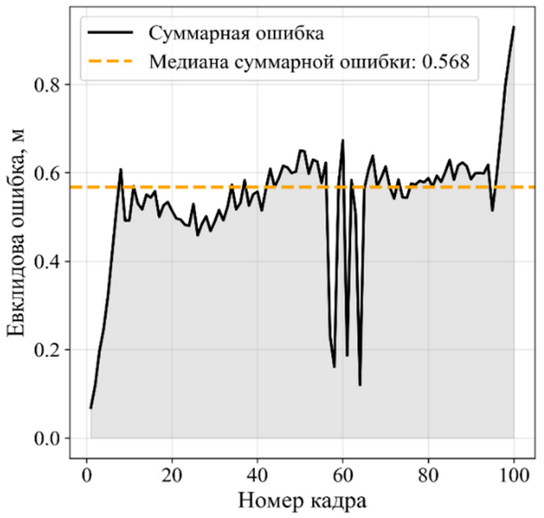


Рис. 5. Евклидова ошибка локализации объекта при движении в латеральной плоскости (перпендикулярно оптической оси)

Таким образом, предложенная система компьютерного зрения обеспечивает стабильную и приемлемую точность локализации для обоих типов движения. Однако при практическом внедрении в индустриальные многолучевые измерительные каналы необходимо учитывать рост погрешности при латеральных перемещениях объекта относительно оптической оси. Для минимизации систематических отклонений в таких сценариях рекомендуется применение адаптивной калибровки или постобработки результатов с использованием компенсационных моделей.

4.3. Оптимизация формы импульса

В ходе предварительных исследований было установлено, что более сглаженные формы импульсов обеспечивают меньший уровень искажений в многолучевом канале [26]. Поскольку степень сглаженности импульса определяет скорость спада энергетического спектра, при формулировке оптимизационной задачи целесообразно использовать критерий минимизации внеполосных излучений. Задачу оптимизации формы импульса по критерию минимизации внеполосных излучений можно записать как [23, 27]:

$$\arg\left\{\min_{a(t)} J\right\},\ J = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^{2n} G_a(\omega)\, d\omega\,, \qquad (1)$$

$$G_a(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \exp(-j\omega t)\, dt \right|^2 .$$

Можно показать, что (1) можно преобразовать к следующему виду:

$$J = (-1)^n \int_{-T_a/2}^{T_a/2} a(t) a^{(2n)}(t) dt\,, \qquad (2)$$

где $a^{(2n)}(t)$ – производная степени $2n$ от функции $a(t)$ (параметр n определяет скорость спада внеполосных излучений при выборе граничных условий в соответствии с теоремой Мезона [28]).

С учетом нормировки импульса к единичной энергии оптимизационная задача может быть решена аналитически для параметров T_a и n [23, 27]. Дополнительно для контроля за уровнем искажений, обусловленных каналом передачи, необходимо ввести следующее ограничение:

$$\max_{i=1\ldots N_{\mathrm{RX}}} \max_{k=1\ldots N-1} \mathrm{EVM}_i\left[c_k, \hat{c}_k\right] < D_0\,, \qquad (3)$$

где D_0 – уровень ограничения искажений; N_{RX} – число точек, в которых может располагаться приемник; N – число модуляционных символов [23, 27]. Оценки принятых модуляционных символов $\hat{c}_k$ могут быть получены на выходе согласованного фильтра в моменты времени $t = T_a + kT$.

Для упрощения процедуры оптимизации будем рассматривать не все точки расположения приемника, а лишь точку, в которой достигается максимальный уровень искажений. Однако поскольку при перемещении приемника даже на половину длины волны условия распространения могут сильно измениться, для получения более устойчивого решения было предложено выполнять оптимизацию в окрестности точки с максимальным уровнем искажений. После успешной оптимизации в окрестности точки с максимальным уровнем искажений необходимо проверить уровень искажений во всех точках. Для корректной демодуляции сигналов с модуляцией ФМ-4 максимальный уровень искажений не должен превышать 0,185 [29]. Данное пороговое значение можно использовать и для модуляции ФМ-2, поскольку минимальное расстояние между точками сигнального созвездия одинаково для обеих схем модуляции при фиксированной энергии бита.

5 Обсуждение результатов

Рассмотрим движение приемника в центральной зоне от точки с координатой $x = 10$ метров до точки с координатой $x = 11{,}5$ м (рис. 6) с шагом 0,1 метра. Предварительные исследования уровня искажений при использовании сигналов ФМ-2, сформированных фильтром с приподнятым косинусом (RRC-фильтр), с коэффициентом скругления передаточной характеристики $\beta = 1$ показали, что максимальный уровень искажений достигается в точке с координатами $x = 11{,}1$ метров.

Процедура оптимизации формы импульса длительностью $T_a = 8T$ с параметром $n = 6$ была выполнена в окрестности данной точки. В качестве ограничения на уровень искажений было выбрано значение $D_0 = 0{,}14$. Результирующие коэффициенты разложения представлены в таблице 2.

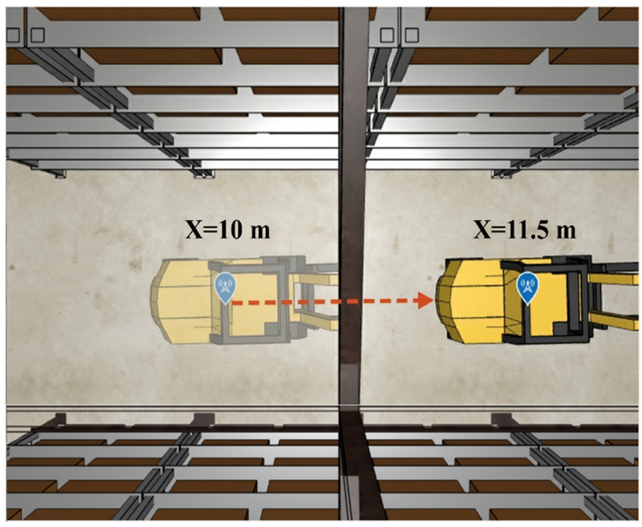


Рис. 6. Движение приемника от точки с координатой x=10 м до точки с координатой x = 11,5 м

Таблица 2

Результирующие коэффициенты разложения

Коэффициент разложения	Значение
a_0	0,197386315731937
a_1	0,195190492672729
a_2	0,191960614258026
a_3	0,186221274410080
a_4	0,177299802879840
a_5	0,161283216179479
a_6	0,141544456235090
a_7	0,123138547199687
a_8	0,103730568037915
a_9	0,0877013725896572
a_{10}	0,0721942409978056
a_{11}	0,0579457242565493
a_{12}	0,0343677767922889
a_{13}	0,00643233138095855
a_{14}	–0,00187765837779456

Вид сигнального созвездия на приеме в точке с координатой $x = 11{,}1$ метра для сигналов ФМ-2, сформированных RRC-фильтром (β = 1), и оптимальных сигналов приведен на рис. 7. Как видно, в случае сигналов, сформированных RRC-фильтром (β = 1), вместо двух точек сигнального созвездия ФМ-2 наблюдается восемь кластеров точек. В то же время при использовании оптимальных сигналов кластеры точек сигнального созвездия сгруппированы ближе друг к другу и ближе к истинным значениям.

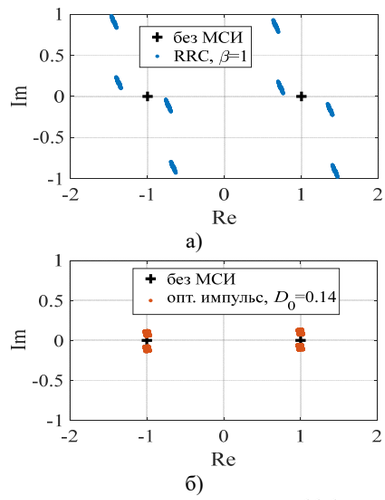


Рис. 7. Сигнальное созвездие в точке с x = 11,1 м для сигналов ФМ-2 через RRC-фильтр (β = 1) (а) и для оптимальных сигналов (б)

В таблицах 3 и 4 приведены значения уровня искажений в окрестности точки приемника с максимальным уровнем искажений. Во всех рассматриваемых точках для оптимальных сигналов уровень искажений не превышает 0,14, что обусловлено учетом данных точек приемника в процедуре оптимизации. Для остальных местоположений приемника уровень искажений при использовании оптимальных сигналов составляет менее 0,185 (табл. 4), что обеспечивает корректную демодуляцию сигналов с ФМ-2 модуляцией.

Таблица 3

Уровень искажений в точках, учитываемых в ходе оптимизации

x, м	EVM (ФМ-2 + RRC-фильтр, β=1)	Оптимальные сигналы
11,04	0,25	0,14
11,06	0,36	0,14
11,08	0,16	0,13
11,10	1,02	0,14
11,12	0,12	0,06
11,14	0,08	0,05

Таблица 4

Уровень искажений в средней зоне

x, м	EVM (ФМ-2 + RRC-фильтр, β=1)	Оптимальные сигналы
10	0,1	0,04
10,1	0,01	0,05
10,2	0,01	0,05
10,3	0,03	0,05
10,4	0,05	0,05
10,5	0,24	0,05
10,6	0,13	0,05
10,7	0,25	0,08
10,8	0,13	0,05
10,9	0,54	0,16
11	0,16	0,08
11,1	1	0,14
11,2	0,08	0,06
11,3	0,21	0,06
11,4	0,19	0,05
11,5	0,04	0,05

6 Заключение

В данной работе представлено решение актуальной задачи снижения вычислительной сложности приёмного тракта беспроводных систем передачи данных в условиях индустриальных помещений («Индустрия 4.0»). Основная сложность таких сценариев заключается в интенсивном многолучевом распространении радиоволн, вызванном наличием большого количества металлических поверхностей. Это приводит к значительной межсимвольной интерференции, для компенсации которой традиционно требуются вычислительно сложные алгоритмы обработки на приемной стороне.

Важным научным результатом работы является разработка и обоснование замкнутой интеллектуальной архитектуры, объединяющей подсистему компьютерного зрения с технологией адаптивного выбора формы импульса. В отличие от классических методов компенсации интерференции на приемной стороне (например, с помощью вычислительно затратных эквалайзеров), предложенное решение позволяет адаптировать сигнал к прогнозируемой канальной обстановке еще до возникновения искажений. При этом задача адаптации сигнала к условиям распространения решается до запуска передачи данных на этапе выбора формы оптимального импульса для заданных координат. Оптимальные импульсы обладают заранее известными спектральными характеристиками, что позволяет избежать неконтролируемого расширения спектра, свойственного методам прекодирования.

Разработана подсистема компьютерного зрения для пространственной локализации. Подтверждена эффективность трекинга промышленной техники с использованием нейросетевой архитектуры YOLOv11. Двухэтапное обучение позволило достичь следующих показателей детекции: Precision ≈ 0,998, Recall ≈ 0,997. Высокая точность обнаружения является необходимым условием для надежного определения координат, которое, в свою очередь, служит входными данными для блока выбора формы используемых сигналов.

Проведённая валидация системы локализации на двух типах траекторий, характерных для промышленной динамики, подтвердила её работоспособность в реальных сценариях. При движении объекта вдоль оптической оси камеры (изменение масштаба) метод демонстрирует высокую стабильность: медианная евклидова ошибка позиционирования составляет 0,148, среднеквадратическое отклонение – 0,164, а систематические смещения по координатам не превышают −0,092 (X) и −0,012 (Y). Максимальные отклонения (0,721) фиксируются преимущественно на краевых участках траектории, что связано с оптическими искажениями и изменением глубины резкости. В сценарии латерального перемещения (поперёк луча визирования) наблюдается рост погрешности до 0,568 (медиана) с выраженной анизотропией: ошибка по оси Y (−0,556) существенно превышает погрешность по оси X (−0,1). Данный эффект обусловлен геометрией перспективного проецирования, при которой малые неточности детекции границ объекта на изображении трансформируются в значительные ошибки обратного проецирования. При этом низкое стандартное отклонение (0,135) указывает на систематический характер смещения, что открывает возможность его компенсации посредством калибровочных коэффициентов или постобработки. Полученные количественные характеристики ошибок (медианы, максимумы, стандартные отклонения) позволяют сформировать доверительные интервалы для однозначной идентификации пространственной зоны нахождения объекта. Эти данные могут служить входной информацией для блока адаптации сигнала в многолучевых индустриальных измерительных каналах. Для повышения точности в сценариях латерального движения рекомендуется внедрение адаптивной калибровки или использование компенсационных моделей, учитывающих анизотропию погрешности.

Предложена процедура синтеза оптимальных импульсов с ограничением на уровень искажений. Ключевой особенностью является введение в оптимизационную задачу ограничения на максимальное значение модуля вектора ошибки (EVM < D_0), рассчитанного с учетом смоделированной многолучевой обстановки в конкретной пространственной зоне, определенной подсистемой компьютерного зрения.

Подтвержден выигрыш от выбора формы сигналов с помощью системы компьютерного зрения. Продемонстрировано, что для точки пространства с максимальным уровнем искажений, идентифицированной с помощью трассировки лучей, сигналы на основе оптимальных импульсов обеспечивают гарантированное подавление межсимвольной интерференции. В окрестности данной точки, используемой при оптимизации, уровень EVM не превышает заданного порога $D_0 = 0{,}14$, а на всей исследуемой траектории движения приемника остается ниже критического значения 0,185, необходимого для корректной демодуляции сигналов ФМ-2/ФМ-4.

Таким образом, подсистема компьютерного зрения обеспечивает контекстную информацию о местоположении объекта (и, косвенно, о типе канальной обстановки), а библиотека предварительно рассчитанных оптимальных импульсов позволяет адаптировать форму сигнала к этой обстановке**.** Экспериментально подтверждено, что точность пространственной локализации, включая сценарии с латеральным движением, является достаточной для надежной привязки приемника к зоне многолучевого канала с предсказуемыми искажениями. Это создает условия для использования упрощенных, алгоритмов поэлементного приема с низкой вычислительной сложностью на движущихся индустриальных устройствах без потери достоверности передачи данных.

Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию предложенной схемы с трассировкой лучей в реальном времени для динамического обновления библиотеки импульсов, учет множества одновременно движущихся объектов.

Литература

1. *González-Prelcic N., et al.* The Integrated Sensing and Communication Revolution for 6G: Vision, Techniques, and Applications // Proceedings of the IEEE. 2024. Vol. 112. No 7. P. 676-723. doi: 10.1109/JPROC.2024.3397609.

2. *Павлов В. А., Белов А. А., Завьялов С. В., Саянский А. Д., Вабищевич Д. А.* Применение компьютерного зрения для управления реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью с целью расширения зоны покрытия в системах мобильной связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. № 9. С. 28-35. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-28-35

3. *Jiang T. et al.* 3GPP Standardized 5G Channel Model for IIoT Scenarios: A Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. No. 11. P. 8799-8815. doi: 10.1109/JIOT.2020.3048992

4. *Morejón D., Pérez J. R., Eizmendi I., Fernández M., Angueira P., Torres R. P.* Channel Correlation Analysis of Distributed Access Links for Reliable Industrial Wireless Connectivity // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2026. Vol. 7. No 2. P. 564-576. doi: 10.1109/OJAP.2026.3660034

5. *Prlja A. Anderson J. B.* Reduced-Complexity Receivers for Strongly Narrowband Intersymbol Interference Introduced by Faster-than-Nyquist Signaling // IEEE Transactions on Communications. 2012. Vol. 60. No. 9. P. 2591-2601. doi: 10.1109/TCOMM.2012.070912.110296

6. *Anderson J. B., Zeinali M.* Best rate 1/2 convolutional codes for turbo equalization with severe ISI // 2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings, Cambridge, MA, USA. 2012. P. 2366-2370, doi: 10.1109/ISIT.2012.6283937

7. *Anderson J. B., Zeinali M.* Analysis of best high rate convolutional codes for faster than Nyquist turbo equalization // 2014 IEEE International Symposium on Information Theory, Honolulu, HI, USA. 2014. P. 1987-1991, doi: 10.1109/ISIT.2014.6875181

8. *Anderson J. B., Prlja A., Rusek F.* New reduced state space BCJR algorithms for the ISI channel // IEEE International Symposium on Information Theory. 2009. P. 889–893.

9. *Cicek A., Cavus E., Bedeer E., Marsland I., Yanikomeroglu H.* Coordinate Interleaved Faster-Than-Nyquist Signaling // IEEE Communications Letters. 2023. Vol. 27. No. 1. P. 229-233, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3212074.

10. *Abdelsamie A., Marsland I., Ibrahim A., Yanikomeroglu H.* MetNet: A Novel Low-Complexity Neural Network-Aided Detection for Faster-Than-Nyquist (FTN) Signaling in ISI Channels // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2023. Vol. 4. P. 798-809, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3253789.

11. *Ibrahim A., Bedeer E., Yanikomeroglu H.* A Novel Low Complexity Faster-Than-Nyquist Signaling Detector Based on the Primal-Dual Predictor-Corrector Interior Point Method // IEEE Communications Letters. 2021. Vol. 25. o. 7. P. 2370-2374. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3071784

12. *Bedeer E., Ahmed M. H., Yanikomeroglu H.* A Very Low Complexity Successive Symbol-by-Symbol Sequence Estimator for Faster-Than-Nyquist Signaling // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 7414-7422, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2663762

13. *Wang H., Liu A., Feng Z., Liang X., Liang H., Cai B.* Iterative-Detection-Aided Tomlinson-Harashima Precoding for Faster-Than-Nyquist Signaling // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 7748-7757, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2962069

14. *Liu M., Xue W., Jia P., Makarov S.B., Li B.* Research on Spectrum Optimization Technology for a Wireless Communication System. Symmetry. 2020. Vol. 12. No 1. P. 34, doi: 10.3390/SYM12010034

15. *Shang W., Xu Y., Qi J., Xue W., Makarov S. B.* Optimal Waveform of the Partial-Respond Signal Based on Minimum Out-of-Band Radiation Criterion // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. No 10. C. 1086, doi: 10.3390/app7101086

16. *Gelgor A., Gelgor T.* New Pulse Shapes for Partial Response Signaling to Outperform Faster-than-Nyquist Signaling // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia. 2019. P. 144-148, doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906884.

17. *Makarov S. B. et al*., Optimizing the Shape of Faster-Than-Nyquist (FTN) Signals With the Constraint on Energy Concentration in the Occupied Frequency Bandwidth // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 130082-130093, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009213

18. *Zavjalov S., Orlova A., Lavrenyuk I., Makarov S., Kuznetsova A., Volvenko S.* Beyond DVB-S2X: Optimal Signals for High-Throughput CubeSat Communications // 2025 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Saint Petersburg, Russian Federation. 2025. P. 232-235, doi: 10.1109/EExPolytech66949.2025.11252458.

19. *Cebecioglu B. B. et al.* Experimental Analysis of 5G NR for Indoor Industrial Environments // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 89310-89321, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3419011

20. *Amjoud A. B., Amrouch M.* Object Detection Using Deep Learning, CNNs and Vision Transformers: A Review // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 35479–35516. doi:10.1109/ACCESS.2023.3266093

21. *Khanam R., Hussain M.* YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. arXiv. 2024. Available at: https://arxiv.org/html/2410.17725v1 (accessed: 25 April 2026).

22. *Szeliski R.* Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer. 2022. 925 p., doi: 10.1007/978-3-030-34372-9

23. *Orlova A. et al.* Symmetrical Pulse Shape Optimization for Low-Complexity RedCap Devices in Industrial Multipath Channels // Symmetry. 2025. Vol. 17. No 11, Art. no. 2000, Nov. 2025, doi: 10.3390/sym17112000.

24. *Bhatia G. S., Corre Y., Di Renzo M.* Efficient ray-tracing channel emulation in industrial environments: an analysis of propagation model impact // 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Gothenburg. Sweden. 2023. P. 180-185, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188258.

25. *Lahk M., Ernits J.-P.* Synthetic dataset for warehouse equipment and pallet recognition (Videos). doi: 10.48726/e9wxe-qpv69.

26. *Орлова А. С., Макаров С. Б., Завьялов С. В., Лавренюк И., Томашевич С.В.* Оценка уровня векторной ошибки при индустриальном сценарии передачи данных в условиях многолучевого распространения спектрально-эффективных сигналов // Радиотехника. 2025. Том 89. № 3. С. 74-89, doi: 10.18127/j00338486-202503-07.

27. *Орлова А. С., Макаров С. Б., Завьялов С. В., Волвенко С. В.* Оптимальные сигналы для многолучевых каналов передачи данных // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 3. С. 121-134, doi: 10.18127/j00338486-202503-11.

28. *Mason S. J., Zimmermann H. J.* Electronic Circuits, Signals, and Systems. New York: Wiley, 1960, 616 p.

29. TS 38.141-1 V18.2.0; NR; Base Station (BS) Conformance Testing; Part 1: Conducted Conformance Testing. 3GPP: Sophia Antipolis, France, 2023. Available online: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3367

SELECTION OF OPTIMAL SIGNALS UNDER MULTIPATH PROPAGATION CONDITIONS USING COMPUTER VISION FOR DETERMINING THE LOCATION OF TRANSCEIVER MODULES

Vitalii A. Pavlov, *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia,* ***pavlov_va@spbstu.ru***
Anna S. Orlova, *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia,* ***ovsyannikova_as@spbstu.ru***
Faridoddin Shariaty, *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia,* ***Shariaty3@gmail.com***
Sergey V. Zavjalov, *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia,* ***zavyalov_sv@spbstu.ru***
Leonid B. Liokumovich, *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russia,* ***leonid@spbstu.ru***

Abstract

This paper proposes an intelligent architecture to reduce the computational complexity of the receiver in wireless data transmission systems in industrial environments. The core innovation lies in a closed-loop framework integrating a computer vision subsystem for spatial localization with adaptive pulse shaping. Industrial equipment detection employs the YOLOv11x architecture with two-stage transfer learning, achieving Precision ?0.998 and Recall ?0.997. Localization validation across two characteristic trajectories demonstrates a median Euclidean error of 0.148 for motion along the optical axis and 0.568 for lateral displacement, with the identified error anisotropy being readily compensable via calibration coefficients. These spatial coordinates enable pre-selection of optimal transmit pulses constrained by a distortion threshold (EVM < 0.14), effectively suppressing intersymbol interference in multipath channels. Experimental validation confirms that the achieved localization accuracy reliably maps the receiver to a zone with predictable channel distortions, ensuring robust BPSK/QPSK demodulation while allowing simplified, low-complexity signal processing. Consequently, the proposed vision-aided adaptive transmission scheme significantly reduces computational overhead at the receiver without compromising link reliability in complex industrial environments.

Keywords: *computer vision, object localization, adaptive pulse shaping, multipath propagation, Industry 4.0, intersymbol interference.*

References

[1] N. Gonzalez-Prelcic et al., "The integrated sensing and communication revolution for 6G: Vision, techniques, and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 112, no. 7, pp. 676-723, Jul. 2024, doi: 10.1109/JPROC.2024.3397609.

[2] V. A. Pavlov, A. A. Belov, S. V. Zavjalov, A. D. Sayanskiy, and D. A. Vabishchevich, " Application of computer vision to control reconfigurable intelligent surface to extend coverage area in mobile communication systems," *T-Comm*, vol. 18, no. 9, pp. 28-35, 2024, doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-28-35. (in Russian)

[3] T. Jiang et al., "3GPP standardized 5G channel model for IIoT scenarios: A survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 8799-8815, Jun. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3048992.

[4] D. Morej?n, J. R. P?rez, I. Eizmendi, M. Fern?ndez, P. Angueira, and R. P. Torres, "Channel correlation analysis of distributed access links for reliable industrial wireless connectivity," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, early access, 2026, vol. 7, no 2, pp. 564-575. doi: 10.1109/OJAP.2026.3660034.

[5] A. Prlja and J. B. Anderson, "Reduced-complexity receivers for strongly narrowband intersymbol interference introduced by faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 9, pp. 2591-2601, Sep. 2012, doi: 10.1109/TCOMM.2012.070912.110296.

[6] J. B. Anderson and M. Zeinali, "Best rate 1/2 convolutional codes for turbo equalization with severe ISI," in *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Cambridge, MA, USA, 2012, pp. 2366-2370, doi: 10.1109/ISIT.2012.6283937.

[7] J. B. Anderson and M. Zeinali, "Analysis of best high rate convolutional codes for faster than Nyquist turbo equalization," in *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Honolulu, HI, USA, 2014, pp. 1987-1991, doi: 10.1109/ISIT.2014.6875181.

[8] J. B. Anderson, A. Prlja, and F. Rusek, "New reduced state space BCJR algorithms for the ISI channel," in *IEEE International Symposium on Information Theory*, Jun. 2009, pp. 889-893, doi: 10.1109/ISIT.2009.5205622.

[9] A. Cicek, E. Cavus, E. Bedeer, I. Marsland, and H. Yanikomeroglu, "Coordinate interleaved faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 1, pp. 229-233, Jan. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3212074.

[10] A. Abdelsamie, I. Marsland, A. Ibrahim, and H. Yanikomeroglu, "MetNet: A novel low-complexity neural network-aided detection for faster-than-Nyquist (FTN) signaling in ISI channels," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 4, pp. 798-809, 2023, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3253789.

[11] A. Ibrahim, E. Bedeer, and H. Yanikomeroglu, "A novel low complexity faster-than-Nyquist signaling detector based on the primal-dual predictor-corrector interior point method," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 7, pp. 2370-2374, Jul. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3071784.

[12] E. Bedeer, M. H. Ahmed, and H. Yanikomeroglu, "A very low complexity successive symbol-by-symbol sequence estimator for faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7414-7422, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2663762.

[13] H. Wang, A. Liu, Z. Feng, X. Liang, H. Liang, and B. Cai, "Iterative-detection-aided Tomlinson-Harashima precoding for faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 7748-7757, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2962069.

[14] M. Liu, W. Xue, P. Jia, S. B. Makarov, and B. Li, "Research on spectrum optimization technology for a wireless communication system," *Symmetry*, vol. 12, no. 1, p. 34, 2020, doi: 10.3390/SYM12010034.

[15] W. Shang, Y. Xu, J. Qi, W. Xue, and S. B. Makarov, "Optimal waveform of the partial-respond signal based on minimum out-of-band radiation criterion," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 10, p. 1086, 2017, doi: 10.3390/app7101086.
[16] A. Gelgor and T. Gelgor, "New pulse shapes for partial response signaling to outperform faster-than-Nyquist signaling," in *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 144-148, doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906884.
[17] S. B. Makarov et al., "Optimizing the shape of faster-than-Nyquist (FTN) signals with the constraint on energy concentration in the occupied frequency bandwidth," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130082-130093, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009213.
[18] S. Zavjalov, A. Orlova, I. Lavrenyuk, S. Makarov, A. Kuznetsova, and S. Volvenko, "Beyond DVB-S2X: Optimal signals for high-throughput CubeSat communications," in *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech),* Saint Petersburg, Russian Federation, 2025, pp. 232-235, doi: 10.1109/EExPolytech66949.2025.11252458.
[19] B. B. Cebecioglu et al., "Experimental analysis of 5G NR for indoor industrial environments," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 89310-89321, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3419011.
[20] A. B. Amjoud and M. Amrouch, "Object detection using deep learning, CNNs and vision transformers: A review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 35479-35516, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3266093.
[21] R. Khanam and M. Hussain, "YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements," arXiv, 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/html/2410.17725v1
[22] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2022, 925 p. doi: 10.1007/978-3-030-34372-9.
[23] A. Orlova, S. Zavjalov, A. Chekireva, A. Kuznetsova, I. Lavrenyuk, S. Makarov, G. Dong, "Symmetrical pulse shape optimization for low-complexity RedCap devices in industrial multipath channels," *Symmetry*, vol. 17, no. 11, art. no. 2000, Nov. 2025, doi: 10.3390/sym17112000.
[24] G. S. Bhatia, Y. Corre, and M. Di Renzo, "Efficient ray-tracing channel emulation in industrial environments: An analysis of propagation model impact," in *Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Gothenburg, Sweden, 2023, pp. 180-185, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188258.
[25] M. Lahk and J.-P. Ernits, "Synthetic dataset for warehouse equipment and pallet recognition (Videos)," 2024, doi: 10.48726/e9wxe-qpv69.
[26] A. S. Orlova, S. B. Makarov, S. V. Zavyalov, and S. V. Volvenko, "Optimal signals for multipath data transmission channels," *Radiotekhnika*, vol. 89, no. 3, pp. 121-134, 2025, doi: 10.18127/j00338486-202503-11.
[27] A. S. Orlova, S. B. Makarov, S. V. Zavyalov, I. Lavrenyuk, and S.V. Tomashevich, "Estimation of the error vector magnitude in an industrial data transmission scenario under conditions of multipath propagation of spectrally efficient signals," *Radiotekhnika*, vol. 89, no. 3, pp. 74-89, 2025, doi: 10.18127/j00338486-202503-07.
[28] S. J. Mason and H. J. Zimmermann, "Electronic Circuits, Signals, and Systems," New York : Wiley, 1960, 616 p.
[29] 3GPP, "TS 38.141-1 V18.2.0; NR; Base Station (BS) conformance testing; Part 1: Conducted conformance testing," 3GPP, Sophia Antipolis, France, 2023. [Online]. Available: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3367

Information about authors:

Vitalii A. Pavlov, *Associate professor, PhD, Associate professor, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg. Russia. Orcid: 0000-0003-0726-6613*

Anna S. Orlova, *PhD, Assistant professor, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg. Russia. Orcid:0000-0002-3401-2718*

Faridoddin Shariaty, *Senior lecturer, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg. Russia. Orcid: 0000-0002-7060-8826*

Sergey V. Zavjalov, *Associate professor, PhD, Associate professor, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg. Russia. Orcid: 0000-0003-3398-3616*

Leonid B. Liokumovich, *Professor, Dr.Sc., Professor, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg. Russia. Orcid: 0000-0001-5988-1429*