



## Кластеризация абонентов в когнитивной системе управления реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью для систем связи 5G/6G

В. А. Павлов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0003-0726-6613](https://orcid.org/0000-0003-0726-6613), [pavlov\\_va@spbstu.ru](mailto:pavlov_va@spbstu.ru)

А. А. Белов<sup>а</sup>, ведущий инженер, [orcid.org/0000-0003-0617-4514](https://orcid.org/0000-0003-0617-4514)

Ф. Шариати<sup>а</sup>, аспирант, ассистент, [orcid.org/0000-0002-7060-8826](https://orcid.org/0000-0002-7060-8826)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

**Введение:** повышение эффективности работы систем связи миллиметрового диапазона является актуальной задачей в области телекоммуникаций. Использование вспомогательных систем компьютерного зрения для улучшения управления лучом реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей представляет значительный интерес при разработке систем 5G/6G миллиметрового диапазона. **Цель:** разработать и протестировать методы, использующие компьютерное зрение для точного определения положения абонентов и на основании этой информации оптимизирующие формирование диаграммы направленности антенн в системах связи миллиметрового диапазона. **Методы:** исследование включало моделирование зон покрытия лучом реконфигурируемой интеллектуальной поверхности для оценки размеров, формы и ориентации этих зон. Получены и использованы приближенные формулы для формы и размеров зон покрытия одним лучом. Для обнаружения пешеходов применена сверточная нейронная сеть YOLOv11, а для группировки близко расположенных пользователей — метод кластеризации DBSCAN. Оценка качества связи проводилась с использованием коэффициента покрытия (отношения общего количества пользователей к количеству обеспеченных связью). **Результаты:** проведено моделирование работы системы связи миллиметрового диапазона 5G. В итоге установлено, что зона покрытия одного луча имеет форму вытянутого эллипса, размеры и ориентация которого зависят от положения точки пересечения максимума излучения антенны с земной поверхностью. Тестирование с использованием реальных видеозаписей подтвердило эффективность предложенных методов управления лучом антенны. В частности, выявлено, что использование многолучевого режима работы реконфигурируемой интеллектуальной поверхности обеспечивает заметное улучшение качества связи в случае большого количества абонентов. Количественные оценки показали, что оптимальное количество лучей обычно не превышало четырех. **Практическая значимость:** результаты исследования имеют важное практическое значение для разработки и оптимизации работы систем связи миллиметрового диапазона. Использование предложенных методов позволяет повысить эффективность управления лучом и улучшить качество связи в условиях большого количества абонентов.

**Ключевые слова** — компьютерное зрение, реконфигурируемая интеллектуальная поверхность, кластеризация, обнаружение объектов, системы связи 5G/6G, мобильная связь.

**Для цитирования:** Павлов В. А., Белов А. А., Шариати Ф. Кластеризация абонентов в когнитивной системе управления реконфигурируемой интеллектуальной поверхностью для систем связи 5G/6G. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 3, с. 59–68. doi:10.31799/1684-8853-2025-3-59-68, EDN: UTJUNH

**For citation:** Pavlov V. A., Belov A. A., Shariaty F. Clustering of users in cognitive control system of reflective intelligent surface for 5G/6G communication systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 3, pp. 59–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-3-59-68, EDN: UTJUNH

### Введение

В современном мире беспроводные коммуникации играют ключевую роль в обеспечении связи. С переходом на системы 5G/6G требования к качеству обслуживания, скорости передачи данных и эффективности использования излучаемой мощности становятся все более высокими. С целью расширить полосы пропускания и повысить скорость передачи информации производится переход на более высокие частоты, вплоть до миллиметровых волн (ММВ). Системы 5G уже используют ММВ при работе в диапазоне FR2 (24–52 ГГц). Однако по сравнению с более низкочастотными диапазонами FR1 (частоты

ниже 6 ГГц) применение ММВ имеет существенные особенности, связанные как с характером распространения ММВ, так и с новыми принципами построения и работы базовых станций (БС). Во-первых, любые затеняющие абонентов препятствия на пути распространения ММВ (дома, деревья и т. п.) снижают уровень принятого абонентским терминалом сигнала и практически всегда приводят к полному нарушению связи. Во-вторых, антенны ММВ (обычно это фазированные антенные решетки) часто имеют узкие диаграммы направленности (ДН). Одним из перспективных направлений развития в области совершенствования связи на ММВ является использование реконфигурируемых интеллекту-

альных поверхностей (РИП), которые позволяют динамически управлять электромагнитными волнами. Специально размещенные РИП способны переотражать сигналы БС ММ-диапазона в теневые зоны и могут значительно повысить эффективность как существующих, так и перспективных систем связи за счет расширения зоны покрытия БС. Но узкие ДН антенн ММВ не способны обеспечить одномоментное покрытие большой площади и требуют точного наведения на абонента. Связанные с этим задачи пока находятся в стадии решения. Одним из подходов является использование вспомогательных систем компьютерного зрения, определяющих наличие и положение абонентов и передающих информацию БС и РИП для использования в алгоритмах управления лучом.

В работе [1] для управления системы 6G, работающей в диапазоне терагерцовых частот, используется система компьютерного зрения. Основная идея заключается в применении визуальной информации для упреждающего переключения соединения, что позволяет максимизировать пропускную способность системы. Предложенная авторами система использует глубокое обучение для обнаружения пользователей, предсказания их траекторий и прогнозирования качества связи, что позволяет минимизировать потери из-за блокировок сигнала. Результаты экспериментов показывают, что предложенная система обеспечивает увеличение пропускной способности на 30 % по сравнению с традиционными методами управления мобильностью. Особенностью работы является проведение экспериментальных исследований исключительно внутри помещений ограниченного размера.

В работах [2, 3] описан пример интеграции РИП, функционирующей в диапазоне ММВ, и системы компьютерного зрения, расположенных вне помещения. Для выбора оптимальной ДН в работе [2] используется генетический алгоритм. В [3] показано, что при высокой загрузке сети совместное использование РИП и системы компьютерного зрения позволяет снизить средний уровень взаимных помех на 40 %.

В работе [4] описан пример моделирования использования компьютерного зрения для формирования ДН в системе ММО ММ-диапазона на основе синтетического набора данных [5]. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что использование визуальных данных может значительно улучшить точность прогнозирования ДН.

В работе [6] также проводилось моделирование на синтетическом наборе данных [5]. Для управления РИП в [6] использовали YOLOv3. Авторы продемонстрировали, что предложенный метод визуального контроля способен обес-

печить почти оптимальную достижимую скорость при значительно меньших затратах на обучение синтезу ДН, что свидетельствует о потенциале применения визуальной информации для повышения эффективности систем связи с РИП.

В [7] в качестве системы компьютерного зрения авторы использовали сочетание стереокамеры и алгоритма YOLOX. Эксперименты проводились с РИП размером  $20 \times 20$  элементов на частоте 5,4 ГГц. В работе показано, что РИП под управлением системы компьютерного зрения способен быстро корректировать коэффициенты отражения при динамическом сопровождении пользователя. Однако с увеличением расстояния до пользователей возрастает сложность и снижается точность работы системы компьютерного зрения.

В работах [8–10] представлено решение проблемы увеличения зоны покрытия в современных высокочастотных системах мобильной связи. Решение заключается в использовании компьютерного зрения для управления ДН РИП. Показано, что при использовании РИП, работающего под управлением системы компьютерного зрения, канал связи может быть создан в теневых зонах передатчика при работе в помещении сложной формы, таком как L-образный коридор. Это значительно увеличивает мощность принимаемого сигнала на 15–20 дБ, что делает ее достаточной для надежной работы абонентского оборудования.

В [11] был разработан нейросетевой детектор объектов, обученный и протестированный на разработанном авторами работы наборе данных, состоящем из 20232 пар изображений (цветного изображения и карты глубины), полученных с камеры, прикрепленной к БС, расположенной внутри помещения. Каждая пара изображений содержит информацию о категории объекта (человек, мобильный телефон и ноутбук) и его положения в кадре (ограничительные прямоугольники). Результаты, полученные авторами (Precision 94,46 %, Recall 81,04, F1-score 87,24 %), показали перспективность применения технологии формирования ДН с помощью нейросетевого детектора, обученного на специализированном наборе данных.

В работе [12] разработали систему прогнозирования блокировок и упреждающего переключения (handover) для систем связи внутри помещения в диапазонах крайне высоких и терагерцовых частот, которые критичны для систем 6G. Авторы предлагают метод, основанный на анализе последовательностей RGB-D-изображений и индексов лучей, для обнаружения пользователей и препятствий, предсказания их траекторий и прогнозирования блокировок. Основная идея заключается в разделении стационарного фона

и движущихся объектов, что позволяет снизить задержки и энергопотребление по сравнению с традиционными методами. Результаты экспериментов показывают, что предложенная система достигает точности прогнозирования блокировок до 97 % и позволяет минимизировать потери в пропускной способности из-за блокировок.

В работе [13] для управления РИП используется система компьютерного зрения на базе RGB-D-камеры, нейросетевого детектора YOLOv4-tiny [14] для обнаружения и SORT [15] для сопровождения пользователей. Для формирования ДН используется предобученная нейронная сеть ResNet34 [16], информация с выхода которой передается на ПЛИС для управления РИП. Эксперименты в безэховой камере продемонстрировали способность системы отслеживать цели и передавать данные с высокой точностью.

В [17] представлена система на базе компьютерного зрения для управления ДН базовой станции. Система захватывает изображение, а детектор объектов на основе глубокого обучения определяет 3D-местоположение абонента. Поскольку в этом случае БС может напрямую определять направление ДН, то данная система позволяет добиться значительного выигрыша в скорости формирования ДН. Авторы показали, что благодаря системе компьютерного зрения достигается более чем 40-процентное улучшение среднего коэффициента усиления антенны.

Из обзора и анализа источников [1–17] можно сделать вывод, что задача сопряжения алгоритмов компьютерного зрения и РИП является перспективной и относительно мало проработанной для случая связи вне помещений. В то же время в работах отсутствует исследование влияния кластеризации на эффективность обслуживания абонентов. Отдельно стоит отметить актуальность исследования сопряжения алгоритмов компьютерного зрения, РИП и кластеризации применительно к работе вне помещения. Данная проблема не исследована в должной мере и представляет как научный, так и практический интерес.

Цель настоящей работы заключается в разработке и тестировании методов, которые позволят точно определять положение абонентов и оптимизировать зоны покрытия в системах связи миллиметрового диапазона.

### Моделирование зоны покрытия

Для определения параметров зоны покрытия было проведено моделирование плоской прямоугольной РИП, переотражающей сигнал от БС ММ-диапазона (5G FR2) в теньевую зону [18]. При

моделировании распространения ММВ использовалось уравнение Фрииса [18] и известные параметры антенн. Определялась мощность на входе приемника абонентского терминала в зависимости от его положения в зоне работы РИП.

При моделировании использовались следующие параметры:

- рабочая частота: 28 ГГц;
- мощность БС: 40 дБм;
- коэффициент усиления антенны БС: 30 дБ;
- координаты БС:  $X = -125$  м,  $Y = 10$  м,  $Z = 75$  м;
- размеры РИП:  $240 \times 240$  мм;
- количество элементов РИП:  $48 \times 48$ ;
- координаты РИП:  $X = 0$  м,  $Y = 10$  м,  $Z = 0$  м;
- пороговая чувствительность приемника:  $-90$  дБм;
- коэффициент усиления антенны приемника: 6 дБ;
- дополнительные потери мощности по разным причинам: 10 дБ.

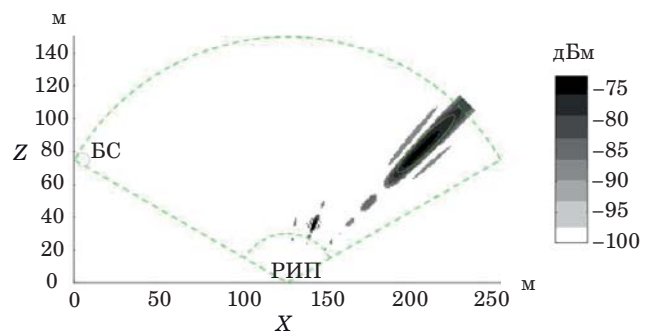
На рис. 1 показан сектор работы РИП  $\pm 60^\circ$  по углу и 150 м по дальности и распределение мощности сигнала на входе приемника абонентского терминала в пределах этого сектора.

Моделирование показало, что зона покрытия одного луча имеет форму, близкую к вытянутому эллипсу. Большая полуось эллипса направлена вдоль проекции направления максимума излучения антенны на земную поверхность, ее длина зависит от положения точки пересечения максимума излучения антенны с земной поверхностью. Малая полуось эллипса направлена поперек направления проекции максимума излучения антенны, а ее длина определяется шириной ДН.

Для рассматриваемого случая были получены следующие приближенные выражения для параметров этого эллипса (в метрах):

- большая полуось:  $L_1 = 0,5 \times R + 5$ ;
- малая полуось:  $L_2 = R \times \sin(2 \times A)$ ,

где  $R$  – точка пересечения максимума ДН с земной поверхностью;  $A$  – ширина ДН антенны по уровню половинной мощности.



■ Рис. 1. Пример зоны покрытия

■ Fig. 1. Example of the coverage area

Для согласования зоны покрытия с положением абонентов форма кластера также должна выбираться в форме эллипса, соответствующего эллипсу покрытия РИП и скорректированного с учетом положения и ориентации видеокамеры.

## Описание метода кластеризации

В данной работе предлагается комплексный подход к использованию компьютерного зрения и методов кластеризации для оптимизации процесса формирования ДН в системах с РИП. Описание метода представлено на рис. 2.

Анализ литературы [19, 20] показал, что архитектура нейронной сети YOLOv11 [20] потенциально может быть эффективной при обнаружении небольших объектов (таких как пешеходы) с большого расстояния в различных ситуациях (таких как условия плотной городской застройки, в условиях низкой видимости), а также для интеграции с системами РИП для улучшения качества связи.

YOLOv11 содержит несколько ключевых архитектурных компонентов, значительно улучшающих извлечение признаков и производительность модели. В частности, внедрение блоков C3k2, SPPF и C2PSA позволяет модели более эффективно обрабатывать сложные сцены и объекты. Блок C3k2 (Cross Stage Partial с размером ядра 2) улучшает извлечение признаков, обеспечивая более точное и эффективное обнаружение объектов. Этот компонент позволяет модели лучше обрабатывать сложные сцены и объекты, повышая общую производительность. Блок SPPF (Spatial Pyramid Pooling – Fast) обеспечивает более эффективное использование вычислительных ресурсов, что особенно важно для приложений реального времени. Модуль C2PSA (сверточный блок с параллельным пространственным «вниманием») позволяет модели фокусироваться на наиболее важных частях изображения. C2PSA улучшает способность модели распознавать объекты в сложных и загроможденных сценах, повышая точность обнаружения.

YOLOv11 демонстрирует высокую среднюю точность (mAP) и вычислительную эффектив-

ность по сравнению с предыдущими версиями, сохраняя баланс между размером модели и точностью. Например, для версии YOLOv11x mAP составляет 54,7 % при размере входного изображения  $640 \times 640$  пикселей на стандартном наборе данных COCO.

После обнаружения объектов применяется метод кластеризации DBSCAN для группировки пользователей. Этот метод позволяет эффективно группировать пользователей на основе их пространственного расположения, что упрощает процесс формирования ДН и повышает эффективность передачи данных.

Алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) работает по принципу кластеризации на основе плотности. Он группирует точки данных (абонентов), которые находятся близко друг к другу, и отделяет точки, которые находятся в областях с низкой плотностью.

Рассмотрим основные шаги алгоритма.

**1. Выбор параметров:** задаются два параметра — радиус соседства ( $\epsilon$ ) и минимальное количество точек (MinPts), необходимых для формирования кластера.

**2. Определение ядра:** для каждой точки в наборе данных алгоритм проверяет, есть ли в ее  $\epsilon$ -окрестности не менее MinPts точек. Если это условие выполняется, точка считается ядром кластера.

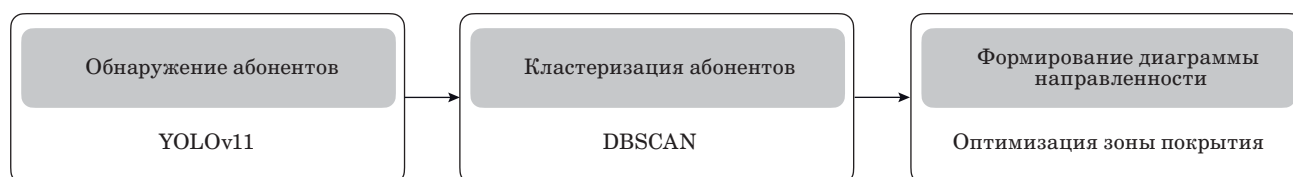
**3. Расширение кластера:** если точка является ядром, все точки в ее  $\epsilon$ -окрестности, включая другие ядра, добавляются в тот же кластер. Этот процесс повторяется рекурсивно для всех соседних точек.

**4. Обнаружение шума:** точки, которые не принадлежат ни одному кластеру и не являются ядрами, считаются шумом.

Таким образом, DBSCAN эффективно выделяет кластеры произвольной формы и устойчив к выбросам.

Алгоритм DBSCAN позволяет гибко управлять структурой кластеров. Он строит упорядоченное представление данных и создает кластеры с учетом их плотности. Основные шаги алгоритма кластеризации абонентов включают:

**1. Вычисление расстояний и углов:** для каждой точки вычисляются расстояние и угол до



■ **Рис. 2.** Описание метода

■ **Fig. 2.** Description of the method



антенны. Расстояние  $d$  между точкой  $(x_i, y_i)$  и антенной  $(x_a, y_a)$  определяется как

$$d = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2}.$$

Угол  $\theta$  между точкой и антенной вычисляется как

$$\theta = \arctg\left(\frac{y_i - y_a}{x_i - x_a}\right).$$

**2. Нормализация признаков:** углы нормализуются линейно в диапазоне от 0 до 1, а расстояния нормализуются нелинейно. Нормализация углов необходима, так как поле зрения камеры составляет  $120^\circ$ . Это позволяет упростить дальнейшую обработку данных. Нормализованные углы  $\theta'$  вычисляются как

$$\theta' = \frac{2 \times \theta}{\pi/3}.$$

Нормализация расстояний необходима для того, чтобы на дальних расстояниях вес расстояния был меньше, так как эллипсы будут длиннее по вектору антенна-кластер. Нормализованные расстояния  $d'$  вычисляются как

$$d' = \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{d_{\max}}\right)\right),$$

где  $d_{\max}$  — максимальное расстояние среди всех точек. Это позволяет уменьшить влияние дальних точек на формирование эллипсов, что особенно важно для точного моделирования зон покрытия.

**3. Кластеризация:** для кластеризации нормализованных признаков используется алгоритм DBSCAN.

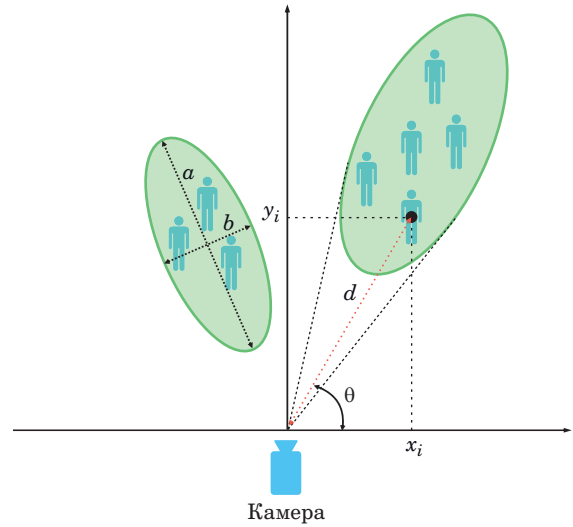
**4. Разделение кластеров по углу:** кластеры разделяются на подкластеры на основе углового расстояния. Если угловое расстояние между соседними точками превышает заданный порог, точками начинается новый подкластер.

**5. Формирование эллипсов:** для каждого подкластера вычисляется центр масс и ориентация. Эллипсы формируются на основе максимального углового расстояния и расстояния до антенны. Основная ось эллипса  $a$  и поперечная ось  $b$  вычисляются как

$$a = d_{\max} \sin(\theta_{\max}) \times 2,$$

$$b = a \times 0,6,$$

где  $\theta_{\max}$  — максимальный угол, который равен  $10^\circ$  (определяется шириной ДН РИП).



■ **Рис. 3.** Процесс формирования кластеров  
■ **Fig. 3.** The process of cluster formation

На основе результатов кластеризации формируются эллипсы (рис. 3), которые охватывают группы пользователей и используются для моделирования зон покрытия и оптимизации формирования ДН.

Для оценки эффективности предложенного подхода было проведено моделирование различных сценариев использования РИП в беспроводных сетях, которое позволяет оценить влияние метода кластеризации DBSCAN на эффективность системы и качество связи. Результаты моделирования демонстрируют, что предложенный подход значительно повышает эффективность обслуживания абонентов.

Для количественной оценки эффективности кластеризации используется метрика, определяемая как отношение числа абонентов, находящихся внутри сформированных эллиптических зон покрытия ( $n$ ), к общему числу абонентов ( $N$ ) в кадре:

$$\text{Coverage ratio} = \frac{n}{N}.$$

Эта метрика позволяет оценить, насколько точно метод кластеризации DBSCAN группирует абонентов и формирует эллипсы, охватывающие группы пользователей.

## Управление РИП

Для определения требуемого угла отклонения РИП необходимо преобразовать координаты центра кластера  $(x, y)$  из декартовой системы координат в сферическую, чтобы найти углы  $\theta$  и  $\varphi$ :

$$\theta = \left( \sqrt{x^2 + y^2} \right) \times \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол обзора камеры, равен  $60^\circ$  (определяется по результатам тестирования камеры);

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + \frac{180^\circ}{\pi}.$$

Фазы элементов РИП, необходимые для отклонения луча на требуемые углы, могут быть рассчитаны по формуле [21]

$$w = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta (\cos \varphi x_n + \sin \varphi y_n),$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $x_n$  и  $y_n$  — координаты элемента РИП с номером  $n$ . В случае формирования многолучевой ДН распределения отдельных диаграмм комбинируются.

## Результаты моделирования

Для оценки эффективности предлагаемого метода формирования ДН, основанного на интеграции алгоритма кластеризации DBSCAN и модели обнаружения объектов YOLOv11, были проведены эксперименты на видеопоследовательности из набора данных библиотеки OpenCV (<https://opencv.org/>). На данном видео абоненты перемещаются в различных направлениях и с разной скоростью, система должна в реальном времени корректировать зоны покрытия для обеспечения стабильного качества связи. В данной работе основным показателем эффективности выступает коэффициент покрытия (coverage ratio).

Формирование лучей в режиме реального времени иллюстрирует рис. 4. Зеленые эллипсы обозначают зоны покрытия, динамически сформированные на основе результатов кластеризации с использованием алгоритма DBSCAN. При этом обнаружение объектов, реализуемое посредством модели YOLOv11, обеспечивает высокую точность и оперативность в идентификации перемещающихся абонентов, что критически важно для адаптивного формирования зон покрытия.

Среднее значение метрики coverage ratio для предлагаемого метода составило 0,77, что свидетельствует о высокой точности кластеризации и эффективном моделировании зон покрытия. Для дополнительной проверки предложенного подхода были проведены сравнительные эксперименты, в ходе которых изучалась зависимость коэффициента охвата от числа формируемых лучей. Результаты экспериментов (рис. 5) показывают, что увеличение числа лучей существенно влияет на охват абонентов.

1. При использовании одного луча коэффициент охвата составил 52 %, что указывает на недостаточное покрытие и неспособность охватить распределенные группы абонентов.

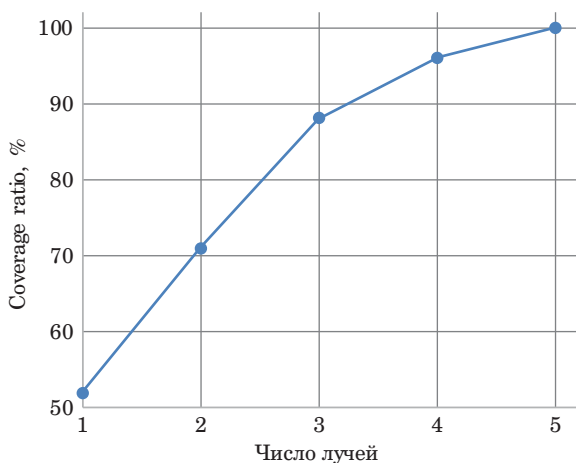
2. При формировании двух лучей значение коэффициента покрытия увеличилось до 71 %, что дает заметное улучшение охвата абонентов, однако значительная доля объектов остается вне зон покрытия.

3. Применение трех лучей позволило достичь коэффициента покрытия 88 %, обеспечив более равномерное распределение зон покрытия.

4. При использовании четырех лучей наблюдается дальнейшее улучшение, и коэффициент охвата достигает 96 %, что говорит о почти полном покрытии динамически перемещающихся абонентов.



■ **Рис. 4.** Примеры создания кластеров  
■ **Fig. 4.** Examples of creating clusters



■ **Рис. 5.** Зависимость coverage ratio от числа лучей

■ **Fig. 5.** The dependence of the coverage ratio on the number of beams

5. Применение пяти лучей привело к полному охвату (100 %), что демонстрирует потенциал метода при оптимальной конфигурации.

Первоначально при увеличении числа лучей наблюдается значительный прирост коэффициента покрытия. Однако при достижении пяти лучей отмечается эффект насыщения, когда дальнейшее увеличение числа лучей не приводит к улучшению охвата. Несмотря на то, что среднее число абонентов в зоне работы РИП равно шести (а максимальное девяти), уже четыре луча обеспечивают практически полное покрытие. Это связано с тем, что соседние абоненты часто попадают в один кластер и обслуживаются одним лучом. По мере дальнейшего роста количества абонентов вероятность попадания нескольких абонентов в один кластер только растет. Однако при определении оптимального количества лучей надо также иметь в виду, что для пассивных РИП мощность переотраженного сигнала БС делится между лучами поровну, снижая мощность принятого абонентом сигнала. Это свидетельствует о том, что оптимальное число лучей определяется компромиссным соотношением между максимальным охватом и другими параметрами системы. Использование нескольких лучей позволяет гибко реагировать на изменения в плотности распределения абонентов. При динамическом перемещении объектов метод демонстрирует высокую адаптивность, обеспечивая своевременное корректирование зон покрытия, что критически важно для поддержания качества связи в условиях реального времени. Полученные результаты указывают на то, что применение мультилучевого формирования зон покрытия является эффективным решением для систем с РИП. В зависимости от требований конкретного сценария (например, уровня загруженности, динамики перемещений абонентов) возможно оптимальное

распределение числа лучей, что позволяет достигать баланса между качеством связи и вычислительными затратами.

Проведенный анализ дает возможность сделать вывод, что интеграция методов компьютерного зрения и кластеризации существенно повышает эффективность использования зон покрытия в динамичных условиях. Использование нескольких лучей обеспечивает практически полный охват абонентов, что ведет к повышению качества связи и эффективному использованию энергетического бюджета системы. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию вычислительных процессов при увеличении числа лучей, а также на оценку влияния окружающей среды и плотности абонентов на параметры формирования зон покрытия.

## Заключение

В работе были исследованы возможности использования систем компьютерного зрения для оптимизации управления положением луча РИП в системах связи ММ-диапазона. Проведено моделирование зон покрытия (областей с уровнем сигнала, достаточным для работы абонентского оборудования) РИП ММ-диапазона с узкой ДН, получены приближенные формулы для оценки размеров и ориентации зон покрытия для различных положений луча. Полученные данные использованы для определения требований к специализированным алгоритмам кластеризации, которые объединяют потенциальных абонентов в группы оптимальных размеров и формы. Показано, как информация о количестве и расположении кластеров может быть использована для управления фазами элементов РИП. Проведена проверка предлагаемых подходов на реальных видеоматериалах с пешеходами, произвольно перемещающимися в зоне действия РИП. Для обнаружения пешеходов использовалась современная сверточная нейронная сеть YOLOv11, обеспечивающая высокую точность и скорость работы при умеренной вычислительной сложности. После обнаружения объектов применяется метод кластеризации DBSCAN для группировки пользователей. В качестве метрики оценки качества связи использовался коэффициент покрытия (coverage ratio). Показаны преимущества использования многолучевого режима работы РИП в случае большого количества абонентов. Получены количественные оценки зависимости коэффициента покрытия от количества лучей в реальных ситуациях. Эти зависимости показывают, что увеличение количества одновременно формируемых лучей до трех-четырех существенно повышает коэффициент покрытия и дальнейшее увеличение количества лучей обычно нецелесообразно.



## Литература

1. Ahn Y., Kim J., Kim S., Kim S., Shim B. Sensing and computer vision-aided mobility management for 6G millimeter and terahertz communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, vol. 72, iss. 10, pp. 6044–6058. doi:10.1109/TCOMM.2024.3392799
2. Loscri V., Rizza C., Benslimane A., Vegni A. M., Innocenti E., Giuliano R. BEST-RIM: A mmWave beam steering approach based on computer vision-enhanced reconfigurable intelligent metasurfaces. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, vol. 72, iss. 6, pp. 7613–7626. doi:10.1109/TVT.2023.3243358
3. Loscri V., Vegni A. M., Innocenti E., Giuliano R., Mazzenga F. A joint computer vision and reconfigurable intelligent meta-surface approach for interference reduction in beyond 5G networks. *IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, Paris, France, 7–10 June 2021, IEEE, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/HPSR52026.2021.9481794
4. Tian Y., Pan G., Alouini M. S. Applying deep-learning-based computer vision to wireless communications: Methodologies, opportunities, and challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 132–143. doi:10.1109/OJCOMS.2020.3042630
5. Alrabeiah M., Hredzak A., Liu Z., Alkhateeb A. ViWi: A deep learning dataset framework for vision-aided wireless communications. *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, 25–28 May 2020, IEEE, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128579
6. Jiang S., Hindy A., Alkhateeb A. Camera aided reconfigurable intelligent surfaces: Computer vision based fast beam selection. *IEEE International Conference on Communications*, Rome, Italy, 28 May–01 June 2023, IEEE, 2023, pp. 2921–2926. doi:10.1109/ICC45041.2023.10279112
7. Ouyang M., Gao F., Wang Y., Zhang S., Li P., Ren J. Computer vision-aided reconfigurable intelligent surface-based beam tracking: Prototyping and experimental results. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, vol. 22, iss. 12, pp. 8681–8693. doi:10.1109/TWC.2023.3264752
8. Pavlov V. A., Belov A. A., Sayanskiy A. D., Vabishchevich D. A. Reconfigurable intelligent surface assisted by computer vision for increasing coverage area in mobile communication systems. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2024, vol. 62, Article 101318. doi:10.1016/j.photonics.2024.101318
9. 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. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2024, т. 18, № 9, с. 28–35. doi:10.36724/2072-8735-2024-18-9-28-35
10. Sayanskiy A., Yafasov R., Pavlov V., Belov A. Application of computer vision to intelligent reflective surface beam steering. *Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, Siena, Italy, 12–17 September 2022, 2022, pp. X-391–X-393. doi:10.1109/Metamaterials54993.2022.9920826
11. Kim S., Ahn Y., Park D., Shim B. VOMTC: Vision objects for millimeter and terahertz communications. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, vol. 11, iss. 1, pp. 243–257. doi:10.1109/TCCN.2024.3435909
12. Liu Y., Wu J., Kim S., Shim B. Vision-aided blockage prediction and proactive handover for indoor mmWave and terahertz communications. *IEEE Global Communications Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 4–8 December 2023, IEEE, 2023, pp. 7411–7416. doi:10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437782
13. Li W., Ma Q., Liu C., Zhang Y., Wu X., Wang J., Gao S., Qiu T., Liu T., Xiao Q., Wei J., Gu T. T., Zhou Z., Li F., Cheng Q., Li L., Tang W., Cui T. J. Intelligent metasurface system for automatic tracking of moving targets and wireless communications based on computer vision. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 989. doi:10.1038/s41467-023-36645-3
14. Wang C. Y., Bochkovskiy A., Liao H. Y. M. Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, July 2, 2021, pp. 13024–13033. doi:10.1109/CVPR46437.2021.01283
15. Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple online and realtime tracking. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, USA, 25–28 September 2016, IEEE, 2016, pp. 3464–3468. doi:10.1109/ICIP.2016.7533003
16. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016, IEEE, 2016, pp. 770–778. doi:10.1109/CVPR.2016.90
17. Ahn Y., Kim J., Kim S., Shim K., Kim J., Kim S. Toward intelligent millimeter and terahertz communication for 6G: Computer vision-aided beamforming. *IEEE Wireless Communications*, 2023, vol. 30, iss. 5, pp. 179–186. doi:10.1109/MWC.007.2200155
18. Semenov S., Pavlov V., Belov A. Application of genetic algorithm to optimize coverage in shadow regions in 5G and 6G millimeter wave communication systems. *26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, 2024, pp. 1–4. doi:10.1109/DSPA60853.2024.10510148
19. Amjoud A. B., Amrouch M. Object detection using deep learning, CNNs and vision transformers: A review. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 35479–35516. doi:10.1109/ACCESS.2023.3266093



20. Khanam R., Hussain M. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. *arXiv*, 2024, <https://arxiv.org/html/2410.17725v1> (дата обращения: 3.03.2025).

21. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки: пер. с англ. под ред. А. И. Синани. 2-е изд. М., Технофера, 2012. 560 с.

UDC 004.932.72

doi:10.31799/1684-8853-2025-3-59-68

EDN: UTJUH

## Clustering of users in cognitive control system of reflective intelligent surface for 5G/6G communication systems

V. A. Pavlov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0003-0726-6613](https://orcid.org/0000-0003-0726-6613), [pavlov\\_va@spbstu.ru](mailto:pavlov_va@spbstu.ru)

A. A. Belov<sup>a</sup>, Leading Engineer, [orcid.org/0000-0003-0617-4514](https://orcid.org/0000-0003-0617-4514)

F. Shariaty<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, Assistant Professor, [orcid.org/0000-0002-7060-8826](https://orcid.org/0000-0002-7060-8826)

<sup>a</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Improving the efficiency of millimeter-wave communication systems is an important task in the field of telecommunications. The use of computer vision assisted systems to improve beam control of reconfigurable intelligent surfaces is of significant interest in the development of 5G/6G millimeter wave systems. **Purpose:** To develop and test the methods that make it possible to accurately determine the position of subscribers and optimize beamforming in millimeter-wave communication systems. **Methods:** We model the coverage areas of a reconfigurable intelligent surface to assess their size and orientation. Approximate formulas are derived for the shape and size of the coverage areas. We use the YOLOv11 convolutional neural network to detect pedestrians, and the DBSCAN clustering method to group nearby users. The quality of communication is assessed using the coverage ratio metric (the ratio of the number of users served by the system to all users). **Results:** We perform a simulation of a millimeter wave communication system. The simulation shows that the coverage area of one beam has the shape of an elongated ellipse, the dimensions of which depend on the position of the intersection point of the maximum radiation of an antenna with the ground surface. Testing on real video materials confirms the effectiveness of the proposed methods. In particular, the use of multibeam mode of operation of a reconfigurable intelligent surface has shown advantages in the case of a large number of users. Quantitative estimates show that the optimal number of beams usually does not exceed four. **Practical relevance:** The research results are of significant practical importance for the development and optimization of millimeter-wave communication systems. The proposed methods make it possible to increase the efficiency of beam control and improve the quality of communication with a large number of subscribers.

**Keywords** — computer vision, reconfigurable intelligent surface, clustering, object detection, 5G/6G communication systems, mobile communications.

**For citation:** Pavlov V. A., Belov A. A., Shariaty F. Clustering of users in cognitive control system of reflective intelligent surface for 5G/6G communication systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 3, pp. 59–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-3-59-68, EDN: UTJUH

## References

- Ahn Y., Kim J., Kim S., Kim S., Shim B. Sensing and computer vision-aided mobility management for 6G millimeter and terahertz communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, vol. 72, iss. 10, pp. 6044–6058. doi:10.1109/TCOMM.2024.3392799
- Loscri V., Rizza C., Benslimane A., Vegni A. M., Innocenti E., Giuliano R. BEST-RIM: A mmWave beam steering approach based on computer vision-enhanced reconfigurable intelligent metasurfaces. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, vol. 72, iss. 6, pp. 7613–7626. doi:10.1109/TVT.2023.3243358
- Loscri V., Vegni A. M., Innocenti E., Giuliano R., Mazzenga F. A joint computer vision and reconfigurable intelligent meta-surface approach for interference reduction in beyond 5G networks. *IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, IEEE, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/HPSR52026.2021.9481794
- Tian Y., Pan G., Alouini M. S. Applying deep-learning-based computer vision to wireless communications: Methodologies, opportunities, and challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 132–143. doi:10.1109/OJCOMS.2020.3042630
- Alrabeiah M., Hredzak A., Liu Z., Alkhateeb A. ViWi: A deep learning dataset framework for vision-aided wireless communications. *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, IEEE, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128579
- Jiang S., Hindy A., Alkhateeb A. Camera aided reconfigurable intelligent surfaces: Computer vision based fast beam selection. *IEEE International Conference on Communications*, IEEE, 2023, pp. 2921–2926. doi:10.1109/ICC45041.2023.10279112
- Ouyang M., Gao F., Wang Y., Zhang S., Li P., Ren J. Computer vision-aided reconfigurable intelligent surface-based beam tracking: Prototyping and experimental results. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, vol. 22, iss. 12, pp. 8681–8693. doi:10.1109/TWC.2023.3264752
- Pavlov V. A., Belov A. A., Sayanskiy A. D., Vabishchevich D. A. Reconfigurable intelligent surface assisted by computer vision for increasing coverage area in mobile communication systems. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2024, vol. 62, Article 101318. doi:10.1016/j.photonics.2024.101318
- Pavlov V. A., Belov A. A., Zavjalov S. V., Sayanskiy A. D., Vabishchevich D. A. Application of computer vision to control reconfigurable intelligent surface to extend coverage area in mobile communication systems. *T-Comm*, 2024, vol. 18, no. 9, pp. 28–35 (In Russian). doi:10.36724/2072-8735-2024-18-9-28-35
- Sayanskiy A., Yafasov R., Pavlov V., Belov A. Application of computer vision to intelligent reflective surface beam steering. *Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, 2022, pp. X-391–X-393. doi:10.1109/Metamaterials54993.2022.9920826
- Kim S., Ahn Y., Park D., Shim B. VOMTC: Vision objects for millimeter and terahertz communications. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, vol. 11, iss. 1, pp. 243–257. doi:10.1109/TCCN.2024.3435909
- Liu Y., Wu J., Kim S., Shim B. Vision-aided blockage prediction and proactive handover for indoor mmWave and terahertz communications. *IEEE Global Communications Conference*, IEEE, 2023, pp. 7411–7416. doi:10.1109/GLOBE-COM54140.2023.10437782

13. Li W., Ma Q., Liu C., Zhang Y., Wu X., Wang J., Gao S., Qiu T., Liu T., Xiao Q., Wei J., Gu T. T., Zhou Z., Li F., Cheng Q., Li L., Tang W., Cui T. J. Intelligent metasurface system for automatic tracking of moving targets and wireless communications based on computer vision. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 989. doi:10.1038/s41467-023-36645-3
14. Wang C. Y., Bochkovskiy A., Liao H. Y. M. Scaled-YOLOv4: Scaling cross stage partial network. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, pp. 13024–13033. doi:10.1109/CVPR46437.2021.01283
15. Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple online and realtime tracking. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, IEEE, 2016, pp. 3464–3468. doi:10.1109/ICIP.2016.7533003
16. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, 2016, pp. 770–778. doi:10.1109/CVPR.2016.90
17. Ahn Y., Kim J., Kim S., Shim K., Kim J., Kim S. Toward intelligent millimeter and terahertz communication for 6G: Computer vision-aided beamforming. *IEEE Wireless Communications*, 2023, vol. 30, iss. 5, pp. 179–186. doi:10.1109/MWC.007.2200155
18. Semenov S., Pavlov V., Belov A. Application of genetic algorithm to optimize coverage in shadow regions in 5G and 6G millimeter wave communication systems. *26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, 2024, pp. 1–4. doi:10.1109/DSPA60853.2024.10510148
19. Amjoud A. B., Amrouch M. Object detection using deep learning, CNNs and vision transformers: A review. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 35479–35516. doi:10.1109/ACCESS.2023.3266093
20. Khanam R., Hussain M. YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv*, 2024. Available at: <https://arxiv.org/html/2410.17725v1> (accessed 3 March 2025).
21. Hansen R. C. *Fazirovannyye antennyye reshetki* [Phased Array Antennas]. 2nd ed. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 560 p. (In Russian).

### Уважаемые авторы!

#### При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Текст рукописи должен быть оригинальным, а цитирование и самоцитирование корректно оформлено.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Простые **формулы** набирайте в Word, сложные с помощью редактора Mathtype или Equation. Для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта в Mathtype никогда не пользуйтесь вкладкой Other, Smaller, Larger, используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в Mathtype полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» — «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Подробнее см. <http://i-us.ru/index.php/ius/author-guide>

#### Иллюстрации:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Adobe Illustrator (\*.ai); Coreldraw (\*.cdr, версия не выше 15); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF); веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подписанных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

#### В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png, \*.jpg с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение;

— экспортное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц, doi;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц, doi;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов» — <http://i-us.ru/index.php/ius/author-guide>.

#### Контакты

Куда: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ  
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)