

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Federal public budgetary scientific establishment «Federal scientific center «Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»; e-mail: haosit13@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Pshenokova Inna Auesovna – Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: pshenokova_inna@mail.ru; Nalchik, Russia; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Intellectual'nyye sredy obitaniya».

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-81-93

С.М. Соколов, А.А. Богуславский, А.Б. Бугеря, М.А. Ильенков

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

С ростом востребованности подвижных робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности существенно возрастает требование их информационной осведомлённости. В обеспечении этой осведомлённости ведущее место занимают системы технического зрения. Для поддержки функционирования группировок, как и каждого, отдельно взятого робота, требуется формирование информационного поля, позволяющего оперативно принимать решения в системах управления как отдельными роботами, так и всей группировкой в целом. Желание возложить на РТК всё большее число самостоятельно решаемых задач требует от СТЗ всё более широкого и детального рассмотрения области функционирования. Распределённые системы наблюдения и контроля пространства являются одним из перспективных направлений решения данной задачи, обеспечивая формирование единого информационного поля на основе кооперативного восприятия, совместной локализации и семантической интерпретации обстановки. В работе рассматривается задача контроля распределённой системой технического зрения заданной области пространства с целью обнаружения в этой области объектов интереса с известным характерным размером. При этом предполагается возможность расположения видеокамер как на наземных, так и на воздушных средствах. Описывается компоновка распределённой системы технического зрения для решения сформулированной задачи. Ядром описываемой системы является унифицированный информационный модуль со всенаправленным регистрирующим блоком. Модуль выступает агентом распределённой СТЗ. Несколько таких модулей распределяются по указанной на карте области пространства с учётом особенностей рельефа и других объектов, располагающихся в этой области. Решается задача выбора оптимального по ряду критериев состава распределённой системы. Предлагается методика планирования расположения агентов с заданными характеристиками регистрирующих блоков по заданной 3D-карте местности для обеспечения обнаружения объектов интереса с известными характерными размерами. Приводится алгоритм расчёта мест расположения СТЗ с фиксированными полями зрения для контроля заданного участка пересечённой местности на предмет выявления статичных объектов с известными характерными размерами и отличием от окружающего фона по отражающей способности либо перемещающихся объектов.

Автономность роботов; информационное обеспечение; система технического зрения; унификация решений в области автономии.

S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky, A.B. Bugerya, M.A. Ilienkov

METHOD OF SPACE CONTROL BY A DISTRIBUTED VISION SYSTEM

With the growing demand for mobile robotic complexes with an increased degree of autonomy, the demand for their information awareness increases significantly. Vision systems play a leading role in ensuring this awareness. To support the functioning of groups, as well as each individual robot, it is necessary to form an information field that allows for prompt decision-making in the control systems of both individual robots and the entire group as a whole. The desire to assign an increasing number of independently solved tasks to the robotic complexes requires an increasingly broad and detailed consideration of the field of operation from the VS. Distributed space surveillance and control systems are one of the promising areas for solving this problem, ensuring the formation of a unified information field based on cooperative perception,

joint localization and semantic interpretation of the situation. The paper considers the problem of monitoring a given area of space by a distributed vision system in order to detect objects of interest with a known characteristic size in this area. At the same time, it is assumed that video cameras can be located on both ground and air vehicles. The layout of a distributed vision system for solving the formulated problem is described. The core of the described system is a unified information module with an omnidirectional recording unit. The module acts as an agent of the distributed VS. Several such modules are distributed over the area of space indicated on the map, taking into account the terrain features and other objects located in this area. The problem of choosing the optimal composition of a distributed system according to a number of criteria is solved. A methodology is proposed for planning the location of agents with specified characteristics of recording units on a given 3D terrain map to ensure the detection of objects of interest with known characteristic dimensions. An algorithm is given for calculating the locations of VS with fixed fields of view for monitoring a given area of rough terrain in order to identify static objects with known characteristic dimensions and differences from the surrounding background in reflectivity or moving objects.

Robot autonomy; information support; vision system; unification of autonomy robotics solutions.

Введение. С ростом востребованности подвижных робототехнических комплексов (РТК) с повышенной степенью автономности (ПСА) существенно возрастает требование их информационной осведомлённости. В этой осведомлённости ведущее место занимают системы технического зрения (СТЗ). СТЗ – глаза роботов, обеспечивающие формирование описания окружающей среды на основе зрительных данных. Ещё одной тенденцией в использовании РТК является их групповое применение, причём в этих группах объединяются разнородные и разнотипные РТК (воздушные, наземные, различных классов и назначения). Для обеспечения функционирования таких группировок, как и каждого отдельно взятого робота, требуется формирование единого информационного поля, позволяющего оперативно принимать решения в системах управления как отдельными роботами, так и всей группировкой в целом.

Современные исследования в области кооперативного восприятия показывают, что информационное поле может формироваться на различных уровнях совмещения данных: от обмена «необработанными» сенсорными измерениями до передачи признаков, объектов и семантических описаний сцены. В работе Bai и др. [1] предложена иерархическая модель кооперативного восприятия для гетерогенных систем, в которой рассматриваются архитектуры объединения данных от различных сенсорных узлов. Экспериментальные исследования и специализированные наборы данных (например, TUMTraF V2X [2]) демонстрируют, что кооперативное объединение наблюдений существенно повышает полноту обнаружения объектов и устойчивость к перекрытиям образов объектов по сравнению с одиночными платформами.

Фундаментом построения общего информационного пространства для группы РТК выступают методы совместной локализации и картирования (Collaborative SLAM). В децентрализованных решениях, таких как DVM-SLAM [3], показана возможность построения согласованной карты среды и совместной локализации агентов без централизованного управляющего узла, что особенно важно при ограничениях по пропускной способности каналов связи и при динамическом составе группы. В работах, ориентированных на кооперацию воздушных и наземных платформ, демонстрируется, что объединение данных от разнородных РТК (беспилотный летательный аппарат (БЛА) – наземный робототехнический комплекс (НРТК)) позволяет повысить точность глобальной привязки и обеспечить более полное покрытие наблюдаемой области [4, 14].

Однако геометрическое описание среды (карта и положение объектов) является лишь одним из уровней информационного поля. Для поддержки принятия решений требуется семантическая интерпретация наблюдаемой обстановки. Подходы к формированию семантической ситуационной осведомлённости, рассмотренные в [5], предполагают интеграцию результатов детекции, распознавания и прослеживания объектов в единое представление, пригодное для использования в системах управления. Дополнительные аспекты обработки видеопотоков от нескольких мобильных платформ и организации коллективного анализа обстановки рассматриваются в [6], где подчёркивается важность согласованности представлений и минимизации ложных интерпретаций.

Особую актуальность в разнородных группах РТК приобретает объединение данных, полученных с различных ракурсов наблюдения. В обзоре [7] показано, что совмещение «собственного» взгляда НРТК и «внешнего» наблюдения (например, с БЛА) по-

звolyет существенно расширить зону контролируемого пространства и повысить достоверность распознавания объектов и событий. Для групп НРТК это означает возможность формирования более целостного и устойчивого информационного поля.

В более широком контексте автономных и многоагентных систем [3, 8] информационная осведомлённость рассматривается как результат интеграции модулей восприятия, планирования и кооперации. При этом распределённые системы наблюдения/контроля пространства выделяются как одно из ключевых направлений повышения автономности. Накопленные исследования по кооперативным системам SLAM [9, 10] подтверждают, что распределённая обработка визуальной информации и совместное исследование пространства позволяют повысить масштабируемость и отказоустойчивость групп РТК.

Желание возложить на РТК всё большее число самостоятельно решаемых задач требует от СТЗ всё более широкого и детального рассмотрения области функционирования. Распределённые системы наблюдения и контроля пространства являются одним из перспективных направлений решения данной задачи, обеспечивая формирование единого информационного поля на основе кооперативного восприятия, совместной локализации и семантической интерпретации обстановки.

В работе рассматривается задача контроля распределённой системой технического зрения заданной области пространства с целью обнаружения в этой области объектов интереса, имеющих известный характерный размер. При этом предполагается возможность расположения видеокамер как на наземных, так и на воздушных средствах. Пример формулировки подобной задачи, который рассматривается в работе, следующий. В заданной 2D картой и картой высот области пространства расположить необходимое число агентов со всенаправленными регистрирующими блоками с заданными характеристиками по разрешению с целью обнаружения в этой области объектов, имеющих заданный характерный размер.

Приводится компоновка распределённой системы технического зрения (РСТЗ) для решения сформулированной задачи. Ядром описываемой системы является унифицированный информационный модуль со всенаправленным регистрирующим блоком. Модуль выступает агентом распределённой СТЗ. Кроме того, предлагается методика планирования расположения агентов с заданными характеристиками регистрирующих блоков по заданной 3D-карте местности для обеспечения обнаружения объектов интереса с известными характерными размерами. Описывается алгоритм расчёта мест расположения СТЗ с фиксированными полями зрения для контроля заданного участка пересечённой местности на предмет выявления статичных объектов с известными характерными размерами и отличием от окружающего фона по отражающей способности либо перемещающихся объектов.

Агент распределённой системы. Ядром описываемой системы является унифицированный информационный модуль со всенаправленным регистрирующим блоком. Аппаратную часть модуля образует набор из видеокамер с различными оптическими системами с частично перекрывающимися полями зрения, что обеспечивает сбор зрительных данных в области пространства вокруг места расположения регистрирующего блока с параметрами 360° вокруг вертикальной оси и 120° вокруг горизонтальной оси (рис. 1).

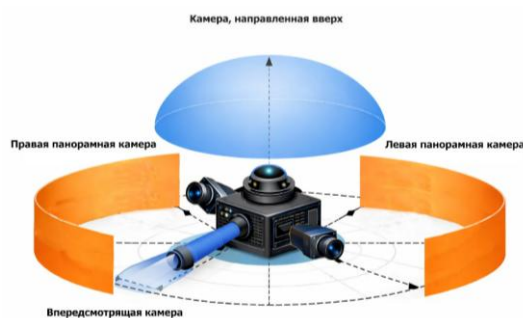


Рис. 1. Схема поля зрения всенаправленного регистрирующего блока

Все видеокамеры по каналам Ethernet подключаются к вычислительно-управляющему блоку (ВУБ), реализующему сбор и обработку зрительных данных и выдающему управляющие сигналы на исполнительные механизмы поворотного устройства, на котором устанавливается агент (рис. 2).

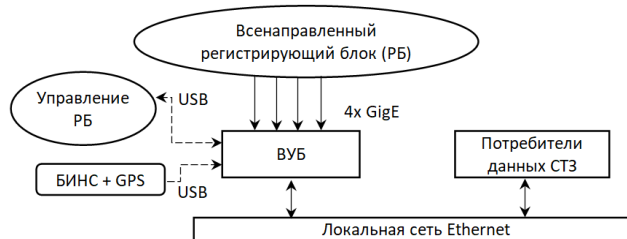


Рис. 2. Схема общей компоновки аппаратной части РСТЗ

Программная часть построена на основе программного каркаса СТЗ РВ [11] и позволяет оперативно маневрировать, как аппаратным составом, так и алгоритмическим наполнением (от простого обнаружения до распознавания и управления воздействием на объект интереса) каждого агента. На рис. 3 показан экран оператора при постановке задачи одному из агентов РСТЗ.

Открытая архитектура программного обеспечения унифицированного информационного модуля [12] позволяет оперативно изменять аппаратный состав модуля (агента) в РСТЗ.

Особенностью предложенных решений является возможность их компоновки доступными средствами аппаратной поддержки и доверенным программным обеспечением. Это обеспечивается следующими приемами:

1) Использование общедоступных аппаратных компонент.

В состав агента входят стандартные IP-видеокамеры с интерфейсом Ethernet и типовые вычислительные платформы компактного исполнения на базе Intel-совместимых процессоров общего назначения. Отсутствие специализированных или уникальных аппаратных решений снижает стоимость системы, упрощает её масштабирование и техническое обслуживание, а также обеспечивает возможность быстрого восстановления работоспособности за счёт замены компонентов из доступной номенклатуры.

2) Модульный принцип построения.

Унифицированный информационный модуль реализован по блочно-модульной архитектуре, что позволяет варьировать состав регистрирующих блоков (тип камер, разрешение, оптические характеристики) без изменения общей логики функционирования системы. Аппаратная и программная части связаны через стандартизированные интерфейсы, обеспечивающие совместимость и расширяемость.

3) Применение стандартных сетевых протоколов.

Передача видеоданных и управляющих сигналов осуществляется по широко распространённым протоколам Ethernet/TCP-IP, USB и CAN, что исключает необходимость в специализированных каналах связи и обеспечивает интеграцию с существующей сетевой инфраструктурой в составе операционных систем общего назначения. Это повышает надёжность, снижает требования к внедрению и облегчает эксплуатацию распределённой системы.

4) Ориентация на доверенное программное обеспечение.

Программная часть построена на базе проверенного авторского программного каркаса СТЗ РВ и может функционировать под управлением сертифицированных операционных систем и библиотек обработки изображений. Использование открытых и документированных интерфейсов обеспечивает прозрачность алгоритмов и контролируемость процессов обработки данных.

5) Масштабируемость и унификация решений.

Архитектура агента допускает тиражирование без изменения базовых принципов построения. Каждый модуль может быть добавлен в распределённую систему с предусмотренной перенастройкой программного каркаса, что подтверждает возможность формирования системы требуемой конфигурации на основе унифицированных компонентов.

6) Гибкость алгоритмического наполнения.

Благодаря разделению уровней сбора данных, их предварительной обработки и принятия решений обеспечивается возможность постепенного усложнения функционала – от задач детектирования до распознавания и управления воздействием.

В совокупности указанные характеристики подтверждают, что предложенные решения обладают не только функциональной завершенностью, но и практической реализуемостью, обеспечивая компоновку распределённой системы технического зрения на основе доступной элементной базы и доверенной программной среды.

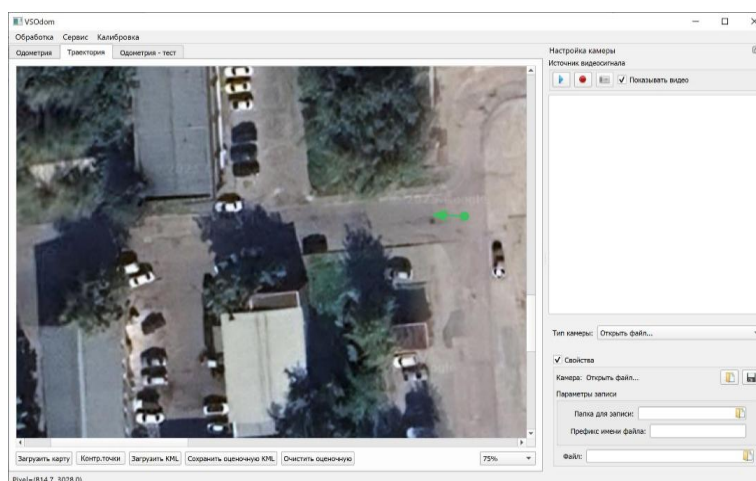


Рис. 3. Экран оператора при постановке задачи агенту РСТЗ

Режимы работы агента. В настоящее время предусмотрены три режима работы агентов РСТЗ: автоматический (автономный), полуавтоматический и режим настройки. В автоматическом режиме агент, заняв отведённое положение переходит в режим обнаружения объекта интереса (ОИ), параметры которого (предпочтительные признаки) заранее введены на борт (в режиме настройки). Если ОИ обнаружен, то агент помещает образ ОИ в центр главного поля зрения и управляя положением поворотного устройства, реализует слежение за этим образом. В полуавтоматическом режиме выполняются те же действия, что и в автоматическом, но после обнаружения ОИ и наведения на него главного поля зрения с помощью трансфокатора выполняется увеличение детальности рассмотрения ОИ и это изображение передаётся оператору. В этой же части может быть произведено автоматическое распознавание ОИ, но алгоритмы распознавания требуют большей вычислительной мощности. Режим настройки позволяет изменять параметры алгоритмов обнаружения и распознавания объектов интереса.

Пульт управления РСТЗ. РСТЗ кроме нескольких описанных агентов включает в свой состав пульт управления с помощью которого реализуется контроль за работой системы. На этом же пульте выполняется расчёт распределения агентов в заданной области пространства и выдача заданий каждому из них.

Аппаратная часть пульта РСТЗ состоит из носимого системного блока и усиливающих блоков-антенн Wi-Fi связи.

Программная часть по выданному заданию (известной 3D карты местности и требований к характерным размерам обнаруживаемых объектов) реализует расчёт мест расположения агентов РСТЗ, выдачу заданий каждому из агентов и контроль за их работой.

В начальной позиции пульт управления и агенты могут располагаться в одной стартовой позиции с расстояниями между участниками порядка нескольких метров. При таком расположении достаточно встроенных антенн для Wi-Fi связи. При включении дополнительных антенн-усилителей в начальной позиции пульт и агенты могут быть удалены друг от друга на расстояния до нескольких сотен метров.

Алгоритм функционирования всей системы следующий.

Включается пульт управления РСТЗ, агенты и подвижные платформы, на которых они установлены. Каждый агент начинает свою работу с информирования центрального пульта о своей готовности принять задание. Система регистрирует количество работоспособных агентов и их характеристики (по дальности обнаружения объектов интереса).

В пульт управления РСТЗ вводится задание на контроль заданной области пространства, производится расчёт/планирование мест расположения агентов.

После расчёта мест расположения агентов реализуется выдвижение (если агент установлен на подвижном основании) или расположение агента в заданном месте и включение заданного режима работы.

На описываемом этапе работ рассматривается такой сценарий использования системы. На вход системы подаётся карта и/или изображение (вид сверху) интересующей области пространства (например, области в которой производится разминирование, и которую надо охранять от проникновения посторонних объектов). Выполняется расчёт расположения агентов и выдаётся задание каждому из них в режиме супервизорного управления оператор – РСТЗ.

Планирование расположения агентов. Для формирования общего информационного пространства группы мобильных средств в целях контроля (обнаружения/слежения) за объектами интереса внутри заданной области пространства в первую очередь необходимо обеспечить полное покрытие полями зрения заданной местности либо набором неподвижных камер, либо мобильными платформами, которые будут следовать по маршруту, с указанными местами расположения камер. Этой цели служит алгоритм для определения оптимального расположения регистрирующих блоков для полного покрытия местности. Под полным покрытием подразумевается обнаружение (и распознавание) объекта интереса заданного размера (в любой момент времени) хотя бы одной камерой.

В стационарном режиме с учетом известной 3D карты местности и требований к характерным размерам обнаруживаемых объектов интереса выполняется расчёт мест расположения наблюдателей. Целью расчета является определение такого расположения агентов, при котором объект интереса заданного размера, расположенный в пределах рассматриваемого участка пересеченной местности, будет наблюдаться хотя бы одним из наблюдателей распределенной системы.

Карта области функционирования системы задаётся в формате карты высот - растрового изображения, яркость пикселей которого определяет высоту точек поверхности [13]. Пример карты высот, которой задается местность, приведен на рис. 4.

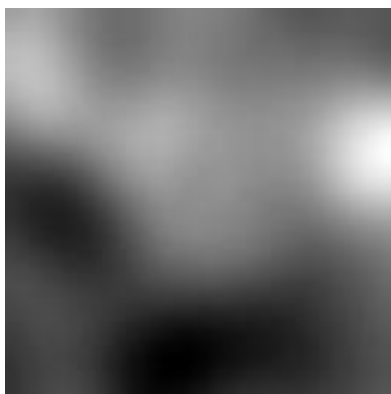


Рис. 4. Пример карты высот

По заданной карте высот строится 3D карта заданной области пространства, на котором будут располагаться агенты (рис. 5).

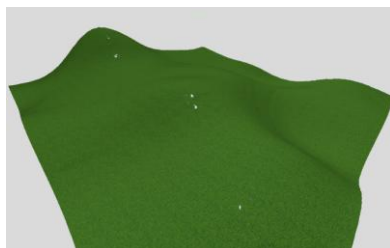


Рис. 5. Пример 3D карты заданной области пространства для расположения агентов

Для определения мест установки агентов необходимо провести анализ области наблюдения (видимости) каждого регистрирующего блока распределенной СТЗ. Анализ области наблюдения (видимости) местности агентом проводится в два этапа: проверка нахождения точки внутри геометрической зоны видимости камеры и проверка ограничения/загораживания видимости объектами рельефа (по карте местности).

Проверка нахождения точки внутри геометрической зоны наблюдения агента выполняется по известным характеристикам его регистрирующего блока. Здесь же определяется максимальная дальность для обнаружения объекта интереса заданного размера. Пример отображения области видимости видеокамеры, установленной на треноге, представлен на рис. 6.

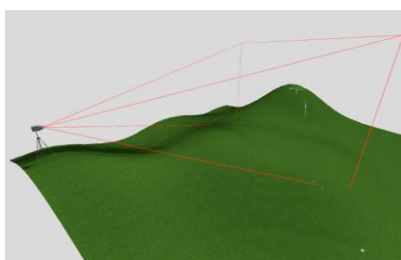


Рис. 6. Пример регистрирующего блока в виде одной видеокамеры на треноге с отображенной пирамидой поля зрения

Объект наблюдается камерой, если расстояние до него не превышает рассчитанную максимальную требуемую дальность обнаружения и вектор наблюдения между камерой и точкой на объекте находится в пределах поля зрения камеры.

Даже если объект находится внутри зоны видимости, видеокамера может не регистрировать его из-за ограничения рельефом местности (рис. 7).

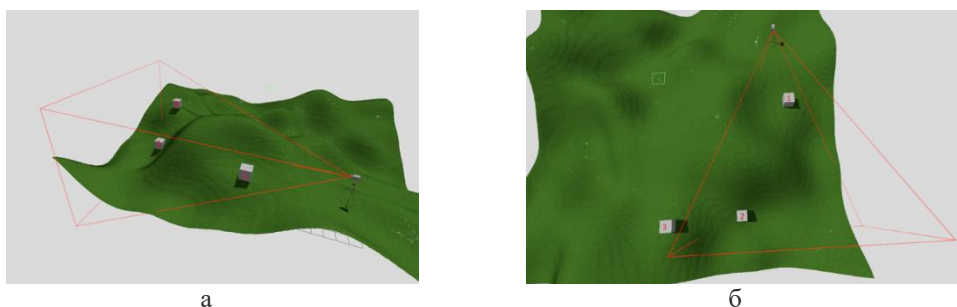


Рис. 7. Пример расположения объектов интереса на карте местности: а – вид сбоку; б – вид сверху. Куб 1 наблюдается с помощью установленной камеры, кубы 2 и 3 – нет: куб 2 находится за холмом, а куб 3 находится вне поля зрения камеры

Решить проблему отсутствия видимости куба 2 и 3 можно (рис. 7), расположив еще одного агента с другой стороны холма. Пример расстановки представлен на рис. 8.

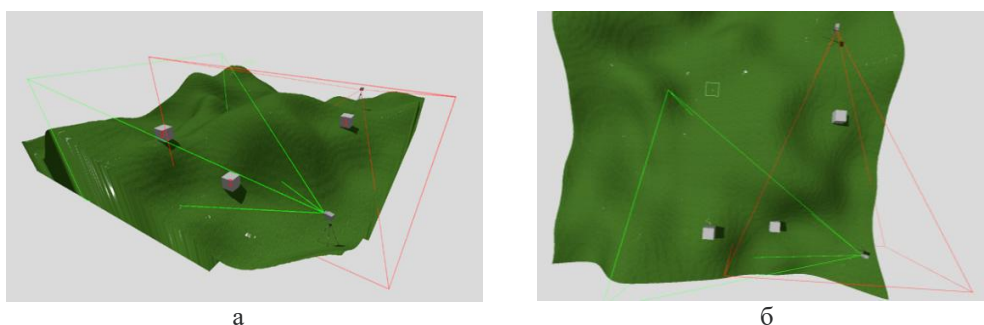


Рис. 8. Устранение «мёртвой» зоны за счет размещения дополнительного агента:
а – вид с боку; б – вид с верху

Видимость может быть ограничена за счет других объектов, находящихся на местности, например, деревьями и кустами. Пример карты местности с расположенными на ней агентом, объектом интереса и лесом представлен на рис. 9.

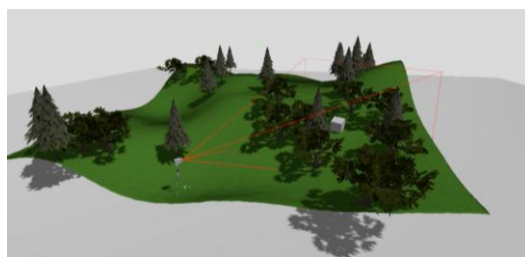


Рис. 9. Пример ограничения поля зрения регистрирующего блока посторонними объектами

Ограничение, возникшее в связи с наличием деревьев на оси визирования, преодолевается с помощью установки дополнительного агента. Место расположения дополнительного агента по известным координатам объектов-затенителей определяется итеративно путем перебора всех возможных вариантов установки наблюдателя. Для получения набора точек-кандидатов карта местности делится на прямоугольную сетку с заданным шагом (дискретизация пространства). Каждая точка этой сетки, в которой не располагаются другие объекты и в которую возможно установить агента (устойчивая поверхность, нет резких перепадов высот) является кандидатом для установки наблюдателя. Шаг определяется в соответствии с требованиями по точности работы системы и по возможностям вычислителя: чем больше шаг, тем ниже точность и тем ниже требования к производительности вычислителя. Для каждой точки-кандидата рассчитывается площадь мертвой зоны, которая будет покрыта за счет дополнительного агента, расположенного в этой точке. Дополнительный агент будет установлен таким образом, чтобы эта площадь была максимальной.

В зависимости от загрузки местности посторонними объектами и сложности рельефа состав системы может изменяться, к примеру, для решения некоторых задач целесообразно (если возможно) использование воздушных средств в дополнение к наземным [14].

Алгоритм определения оптимального расположения агентов. Для определения оптимального положения агентов, необходимо учитывать параметры регистрирующих блоков (РБ), а именно угловое поле зрения, дальность эффективного наблюдения, которая определяется из известных параметров камеры и критерия распознавания объекта интереса. Также необходимо учитывать загораживающие объекты – препятствия, кото-

рые могут располагаться на местности: здания, деревья и другие объекты, которые ограничивают поле зрения камер, в том числе, холмы и впадины, за которыми может находиться объект интереса. Также необходимо учитывать наличие запретных зон для размещения камер: поверхность воды или области с резким перепадом высот.

Задача расстановки наблюдателей на холмистой местности относится к классу NP-трудных [15]. Существует общий подход к ее решению. Согласно этому подходу, необходимо провести анализ и выбор оптимальных точек размещения агентов на основе требуемых критериев. В работе [16] в качестве критериев выбраны критерий максимума покрытия местности (Maximal covering location problem – MCLP) и критерий максимизации резервного покрытия (Backup coverage location problem – BCLP) для обеспечения непрерывного наблюдения в случае ограничения видимости основной камеры для заданной части местности. В алгоритме, представленном Аджай Кошик и соавторами [17]: для уменьшения влияния случайно перемещающихся посторонних объектов на видимость системы оптимизация установки агентов проводится по критерию увеличения количества важных областей (заранее заданные зоны интереса в пространстве наблюдения: входы в здания, тротуары и другие места, на которых происходит много активностей) местности сразу тремя камерами. В работе [18] рассматривается другой критерий/аспект – стоимость сети. Оптимизация проводится выборкой набора камер с минимальной суммарной стоимостью из множества, состоящего из 200 различных моделей, с сохранением покрытия местности на уровне не ниже, чем 80%. В методе, предложенном в [19], в качестве критерия выбрана минимизация количества агентов.

В нашей работе используется алгоритм, в котором в качестве основных критериев выступают MCLP и BCLP (в модернизированном и ранжированном виде), а также в качестве дополнительного средства отбора решений используется критерий минимизации стоимости сети. На данном этапе работы была реализована первая версия алгоритма, которая работает с 2D картой (снимок со спутника) местности и картой высот и учитывает наличие объектов-затенителей и запретных зон для размещения агентов (поверхность воды, резкие перепады высот), которые заранее известны и отмечены на схеме. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 10.

На 2D карте местности, которая подается на вход алгоритма, выделяются объекты сцены: область интереса, здания, зона допустимой установки камер. После этого происходит дискретизация зоны наблюдения и разрешенной зоны установки камер. Разрешенной зоной установки является часть области интереса, исключаящая запрещенные зоны и места расположения объектов-затенителей и зданий. Полученная сетка точек в зоне наблюдения используется для оценки покрытия камерами. Далее происходит генерация кандидатов на размещение камер. Кандидат задается комбинацией параметров: координатой точки установки камеры, которая выбирается из сетки точек разрешенной зоны, и направления наблюдения, которое определяется ориентацией камеры. Определение мест расстановки камер происходит итеративно. Первичная расстановка агентов проводится с помощью жадного алгоритма максимального заполнения рассматриваемой области. На каждом шаге выбирается свободная и доступная для размещения точка, которая дает максимальный прирост покрытия местности (аналог MCLP). После первичного жадного выбора мест установки наблюдателей происходит оптимизация по критерию BCLP за счет перестановок агентов с сохранением полученного уровня покрытия. После оптимизация проверяется соответствие критериям: если выполняются, то на выходе алгоритма получается множество точек для установки камер; если нет – происходит генерация нового размещения камер за счет удаления или перемещения малоэффективных камер (с низким покрытием или с перекрытием с более, чем 1 камерой) в недостаточно покрытые места [16, 18]. По полученному множеству точек для каждого агента системы указывается сектор ответственности в окружающем пространстве. Если агенты расположены на подвижных платформах, то, при необходимости, возможно, как оперативное изменение зон ответственности, так и изменение расположения агентов. Смена места расположения наблюдателей является очень полезной особенно в случаях выхода из строя одного из агентов. Архитектура многоагентных систем позволяет компенсировать отказы за счет других наблюдателей [20]. В таких ситуациях возможно провести повторную оптимизацию и выбор новых точек размещения агентов с целью минимизации непокрытых мертвых зон.

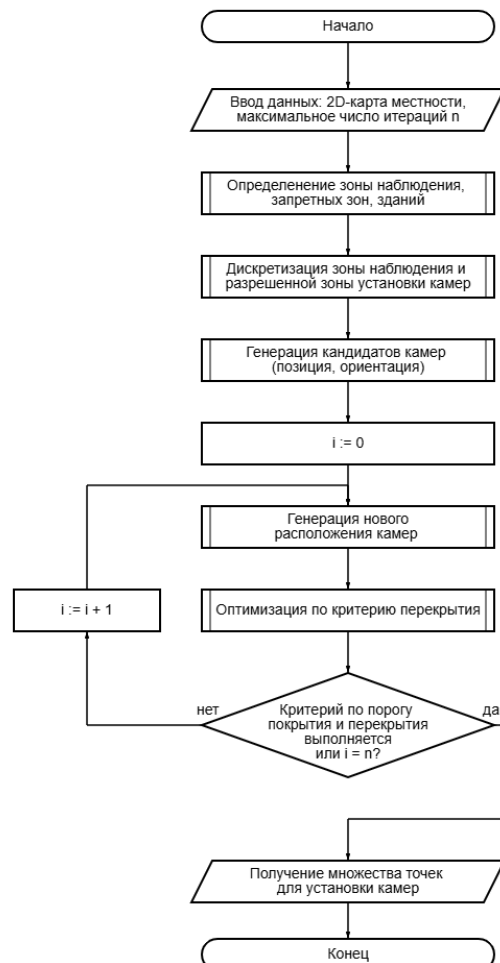


Рис. 10. Блок-схема алгоритма получения точек установки камер

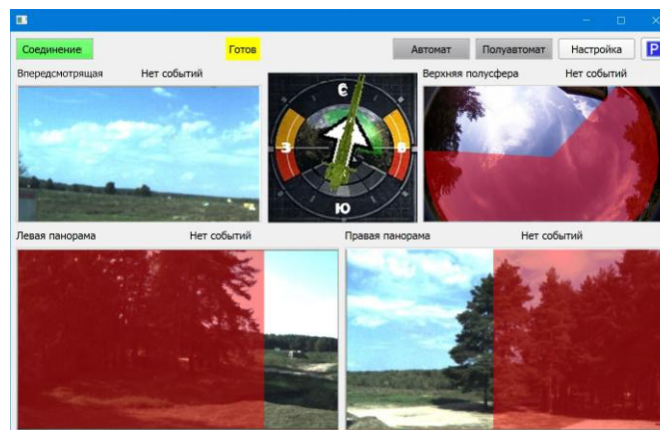


Рис. 11. Пример указания сектора ответственности в полях зрения всенаправленного РБ

Оснащение агентов всенаправленными регистрирующими блоками позволяет ещё больше повысить надёжность контроля заданной области пространства и избежать дополнительных перемещений агентов РСТЗ. При изменении зон ответственности, предпо-

лагающих изменение угла обзора (сектора ответственности), у агентов с всенаправленным РБ такое изменение реализуется в программной части, указанием сектора сбора и обработки зрительных данных (см. рис. 11).

За счет оптимального расположения агентов на местности обеспечивается совместный сбор визуальной информации в целях построения общей информационной среды, благодаря которой распределенная СТЗ сможет эффективно принимать решения даже в динамически изменяющихся условиях.

Описанная распределенная система технического зрения контроля пространства позволяет решать большой круг задач информационного обеспечения отдельных РТК и их группировок. Возможными сферами применения подобных систем являются: информационное обеспечение средств противодействия беспилотным летательным аппаратам, охрана объектов, поиск объектов и людей, экологический мониторинг.

Заключение. В статье описан пример распределенной системы технического зрения контроля пространства, предназначенной для информационного обеспечения РТК с повышенной степенью автономности. Ключевым звеном системы является агент – унифицированный информационный модуль, оперативно перестраиваемый на различные задачи, решаемые в масштабе реального времени (до 15-20 раз в секунду).

На описанном этапе исследований значительная часть подготовительных операций к выбору мест расположения агентов распределенной СТЗ выполняется в ручном режиме (подготовка картографической информации, выдача заданий и реализация перемещений подвижных платформ с агентами, взаимодействие с оборудованием для воздействия на обнаруженные/распознанные объекты интереса. Эти работы активно автоматизируются. Все ключевые компоненты уже опробованы, стоит задача комплексирования всех средств автоматизации и проведение экспериментов с подвижными платформами с повышенной степенью автономности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bai Z., Wu G., Barth M. J., Liu Y., Sisbot E. A., Oguchi K., Huang Z. A Survey and Framework of Cooperative Perception: From Heterogeneous Singleton to Hierarchical Cooperation // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 11. – P. 15191-15209. – DOI: 10.1109/TITS.2024.3436012.
2. Zimmer W., Wardana G.A., Sritharan S., Zhou X., Song R., Knoll A.C. TUMTraf V2X Cooperative Perception Dataset // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2024. – P. 22668-22677. – URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Zimmer_TUMTraf_V2X_Cooperative_Perception_Dataset_CVPR_2024_paper.html (дата обращения: 04.02.2026).
3. Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration // Biomimetic Intelligence and Robotics. – 2025. – Vol. 5. – Article 100203. – DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203.
4. Liu P., Bi Y., Wang C., Jiang X. A Distributed Multi-Robot Collaborative SLAM Method Based on Air-Ground Cross-Domain Cooperation // Drones. – 2025. – Vol. 9, No. 7. – Article 504. – DOI: 10.3390/drones9070504.
5. Ruan T., et al. A framework for semantics-based situational awareness during mobile robot deployments // Frontiers in Robotics and AI. – 2025. – Vol. 12. – Article 1694123. – DOI: 10.3389/frobt.2025.1694123.
6. Zhou P., et al. Designing Multi-Robot Ground Video Sensemaking with Public Safety Professionals. – 2026. – arXiv:2602.08882. – DOI: 10.48550/arXiv.2602.08882. – URL: <https://arxiv.org/abs/2602.08882> (дата обращения: 04.02.2026).
7. He Y., Huang Y., Chen G., Lu L., Pei B., Xu J., Lu T., Sato Y. Bridging Perspectives: A Survey on Cross-view Collaborative Intelligence with Egocentric-Exocentric Vision // International Journal of Computer Vision. – 2026. – Vol. 134. – DOI: 10.1007/s11263-025-02608-y.
8. Zhang S., Li Z., Xu S., Yin Y. A Survey on Multi-Robot Collaboration Systems: Architectures, Performances, and Applications: TechRxiv. – 2025. – DOI: 10.36227/techrxiv.176045766.60277537/v1. – URL: https://www.techrxiv.org/users/968140/articles/1339550/master/file/data/Multi_Robot_Systems_Survey_2025/Multi_Robot_Systems_Survey_2025.pdf (дата обращения: 04.02.2026).
9. Epsilon8854. awesome-Collaborative-SLAM (GitHub repository). – URL: <https://github.com/Epsilon8854/awesome-Collaborative-SLAM> (дата обращения: 04.02.2026).
10. Li D. Active-SLAM: awesome-Active-SLAM (GitHub repository). – URL: <https://github.com/DoongLi/awesome-Active-SLAM> (дата обращения: 02.03.2026).
11. Богуславский А.А., Соколов С.М. Технология изготовления программного обеспечения СТЗ автономных РТК // Тр. 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 23-24 ноября 2023. – СПб.: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 27-35.

12. Соколов С.М., Богуславский А.А. Ключевая роль программного обеспечения в создании РТК с повышенной степенью автономности и требования к нему // Сб. трудов конференции в рамках Международного военно-технического форума «Армия-2022», 16-21 августа 2022 г., г. Кубинка.
13. Dübel S., Schumann H. Visualization of features in 3D terrain // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2017. – Vol. 6, No. 11. – Art. 357.
14. Носков В.П., Гойдин О.П., Вазаев А.В. Совместная видеонавигация роботов воздушного и наземного применения // XVIII Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2025): Матер. мультikonференции (Тула, 15 сентября – 20 сентября 2025 г.): в 4 т. Т. 1. Робототехника и мехатроника (РиМ-2025). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 238-241.
15. Galatola M., Salza D., Rossi C. Risk-Aware Optimal Camera Placement for Forest Fire Detection and Monitoring // Optimization, Learning Algorithms and Applications: Proceedings of the 5th International Conference, OL2A 2025, Sesti Levante, Italy, April 28-30, 2025. Part I. – Cham: Springer, 2026. – P. 127-143.
16. Murray A.T., et al. Coverage optimization to support security monitoring // Computers, Environment and Urban Systems. – 2007. – No. 31. – P. 133-147.
17. Kaushik A., Indu S., Gupta D. A Grey Wolf Optimization Based Algorithm for Optimum Camera Placement // Wireless Personal Communications. – 2019. – Vol. 105. – P. 1143-1167.
18. Wang X., Zhang H., Gu H. Solving optimal camera placement problems in IoT using LH-RPSO // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 40881-40891.
19. Старцев Д.Ю., Логинов И.В., Родительский О.А. Численный метод расчета оптимального размещения датчиков на местности при ограничении пропускной способности // Экономика. Информатика. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 633-644.
20. Li X., Lin Y., Du Z., Lin M., Wu C. Intelligent multi-robot collaborative transport system // Urban Life-line. – 2024. – Vol. 2, No. 1. – Article 16.

REFERENCES

1. Bai Z., Wu G., Barth M. J., Liu Y., Sisbot E. A., Oguchi K., Huang Z. A Survey and Framework of Cooperative Perception: From Heterogeneous Singleton to Hierarchical Cooperation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, Vol. 25, No. 11, pp. 15191-15209. DOI: 10.1109/TITS.2024.3436012.
2. Zimmer W., Wardana G.A., Sritharan S., Zhou X., Song R., Knoll A.C. TUMTraF V2X Cooperative Perception Dataset, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2024, pp. 22668-22677. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Zimmer_TUMTraF_V2X_Cooperative_Perception_Dataset_CVPR_2024_paper.html (accessed 04 February 2026).
3. Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2025, Vol. 5, Article 100203. DOI: 10.1016/j.birob.2024.100203.
4. Liu P., Bi Y., Wang C., Jiang X. A Distributed Multi-Robot Collaborative SLAM Method Based on Air-Ground Cross-Domain Cooperation, *Drones*, 2025, Vol. 9, No. 7, Article 504. DOI: 10.3390/drones9070504.
5. Ruan T., et al. A framework for semantics-based situational awareness during mobile robot deployments, *Frontiers in Robotics and AI*, 2025, Vol. 12, Article 1694123. DOI: 10.3389/frobt.2025.1694123.
6. Zhou P., et al. Designing Multi-Robot Ground Video Sensemaking with Public Safety Professionals, 2026. arXiv:2602.08882. DOI: 10.48550/arXiv.2602.08882. Available at: <https://arxiv.org/abs/2602.08882> (accessed 04 February 2026).
7. He Y., Huang Y., Chen G., Lu L., Pei B., Xu J., Lu T., Sato Y. Bridging Perspectives: A Survey on Cross-view Collaborative Intelligence with Egocentric-Exocentric Vision, *International Journal of Computer Vision*, 2026, Vol. 134. DOI: 10.1007/s11263-025-02608-y.
8. Zhang S., Li Z., Xu S., Yin Y. A Survey on Multi-Robot Collaboration Systems: Architectures, Performances, and Applications: TechRxiv, 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.176045766.60277537/v1. Available at: https://www.techrxiv.org/users/968140/articles/1339550/master/file/data/Multi_Robot_Systems_Survey_2025/Multi_Robot_Systems_Survey_2025.pdf (accessed 04 February 2026).
9. Epsilon8854. awesome-Collaborative-SLAM (GitHub repository). Available at: <https://github.com/Epsilon8854/awesome-Collaborative-SLAM> (дата обращения: 04.02.2026).
10. Li D. Active-SLAM: awesome-Active-SLAM (GitHub repository). Available at: <https://github.com/DoongLi/awesome-Active-SLAM> (accessed 02 March 2026).
11. Boguslavskiy A.A., Sokolov S.M. Tekhnologiya izgotovleniya programmnogo obespecheniya STZ avtonomnykh RTK [Technology of software development for vision systems of autonomous robotic systems], *Tr. 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 23-24 noyabrya 2023* [Proceedings of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", November 23-24, 2023]. Saint Petersburg: TSNII RTK, 2023, pp. 27-35.

12. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A. Klyuchevaya rol' programmnoy obespecheniya v sozdaniy RTK s povyshennoy stepen'yu avtonomnosti i trebovaniya k nemu [The Key Role of Software in the Development of Robotic Systems with a High Degree of Autonomy and the Requirements for It], *Sb. trudov konferentsii v ramkakh Mezhdunarodnogo voenno-tekhnicheskogo foruma «Armiya-2022»*, 16-21 avgusta 2022 g. g. Kubinka [Proceedings of the Conference within the International Military-Technical Forum "Army-2022", August 16-21, 2022, Kubinka].
13. Dübel S., Schumann H. Visualization of features in 3D terrain, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, Vol. 6, No. 11, Art. 357.
14. Noskov V.P., Goydin O.P., Vazaev A.V. Sovmestnaya videonavigatsiya robotov vozduhnogo i na-zemnogo primeneniya [Cooperative video navigation of aerial and ground robots] *XVIII Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2025): Mater. mul'tikonferentsii (Tula, 15 sentyabrya – 20 sentyabrya 2025 g.): v 4 t. T. 1 Robototekhnika i mekhatronika (RiM-2025)* [XVIII All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU-2025): Conference Proceedings (Tula, September 15–20, 2025): in 4 vols. Vol. 1. Robotics and Mechatronics (RiM-2025)]. Tula: Izd-vo TulGU, 2025, pp. 238-241.
15. Galatola M., Salza D., Rossi C. Risk-Aware Optimal Camera Placement for Forest Fire Detection and Monitoring, *Optimization, Learning Algorithms and Applications: Proceedings of the 5th International Conference, OL2A 2025, Sesti Levante, Italy, April 28-30, 2025. Part I*. Cham: Springer, 2026, pp. 127-143.
16. Murray A.T., et al. Coverage optimization to support security monitoring, *Computers, Environment and Urban Systems*, 2007, No. 31, pp. 133-147.
17. Kaushik A., Indu S., Gupta D. A Grey Wolf Optimization Based Algorithm for Optimum Camera Placement, *Wireless Personal Communications*, 2019, Vol. 105, pp. 1143-1167.
18. Wang X., Zhang H., Gu H. Solving optimal camera placement problems in IoT using LH-RPSO, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 40881-40891.
19. Startsev D.Yu., Loginov I.V., Roditel'skiy O.A. Chislennyy metod rascheta optimal'nogo razmeshcheniya datchikov na mestnosti pri ogranichenii propusknoy sposobnosti [Numerical method for optimal sensor placement under bandwidth constraints], *Ekonomika. Informatika* [Economics. Informatics], 2023, Vol. 50, No. 3, pp. 633-644.
20. Li X., Lin Y., Du Z., Lin M., Wu C. Intelligent multi-robot collaborative transport system, *Urban Life-line*, 2024, Vol. 2, No. 1, Article 16.

Соколов Сергей Михайлович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: sokolsm@list.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с.; зав. сектором.

Богуславский Андрей Александрович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: anbg74@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; в.н.с.

Бугеря Александр Борисович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: shurabug@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; к.ф.-м.н.; с.н.с.

Ильенков Максим Александрович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: m.ilyenkov@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; аспирант.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@list.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; professor; principal researcher; chief division.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: anbg74@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; leading researcher.

Bugerya Alexandr Borisovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: shurabug@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; cand. of math. and physics. sc.; senior researcher.

Ilienkov Maksim Alexandrovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: m.ilyenkov@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +74992207994; postgraduate student.