

УДК 004.75

DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-3-633-644

Численный метод расчета оптимального размещения датчиков на местности при ограничении пропускной способности

Старцев Д.Ю., Логинов И.В., Родительский О.А.

ФГКВОУ ВО «Академия ФСО России»,

Россия, 302020, Орловская область, г. Орел, ул. Приборостроительная, д. 35

E-mail: loginov_iv@bk.ru

Аннотация. В работе рассмотрена проблема размещения датчиков мониторинга на местности в условиях наличия значительного количества препятствий и ограничений на пропускную способность каналов передачи данных. Цель исследования – снижение количества технических средств мониторинга для покрытия заданной области наблюдения. Достижение цели обеспечивается за счет применения метода итеративной генерации нового размещения датчиков, минимизирующих величину непокрытых участков зоны наблюдения. Результатом исследования является новый метод расчета оптимального размещения датчиков на местности при ограничении пропускной способности каналов передачи данных, реализующий оптимизацию при наличии двух одновременных критериев: количество технических средств (с учетом ограничений на их характеристики) и пропускная способность каналов связи. Метод позволяет рассчитать места размещения датчиков мониторинга с учетом заданных характеристик беспроводной сети передачи данных. Программная реализация алгоритмов численного расчета позволяет автоматизировать расчет мест установки и подготавливать исходные данные для расстановки датчиков на местности. Результаты применения предложенного подхода к типовым задачам покрытия объекта зонами наблюдения показали возможность обеспечения заданных характеристик системы мониторинга минимальным количеством технических средств.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, оптимизация размещения, детектор, метод построения сети, стохастическая оптимизация, сплошное покрытие с препятствиями, модель сенсора, численный метод

Для цитирования: Старцев Д.Ю., Логинов И.В., Родительский О.А. 2023. Численный метод расчета оптимального размещения датчиков на местности при ограничении пропускной способности. Экономика. Информатика. 50(3): 633–644. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-3-633-644

Numerical Method for Calculating the Optimal Placement of Sensors on the Ground with Limited Bandwidth

Dmitry U. Startsev, Ilya V. Loginov, Oleg A. Roditelskiy

The Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation

35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302020, Russian Federation

E-mail: loginov_iv@bk.ru

Abstract. The paper considers the problem of placing monitoring sensors on the ground in the presence of a significant number of obstacles and restrictions on the bandwidth of data transmission channels. The purpose of the study is to reduce the number of technical monitoring tools to cover a given observation area. The goal is achieved by applying the method of iterative generation of a new placement of sensors that minimize the amount of uncovered areas of the observation zone. The result of the study is a new method for calculating the optimal placement of sensors on the ground with limited bandwidth of data transmission channels, which implements optimization in the presence of two simultaneous criteria – the number of technical means (taking into account restrictions on their characteristics) and the bandwidth of communication channels. The method allows you to calculate the locations of monitoring sensors taking into account the specified characteristics of

the wireless data transmission network. The software implementation of numerical calculation algorithms allows you to automate the calculation of installation sites and prepare the initial data for the placement of sensors on the ground. The results of applying the proposed approach to typical tasks of covering an object with observation zones showed the possibility of providing the specified characteristics of the monitoring system with a minimum amount of technical means.

Keywords: wireless sensor networks, placement optimization, detector, network construction method, stochastic optimization, continuous coverage with obstacles, sensor model, numerical method

For citation: Startsev D.U., Loginov I.V., Roditelskiy O.A. 2023. Numerical Method for Calculating the Optimal Placement of Sensors on the Ground with Limited Bandwidth. Economics. Information technologies, 50(3): 633–644 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-3-633-644

Введение

Развитие технологий построения сенсорных сетей приводит к возможности развертывания на местности (на объектах, сооружениях) крупномасштабных сетей мониторинга и наблюдения, включающих тысячи датчиков различного назначения и принципов работы (локация, измерение температуры, давления, влажности, видеонаблюдение, местная связь, контроль присутствия и т.п.) [Муравьев и др., 2020; Старцев, Нехаев, 2022]. Например, предлагается использовать сенсорные сети для мониторинга окружающей среды, отслеживания транспорта, построения интеллектуальных зданий, организации охраны и наблюдения, мониторинга и отслеживания животных [Когельман, 2020]. Такая возможность позволяет развертывать распределенные сети сбора данных и мониторинга, удаленного управления и контроля, распределенного наблюдения за опасными факторами и условиями внешней среды. Развертывание катастрофоустойчивых сетей позволяет обеспечить надежность функционирования при наличии опасных внешних воздействий за счет децентрализованного, либо смешанного режима работы, что позволяет использовать их для решения задач, связанных с обеспечением безопасности.

Каждый принцип работы датчика сбора данных и наблюдения накладывает ограничение на особенности его применения и соответственно размещения на местности (объектах). С другой стороны, отдельные виды датчиков генерируют высокие трафик (10-100 мбит/с и более) и тем самым предъявляют повышенные требования к организации сети передачи данных [Старцев, Логинов, 2022].

При организации временно развертываемых сетей наблюдения (при чрезвычайных ситуациях техногенного характера или, например, борьбе с лесными пожарами) возникает задача оптимального покрытия площади объекта, имеющего различные препятствия (строения) и запретные зоны (места где не могут быть размещены технические средства), зоной наблюдения датчиков, имеющими различные характеристики (дальность действия, вероятность обнаружения опасного события, скорость передачи информации, геометрические разделы сектора наблюдения), в условиях ограниченной пропускной способности канала связи. Известные алгоритмы организации беспроводных сетей мониторинга ориентированы на обеспечение стационарного развертывания, и в условиях мобильного развертывания на местности с препятствиями не обеспечивают необходимую площадь наблюдения для высокоскоростных средств. Все это обуславливает необходимость разработки численных методов размещения датчиков на местности, с учетом величины пропускной способности канала связи.

Обзор подходов к размещению датчиков на местности

Для решения задач размещения датчиков (в том числе беспроводных) на местности могут применяться методы покрытия двумерного пространства нерегулярными объектами с ограничениями, относящаяся к классу NP-полных задач. Примеры применения методов

оптимизационного геометрического покрытия / размещения рассматриваются в целом ряде работ. Так в [Картак, Фабарисова, 2018] рассматривается проблема оптимизации нерегулярного двумерного размещения объектов в форме полимино на прямоугольных структурах. Предлагается размещение тримино L-формы и тетрамино L-формы. Подход основывается на методе целочисленного линейного программирования. Предложенная в работе математическая модель может быть применена для задачи оптимизации нерегулярного размещения. Для задач большей размерности предложен подход на основе поэлементной оптимизации. У Кузнецова В.Ю. в [Кузнецов, Филиппова, 2006] решается задача покрытия многосвязных ортогональных многоугольников с запретными зонами для оптимального размещения сенсоров в области мониторинга. В [Забелин, Фроловский, 2013] рассматривается возможность применения алгоритмов первого подходящего, вероятностного, экстремального, муравьиного и генетического алгоритмов для решения задачи «раскрой и упаковки» и предлагает адаптировать данные метаэвристические алгоритмы для решения задач в различных системах: освещения, агротехнических, охранных, беспроводной связи, воздушного наблюдения. Решение минимаксной задачи размещения точечного объекта на плоскости с прямоугольной (манхэттенской) метрикой с ограничениями на допустимую область размещения и ее прямое аналитическое решение при помощи методов тропической (идемпотентной) математики предлагается в работе [Плотников, Кривулин, 2018]. Решение данной задачи предлагается осуществлять с учетом дополнительных ограничений на область размещения, которая задана в форме прямоугольника. Приведены графические примеры решения задачи для разных вариантов расположения допустимой области размещения на плоскости. Задача размещения геометрических объектов в многосвязный ортогональный полигон рассматривается в [Хасанов, Дямина, 2020]. В качестве решения задачи предлагается использовать метод на базе матричной технологии. Описаны основные этапы конструирования плана размещения. Продемонстрирован интерфейс и функциональные возможности программного модуля, реализующего предложенный метод.

Применительно непосредственно к сенсорным сетям рассматриваются задачи оптимизации технических средств при заданной площади мониторинга [Муравьев и др., 2020]: в работе [Кучеров, Мигов, 2018] рассматривают показатели площади мониторинга и вероятность обеспечения мониторинга не менее заданного значения; в работе [Гарафутдинов, 2018] рассматривается решение задачи многократного мониторинга заданной области покрытия кругами известного радиуса; приводится пример беспроводной сенсорной сети для мониторинга микроклимата (температуры, влажности, концентрации углекислого газа) на фермах крупного рогатого скота, обеспечивающего работоспособность при выходе из строя отдельных датчиков [Ильин, Второй, 2020]. Также рассматривают объектно-ориентированные особенности применения: отличительные черты построения беспроводных аудиосенсорных сетей [Куракевич, Серегин, 2020], проблема размещения подводных, устойчивых к ошибкам детекторов и механизмы локализации датчиков гидроакустики [Das, Thampri 2017] и [Jouhari et al, 2019]; беспроводные системы мониторинга и видеонаблюдения [Старцев, Логинов, 2021].

Значительное количество работ посвящено оптимизации размещения беспроводных датчиков на местности, в том числе пересеченной и с наличием препятствий: используются критерий минимизации энергопотребления [Ouchitachen, 2015]; рассматривается применение машинного обучения для перепроектирования сетей [Alsheikh, 2014]; рассмотрено применение модифицированных коммуникационных протоколов для подвижных датчиков об-

наружения [Wu et al, 2009], рассмотрена задача мониторинга беспроводных объектов [Виноградов, 2022]. При этом ограничения пропускной способности в совокупности в высокой неопределенностью радиоэлектронной обстановки выносятся в общем случае в ограничения. Высокоскоростные сети наблюдения, такие как видеонаблюдения и радиолокационного наблюдения требуют прямого учета ограничений, что обосновывает актуальность проведения исследований.

Задача размещения высокоскоростных датчиков на местности

Исходными данными для задачи размещения высокоскоростных датчиков технических средств охраны выступает план временно охраняемой местности (рис. 1). План местности должен быть заранее построен на основе схемы, снимка или ортофотоплана с точностью указания координат не менее 0,1 м. На плане местности должны быть указаны зоны наблюдения, запретные зоны для размещения датчиков, препятствия, характеристики освещенности, влияющие на детектирование. Для каждой зоны наблюдения (обнаружения) устанавливают список типовых целей для обнаружения: транспортные средства, люди, предметы.

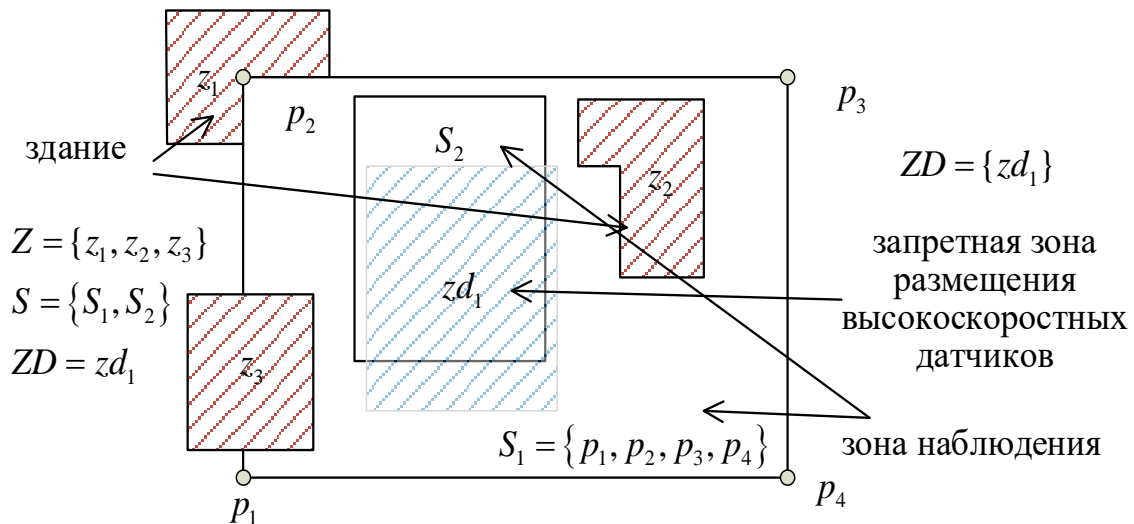


Рис. 1. Исходные данные для задачи размещения датчиков на местности
 Fig. 1. Initial data for the task of placing sensors on the ground

Задача размещения высокоскоростных датчиков на местности состоит в нахождении подмножества высокоскоростных датчиков ND^* из множества доступных $ND^* \in ND$, а также мест их размещения P_{ND^*} (включая азимуты диаграмм направленности), минимизирующих количество датчиков технических средств охраны N_D :

$$\langle ND^*, P_{ND^*} \rangle = \arg \min_{ND} (N_D(ND) + N_R(ND)), ND \subseteq NDT, \quad (1)$$

N_R – количество ретрансляторов (точек доступа беспроводной связи) $NR^* \in NR$; места размещения ретрансляторов P_{ND^*} ; при выполнении требований полного покрытия зоны наблюдения и функционирования рубежей детектирования, опознавания и идентификации объектов:

$$S^{\text{набл,з}\in\mathbb{Z}} = \bigcup_i S_i^{\text{набл,з}\in\mathbb{Z}} \subseteq S^{\text{набл,з}\in\mathbb{Z}}(ND^*) = \bigcup_{j=1}^{N_D} S_j^{\text{набл,з}\in\mathbb{Z}}(d_j), \quad (2)$$

$$L^{\text{детек,з}\in\mathbb{Z}} = \bigcup_i L_i^{\text{детек,з}\in\mathbb{Z}} \subseteq L^{\text{детек,з}\in\mathbb{Z}}(ND^*) = \bigcup_{j=1}^{N_D} L_j^{\text{детек,з}\in\mathbb{Z}}(d_j), \quad (3)$$

$$L^{\text{опозн,з}\in\mathbb{Z}} = \bigcup_i L_i^{\text{опозн,з}\in\mathbb{Z}} \subseteq L^{\text{опозн,з}\in\mathbb{Z}}(ND^*) = \bigcup_{j=1}^{N_D} L_j^{\text{опозн,з}\in\mathbb{Z}}(d_j), \quad (4)$$

$$L^{\text{идентиф,з}\in\mathbb{Z}} = \bigcup_i L_i^{\text{идентиф,з}\in\mathbb{Z}} \subseteq L^{\text{идентиф,з}\in\mathbb{Z}}(ND^*) = \bigcup_{j=1}^{N_D} L_j^{\text{идентиф,з}\in\mathbb{Z}}(d_j), \quad (5)$$

и выполнении требований передачи высокоскоростных потоков данных по каналам беспроводной связи:

$$C_{km}^R(RSSI = \min RSSI_{kjm}) \geq C_{km}^{ND}, \quad (6)$$

$$\forall k, k = 1..N_R, \sum_{j=1}^{N_D} C_j(ND^*, rs = k) \leq C(rs_k) = C_{km}^R, \quad (7)$$

где $C(rs_k)$ – пропускная способность беспроводного k -го ретранслятора (точки доступа).

Результатом решения задачи размещения датчиков технических систем охраны являются список высокоскоростных датчиков с места расположения (привязанных к карте или схеме объекта), а также азимута диаграммы направленности:

$$\langle ND^*, P_{ND^*}, Az \rangle. \quad (8)$$

Численный метод размещения высокоскоростных датчиков на местности с препятствиями

Для решения задачи размещения высокоскоростных датчиков мониторинга на местности при ограничении пропускной способности каналов связи предложен численный метод, заключающийся в выполнении последовательности операций (рис. 2):

1. Генерация зоны сплошного покрытия и его наложение на зону наблюдения, выполняется на основе эвристики сплошного покрытия заданными фигурами: кругами, секторами, треугольниками [Старцев, Логинов, 2021].

2. Перенос высокоскоростных датчиков из запретных зон и строений на их границы, выполняется методом кратчайшего перпендикуляра.

3. Итеративная генерация нового размещения датчиков, минимизирующую величину непокрытых участков зоны наблюдения.

4. Итеративная генерация нового размещения датчиков, обеспечивающую расстановку датчиков при ограничении на пропускную способность ретрансляторов.



Рис. 2. Алгоритм размещения высокоскоростных датчиков на местности
 Fig. 2. Algorithm for placing high-speed sensors on the ground

В рамках итеративной генерации новых размещений ищется новое подмножество датчиков ND_i . Операция выполняется в соответствии с алгоритмом на рисунке 3.

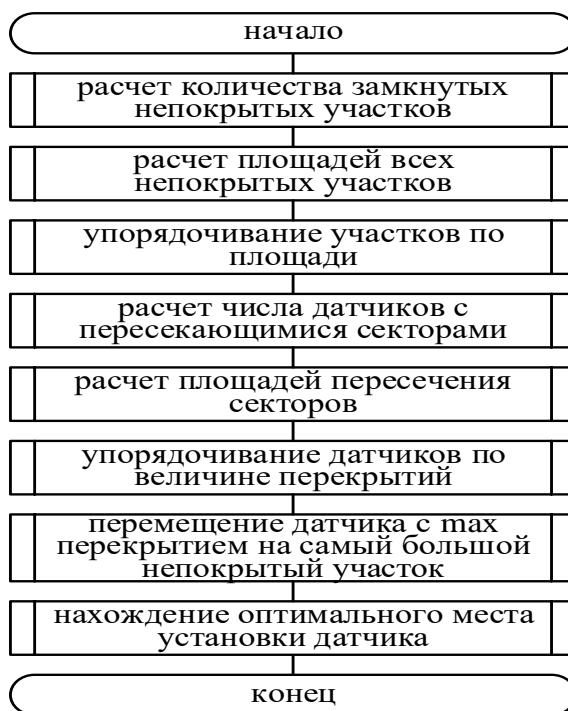


Рис. 3. Алгоритм генерации нового размещения высокоскоростных датчиков на местности
 Fig. 3. Algorithm for generating a new placement of high-payload sensors on the ground

Перераспределение датчиков выполняется по диагонали слева направо, сверху вниз. Операция нахождения оптимального места (координат) размещения j -го датчика поясняется рисунком 4. Формируется зона покрытия (видимости) для всех датчиков (сверху и слева непокрытого участка) $j < J$ (рис. 4, шаг 1):

$$S_{iJ} = \bigcup_{j=1}^J S_{ij} . \quad (9)$$

Рассчитывается совокупная зона наблюдения (2). Определяется потенциальная линия L_{iJ} размещения датчика (3) – наиболее удаленная точка установки датчика мониторинга от совокупной зоны наблюдения S_{iJ} . Осуществляется расчет величины площади перекрытия для i -го датчика $\Delta S_{iJ} = S_{iJ} \cap S_{ij}$ в зависимости от точки на потенциальной линии размещения L_{iJ} (вариант площади перекрытия представлен на графике – 5).

Определение того, что датчик попадает в запретную зону (строение или формального заданную зону, где невозможна установка датчика) реализуется с использованием алгоритма на рисунке 5. Смысл в том, что датчики наблюдения, попадающие в запретную зону, переносятся на ее границу в соответствии с методом минимального перпендикуляра.

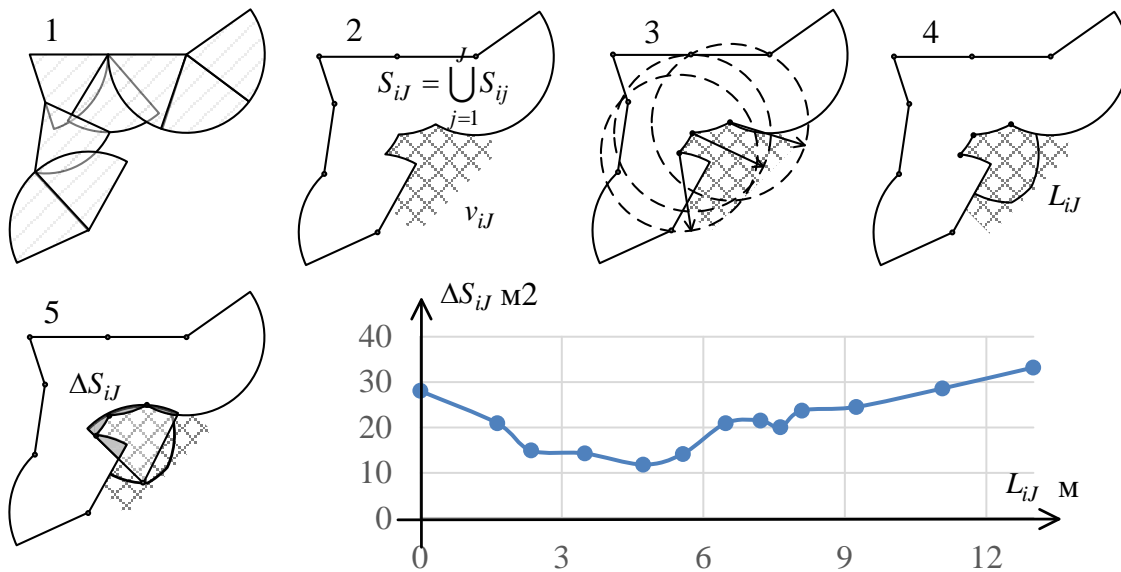


Рис. 4. Схема нахождения нового размещения высокоскоростного датчика на местности
 Fig. 4. The scheme of finding the new location of the high-speed sensor on the ground

Алгоритм нахождения того, что точка размещения датчика находится в запретной зоне реализуется следующим образом:

- 1) Каждый многоугольник всех запретных зон разбивается на треугольники методов с использованием модифицированного жадного алгоритма для невыпуклых многоугольников.
- 2) Для каждой точки размещения датчика проверяется ее нахождение внутри всех запрещенных треугольников.

Перенос точки установки датчика на границу запретной зоны – точка передвигается по минимальному перпендикуляру, азимут диаграммы направленности сохраняется без изменений.

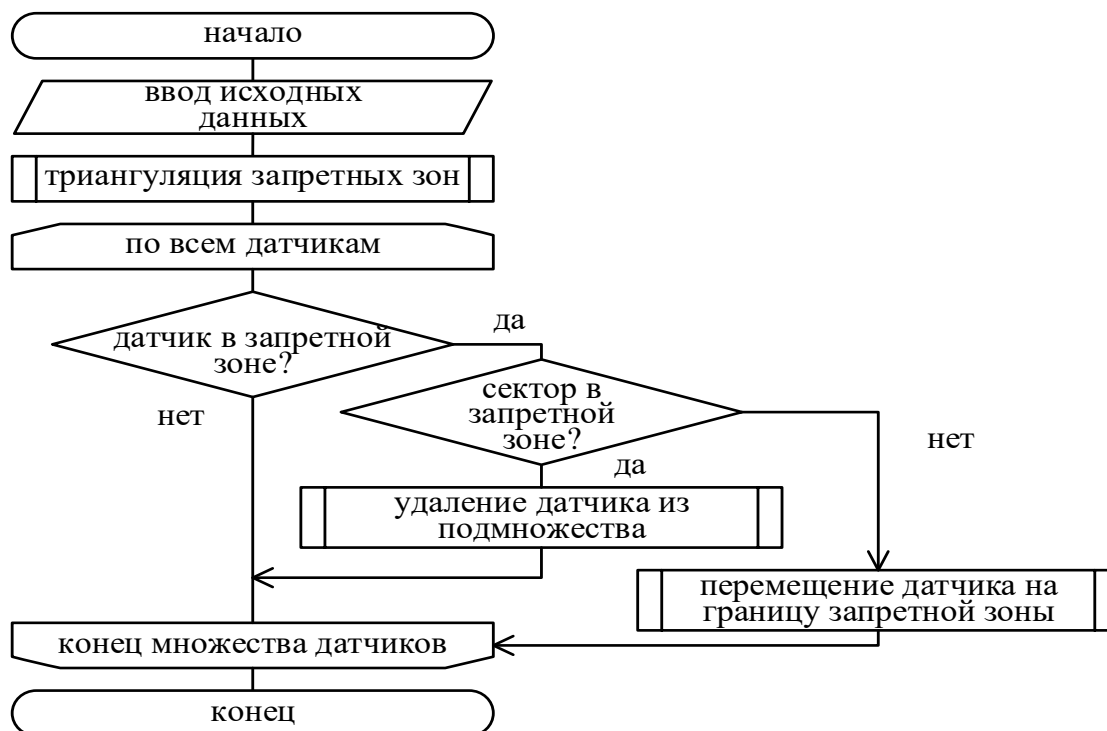


Рис. 5. Алгоритм определения запретного места установки датчика
Fig. 5. Algorithm for determining the forbidden location of the sensor

Расчет размещений датчиков в программном средстве TriangleM

В рамках исследования для практической реализации алгоритма размещения высокоскоростных датчиков на местности разработано программное средство. Программное средство TriangleM по расчету мест размещения датчиков на местности в условиях высокого уровня закрытия препятствиями представляет собой приложение со следующими основными функциями: визуализации – создание проекта, подготовка исходных данных с построением схемы объекта (зон и рубежей наблюдения), расчетной – проведение расчета предположительных мест размещения высокоскоростных датчиков и ретрансляторов на основе установленных требований к зонам и рубежам наблюдения). Предполагаемое направление использования программного средства это ее применение в интересах проектирования и анализа систем безопасности и жизнеобеспечения различных объектов (рис. 6,7).



Рис. 6. Пример построения схемы объекта в программном средстве TriangleM
Fig. 6. Example of building an object schema in the TriangleM software

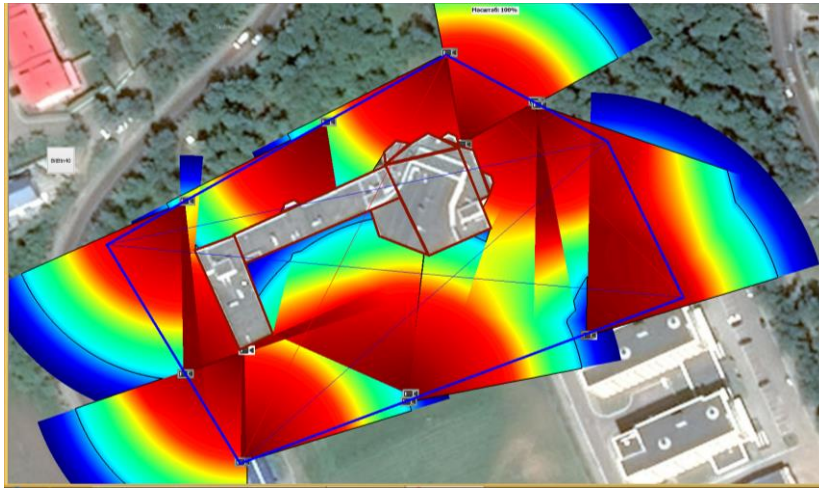


Рис. 7. Пример построения схемы зоны покрытия и размещения датчиков в программном средстве TriangleM

Fig. 7. An example of constructing a coverage area diagram and placing sensors in the Triangle software

Территория объекта представляет собой участок местности с расположенными на нем препятствиями (строениями). Основной объект представляет собой Г-образное строение. Определены границы объекта, в пределах которых должно обеспечиваться полное покрытие площади датчиками наблюдения. Граница зоны действия датчика составляет 90 метров. Граница зоны идентификации объектов датчиком с вероятностью 95% составляет 45 метров. Сектор действия датчика составляет 72° .

Программа позволяет задать параметры датчиков (дальность действия, вероятность обнаружения, зону обнаружения при заданной вероятности), произвести размещение датчиков в пределах границы объекта, после чего произвести перемещение датчиков, попавших в запретные зоны, в разрешенные места и провести переустановку датчиков до полного покрытия требуемой площади, при этом лишние датчики могут удаляться, а недостающие наоборот добавляться. После полного покрытия площади датчиками программное средство строит схему покрытия объекта с указанием количества и мест размещения датчиков.

В представленном примере площадь объекта полностью покрыта 11 датчиками, 4 из которых попали в запретную зону. Произведено смещение данных датчиков на границу запретной зоны по кратчайшему расстоянию и произведена перестановка остальных датчиков в пределах разрешенной зоны. В результате перестановки выяснилось, что данного количества недостаточно для полного покрытия требуемой площади, поэтому произведено добавление дополнительного датчика.

Заключение

В статье рассмотрены проблемы развертывания беспроводных быстровозводимых датчиков. Показана необходимость оптимизации мест размещения датчиков в условиях ограничения пропускной способности канала связи.

Предложен численный метод расчета оптимального размещения датчиков на местности с учетом ограничений пропускной способности канала связи, отличающийся от существующих совместным применением эвристики на основе замощения территории объекта секторами и стохастической оптимизацией мест размещения датчиков на основе метода условного спуска, который позволяет численно решать задачу выбора подмножества высокоскоростных датчиков и мест их размещения. Описана реализация предложенного метода

в программном средстве проектирования и построения систем безопасности и жизнеобеспечения объектов. Приведен пример расстановки датчиков на местности в программном средстве, реализующем приведенные в статье алгоритмы на примере сети беспроводных видеокамер.

Список литературы

- Виноградов Г.П. 2022. Отслеживание мобильных объектов средствами беспроводных сенсорных сетей. Информационные и математические технологии в науке и управлении. 1(25): 58-69.
- Гарафутдинов Д.И. 2018. Беспроводная сенсорная сеть многократного мониторинга заданной области. Аллея науки. Т. 2. № 5 (21): 1066-1072.
- Забелин С.Л., Фроловский В.Д. Разработка и исследование моделей, методов и алгоритмов для синтеза и анализа решений задач геометрического покрытия. Вестник СибГУТИ, г. Новосибирск, 2013. № 2: 42-53.
- Ильин Р.М., Вторый С.В. 2020. Беспроводные сенсорные сети для мониторинга параметров микроклимата на фермах КРС. Техника и оборудование для села. 11(281): 32-34.
- Картак В.М., Фабарисова А.И. 2018. Методы целочисленного линейного программирования в задаче нерегулярного размещения плоских геометрических объектов в форме полимино. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Т. 22. № 2 (80): 131-137.
- Когельман Л.Г. 2020. Обзор применения беспроводных сенсорных сетей. Современные информационные технологии. 31(31): 65-75.
- Кузнецов В.Ю., Филиппова А.С. 2006. Задача размещения газоанализаторов при условиях покрытия зонами их действия территорий с запрещенными участками. Проблемы оптимизации и экономические приложения: 3-я Всероссийская конференция. Материалы конференции (Омск, 11 – 15 июля 2006), 182.
- Куракевич М.А., Серегин Ю.Н. 2020. Алгоритм взаимодействия аудиодатчиков в беспроводной сенсорной сети. Аллея науки. Т. 2. № 4 (43): 691-698
- Кучеров А.В., Мигов Д.А. 2018. Расчет ожидаемой площади покрытия беспроводной сенсорной сети с ненадежными узлами. Проблемы информатики. 3(40): 21-33.
- Муравьев К.А., Алябьев И.О., Синютина Д.С., Шушуев А.И. 2020. Алгоритмическое проектирование беспроводных сенсорных сетей. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 2: 322-327.
- Плотников П.В., Кривулин Н.К. 2018. Прямое решение минимаксной задачи размещения в прямоугольной области на плоскости с прямоугольной метрикой. Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 14(2): 116–130.
- Старцев Д.Ю., Логинов И.В. 2022. Проблема увеличения интенсивности информационных потоков в системах физической безопасности. Охрана, безопасность, связь — 2022: сборник статей.
- Старцев Д.Ю., Логинов И.В. 2021. Алгоритм оптимального размещения беспроводных видеосенсоров в быстровозводимых системах мониторинга и охраны объектов. Информационные системы и технологии. 5(127): 39-49.
- Старцев Д.Ю., Нехаев С.В. 2022. Основные задачи и типовые нарушители быстроразворачиваемых комплексов технических средств охраны для транспортной безопасности. Образование – наука – производство: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2022. – С. 224-227.
- Хасанов Р.И., Дямина Э.И. 2019. Математическое и программное обеспечение размещения ортогональных объектов в многоугольной области на базе матричной технологии. Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 1(20): 183-186.
- Alsheikh M. A., Lin Sh., Niyato D., Tan H.-P. 2014. Machine Learning in Wireless Sensor Networks: Algorithms, Strategies, and Applications. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 16(4), 1996-2018. Research Collection School Of Computing and Information Systems.
- Das Anjana P, Thampi Sabu M. 2017. Fault-resilient localization for underwater sensor networks. Ad Hoc Networks, vol. 55, 132-142.

- Jouhari M., Ibrahim Kh., Tembine H., Ben-Othman J. 2019. Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879-96899.
- Ouchitachen H, Hair A., Idrissi N. 2015. Optimal Placement of Sensors in Mission-specific Mobile Sensor Networks. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering* Vol. 16, No. 1, October 2015, pp. 191 – 199.
- Wu Di, Bao L., Li R. UWB-Based Localization in Wireless Sensor Networks (2009). *Communications, Network and System Sciences*, August 2009.

References

- Vinogradov G.P. 2022. Otslezhivanie mobil'nyh ob'ektov sredstvami besprovodnyh sensornyh setej [Tracking of mobile objects by means of wireless sensor networks]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii*. 1(25): 58-69.
- Garafutdinov D.I. 2018. Besprovodnaja sensornaja set' mnogokratnogo monitoringa zadannoj oblasti [Wireless sensor network for multiple monitoring of a given area]. *Alleja nauki*. T. 2. № 5 (21): 1066-1072.
- Zabelin S.L., Frolovskij V.D. 2013. Razrabotka i issledovanie modelej, metodov i algoritmov dlja sinteza i analiza reshenij zadach geometricheskogo pokrytija [Development and research of models, methods and algorithms for synthesis and analysis of solutions to geometric coating problems]. *Vestnik SibGUTI*, g. Novosibirsk, 2: 42-53. (in Russian)
- Il'in R.M., Vtoryj S.V. 2020. Besprovodnye sensornye seti dlja monitoringa parametrov mikroklimata na fermah KRS [Wireless sensor networks for monitoring microclimate parameters on cattle farms]. *Tehnika i oborudovanie dlja sela*. 11 (281): 32-34.
- Kartak V.M., Fabarisova A.I. 2018. Metody celochislennogo linejnogo programmirovanija v zadache nereguljarnogo razmeshhenija ploskih geometricheskikh ob'ektov v forme polimino [Methods of integer linear programming in the problem of irregular placement of planar geometric objects in the form of polyominoes]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta*. T. 22. № 2 (80): 131-137.
- Kogel'man L.G. 2020. Obzor primeneniya besprovodnyh sensornyh setej [Overview of the application of wireless sensor networks]. *Sovremennye informacionnye tehnologii*. 31(31): 65-75.
- Kuznecov V.Ju., Filippova A.S. 2006. Zadacha razmeshhenija gazoanalizatorov pri uslovijah po-krytija zonami ih dejstvija territorij s zapreshhennymi uchastkami [The task of placing gas analyzers under conditions of covering territories with prohibited areas by their zones of operation]. *Problemy optimizacii i jekonomicheskie prilozhenija: 3-ja Vserossijskaja konferencija. Materialy konferencii* (Omsk, 11 – 15 ijulja 2006). P. 182.
- Kurakevich M.A., Seregin Ju.N. 2020. Algoritm vzaimodejstvija audiodatchikov v besprovodnoj sensornoj seti [Algorithm of interaction of audio sensors in a wireless sensor network]. *Alleja nauki*. T. 2. № 4 (43): 691-698.
- Kucherov A.V., Migov D.A. 2018. Raschet ozhidaemoj ploshhadi pokrytija besprovodnoj sensornoj seti s nenadezhnymi uzlami [Calculation of the expected coverage area of a wireless sensor network with unreliable nodes]. *Problemy informatiki*. 3(40): 21-33.
- Murav'ev K.A., Aljab'ev I.O., Sinjutina D.S., Shushuev A.I. 2020. Algoritmicheskoe proektirovanie besprovodnyh sensornyh setej [Algorithmic design of wireless sensor networks]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"*. T. 2: 322-327.
- Plotnikov P.V., Krivulin N.K. 2018. Prjamoe reshenie minimaksnoj zadachi razmeshhenija v prjamougol'noj oblasti na ploskosti s prjamougol'noj metrikoi [Direct solution of the minimax problem of placement in a rectangular area on a plane with a rectangular metric]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaja matematika. Informatika. Processy upravlenija*. 14(2): 116–130.
- Starcev D.Ju., Loginov I.V. 2022. Problema uvelichenija intensivnosti informacionnyh potokov v sistemah fizicheskoj bezopasnosti [The problem of increasing the intensity of information flows in physical security systems]. *Ohrana, bezopasnost', svjaz' — 2022: sbornik statej*.
- Starcev D.Ju., Loginov I.V. 2021. Algoritm optimal'nogo razmeshhenija besprovodnyh video-sensorov v bistrovzvodimyh sistemah monitoringa i ohrany ob'ektov [Algorithm of optimal placement of

- wireless video sensors in pre-fabricated systems of monitoring and protection of objects]. *Informacionnye sistemy i tehnologii*. 5(127): 39-49.
- Starcev D.Ju., Nehaev S.V. 2022. Osnovnye zadachi i tipovye narushiteli bystrorazvorachiva-emyh kompleksov tehniceskikh sredstv ohrany dlja transportnoj bezopasnosti [The main tasks and typical violators of rapidly developing complexes of technical security equipment for transport security]. *Образование - наука - производство: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с меж-дународным участием).* – P. 224-227.
- Hasanov R.I., Djaminova Je.I. 2019. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie razmeshhenija ortogonal'nyh ob'ektov v mnogougol'noj oblasti na baze matrichnoj tehnologii [Mathematical and software support for the placement of orthogonal objects in a polygonal area based on matrix technology]. *Molodezhnyj vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehniceskogo universiteta*. 1(20): 183-186.
- Alsheikh M. A., Lin Sh., Niyato D., Tan H.-P. 2014. Machine Learning in Wireless Sensor Networks: Algorithms, Strategies, and Applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(4), 1996-2018. Research Collection School Of Computing and Information Systems.
- Das Anjana P, Thampi Sabu M. 2017. Fault-resilient localization for underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, vol. 55, 132-142.
- Jouhari M., Ibrahim Kh., Tembine H., Ben-Othman J. 2019. Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879-96899.
- Ouchitachen H, Hair A., Idrissi N. 2015. Optimal Placement of Sensors in Mission-specific Mobile Sensor Networks. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering* Vol. 16, No. 1, October 2015, pp. 191 – 199.
- Wu Di, Bao L., Li R. UWB-Based Localization in Wireless Sensor Networks (2009). *Communications, Network and System Sciences*, August 2009.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: о potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Старцев Дмитрий Юрьевич, сотрудник Академии ФСО России, г. Орел, Россия

Логинов Илья Валентинович, кандидат технических наук, сотрудник Академии ФСО России, г. Орел, Россия

Родительский Олег Анатольевич, сотрудник Академии ФСО России, г. Орел, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry U. Startsev, The Academy of the Guard Service Russian Federation, Orel, Russian Federation

Ilya V. Loginov, candidate of information science, The Academy of the Guard Service Russian Federation, Orel, Russian Federation

Oleg A. Roditelskiy, The Academy of the Guard Service Russian Federation, Orel, Russian Federation