УДК 004.942
DOI: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.073-080

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

В. В. Меньших, Н. Е. Чиркова

Кафедра математики и моделирования систем, menshikh@list.ru;
ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», г. Воронеж, Россия

Ключевые слова: гетерогенная система; общественная безопасность; схема ветвей и границ; численный метод оптимизации.

Аннотация: Рассмотрены вопросы разработки численного метода оптимизации расположения элементов системы видеонаблюдения с учетом обеспечения их собственной безопасности. Обоснована необходимость использования схемы ветвей и границ при разработке данного метода, что позволяет с высокой эффективностью осуществлять поиск оптимального решения Определены способы формирования дерева частичных решений, оценки частичных решений, обхода вершин дерева частичных решений. Показан численный пример реализации предложенного метода.

Введение

В современных условиях широкое распространение получили гетерогенные системы обеспечения общественной безопасности (**ГСООБ**). Данные системы относятся к классу сложных систем и характеризуются большим количеством разнородных элементов, взаимосвязанных друг с другом [1]. Эффективность функционирования ГСООБ в последнее время существенно возрастает за счет включения в нее подсистемы видеонаблюдения, базирующейся на использовании современных информационных технологий [2]. Однако при функционировании систем видеонаблюдения могут возникать трудности, связанные с выходом из строя технических средств видеонаблюдения (**ТСВ**).

Потеря сигнала от ТСВ может быть обусловлена целым рядом причин: программными сбоями, неблагоприятными погодными условиями, отключением электроэнергии и др. Одной из наиболее серьезных причин выхода из строя ТСВ является совершение в их отношении противоправных посягательств, самыми распространенными среди которых считаются кража и порча. Это связано с тем, что данные средства обладают высокой эффективностью в предотвращении действий преступного характера, а также зачастую имеют высокую стоимость. Оператор мониторингового центра, не имея визуального контроля за вышедшим из строя ТСВ, не может принять верного управленческого решения, в силу того, что не известна причина, по которой произошло данное событие.

Таким образом, возникает задача оптимизации расположения ТСВ с учетом обеспечения их собственной безопасности. Вопросы функционирования систем видеонаблюдения на отдельно взятых объектах хорошо изучены [3 – 5]. Однако решению задачи оптимального расположения ТСВ, характеризующейся большой

размерностью [6], и, как следствие, трудностью вычислений для крупномасштабных систем видеонаблюдения (например, городских), уделено недостаточно внимания. Цель работы – разработка эффективного численного метода для поиска оптимального решения данной задачи.

Описание математической модели

Вопросам разработки математической модели оптимизации расположения ТСВ с учетом их собственной безопасности посвящена работа [6]. В данной модели осуществляется распределение по потенциальным местам установки ТСВ различных типов так, что обеспечить контроль не только всех охраняемых зон, но и мест установки других ТСВ. Учитывая, что ТСВ различных типов отличаются стоимостью и возможность контроля всех мест размещения ТСВ, как правило, невозможна, в модели максимизируется суммарная стоимость ТСВ на контролируемых местах размещения. Однако данная работа не содержит описания эффективного метода нахождения численного решения задачи на основе разработанной модели. С этой целью осуществим формализацию задачи.

Обозначим:

$O = \left\{ o_1, o_2, ..., o_{|O|} \right\}$ – множество охраняемых зон;

$M = \left\{ m_1, m_2, ..., m_{|M|} \right\}$ – множество потенциальных мест установки ТСВ;

$T = \left\{ t_1, t_2, ..., t_{|T|} \right\}$ – множество типов ТСВ;

$C = \left\{ c_1, c_2, ..., c_{|T|} \right\}$ – множество стоимостей типов ТСВ;

q_{ijks} – параметр, определяющий возможность контроля p_{ijk} с места m_i ТСВ типа t_j за зоной o_k и местом установки другого ТСВ m_s;

x_{ijk} – переменная, определяющая факт контроля ТСВ типа t_j за зоной o_k с места m_i;

$X = \left\{ x_{ijk} \right\}, \ \forall i = 1, ..., |M|, \ \ \forall j = 1, ..., |T|, \ \forall k = 1, ..., |O|$.

Отметим, что место установки ТСВ типа t_j может одновременно контролироваться несколькими ТСВ, поэтому его стоимость c_j необходимо учитывать лишь однажды, что определяется выражением $\operatorname{sign} \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} \left(x_{ijk} q_{ijks} \right)$.

Таким образом, формализованное описание данной модели имеет следующий вид нахождения

$$X^* = \arg\max \sum_{s=1}^{|M|} \sum_{l=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (c_l x_{slk}) \operatorname{sign} \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} \left(x_{ijk} q_{ijks} \right), \quad (1)$$

при ограничениях:

1) на обязательную охрану каждой зоны o_k

$$\forall k \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|T|} x_{ijk} \geq 1; \quad (2)$$

2) число вариантов фактического расположения ТСВ, которое не может превышать числа возможных вариантов p_{ijk}

$$\forall i \forall j \forall k \ x_{ijk} \leq p_{ijk}; \quad (3)$$

3) условие размещения не более одного ТСВ в потенциальном месте установки

$$\forall i \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} x_{ijk} \le 1; \quad (4)$$

4) условие ограниченного количества ТСВ

$$\sum_{i=1}^{|M|} \sum_{k=1}^{|O|} x_{ijk} \le \hat{T}_j, \quad (5)$$

где $\hat{T}_j$ – количество ТСВ типа t_j.

Получение точного решения задачи (1) – (5) за приемлемое время в силу ее большой размерности может оказаться невозможным, что определяет целесообразность использования итерационных подходов, среди которых можно выделить схему ветвей и границ [7, 8]. Ее преимуществом является то, что достаточно быстро на первом этапе, используя идеи «жадного» алгоритма или других эвристических алгоритмов, находится первое приближенное решение, которое далее может только улучшаться. Кроме того, по ходу решения возможен контроль точности найденных приближенных решений. Поэтому, в случае ограниченного времени и/или достаточной точности решения, можно остановиться на текущем приближенном решении.

Численный метод

Обратимся к разработке численного метода на основе схемы ветвей и границ для решения задачи (1) – (5).

Способ формирования дерева частичных решений. Под частичными решениями, то есть вершинами дерева частичных решений, будем понимать иерархически упорядоченные подмножества множества вариантов размещения ТСВ на контролируемой территории. Листами (концевыми вершинами) дерева частичных решений являются одноэлементные подмножества, то есть потенциально возможные решения задачи (1) – (5).

Рассмотрим принцип формирования вершин первого уровня иерархии дерева частичных решений.

Введем следующие обозначения:

W – все множество вариантов расположения элементов системы видеонаблюдения, которое является корнем дерева частичных решений;

W_{1ik} – множество всех вариантов, в которых на месте m_1 установлено ТСВ типа t_i, наблюдающее за зоной o_k.

Очевидно, что:

1) $\forall j \forall k \; W_{1jk} \subseteq W$;

2) $\forall j_1 \forall j_2 \forall k_1 \forall k_2 \; W_{1j_1k_1} \cap W_{1j_2k_2} = \varnothing$, если $j_1 \ne j_2$ и/или $k_1 \ne k_2$;

3) $\bigcup_{j=1}^{|T|} \bigcup_{k=1}^{|O|} W_{1jk} = W$.

Аналогичным образом формируются остальные вершины дерева частичных решений. Пусть $W_{1j_1k_1, 2j_2k_2, \ldots, qj_qk_q}$ – множество всех вариантов расположения ТСВ, в которых:

на месте m_1 установлено ТСВ типа t_{j_1}, контролирующее зону o_{k_1};

на месте m_2 установлено ТСВ типа t_{j_2}, контролирующее зону o_{k_2};

…

на месте m_q установлено ТСВ типа t_{j_q}, контролирующее зону o_{k_q}.

Указанные множества образуют иерархическое дерево, что следует из следующих их свойств, которые нетрудно доказать:

1) $\forall j_1 ... \forall j_q \forall k_1 ... \forall k_q \; W_{ij_1k_1, ..., q-1j_{q-1}k_{q-1}qj_qk_q} \subseteq W_{ij_1k_1, ..., q-1j_{q-1}k_{q-1}}$;

2) $\forall j_1 ... \forall j_{q-1} \forall j_{q1} \forall k1 ... \forall k_{q-1} \forall k_{q1}$ и $\forall j_1 ... \forall_{jq-1} \forall_{jq2} \forall_{k_1} ... \forall k_{q-1} \forall_{k_{q2}}$;

$W_{ij_1k_1, ..., q-1j_{q-1}k_{q-1}, q_1j_{q1}k_{q1}} \cap W_{ij_1k_1, ..., q-1j_{q-1}k_{q-1}, q_2j_{q2}k_{q2}} = \varnothing$, если $q_1 \neq q_2$ и/или $o_1 \neq o_2$;

3) $\bigcup_{d=1}^{|T|} \bigcup_{p=1}^{|O|} W_{1j_1k_1, ..., q-1j_{q-1}k_{q-1}, q_dj_{qd}k_{qp}} = W_{1j_1k_1, ..., q-1j_{q-1}k_{q-1}}$.

Способ оценки частичных решений. Обратимся к нахождению оценок частичных решений. Поскольку решается оптимизационная задача максимизации, оценки должны:

1) мажорировать стоимость всех защищаемых элементов (ТСВ) во множестве, составляющем частичные решения;

2) монотонно убывать при спуске по дереву частичных решений.

Вычисление оценки частичных решений предлагается осуществлять по формуле

$$\sum_{s=1}^{|M'|} \sum_{l=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (c_l \tilde{x}_{slk}) \operatorname{sign} \sum_{i=1}^{|M'|} \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (\tilde{x}_{ijk} q_{ijks}) + (|M| - |M'|) \max_{l=1, ..., |T|} (c_l), \qquad (6)$$

где $M' = \{1, ..., q\}$ – множество мест, для которых осуществляется выбор типов ТСВ и защищаемых зон; $\tilde{x}_{slk}$ и $\tilde{x}_{ijk}$ – значения переменных x_{slk} и x_{ijk} для выбранных мест размещения ТСВ.

Выполнение свойства 1) следует из того, что на все не назначенные места назначаются ТСВ с наибольшей стоимостью; свойства 2) – для нового места q выбирается конкретное ТСВ, стоимость которого заведомо не больше, чем учтенная ранее во множестве $W_{1j_1k_1 ... q-1j_{q-1}k_{q-1}}$ в соответствии с оценкой (6).

Способ обхода вершин дерева частичных решений. Обход дерева частичных решений включает в себя два этапа:

– нахождение первоначального решения;

– обход вершин дерева в целях возможного улучшения первоначального решения.

На начальном этапе осуществляется спуск по дереву частичных решений на основе последовательного распределения ТСВ по местам m_i для охраны зон o_k так, что на выбранные места размещаются ТСВ максимальной стоимости из числа оставшихся на данный момент, то есть реализуется принцип «жадного» алгоритма.

Далее осуществляется последовательный ограниченный обход вершин дерева решений. Ограничение обхода определяется недопустимостью множеств вариантов, которая может возникнуть в силу следующих обстоятельств:

– оценка для очередной вершины оказывается меньше (6), вследствие чего все подмножества соответствующего этой вершине множества вариантов являются неприемлемыми;

– не выполняются ограничения (3) – (5) для переменных $\tilde{x}_{slk}$ и $\tilde{x}_{ijk}$, описывающих уже проведенный выбор мест размещения ТСВ.

Кроме того, ограничение (2) должно быть проверено для концевых вершин, содержащих единственный вариант. Если в ходе обхода дерева частичных решений находится лучший вариант, то все последующие сравнения проводятся с ним.

Численный пример

Предположим, что необходимо обеспечить визуальный контроль за тремя зонами, а также за тремя местами установки ТСВ в целях максимизации их защищенности (рис. 1). Для этого требуется расположить в некоторых местах ТСВ двух различных типов: поворотные и неповоротные. При распределении ТСВ также необходимо учитывать наличие препятствия, которое ограничивает визуальный контроль с места m_3 за зоной o_3.

Для данного примера введем ограничения на количество ТСВ различных типов: $\hat{T}_{j_1} = 1$ (поворотные ТСВ), $\hat{T}_{j_2} = 3$ (узконаправленные ТСВ). Стоимости ТСВ каждого типа равны 2 усл.ед. и 1 усл.ед. соответственно. Перейдем к формированию дерева частичных решений. Первое решение, которое удовлетворяет всем введенным ограничениям, объявляется рекордным (рис. 2).

Следующим этапом является оптимизация полученного решения, осуществляемая в соответствии с разработанными правилами обхода вершин данного дерева частичных решений (рис. 3). Варианты, не удовлетворяющие хотя бы одному из условий (2) – (5) не рассматриваются.

Итоговым результатом является оптимальный вариант расположения ТСВ с учетом их собственной безопасности $W = (w_{123}, w_{211}, w_{322})$.

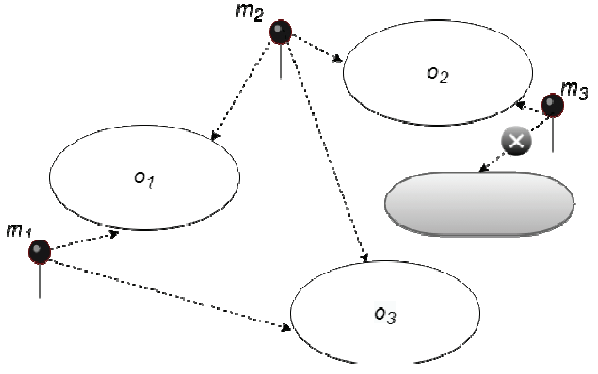

Рис. 1. Схема расположения элементов системы видеонаблюдения

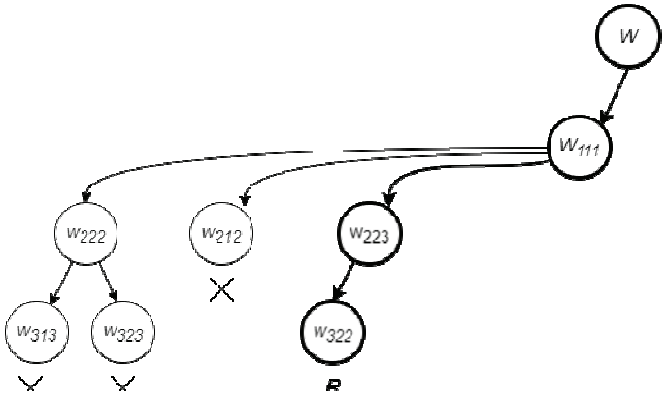

Рис. 2. Поиск первого решения

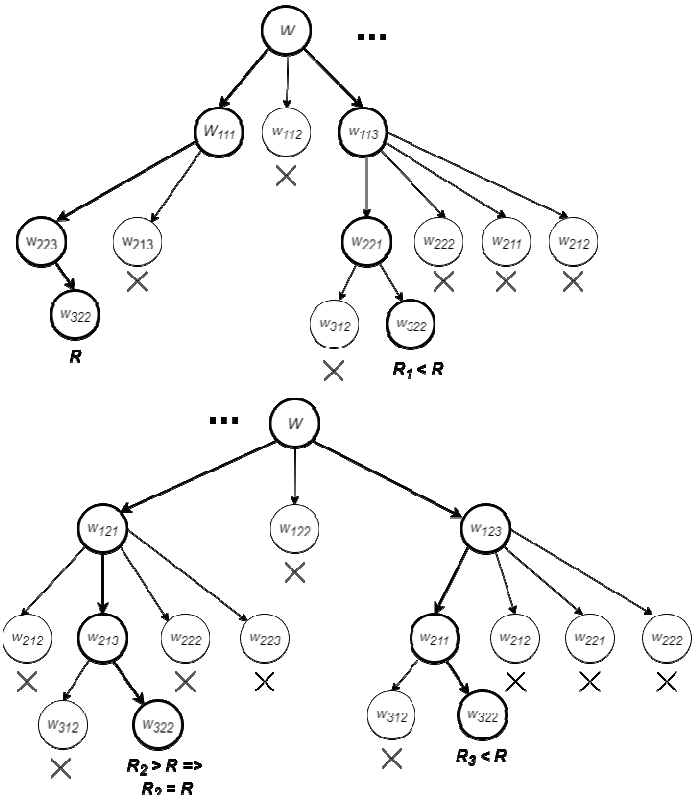

Рис. 3. Этапы обхода вершин дерева частичных решений

Заключение

В работе представлен численный метод оптимизации расположения ТСВ по охраняемым объектам с учетом их собственной безопасности. Предложенный метод основан на использовании схемы метода ветвей и границ, что позволяет с высокой эффективностью осуществлять поиск оптимального решения. Данный метод может быть применен для проектирования систем видеонаблюдения различных масштабов.

Список литературы

1. Математическое моделирование действий органов внутренних дел в чрезвычайных обстоятельствах : монография / В. В. Меньших, А. Ф. Самороковский, В. В. Горлов [и др.]. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2016. – 187 с.

2. Меньших, В. В. Моделирование информационных систем центров ситуационного управления : монография / В. В. Меньших, О. В. Пьянков, И. В. Щербакова. – Воронеж : Научная книга, 2010. – 127 с.

3. Орехов, П. В. Построение модели оптимизации размещения фоторадарных комплексов / П. В. Орехов, В. В. Меньших // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., 1 октября 2014 г., Воронеж. – Воронеж, 2014. – С. 138 – 144.

4. Белобородов, А. Обзор камер видеонаблюдения для промышленных объектов / А. Белобородов // RUБЕЖ : информационно-аналитический журнал. – 2017. – № 1. – С. 42 – 50.

5. Хонович, Д. Проектирование систем видеонаблюдения. – Текст : электронный / Д. Хонович // Компания «Телекамера». – URL : https://www.telecamera.pro/video/useful/articles/?ELEMENT_ID=13912 (дата обращения: 14.01.2021).

6. Menshikh, V. V. Model of Optimization of Arrangement of Video Surveillance Means with Regard to Ensuring their Own Security / V. V. Menshikh, D. Yu. Kalkov, N. E. Spiridonova // Proceedings 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 20 – 22 November, 2019, Lipetsk. – Lipetsk, 2020. – P. 4 – 7. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947617

7. Меньших, А. В. Модель и численный метод оптимизации выбора действий органов внутренних дел при возникновении чрезвычайных обстоятельств криминального характера / А. В. Меньших, В. В. Горлов // Вестн. Воронежского ин-та МВД России. – 2016. – № 2. – С. 213 – 221.

8. Zvereva, D. D. Optimization of Processes of Modernization and Operating Conditions of Infocommunication Networks / D. D. Zvereva, V. V. Menshikh, A. V. Seifer // Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference, 13 – 15 November, 2018, Chelyabinsk. – Chelyabinsk, 2018. – 6 p. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570087

A Numerical Method for Optimization of the Arrangement of Elements of a Video Surveillance System Taking into Account their Safety

V. V. Menshikh, N. E. Chirkova

Department of Mathematics and Systems Modeling, menshikh@list.ru;
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs Russian Federation,
Voronezh, Russia

Keywords: heterogeneous system; public safety; branch and boundary diagram; numerical optimization method.

Abstract: The article deals with the development of a numerical method for optimizing the arrangement of elements of a video surveillance system, taking into account their own safety. The necessity of using the branch and bound scheme in the development of this method is substantiated, which makes it possible to search for an optimal solution with high efficiency. Methods of forming a partial decision tree, evaluating partial solutions, traversing the vertices of a partial decision tree are determined. A numerical example of the implementation of the proposed method is shown.

References

1. Men'shikh V.V., Samorokovskiy A.F., Gorlov V.V. [et al.] *Matematicheskoye modelirovaniye deystviy organov vnutrennikh del v chrezvychaynykh obstoyatel'stvakh: monografiya* [Mathematical modeling of the actions of internal affairs bodies in emergency circumstances: monograph], Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2016, 187 p. (In Russ.)

2. Men'shikh V.V., P'yankov O.V., Shcherbakova I.V. *Modelirovaniye informatsionnykh sistem tsentrov situatsionnogo upravleniya: monografiya* [Modeling of information systems of situational management centers: monograph], Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010, 127 p. (In Russ.)

3. Orekhov P.V., Men'shikh V.V. *Obshchestvennaya bezopasnost', zakonnost' i pravoporyadok v III tysyacheletii* [Public safety, legality and law and order in the III millennium], Proceedings of the International Scientific-Practical Conference, 1 October, 2014, Voronezh, 2014, pp. 138-144. (In Russ.)

4. Beloborodov A. [Review of CCTV cameras for industrial facilities], *RUBEZH: informatsionno-analiticheskiy zhurnal* [RUBEZH: information and analytical journal], 2017, no. 1, pp. 42-50. (In Russ.)

5. https://www.telecamera.pro/video/useful/articles/?ELEMENT_ID=13912 (accessed 14 January 2021).

6. Menshikh V.V., Kalkov D.Yu., Spiridonova N.E. Model of Optimization of Arrangement of Video Surveillance Means with Regard to Ensuring their Own Security, Proceedings 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 20 - 22 November, 2019, Lipetsk, 2020, pp. 4-7, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947617 (In Russ.)

7. Men'shikh A.V., Gorlov V.V. [Model and numerical method for optimizing the choice of actions of the internal affairs bodies in the event of extraordinary circumstances of a criminal nature], *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2016, no. 2, pp. 213-221. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Zvereva D.D., Menshikh V.V., Seifer A.V. Optimization of Processes of Modernization and Operating Conditions of Infocommunication Networks, Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference, 13 - 15 November, 2018, Chelyabinsk, 2018, 6 p., doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570087 (In Russ.)

Numerische Methode zur Optimierung der Platzierung der Elemente des Überwachungssystems unter Berücksichtigung ihrer Sicherheit

Zusammenfassung: Es sind die Fragen der Entwicklung der numerischen Methode der Optimierung der Anordnung der Elemente des Systems der Videoüberwachung unter Berücksichtigung der Gewährleistung ihrer eigenen Sicherheit betrachtet. Die Notwendigkeit der Verwendung des Verzweigungsschemas und Schemas der Grenzen bei der Entwicklung dieser Methode ist begründet, was es ermöglicht, mit hoher Effizienz nach der optimalen Lösung zu suchen. Es sind Methoden zur Bildung eines Teilentscheidungsbaums, Bewertung von Teillösungen, Umgehung der Eckpunkte des Baums der Teilentscheidungen bestimmt. Ein numerisches Beispiel für die Implementierung des vorgeschlagenen Verfahrens ist gezeigt.

Méthode numérique d'optimisation du placement des éléments du système de surveillance en tenant compte de leur sécurité

Résumé: Sont envisagés les problèmes de la mise au point d'une méthode numérique pour adapter les éléments du système de vidéosurveillance à leur propre sécurité. Est justifiée l'utilisation du schéma des branches et des limites dans la conception de cette méthode, ce qui permet de trouver la meilleure solution. Est montré l'exemple numérique d'implémentation de la méthode proposée.

Авторы: ***Меньших Валерий Владимирович*** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования систем; ***Чиркова Наталья Евгеньевна*** – адъюнкт, ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: ***Алексеев Владимир Витальевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.