

УДК 004.932.2

П.В. Бабаян, М.Д. Ершов

АЛГОРИТМЫ УСТРАНЕНИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ ВИДЕНИЯ

Рассмотрена задача совмещения натурального и синтезированного изображений местности в бортовой системе комбинированного видения. Предложены алгоритмы оценивания рассогласования изображений. Данные алгоритмы основаны на многомасштабной обработке изображений и анализе последовательности кадров. Представлены результаты экспериментальных исследований предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: система комбинированного видения, геометрические преобразования, пирамида изображений, последовательность изображений.

Введение. Для обеспечения безопасности полетов и автоматизации процесса управления летательными аппаратами в современных условиях применяются специальные технические средства [1], такие как бортовые системы комбинированного видения.

Задача данных систем заключается в совмещении информации, поступающей от датчиков технического зрения, с информацией, заложенной в цифровых картах местности. При этом учитываются текущие навигационные параметры летательного аппарата.

Система комбинированного видения включает в себя следующие элементы.

1. Датчики технического зрения (оптические датчики различных диапазонов длин волн, радиолокаторы, лазерные радары и др.).
2. Навигационная подсистема.
3. База цифровых карт местности, соответствующих маршрутам полетов.
4. Экран для отображения результата работы – комбинированного изображения.

В результате работы системы комбинированного видения экипажу или системе управления летательного аппарата предоставляется возможность определить местоположение и характеристики важных топографических объектов и, что немаловажно, спрогнозировать полет в условиях недостаточной видимости.

Наличие геометрического рассогласования натурального и синтезированного изображений местности является одной из важнейших проблем при проектировании и эксплуатации систем комбинированного видения, и данная проблема недостаточно проработана [2]. **Целью работы** является разработка алгоритмов совмещения изображений с использованием корреляционно-экстремального подхода [3]. Рассматрива-

ется вычислительная сложность алгоритмов, а также возможность устранения грубых ошибок.

Проблема рассогласования изображений в системе комбинированного видения. Рассогласование натурального изображения местности с синтезированным изображением возникает из-за таких факторов, как ошибки в определении положения летательного аппарата в пространстве (географические координаты X , Y и высота H) и ошибки в определении ориентации летательного аппарата относительно его центра, то есть углов курса Cr , тангажа Tn и крена Kr . Отметим, что в любой момент времени ориентация оптического датчика относительно элементов конструкции летательного аппарата может быть определена с достаточно большой точностью, поэтому основная проблема заключается именно в погрешностях измерения навигационных параметров.

Среднеквадратическое отклонение ошибки измерения различных систем навигации при измерении географических координат составляет от 6 до 60 метров, а высоты – от 2 до 30 и более метров. Погрешность измерения углов ориентации летательного аппарата составляет от 0,1 до 0,7 градуса, а для некоторых систем погрешность достигает 1-2 градусов.

Пример телевизионного изображения местности, полученного при съемке с борта летательного аппарата, представлен на рисунке 1, а.

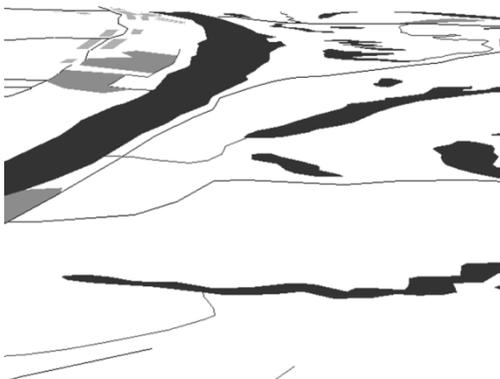
Изображение местности, синтезированное на основе цифровой карты в соответствии с измеренными навигационными параметрами, приведено на рисунке 1, б.

Результат совмещения приведенных исходных изображений (комбинированное изображение) показан на рисунке 1, в. Отметим присутствие значительного рассогласования изображений, ухудшающего восприятие закабинной об-

становки и мешающего верному распознаванию топографических объектов.



а



б



в

Рисунок 1 – Изображения местности: а – натурное; б – синтезированное; в – комбинированное

Общий подход к решению задачи. Подобная задача решается при дистанционном зондировании Земли – осуществляется координатная привязка изображений с использованием опорных точек и цифровых карт земной поверхности [4]. Однако специфика данной задачи позволяет не делать упор на вычислительную сложность алгоритмов ее решения, кроме того, при решении рассматриваются только аффинные преобразования изображений.

Рассмотрим особенности общего подхода к

решению задачи совмещения изображений в системе комбинированного видения. Непосредственное использование исходных изображений в алгоритме оценивания параметров рассогласования невозможно, так как телевизионное и синтезированное изображения разнородны и обладают различающимися яркостными характеристиками. Поэтому, чтобы воспользоваться корреляционно-экстремальным подходом, необходимо выделить особенности [5], характерные как для телевизионного, так и для синтезированного изображений. На роль таких особенностей подходят контуры протяженных топографических объектов, таких как дороги и береговые линии. С учетом этого подход к решению поставленной задачи в системе комбинированного видения состоит из следующих этапов.

1. Применение алгоритмов выделения границ [6] на телевизионном изображении с целью построения бинарного контурного изображения наблюдаемой местности.

2. Синтезирование контурных изображений местности с использованием цифровой карты для каждого ракурса (X, Y, H, Cr, Tn, Kr) в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} X_0 - \Delta x &\leq X \leq X_0 + \Delta x, \\ Y_0 - \Delta y &\leq Y \leq Y_0 + \Delta y, \\ H_0 - \Delta h &\leq H \leq H_0 + \Delta h, \\ Cr_0 - \Delta cr &\leq Cr \leq Cr_0 + \Delta cr, \\ Tn_0 - \Delta tn &\leq Tn \leq Tn_0 + \Delta tn, \\ Kr_0 - \Delta kr &\leq Kr \leq Kr_0 + \Delta kr, \end{aligned} \quad (1)$$

где $X_0, Y_0, H_0, Cr_0, Tn_0, Kr_0$ – текущие навигационные параметры, $\Delta x, \Delta y, \Delta h, \Delta cr, \Delta tn, \Delta kr$ – известные погрешности измерения соответствующих навигационных параметров.

3. Вычисление значения критериальной функции для каждой пары контурных изображений и определение ракурса, при котором было получено максимальное значение данной функции. На данном этапе используется классическая корреляционная функция [3], однако, так как рассматриваются бинарные изображения, функция принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} F(X, Y, H, \alpha, \beta, \varphi) &= \sum_{i=1}^{wz} \sum_{j=1}^{hz} B_s(i, j, X, Y, H) \& \\ &\& B_v(i - \alpha, j - \beta, \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где B_s – контурное изображение на основе цифровой карты, B_v – контурное изображение на основе натурального изображения, α и β – параметры смещения, φ – угол поворота, hz и wz – высота и ширина зоны поиска, $\&$ – операция логического умножения (конъюнкция).

Как можно заметить, в формуле (2) не используются углы ориентации Cr , Tn , Kr . Это связано с тем, что перебор шести параметров и синтезирование для каждого ракурса нового изображения местности требуют больших вычислительных затрат. Для преодоления этой проблемы могут использоваться алгоритмы оценивания параметров геометрических преобразований, позволяющие оценивать евклидовы преобразования изображений, то есть смещение (α , β) и поворот на угол φ .

В силу малых углов зрения и малых ошибок измерения углов ориентации летательного аппарата параметры α , β и φ будем считать пропорциональными величинам ошибок измерения углов курса Cr , тангажа Tn и крена Kr соответственно. Такой подход позволяет заменить сопоставление текущего изображения с набором изображений на основе цифровой карты местности, полученных при переборе всех проверяемых углов ориентации, на сопоставление с изображением, полученным для расширенного поля зрения. Поле зрения расширяется по вертикали и по горизонтали с учетом интервалов неопределенности углов тангажа и курса соответственно. Размер расширенного изображения по одной координате рассчитывается по формуле

$$S = \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \frac{S_0}{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_0}{2}\right)}, \quad (3)$$

где S – размер изображения при синтезировании, S_0 – размер изображения, формируемого оптическим датчиком, γ – поле зрения при синтезировании, γ_0 – поле зрения оптического датчика.

Применение пирамиды изображений. Существуют различные подходы, которые могут применяться при построении пирамиды изображений [7]. Пирамида Гаусса представляет изображение как набор изображений, прошедших через фильтр Гаусса, являющийся фильтром низких частот. Пирамида Лапласа раскладывает изображение на ряд с применением полосового фильтра, а ориентированная пирамида Лапласа применяется для представления изображения в разных ориентациях [8]. В рамках данной работы пирамида изображений используется для представления изображения в различных масштабах, для чего используется фильтр Гаусса.

Непрерывное снижение разрешения изображения по отношению к исходному изображению может быть достигнуто за счет сглаживания изображения путем свертки с гауссовым ядром

$$g(d) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где $d = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$ – расстояние от точки (x, y) до центральной точки (x_c, y_c) заданной окрестности, σ – параметр, меняющийся в зависимости от коэффициента масштаба. Такое последовательное сглаживание исходного изображения приводит к генерации набора изображений, подвергшихся низкочастотной фильтрации. Последовательно расположив полученные изображения, можно сформировать пирамиду Гаусса.

Использование пирамидальной структуры данных в работе алгоритма оценивания параметров геометрических преобразований изображений позволяет определять начальные приближения для обработки нижних уровней по результатам обработки верхних уровней. Таким образом, на каждом последующем уровне увеличивается масштаб изображения и производится уточнение результатов, полученных на предыдущем уровне. В то же время уменьшенный в несколько раз масштаб изображения на верхних уровнях пирамиды значительно сокращает количество обрабатываемых точек, что приводит к ускорению работы алгоритма корреляции.

На верхнем уровне пирамиды для оценки каждого навигационного параметра используется полный интервал допустимой ошибки. В результате получаем грубые оценки навигационных параметров, относительно которых на нижних уровнях производится уточнение, при этом интервалы поиска принимаются равными точности определения значения навигационного параметра на предыдущем уровне, то есть шагу, с которым производится перебор значений параметра. Это дает значительное сокращение количества расчетов критериальной функции с использованием полномасштабных изображений.

На рисунке 2 показан пример трехуровневой пирамиды, состоящей из бинарных контурных изображений.

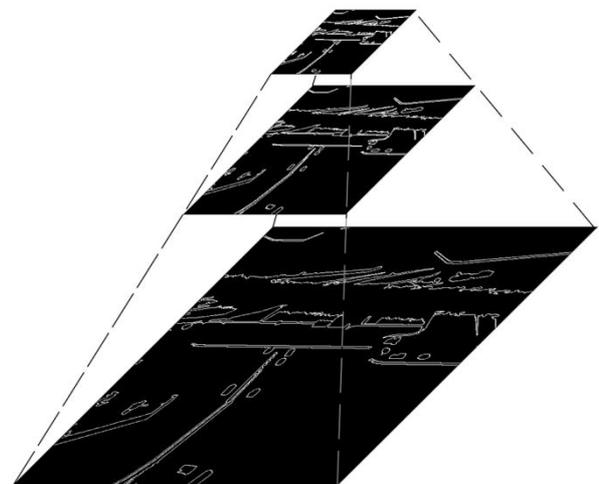


Рисунок 2 – Трехуровневая пирамида контурных изображений

Анализ последовательности кадров. При сопоставлении набора изображений с некоторым эталонным изображением могут возникать грубые ошибки, вызванные наличием нескольких фрагментов или особенностей текущего изображения, похожих на эталонное изображение. С целью исключения подобных ошибок предлагается использовать межкадровый алгоритм уточнения результатов измерений. Суть данного алгоритма заключается в том, что на заданном количестве кадров N запоминаются M измерений, среди которых с большой вероятностью содержится правильное. Измерения соответствуют максимумам взаимной корреляционной функции текущего и эталонного изображений. Затем производится поиск самой гладкой траектории движения между кадрами.

Данный подход предполагает улучшение алгоритма совмещения за счет использования данных о перемещении летательного аппарата, которые определяются на основе информации, поступающей с навигационной системы. Таким образом, если на текущем кадре с помощью алгоритма совмещения определено положение летательного аппарата, то на последующем кадре на основе этих данных, а также информации о перемещении летательного аппарата между кадрами можно оценить новое положение:

$$p_n = p_{n-1} + \Delta p, \quad (5)$$

где p – один из навигационных параметров, n – номер кадра, Δp – перемещение между кадрами.

Запомненные локальные максимумы корреляционной функции представляются вершинами графа, а расстояния между этими вершинами – весами ребер графа. Нахождение кратчайшего пути в графе позволяет определить самую гладкую траекторию движения и отсеять ложные максимумы. На рисунке 3 приведен пример графа для случая, когда на 3-х кадрах запоминаются по 3 максимума. Также для более точного определения траектории используется максимум с $n-3$ кадра.

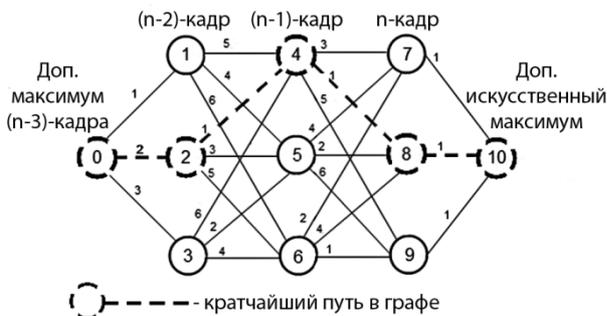


Рисунок 3 – Пример графа при работе алгоритма поиска наиболее гладкой траектории

Для определения наиболее гладкой траектории, проходящей через вершины графа, предлагается использовать алгоритм поиска кратчайшего пути на графе – алгоритм Дейкстры [9,10], который требует гораздо меньших вычислительных затрат, чем метод полного перебора. При увеличении числа вершин графа (за счет увеличения количества кадров и/или измерений) преимущество данного алгоритма проявляется в значительной степени.

Блок-схема алгоритма совмещения изображений в системе комбинированного видения, основанного на анализе последовательности кадров, приведена на рисунке 4.

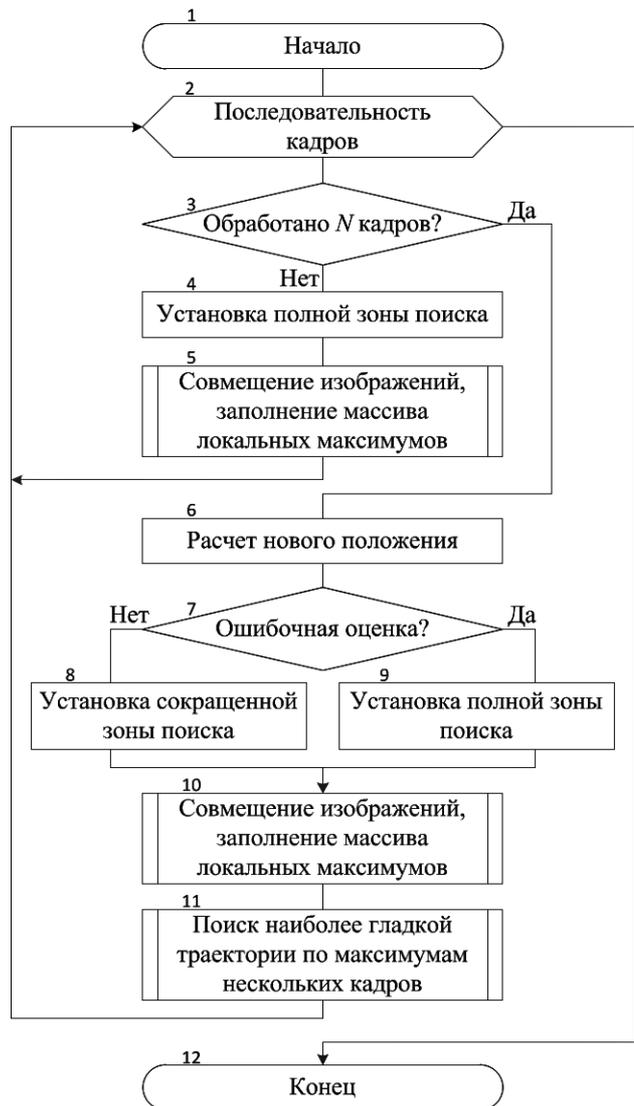


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма совмещения с применением анализа последовательности кадров

Полагается, что ошибки измерения навигационных параметров при рассмотрении близлежащих кадров имеют значительную статическую составляющую. Поэтому на последующих кадрах производится лишь дополнительное уточнение положения при сокращенных зонах поиска

навигационных параметров, что приводит к уменьшению вычислительных затрат.

На каждом новом кадре уточненный набор навигационных параметров проверяется на выход из допустимой зоны поиска, делается вывод об ошибочной оценке того или иного параметра. Если навигационный параметр оценен ошибочно, то используется текущее значение, полученное с навигационной системы летательного аппарата, при этом размер зоны поиска для этого параметра увеличивается.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований было разработано программное обеспечение, имеющее графический интерфейс пользователя, позволяющее загружать исходные данные и использовать их в работе исследуемых алгоритмов (в частности, генерировать модельные изображения на основе текущих навигационных параметров и карты местности).

Экспериментальные исследования проводились с использованием нескольких натуральных видеопоследовательностей, полученных при наблюдении с борта летательного аппарата, длиной от 1500 до 10000 кадров. Размер изображений в последовательностях равен 704×576 элементов разложения, поле зрения камеры – 20×16 градусов. К каждому изображению привязаны набор географических координат, высота полета, а также набор угловых параметров движения летательного аппарата. Данные о топографии, соответствующие заданным навигационным параметрам, формировались на основе нескольких цифровых карт местности.

В ходе выполнения экспериментальных исследований оценивались разработанные и программно реализованные алгоритмы устранения рассогласования изображений в системе комбинированного видения. Ниже представлены таблицы, в которых приведено сравнение предложенных подходов для разных точностей оценивания навигационных параметров.

В таблицах используются следующие обозначения алгоритмов:

A1 – полный перебор шести навигационных параметров;

A2 – с расширением поля зрения при синтезировании изображения местности;

A3 – соответствует A2 с применением двухуровневой пирамиды изображений;

A4 – соответствует A2 с применением трехуровневой пирамиды изображений;

A5 – соответствует A2 с применением анализа последовательности кадров.

В таблице 1 приведено сравнение времени, затрачиваемого на предобработку и совмещение

изображений при использовании разработанных подходов. Экспериментальные исследования выполнены для следующих интервалов оценки навигационных параметров:

– от -20 м до 20 м с шагом 10 м для координат X и Y ;

– от -10 м до 10 м с шагом 5 м для высоты H ;

– от -1° до 1° с шагом 1° для углов курса, тангажа и крена.

Таким образом, при переборе всех шести параметров при обработке одного кадра требуется выполнить 3375 операций синтеза изображения местности и расчета критериальной функции, а при использовании остальных алгоритмов – не более 125 итераций (перебор параметров X , Y , H).

Таблица 1 – Сравнение времени работы при шаге перебора углов, равном 1°

Алгоритм	Всего, с	Предобработка, с	Оценивание рассогласования, с
A1	647,9	644,6	3,3
A2	24,1	23,9	0,16
A3	23,9	23,8	0,1
A4	25,09	25	0,09
A5	5,15	5,1	0,05

Отметим, что синтезирование изображения местности является весьма затратной операцией и занимает почти все время, затрачиваемое на предобработку, но существуют программные средства, позволяющие сократить вычислительную сложность данной операции. Тем не менее, алгоритм на основе полного перебора заметно проигрывает другим алгоритмам даже при грубой оценке параметров рассогласования, поэтому в результатах дальнейших исследований, проведенных при увеличении точности поиска углов ориентации, алгоритм **A1** не отражен.

В таблице 2 приведены результаты для следующих интервалов оценки навигационных параметров:

– от -20 м до 20 м с шагом 10 м для координат X и Y ;

– от -10 м до 10 м с шагом 5 м для высоты H ;

– от -2° до 2° с шагом $0,125^\circ$ для углов курса, тангажа и крена.

Таблица 2 – Сравнение времени работы при шаге перебора углов, равном $0,125^\circ$

Алгоритм	Всего, с	Предобработка, с	Оценивание рассогласования, с
A2	105	23,9	81,1
A3	51,1	23,8	27,3
A4	44,6	25	19,6
A5	7,2	5,1	2,1

Из приведенных результатов исследований

можно сделать выводы, что разработанные алгоритмы устранения рассогласования изображений **A3**, **A4** и **A5** позволяют значительно повысить производительность системы комбинированного видения по сравнению с алгоритмом на основе полного перебора **A1** и базовым алгоритмом **A2**, в котором применяется только расширение поля зрения при синтезировании изображения.

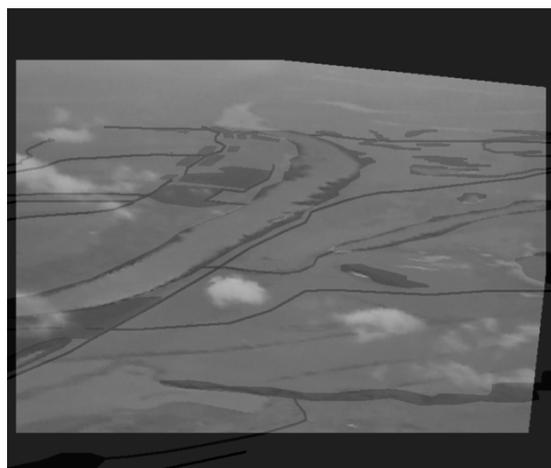
Использование пирамиды изображений позволяет добиться снижения временных затрат при увеличении точности оценивания параметров смещений и поворота, а также при увеличении зоны поиска данных параметров.

Анализ последовательности кадров позволил значительно снизить вычислительные затраты, и были исключены грубые ошибки. Число исправленных кадров составило примерно 5 % от общего числа кадров в последовательностях.

На рисунке 5 показан результат работы системы комбинированного видения с учетом найденных параметров рассогласования.



а



б

Рисунок 5 – Комбинированные изображения:
а – исходные параметры; б – результат устранения рассогласования

Заключение. В статье рассмотрена проблема рассогласования изображений в системе комбинированного видения летательного аппарата. Рассмотрен общий алгоритм решения задачи устранения рассогласования изображений. Предложены подходы к улучшению данного алгоритма, основанные на использовании пирамиды разномасштабных изображений и анализе последовательности кадров.

Работоспособность предложенных подходов подтверждена экспериментально. Проведенные исследования показали целесообразность использования в бортовых системах разработанных алгоритмов вместо исходного алгоритма. Кроме того, разработанные подходы позволяют исключить появление грубых ошибок при определении навигационных параметров летательного аппарата.

Исследования выполнены с использованием средств Гранта для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-252.2014.10).

Библиографический список

1. Алтатов Б.А., Муравьев В.С., Стротов В.В., Фельдман А.Б. Исследование эффективности применения алгоритмов анализа изображений в задаче навигации беспилотных летательных аппаратов // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 29-34.
2. Ygolonov O. Enhanced and synthetic vision systems development based on integrated modular avionics for civil aviation // Digital Avionics Systems Conference Proceedings. NY: IEEE, 2013. P. 1-34.
3. Алтатов Б.А., Бабаян П.В., Балашиов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
5. Стротов В.В. Сравнение двух структурных алгоритмов оценки параметров геометрических преобразований изображений // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 21-25.
6. Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
7. Lindeberg T. Scale-Space Theory in Computer Vision. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1994. 435 p.
8. Burt P.J., Shashua E.H. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code // IEEE Transactions on Communications. 1983. Vol. 31. Issue 4. P. 532-540.
9. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. 576 с.
10. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1. Issue 1. P. 269-271.