

УДК 51.74

М. В. Яшина, А. Г. Таташев, М. Ю. Фомина

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Аппроксимация корреляционной функции скорости транспортного средства по GPS/Glonass-данным

В настоящей работе разработан подход к анализу данных о перемещении автотранспортного средства, получаемых в результате измерений, которые проводятся с помощью спутниковой навигационной системы. При использовании предлагаемого подхода скорость автотранспортного средства рассматривается как стационарный случайный процесс, корреляционная функция которого принадлежит к одному из заданных классов. По результатам мониторинга выбирается значение параметра корреляционной функции, которое в определённом смысле наилучшим образом соответствует результатам измерений. Решается также задача в определённом смысле оптимального выбора длительности интервала усреднения получаемых в результате мониторинга значений скорости, при этом учитывается, насколько при выбранной длительности интервала усреднения выборочная полученная корреляционная функция скорости соответствует корреляционной функции из гипотетического класса при выбранном значении параметра.

Ключевые слова: спутниковые навигационные системы, мониторинг движения автомобиля, стационарный случайный процесс, статистический анализ, корреляционный анализ.

M. V. Yashina, A. G. Tatashev, M. Ju. Fomina

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Approximation of the vehicle speed correlation function using GPS/Glonass data

In this paper, we develop an approach to analyzing the data of the movement of vehicles obtained from measurements made by the satellite navigation system. When using the proposed approach, the vehicle speed is considered to be a stationary random process, the correlation function of which belongs to one of the specified classes. Based on the monitoring results, the value of the correlation function parameter is chosen, which, in a certain sense, best corresponds to the measurement results. We also solve the problem, in a certain sense, of the optimal choice of time averaging the resulting tracking of the speed value. In addition, we take into account that, for the chosen interval duration, the obtained correlation function of the velocity corresponds to the correlation function of the hypothetical class for the program.

Key words: satellite navigation systems, vehicle motion monitoring, stationary random process, statistical analysis, correlation analysis.

1. Введение

Мониторинг движения транспортных средств актуален для задач управления потоками, безопасности дорожного движения и корректной маршрутизации как помощь водителю. Задача состоит в том, чтобы повысить точность GPS/Glonass данных о скорости транспортного средства.

© Яшина М. В., Таташев А. Г., Фомина М. Ю., 2021

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2021

В настоящей работе разработан подход к описанию динамики скорости автотранспортного средства на основе анализа данных измерений скорости движущегося автотранспортного средства. Измерения проводились с использованием спутниковой навигационной системы. Принимается допущение о виде корреляционной функции случайного процесса, представляющего собой скорость транспортного средства, на котором проводились измерения. Выбирается значение параметра корреляционной функции, дающее наилучшее приближение и соответствие с эмпирической корреляционной функцией при различных интервалах усреднения.

Вопросы проведения мониторинга на автомагистралях рассматривались в работах [1]–[5]. В [1] изучались вопросы получения и анализа результатов и теории автотранспортных потоков, в том числе относящиеся к модели следования за лидером [6, 7]. В [8] рассматриваются вопросы оценки и повышения точности результатов измерений, в которых осуществляется наблюдение за движением транспортных средств с использованием спутниковых навигационных систем позиционирования.

В [1] описана информационная система, разработанная для сбора данных для анализа ошибки при передаче информации между транспортными средствами, движущимися по магистрали. Система состоит из сервера, располагающегося в облачной инфраструктуре и мобильных клиентов. Программа мобильного клиента предназначена для сбора информации об объекте, мониторинг которого проводится, и передачи собранной информации серверу, а также для получения контрольных сообщений. Между серверами и мобильными клиентами устанавливается двусторонняя связь. Имеется цепочка автомобилей, движущихся на заданном расстоянии друг от друга. На каждом автомобиле имеются смартфоны на переднем и заднем бамперах. Каждую секунду со смартфонов посылается информация о координатах и скорости. Передаваемый трек содержит информацию о широте и долготе устройства, времени, скорости, точности измерения, модели мобильного устройства и имени транспортного средства. По данным о координатах и вычисляется расстояние между автомобилями. Особое внимание уделяется изменению расстояния между автомобилями. Это изменение рассматривается как ошибка в передаче GPS-сигнала.

2. NMEA-протокол и методы глобального позиционирования

2.1. Спутниковые навигационные системы

Система GPS (**Global Positioning System**) создавалась для применения в военных целях. Она начала работать в конце 80-х — начале 90-х годов, однако до 2000 года искусственные ограничения на определение местоположения существенно сдерживали её возможности использования в гражданских целях. После отмены ограничений на точность определения координат ошибка снизилась со 100 до 20 м (в последних поколениях GPS-приемников при идеальных условиях ошибка не превышает 2 м). Такие условия позволили использовать систему для широкого круга общих и специальных задач: определение точного местоположения; навигация, движение по маршруту с привязкой к карте на основании реального местоположения; синхронизация времени.

Российский аналог GPS — **ГЛОНАСС** (глобальная навигационная спутниковая система) — была развернута в 1995 году, но в связи с недостаточным финансированием и малым сроком службы спутников она не получила широкого распространения. Вторым рождением системы можно считать 2001 год, когда была принята целевая программа её развития, благодаря которой ГЛОНАСС возобновил полноценную работу в 2010 году. Сегодня на орбите работают 24 спутника ГЛОНАСС. Новейшие потребительские устройства используют GPS и ГЛОНАСС как взаимодополняющие системы, подключаясь к ближайшим найденным спутникам, это значительно увеличивает скорость и точность их работы. Сейчас на стадии разработки находятся ещё две спутниковые системы: европейская Galileo и китайская Compass.

Галилео — совместный проект Европейского союза и Европейского космического агентства, анонсированный в 2002 году. Изначально рассчитывали, что уже в 2010 году в рамках этой системы на средней околоземной орбите будут работать 30 спутников. Но этот план не был реализован в срок. Galileo введен в эксплуатацию в 2014 году. Однако полноценное использование системы начнется не ранее 2020 года.

Compass — это следующая ступень развития китайской региональной навигационной системы Beidou, которая была введена в эксплуатацию после запуска 10 спутников в конце 2011 года. Сейчас она обеспечивает покрытие в границах Азии и Тихоокеанского региона, но, как ожидается, к 2020 году система станет глобальной.

Поддержка технологии глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в электронных устройствах реализуется на базе навигационных приемников, которые могут быть выполнены в различных вариантах:

- Smart Antenna — модуль, состоящий из керамической антенны и навигационного приемника. Преимущества: компактность, не требует согласования, удешевляет разработку за счет сокращения сроков.
- MCM (Multi Chip Module) — чип, включающий все компоненты навигационного приемника.
- OEM — экранированная плата, включающая ВЧ интерфейсный процессор и процессор частот основной полосы (RF-frontend + baseband), SAW-фильтры и обвязку. Это наиболее популярное решение на данный момент. Навигационный модуль подключается к микроконтроллеру или системе на кристалле по интерфейсу UART/RS-232 или USB.

Стабилизация сигнала. Прежде чем навигационный приемник сможет выдавать информацию о местоположении, он должен обладать тремя наборами данных:

- 1) Сигналы от спутников.
- 2) Альманах — информация о приблизительных параметрах орбит всех спутников, а также данные для калибровки часов и характеристики ионосферы.
- 3) Эфемериды — точные данные параметров орбит и часов каждого спутника.

NMEA протоколы GPS

Интерфейс обмена данными большинства портативных GPS-приемников реализован по текстовому протоколу **NMEA-0183**. Этот NMEA-протокол описывает не только данные, полученные с GPS-приемников, но и измерения сонаров, радаров, электронных компасов, барометров и других навигационных устройств, использующихся на морских судах. Эти данные содержат полные навигационные измерения GPS-приемника — позицию, скорость и время.

Все NMEA-сообщения состоят из последовательного набора данных, разделенных запятыми. Каждое отдельное сообщение не зависит от других и является полностью «завершенным». NMEA-сообщение включает заголовок, набор данных, представленных ASCII-символами, и поле «чексуммы» для проверки достоверности переданной информации. Заголовок стандартных NMEA-сообщений состоит из 5 символов, из которых два первых определяют тип сообщения, а оставшиеся три — его название.

Каждое NMEA-сообщение начинается с \$, заканчивается \n («перевод строки») и не может быть длиннее 80-ти символов. Все данные содержатся в одной строке и отделены друг от друга запятыми. Информация представлена в виде ASCII-текста и не требует специального декодирования. Если данные не уместятся в выделенные 80 символов, то они «разбиваются» на несколько NMEA-сообщений. Такой формат позволяет не ограничивать

точность и количество символов в отдельных полях данных. В конце каждого NMEA-сообщения содержится поле «чексуммы», отделенное от данных символом *. При необходимости оно может использоваться для проверки целостности и достоверности каждого принятого сообщения.

NMEA-протокол описывает большой список различных сообщений, из которых можно выделить два десятка сообщений, активно использующихся в навигационной аппаратуре. В связи с большой популярностью и простотой представления данных NMEA-протокол нашел применение не только для морской аппаратуры, но и в геодезических, бытовых и авиационных GPS-приемниках.

Точность определения местоположения по GPS

Для выполнения навигационной задачи модуль должен одновременно принимать сигналы от нескольких спутников, т.е. иметь несколько **приемных каналов**. На сегодняшний день это число лежит в диапазоне от 12 до 88. Точность определения местоположения по GPS составляет в среднем 15 м, она обусловлена используемым неточным сигналом, влиянием атмосферы на распространение радиосигнала, качеством кварцевых генераторов в приемниках и пр. Но с помощью корректирующих методов возможно улучшить точность определения местоположения. Эта технология называется **Differential GPS**. Существует два метода коррекции: наземный и спутниковый DGPS.

В наземных методах коррекции наземные станции дифференциальных поправок постоянно сверяют свое заведомо известное местоположение и сигналы от навигационных спутников. На базе этой информации вычисляются корректирующие величины, которые могут быть переданы с помощью УКВ- или ДВ-передатчика на мобильные DGPS-приемники в формате **RTCM**. На основании полученной информации потребитель может корректировать процесс определения собственного местоположения. Точность этого метода составляет 1–3 метра и зависит от расстояния до передатчика корректирующей информации и качества сигнала.

Одним из основных параметров, влияющих на точность определения местоположения и стабильность приема, является **чувствительность**. Она, как правило, определяется качеством малошумящего усилителя на входе приемника и сложностью реализованных алгоритмов цифровой обработки. Типовые значения современных приемников лежат в диапазоне 143 дБм для поиска и 160 дБм для слежения.

Кроме определения местоположения ГНСС предоставляют информацию о точном времени. Как правило, все приемники имеют выход **PPS** (pulse per second, импульсов в секунду) — секундная метка (1 Гц), которая точно синхронизирована с временной шкалой UTC.

3. Метод аппроксимация корреляционной функции скорости

В настоящем разделе разработан алгоритм анализа изменения скорости автотранспортного средства на коротком участке магистрали с использованием данных, полученных в результате измерений, проводившихся на магистрали. Процесс изменения скорости на участке магистрали характеризуется стационарным случайным процессом, математическое ожидание и корреляционная функция которого оцениваются на основе данных измерений, проводившихся с помощью датчика GPS.

3.1. Описание эксперимента

В качестве входных данных для расчётов, проводимых в соответствии с разработанным алгоритмом, который будет описан в разделе 3, использовались результаты измерений, проведённых 20 февраля 2019 г. на Ленинградском проспекте г. Москвы. Маршрут, на котором производились измерения: Ленинградский пр-т, 55 — Ленинградский пр-т, 39.

В одном автобусе была произведена запись GPS треков с двух устройств, находящихся на расстоянии примерно 4 м друг от друга. Измерения проводились с 14 ч. 26 м. на протяжении промежутка времени длительностью 283 сек. Модель первого устройства: Xiaomi Redmi Note 4. Модель второго устройства: Xiaomi Mi A1. Каждую секунду записывались значения координат местоположения и скорости автобуса.

3.2. Оценка математического ожидания и корреляционной функции скорости

Предположим, что в результате измерений получено n значений скорости автотранспортного средства v_1, v_2, \dots, v_n . Считаем, что скорость $v(t)$ на отрезке времени $(0, T]$, на котором проводятся измерения, представляет собой стационарный случайный процесс [9]. Значения скорости фиксируются в моменты времени $i\Delta$, $i = 1, \dots, T = n\Delta$, где Δ — длительность интервала времени, через который регистрируются получаемые в результате измерений значения скорости. Пусть v_i — полученное в результате измерения значение скорости в момент времени $i\Delta$, $i = 1, \dots, n$. Пусть m, D — выборочные значения математического ожидания и дисперсии скорости; $k(\tau), \rho(\tau)$ — выборочные значения соответственно корреляционной функции и нормированной корреляционной функции при значении аргумента, равном τ . Для выборочного среднего значения имеем

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i.$$

Для того чтобы сгладить колебания значений скорости, получаемых в результате измерений, будем усреднять значения скорости по промежуткам времени длительностью $a\Delta$ (размер интервала группировки в терминологии общей теории статистики [10]). Исходная выборка v_1, \dots, v_n заменяется на выборку

$$v_i(a) = \frac{1}{a} \sum_{j=(i-1)a+1}^{ia} v_j, \quad i = 1, \dots, \left[\frac{n}{a} \right],$$

где квадратные скобки означают целую часть числа.

Пусть $k^*(l, a)$ — оцениваемое по результатам измерений значение корреляционной функции $k(\tau)$ при значении аргумента, равном $\tau = la\Delta$, где l — целое неотрицательное число, $0 \leq l < \left[\frac{n}{a} \right]$, в предположении, что оценка производится при интервале усреднения длительностью $a\Delta$.

Для соответствующих оценок имеем

$$k^*(l, a) = \frac{1}{\left[\frac{n}{a} \right] - l} \sum_{i=1}^{\left[\frac{n}{a} \right] - l} (v_i(a) - m)(v_{i+l}(a) - m)$$

(здесь корреляционная функция скорости оценивается усреднением по произведениям отклонений скорости от выборочного среднего на интервалах $((i-1)a\Delta, ia\Delta)$ и $((i+l-1)a\Delta, (i+l)a\Delta)$ при интервале усреднения, равном $a\Delta$; число таких пар интервалов равно $\left[\frac{n}{a} \right] - l$, так как последней такой парой, принадлежащей всему интервалу измерений, является пара $((\left[\frac{n}{a} \right] - l - 1)a\Delta, (\left[\frac{n}{a} \right] - l)a\Delta)$ и $((\left[\frac{n}{a} \right] - 1)a\Delta, \left[\frac{n}{a} \right]a\Delta)$),

$$D(a) = k(0, a),$$

$$\rho^*(l, a) = \frac{k^*(l, a)}{D(a)}.$$

3.3. Оценка параметра корреляционной функции скорости в предположении, что корреляционная функция принадлежит заданному классу

Сделаем допущение, что нормированная корреляционная функция скорости принадлежит одному из следующих классов:

$$\rho(\tau, \beta) = e^{-\beta\tau^2},$$

$$\rho(\tau, \beta) = e^{-\beta|\tau|},$$

$$\rho(\tau, \beta) = e^{-\beta|\tau|}(1 + \beta|\tau|).$$

При заданном классе и заданных значениях β и a средняя квадратическая погрешность приближения $F(\beta, a)$ вычисляется по формуле

$$F(\beta, a) = \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{n}{2a}\right]} \sum_{i=1}^{\left[\frac{n}{2a}\right]} (\rho^*(i, a) - \rho(ia\Delta))^2}. \quad (1)$$

Будем подбирать оптимальный параметр β для каждого класса ρ_1, ρ_2, ρ_3 методом наименьших квадратов. Критерий оптимальности — средняя квадратическая погрешность приближения $F(\beta, a)$, вычисляемая по формуле (1) для каждой пары a и β . Результаты подбора сведены в табл. 1. Ввиду того, что класс $\rho_1(\tau, \beta)$ плохо аппроксимирует эмпирическую нормированную корреляционную функцию ρ^* (здесь $F(\beta, a) > 0.5$ для $\forall \beta, a$), результаты для данного класса опускаются.

Т а б л и ц а 1

Средняя квадратичная оценка погрешности для двух классов функций при различных значениях a, β

| a | $\rho_2(\tau, \beta)$ | | $\rho_3(\tau, \beta)$ | |
|-----|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | β | $F(\beta, a)$ | β | $F(\beta, a)$ |
| 2 | 0.0359 | 0.0213 | 0.0764 | 0.0716 |
| 3 | 0.0355 | 0.0205 | 0.0831 | 0.0657 |
| 4 | 0.0350 | 0.0204 | 0.0821 | 0.0638 |
| 5 | 0.0345 | 0.0207 | 0.0813 | 0.0605 |
| 6 | 0,0342 | 0.0215 | 0.0833 | 0.0507 |
| 7 | 0.0343 | 0.0245 | 0.0845 | 0.0446 |
| 8 | 0.0334 | 0.0183 | 0.0800 | 0.0550 |
| 9 | 0.0332 | 0.0167 | 0.0825 | 0.0441 |
| 10 | 0.0320 | 0.0188 | 0.0780 | 0.0378 |

По результатам оценки погрешности для двух классов функций, можно заключить, что класс $\rho_2(\tau, \beta)$ аппроксимирует эмпирическую корреляционную функцию ρ^* с лучшим приближением.

При выборе оптимального интервала усреднения значений скорости помимо оценки погрешности следует учитывать количество точек на исследуемом временной отрезке, так как выбор большого интервала усреднения приводит к потере информации о динамике скорости автотранспортного средства, рис. 1. Таким образом, несмотря на меньшую погрешность при $a = 9$, предпочтительней выбрать интервал усреднения, равный четырём секундам, т.к. исследуемый временной отрезок достаточно мал и составляет всего 40 с.

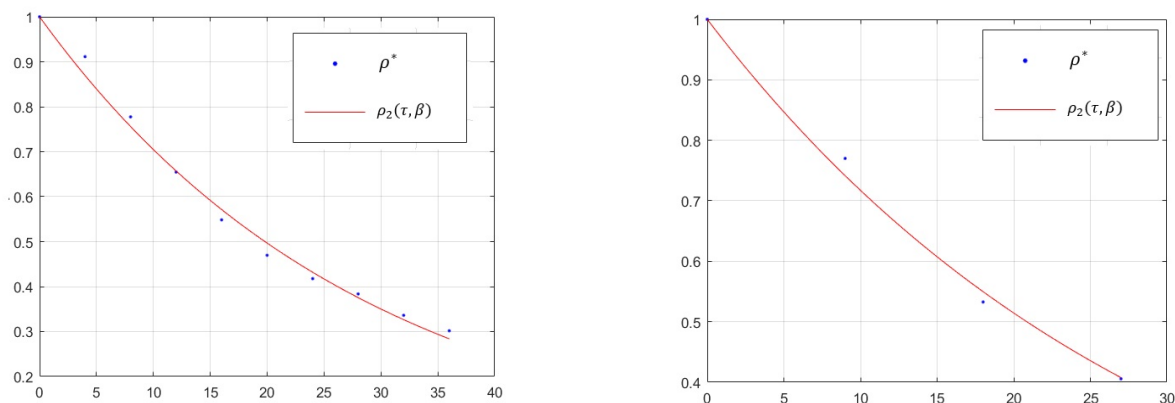


Рис. 1. Аппроксимация ρ^* при интервалах $a = 4$ и $a = 9$ соответственно

4. Заключение

Предположим, что имеются данные о координатах точек нахождения автотранспортного средства в последовательные равностоящие моменты времени. Например, значения координаты фиксировались с помощью спутниковой навигационной системы через интервалы времени длительностью 1 с. По этим значениям координаты определяются значения скорости данного автотранспортного средства в секундных интервалах. Из-за колебаний погрешности в определении значения координаты полученные значения скорости будут скачкообразно изменяться. Эти колебания можно сгладить, усредняя получаемые значения скорости, объединяя соседние интервалы большей длительности. Получаемые в результате усреднения значения скорости более точно аппроксимируют реальную динамику скорости автотранспортного средства. В настоящей работе разработан подход к выбору интервала усреднения, в соответствии с которым эмпирическая корреляционная функция скорости должна хорошо аппроксимироваться корреляционной функцией из гипотетического класса при соответствующим образом выбранном значении параметра.

Литература

1. *Yashina M.V., Dotkulova A.S., Susoev N.P., Fomina M.J.* Incommunication measurements for model validation of the follow-the leader model // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2019. P. 1–7.
2. *Буслаев А.П., Городничев М.Г., Яшина М.В.* Интеллектуальные системы: SSHD-мониторинг многополосного движения и автоматическая обработка информации о трафике: учебное пособие. Москва : МТУСИ, 2012. С. 100.
3. *Buslaev A.P., Yashina M.V., Volkov M.M.* Algorithmic and software aspects of information system implementation for road maintenance management // International Conference on Dependability and Complex Systems. 2015. P. 65–74.
4. *Volkov M.M., Yashina M.V.* Modern information and communication approaches to traffic monitoring // Recent advances in mathematics. Proceedings of the 2015 International Conference on Pure Mathematics, Applied Mathematics and Computational Methods. 2015. P. 167–169.
5. *Buslaev D.A., Yashina M.V., Tatashev A.G., Susoev N.P.* Algorithm for Improving of Geo-Location Accuracy in Distributed Monitoring Mobile Systems of Traffic Flow Characteristics // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. P. 1–6.

6. *Greenshilds D.B.* A study in highway capacity // Proceed. Highway Research Board. 1934. V. 14. P. 448–477.
7. *Treiber M., Hennecke A., Helbing D.* Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations // Physical review E. 2000. V. 62, N 2. P. 1805–1824.
8. *Haigen Min, Xin Wu, Chaoyi Cheng, Xiangmo Zhao.* Kinematic and dynamical vehicle model-assisted global positioning method for autonomous vehicles with low-cost GPS/camera/in-vehicle sensors // Sensors. 2019. V. 19. P. 5430.
9. *Розанов Ю.А.* Введение в теорию случайных процессов. Москва : Наука, 1982. 128 с.
10. *Елисеева И.И., Юзбашев М.М.* Общая теория статистики. 5-е изд. Москва : Финансы и статистика, 2006. 656 с.

References

1. *Yashina M.V., Dotkulova A.S., Susoev N.P., Fomina M.J.* Incommunication measurements for model validation of the follow-the leader model. 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2019. P. 1–7.
2. *Buslaev A.P., Gorodnichev M.G., Yashina M.V.* Интеллектуальные системы: SSHD-мониторинг многополосного движения и автоматическая обработка информации о трафике. Учебное пособие. Moscow : MTUSI, 2012. P. 100. (in Russian).
3. *Buslaev A.P., Yashina M.V., Volkov M.M.* Algorithmic and software aspects of information system implementation for road maintenance management. International Conference on Dependability and Complex Systems. 2015. P. 65–74.
4. *Volkov M.M., Yashina M.V.* Modern information and communication approaches to traffic monitoring. Recent advances in mathematics. Proceedings of the 2015 International Conference on Pure Mathematics, Applied Mathematics and Computational Methods. 2015. P. 167–169.
5. *Buslaev D.A., Yashina M.V., Tatashev A.G., Susoev N.P.* Algorithm for Improving of Geo-Location Accuracy in Distributed Monitoring Mobile Systems of Traffic Flow Characteristics. 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. P. 1–6.
6. *Greenshilds D.B.* A study in highway capacity. Proceed. Highway Research Board. 1934. V. 14. P. 448–477.
7. *Treiber M., Hennecke A., Helbing D.* Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Physical review E. 2000. V. 62, N 2. P. 1805–1824.
8. *Haigen Min, Xin Wu, Chaoyi Cheng, Xiangmo Zhao.* Kinematic and dynamical vehicle model-assisted global positioning method for autonomous vehicles with low-cost GPS/camera/in-vehicle sensors. Sensors. 2019. V. 19. P. 5430.
9. *Rozanov Yu.A.* Введение в теорию случайных процессов. Moscow : Наука, 1982. P. 128. (in Russian).
10. *Eliseeva I.I., YUzbashev M.M.* Общечая теория статистики. 5-е изд. Moscow : Финансы и статистика, 2006. P. 656. (in Russian).

Поступила в редакцию 09.11.2020