

Исаев Р.А.

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКОЙ КОГНИТИВНОЙ МОДЕЛИ

АННОТАЦИЯ

Предложена модификация метода парных сравнений Саати, основанная на использовании альтернативной шкалы оценки превосходства. Выявлены и продемонстрированы преимущества альтернативной шкалы перед классической шкалой в контексте задачи назначения весов нечетких когнитивных карт. Для предложенной шкалы рассчитан случайный индекс согласованности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Нечеткие когнитивные модели; нечеткие когнитивные карты; метод парных сравнений.

Isaev R.A.

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

MODIFIED PAIRWISE COMPARISON METHOD FOR EXPERT ESTIMATION OF A FUZZY COGNITIVE MODEL PARAMETERS

ABSTRACT

This paper proposes the modification of the Saaty's pairwise comparison method based on the use of alternative scale of superiority. We demonstrate advantages of alternative scale over the classical scale in the context of assigning weights for fuzzy cognitive maps. We also present the random consistency index for that scale.

KEYWORDS

Fuzzy cognitive models; fuzzy cognitive maps; pairwise comparison method.

Введение

Одним из подходов к моделированию слабоструктурированных систем, широко применяемым в настоящее время, является когнитивный подход. В соответствии с определением, приведенным в [1], данный подход ориентирован на разработку формальных моделей и методов, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем благодаря учету в этих моделях и методах когнитивных возможностей (восприятие, представление, познание, понимание, объяснение) человека при решении управленческих задач. В качестве основного инструмента исследования систем, применяемого в рамках когнитивного подхода, выступают так называемые когнитивные модели.

Когнитивные модели и нечеткие когнитивные модели: основные понятия

В общем случае когнитивная модель основана на формализации причинно-следственных связей, которые имеют место между факторами, характеризующими исследуемую систему. Результатом формализации является представление системы в виде причинно-следственной сети, называемой когнитивной картой и имеющей вид:

$$G = \langle E, W \rangle,$$

где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – множество факторов (называемых также концептами), W – бинарное отношение на множестве E , которое задает набор связей между его элементами. Данная причинно-следственная сеть называется когнитивной картой моделируемой системы.

Элементы e_i и e_j считаются связанными отношением W (обозначается $(e_i, e_j) \in W$ или $e_i W e_j$), если изменение значения концепта e_i (причины) приводит к изменению значения концепта e_j (следствия). В соответствии с терминологией когнитивного моделирования, в этом случае

говорят, что концепт e_i оказывает влияние на концепт e_j . При этом если увеличение значения переменной состояния концепта-причины приводит к увеличению значения переменной состояния концепта-следствия, то влияние считается положительным («усиление»), если же значение уменьшается – отрицательным («торможение»). Тем самым, отношение W можно представить в виде объединения двух непересекающихся подмножеств $W = W^+ \cup W^-$, где W^+ – множество положительных, а W^- – множество отрицательных связей. Сами концепты при этом могут задавать как относительные (качественные) показатели, такие как популярность, социальная напряженность, так и абсолютные, измеримые величины – численность населения, стоимость и т.п.

Развитием классического понятия когнитивной карты является понятие нечеткой когнитивной карты Силова [6], основанное на весьма естественном предположении о том, что взаимовлияния между концептами могут различаться по интенсивности, и кроме того, интенсивность любого влияния может изменяться с течением времени. Для учета данного обстоятельства вводится показатель интенсивности влияния, и от «обычного» (классического) отношения мы переходим к нечеткому отношению W , элементы w_{ij} которого характеризуют направление и степень интенсивности (вес) влияния между концептами e_i и e_j :

$$w_{ij} = w(e_i, e_j),$$

где w – нормированный показатель интенсивности влияния (характеристическая функция отношения W), обладающий следующими свойствами:

- а) $-1 \leq w_{ij} \leq 1$;
- б) $w_{ij} = 0$, если e_i не зависит от e_j (влияние отсутствует);
- в) $w_{ij} = 1$ при максимальном положительном влиянии e_i на e_j , т.е. когда любая реализация изменений в системе, связанных с концептом e_j , однозначно определяется действиями, связанными с концептом e_i ;
- г) $w_{ij} = -1$ при максимальном отрицательном влиянии, т.е. когда любая реализация изменений, связанных с концептом e_j , однозначно сдерживается действиями, связанными с концептом e_i ;
- д) w_{ij} принимает значение из интервала $(-1, 1)$ при промежуточной степени положительного или отрицательного влияния.

Легко видеть, что нечеткая когнитивная карта допускает весьма наглядное представление в виде взвешенного ориентированного графа, вершины которого соответствуют элементам множества E (концептам), а дуги – ненулевым элементам отношения W (причинно-следственным связям). Каждая дуга имеет вес, задаваемый соответствующим значением w_{ij} . Само отношение W представимо в виде матрицы размерности $n \times n$ (где n – число концептов в системе), которая может рассматриваться как матрица смежности данного графа и называется когнитивной матрицей.

Процесс когнитивного моделирования начинается с построения когнитивной карты исследуемой системы на основе информации, получаемой от экспертов. На следующем этапе происходит непосредственно моделирование, основными целями которого являются формирование и проверка гипотез о структуре исследуемой системы, позволяющих объяснить ее поведение, а также выработка стратегий поведения в той или иной ситуации с целью достижения заданных целевых состояний.

Задачи, решаемые с помощью когнитивного моделирования, можно разделить на две группы:

1. Задачи структурно-целевого анализа:
 - нахождение факторов, оказывающих наиболее значимое влияние на целевые;
 - выявление противоречий между целями;
 - выявление циклов обратной связи.
2. Задачи динамического анализа (сценарного моделирования):
 - саморазвитие («что будет, если ничего не делать?»);
 - управляемое развитие:
 - прямая задача («что будет, если ...?»);
 - обратная задача («как сделать, чтобы ...?»).

В частности, с помощью сценарного моделирования можно осуществлять поиск альтернативных решений по приведению моделируемой системы в целевое состояние. Целевое состояние описывается набором значений целевых факторов, а альтернативное решение представляет собой набор допустимых воздействий на управляемые факторы.

Одним из наиболее важных и при этом наиболее сложных этапов в процессе построения нечеткой когнитивной карты является так называемая параметрическая идентификация, т.е. определение весов связей (интенсивностей влияния) между концептами.

Некоторые концепты могут задавать количественные параметры исследуемой системы, и, следовательно, иметь числовые переменные состояния. Если при этом имеется статистическая информация о значениях этих переменных, то эту информацию можно использовать для идентификации весов связей между такими концептами. Таким образом, для идентификации параметров нечеткой когнитивной карты можно использовать статистические методы. Один из таких методов, основанный на применении модели множественной регрессии, предложен в работе [4].

В условиях отсутствия статистических данных основным источником информации при построении карты являются эксперты, и для параметрической идентификации применяются экспертные методы, которые делятся на прямые и косвенные. Прямые методы предполагают непосредственное (явное) задание весов экспертом. Косвенные методы используются для снижения влияния субъективизма при задании весов, и в их основе лежит разбиение общей задачи определения весов на ряд более простых подзадач. Примерами косвенных методов являются метод парных сравнений Саати, метод множеств уровня Ягера и метод Черчмена-Акоффа. Описание этих методов применительно к задаче определения весов нечеткой когнитивной карты можно найти в монографии [2]. В данной работе предлагается модификация метода парных сравнений, основанная на использовании альтернативной шкалы оценки превосходства.

Метод парных сравнений как способ назначения весов НКК

В методе парных сравнений [5] эксперт должен попарно рассмотреть для выбранного концепта все непосредственно связанные с ним концепты (при этом рассматриваются отдельно концепты, влияющие на данный, и концепты, испытывающие влияние со стороны данного). В каждой паре требуется определить концепт, связь с которым имеет больший вес. Таким образом формируется матрица D , называемая матрицей парных сравнений, где d_{ij} показывает, насколько влияние на концепт (со стороны концепта) e_i сильнее влияния на концепт (со стороны концепта) e_j . Матрица парных сравнений обладает следующими свойствами: $d_{ii} = 1$ и $d_{ij} = 1/d_{ji}$.

Полученная матрица проверяется на согласованность. Для этого вычисляются индекс согласованности CI и отношение согласованности CR :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad CR = \frac{CI}{CIS},$$

где CIS – среднее значение согласованности как случайной величины, полученное экспериментальным путем, λ_{\max} – наибольшее собственное число матрицы. Значения $CR > 0,1$, как правило, дают основания сделать вывод о несогласованности матрицы D , и эксперту предлагается скорректировать свои оценки.

Искомый вектор весов связей W определяется как собственный вектор матрицы D при наибольшем собственном числе λ_{\max} :

$$DW = \lambda_{\max} W.$$

Последний этап вычислений – нормализация данного вектора путем деления на максимальный элемент и его умножение на коэффициент силы связей.

Альтернативная шкала оценки степеней превосходства

В дополнение к классической шкале для оценки степеней превосходства в методе парных сравнений можно предложить альтернативную шкалу, содержащую дробные значения (табл. 1).

Таблица 1. Значения классической и альтернативной шкал

Словесное описание	Классическая шкала	Альтернативная шкала
Равное влияние	1	9/9
Совсем незначительное превосходство	2	9/8
Незначительное превосходство	3	9/7
Почти значительное превосходство	4	9/6
Значительное превосходство	5	9/5

Почти явное превосходство	6	9/4
Явное превосходство	7	9/3
Почти абсолютное превосходство	8	9/2
Абсолютное превосходство	9	9/1

Рассмотрим преимущества предлагаемой шкалы перед классической шкалой в контексте задачи назначения весов НКК.

Одним из таких преимуществ является более высокая чувствительность альтернативной шкалы при оценивании невысоких степеней превосходства одного влияния над другим. Взамен, однако, теряется чувствительность при оценивании очень высоких степеней превосходства. Таким образом, перед проведением каждой процедуры парных сравнений следует определять, что в данном случае актуальнее, и на основании этого выбирать тип шкалы. Далее приведены примеры процедур парных сравнений с использованием обеих шкал, которые демонстрируют, что использование альтернативной шкалы обеспечивает более тонкую настройку небольших степеней различия весов.

Пусть при сравнении двух влияний необходимо выразить минимальную (из возможных в данной шкале) степень превосходства одного влияния над другим. В условиях классической шкалы получаем результат, представленный на рис. 1 (здесь и далее приведены снимки экрана при работе с системой поддержки принятия решений «ИГЛА» [3]).

Матрица парных сравнений для концепта

	1	2	Вес связи
▶ 1	1	2	0,9
2	1/2	1	0,45

Кoeffициент силы связей: 0,90

Сравнение пары связей:

Сила связи с концептом "Концепт 1" совсем незначительно превосходит силу связи с концептом "Концепт 2"

Кoeffициент согласия: 0

Суждения согласованы

Концепт обработан

Рис. 1. Задание весов двух связей с использованием классической шкалы

Используя альтернативную шкалу, получаем более адекватные оценки (рис. 2).

Матрица парных сравнений для концепта

	1	2	Вес связи
▶ 1	1	9/8	0,9
2	8/9	1	0,8

Кoeffициент силы связей: 0,90

Сравнение пары связей:

Сила связи с концептом "Концепт 1" совсем незначительно превосходит силу связи с концептом "Концепт 2"

Кoeffициент согласия: 0

Суждения согласованы

Концепт обработан

Рис. 2. Задание весов двух связей с использованием альтернативной шкалы

Теперь пусть при сравнении трех влияний необходимо выразить минимальную (из возможных в данной шкале) степень превосходства первого влияния над вторым, а второго – над третьим. При этом необходимо достигнуть согласованности матрицы парных сравнений. В условиях классической шкалы получаем результат, представленный на рис. 3. Используя альтернативную шкалу, в данном случае также получим более адекватные оценки (рис. 4).

Другим преимуществом предлагаемой шкалы является то, что ее числовые оценки лучше соответствуют своим словесным описаниям. Это особенно хорошо заметно на примере транзитивных влияний. Так, в классической шкале, если *A* незначительно превосходит *B*, а *B* незначительно превосходит *C*, то полная согласованность будет достигнута, если эксперт укажет, что *A* абсолютно превосходит *C*. В предлагаемой же шкале $\frac{9}{7} \cdot \frac{9}{7} = \frac{81}{49} \approx \frac{9}{5}$, то есть два незначительных превосходства по транзитивности дают значительное превосходство, а не абсолютное, что более реалистично.

Наконец, используя классическую шкалу, иногда бывает проблематично получить согласованную матрицу парных сравнений. Рассмотрим следующий пример. Эксперт указал, что сила первой связи значительно превосходит силу второй связи, а сила второй значительно превосходит силу третьей. Оценивая превосходство первой связи над третьей, эксперт может использовать оценку не выше 9, и такая матрица не будет согласованной ($CR = 0,1126 > 0,1$), что продемонстрировано на рис. 5.

Матрица парных сравнений для концепта

	1	2	3	Вес связи
▶ 1	1	2	2	1
2	1/2	1	2	0,63
3	1/2	1/2	1	0,3969

Кoeffициент силы связей: 1,00

Сравнение пары связей:

Сила связи с концептом "Концепт 1" совсем незначительно превосходит силу связи с концептом "Концепт 3"

Кoeffициент согласия: 0,0516

Суждения согласованы

Концепт обработан

Рис. 3. Задание весов трех связей с использованием классической шкалы

Матрица парных сравнений для концепта

	1	2	3	Вес связи
▶ 1	1	9/8	9/8	1
2	8/9	1	9/8	0,9245
3	8/9	8/9	1	0,8547

Кoeffициент силы связей: 1,00

Сравнение пары связей:

Сила связи с концептом "Концепт 1" совсем незначительно превосходит силу связи с концептом "Концепт 3"

Кoeffициент согласия: 0,0038

Суждения согласованы

Концепт обработан

Рис. 4. Задание весов трех связей с использованием альтернативной шкалы

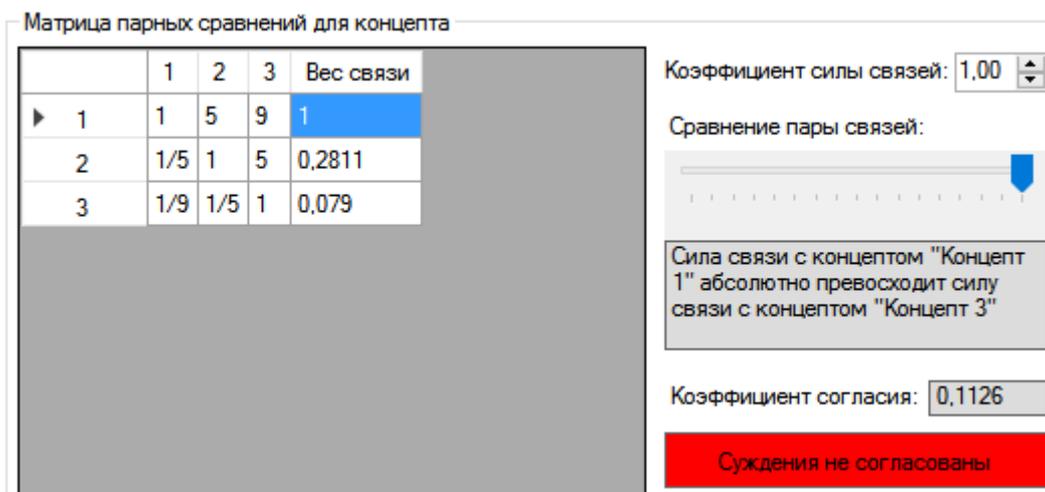


Рис. 5. Невозможность достижения согласованности с использованием классической шкалы

В то же время, используя альтернативную шкалу, для рассмотренной ситуации легко получить согласованную матрицу ($CR = 0,0016 < 0,1$), что продемонстрировано на рис. 6.

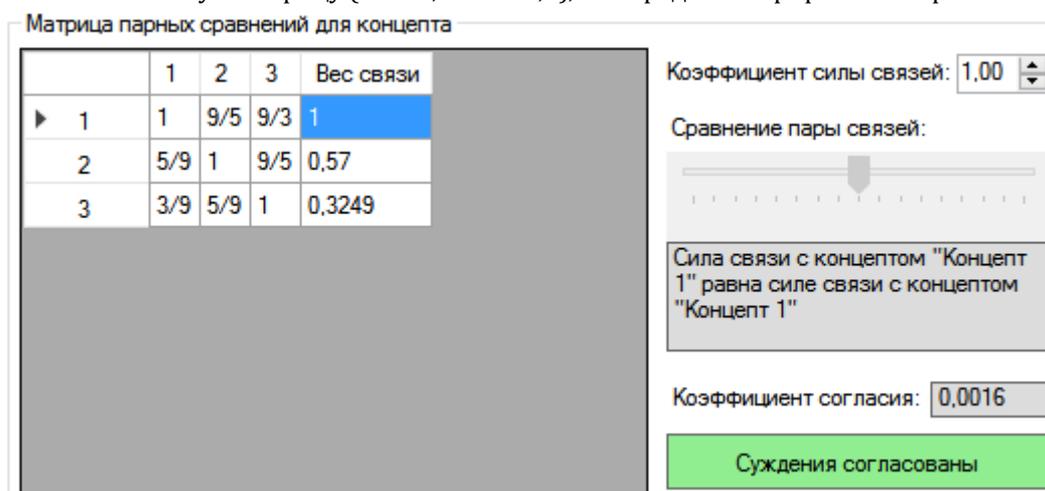


Рис. 6. Достижение согласованности с использованием альтернативной шкалы

Для альтернативной шкалы был рассчитан случайный индекс согласованности (табл. 2). Также были подтверждены значения случайного индекса согласованности для классической шкалы, представленные в [5].

Таблица 2. Значения случайного индекса согласованности для обеих шкал

Порядок матрицы	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайный индекс согласованности для классической шкалы	0,52	0,88	1,11	1,25	1,34	1,4	1,45	1,49
Случайный индекс согласованности для альтернативной шкалы	0,205	0,333	0,417	0,475	0,517	0,547	0,571	0,59

Обобщенная шкала оценки степеней превосходства. Поскольку не во всех ситуациях целесообразно использование шкалы с девятью степенями превосходства, можно предложить обобщение шкалы $9/9, 9/8, \dots, 9/1$, сохраняющее похожие свойства, на случай произвольного количества степеней превосходства.

Пусть шкала включает в себя n степеней превосходства, включая равнозначность. Тогда численные значения этих степеней (в порядке увеличения степени) могут быть вычислены по формуле:

$$a_i = \frac{n}{n+1-i}, \text{ где } i = 1, \dots, n.$$

В случае $n = 9$ получаем уже рассмотренную шкалу $9/9, 9/8, \dots, 9/1$. Или, например, для случая $n = 5$ будет получена следующая шкала (в скобках указана возможная словесная интерпретация степеней превосходства):

- 5/5 (равнозначность);
- 5/4 (незначительное превосходство);
- 5/3 (значительное превосходство);
- 5/2 (явное превосходство);
- 5/1 (абсолютное превосходство).

Основное свойство данного семейства шкал применительно к задаче назначения весов связей нечеткой когнитивной карты состоит в следующем. При сравнении двух влияний вес большего из них будет установлен равным коэффициенту силы связей k . Тогда вес меньшего будет в общем случае равен $\frac{1}{a_i}k$, где a_i – степень превосходства большего влияния над меньшим,

выраженная в предложенной шкале. Заметим, что функция

$$f(i) = \frac{1}{a_i} = \frac{n+1-i}{n} = \frac{n+1}{n} - \frac{1}{n}i$$

является линейной. Таким образом, при увеличении степени превосходства большего влияния над меньшим, вес меньшего уменьшается линейно, что может оказаться удобным при назначении весов. Пример для $n = 5$ приведен в табл. 3.

Таблица 3. Возможные веса влияний, полученные при использовании шкалы с пятью степенями превосходства

Степень превосходства	Вес меньшего влияния в общем случае	Вес меньшего влияния при $k = 0,5$
5/5	k	0,5
5/4	$0,8*k$	0,4
5/3	$0,6*k$	0,3
5/2	$0,4*k$	0,2
5/1	$0,2*k$	0,1

Выводы и дальнейшие направления исследований

Предлагаемый в данной работе модифицированный метод парных сравнений обладает рядом преимуществ перед классическим и может быть использован в задачах параметрической идентификации нечетких когнитивных моделей. В настоящее время выполняется комплекс исследований, связанный с апробацией предложенного метода при построении нечетких когнитивных карт для задач автоматизации проектирования технических объектов и моделирования организационно-управляющих систем.

О научном руководителе:

Подвесовский Александр Георгиевич, заведующий кафедрой «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент.

Литература

1. Авдеева, З.К. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко // Управление большими системами. – 2007. – Вып. 16. – С. 26-39.
2. Ерохин, Д.В. Стратегическое управление инновационной деятельностью предприятия: монография / Д.В. Ерохин, Д.Г. Лагерева, Е.А. Ларичева, А.Г. Подвесовский. – Брянск: БГТУ, 2010. – 196 с.
3. Коростелев, Д.А. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» / Д.А. Коростелев, Д.Г. Лагерева, А.Г. Подвесовский // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008: Труды конференции. – В 3-х т. – Т. 3. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – С. 329-336.
4. Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Применение множественного регрессионного анализа для параметрической идентификации нечетких когнитивных моделей // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2016): труды IV междунар. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – Т. 2. – С. 28-33.
5. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
6. Силов, В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке / В.Б. Силов – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.

References

1. Avdeeva, Z.K. Kognitivnoe modelirovanie dlya resheniya zadach upravleniya slabostrukturirovannymi sistemami (situatsiyami) / Z.K. Avdeeva, S.V. Kovriga, D.I. Makarenko // Upravlenie bol'shimi sistemami. – 2007. – Vyp. 16. – S. 26-39.
2. Erokhin, D.V. Strategicheskoe upravlenie innovatsionnoy deyatel'nost'yu predpriyatiya: monografiya / D.V. Erokhin, D.G. Lagerev, E.A. Laricheva, A.G. Podvesovskiy. – Bryansk: BGTU, 2010. – 196 s.
3. Korostelev, D.A. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy na osnove nechetkikh kognitivnykh modeley «IGLA» / D.A. Korostelev, D.G. Lagerev, A.G. Podvesovskiy // Odinnadtsataya natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2008: Trudy konferentsii. – V 3-kh t. – T. 3. – M.: LENAND, 2008. – S. 329-336.
4. Podvesovskiy A.G., Isaev R.A. Primenenie mnozhestvennogo regressionnogo analiza dlya parametricheskoy identifikatsii nechetkikh kognitivnykh modeley // Informatsionnye tekhnologii intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy (ITIDS'2016): trudy IV mezhdunar. konf. – Ufa: UGATU, 2016. – T. 2. – S. 28-33.
5. Saati, T. Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti. Per. s angl. / Nauch. red. A.V. Andreychikov, O.N. Andreychikova. – M.: Izdatel'stvo LKI, 2008. – 360 s.
6. Silov, V.B. Prinyatie strategicheskikh resheniy v nechetkoy obstanovke / V.B. Silov – M.: INPRO-RES, 1995. – 228 s.

Поступила: 20.09.2016

Об авторе:

Исаев Руслан Александрович, аспирант кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, Ruslan-Isaev-32@yandex.ru.