

УДК 519.71
ББК 32.817

КОМПЛЕКСНЫЙ И МАТРИЧНЫЙ МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НАД НЕЧЕТКИМИ ЧИСЛАМИ

Усков А. А.¹, Киселев И. А.²

(Российский университет кооперации, Москва)

Впервые предложены утверждения, позволяющие сводить арифметические операции над нечеткими числами LR-типа к арифметическим операциям над комплексными числами или матрицами, что дает возможность упростить выполнение указанных арифметических операций (в частности с применением систем компьютерной математики) и использовать наглядное графическое их представление на комплексной плоскости (в виде векторных диаграмм и годографов).

Ключевые слова: арифметические операции, комплексные числа, матрицы, нечеткие числа.

1. Введение

Аппарат нечеткой логики широко используется при математическом описании сложных систем в условиях неопределенности, позволяя формализовать знания, представленные в качественной форме, и не требуя выполнения предпосылок применимости теории вероятностей [1, 3, 6, 9, 10, 13].

Нечеткие числа – нечеткие переменные, определенные на числовой оси. Нечеткое число определяется как нечеткое множество A на множестве действительных чисел R с функцией

¹ Андрей Александрович Усков, доктор технических наук, профессор (andrey@uskov.net, www.uskov.net).

² Игорь Александрович Киселев, аспирант.

принадлежности $\mu_A(x) \in [0, 1]$, где x – действительное число, т.е. $x \in R [1, 9]$.

Нечеткие числа LR -типа – это разновидность нечетких чисел специального вида, задаваемых по определенным правилам [1, 9]. Нечеткие числа LR -типа были предложены в работах [14–17] с целью уменьшения трудоемкости выполнения арифметических и логических операций над нечеткими числами путем аппроксимации функций принадлежности типовыми нелинейными функциями, задаваемыми своими параметрами (LR -аппроксимация). В работах [14–17] приводятся классический вариант арифметических операций над нечеткими числами LR -типа, а также примеры решения уравнений и неравенств с нечеткими числами.

Функции принадлежности нечетких чисел LR -типа задаются с помощью невозрастающих четных неотрицательных действительных функций действительного аргумента $L(x)$ и $R(x)$, удовлетворяющих свойствам: а) $L(-x) = L(x)$, $R(-x) = R(x)$; б) $L(0) = R(0)$.

Пусть $L(x)$ и $R(x)$ – функции LR -типа. Унимодальное нечеткое число A с модой a (т.е. $\mu_A(a) = 1$) с помощью $L(x)$ и $R(x)$ задается следующим образом:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) & \text{при } x \leq a, \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right) & \text{при } x > a; \end{cases}$$

где a – мода; $\alpha > 0$, $\beta > 0$ – левый и правый коэффициенты нечеткости.

Таким образом, при заданных $L(x)$ и $R(x)$ нечеткое число LR -типа определяется тройкой (a, α, β) .

Нечеткое число LR -типа будем называть симметричным, если левый и правый коэффициенты нечеткости равны, т.е. $\alpha = \beta$.

Предположим, имеются нечеткие числа LR -типа: $\tilde{a} = (m, \alpha, \beta)_{LR}$ и $\tilde{b} = (n, \gamma, \delta)_{LR}$.

Арифметические операции над нечеткими LR -числами определяются следующим образом [1, 9]:

сложение

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} + (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m + n, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR};$$

умножение

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \cdot (n, \gamma, \delta)_{LR} = (mn, \alpha n + \gamma m, \beta n + \delta m)_{LR};$$

$$m > 0, n > 0;$$

противоположный элемент

$$-(m, \alpha, \beta)_{LR} = (-m, \beta, \alpha)_{LR};$$

обратный элемент

$$(m, \alpha, \beta)_{LR}^{-1} = \left(\frac{1}{m}, \frac{\beta}{m^2}, \frac{\alpha}{m^2} \right)_{LR}, m > 0.$$

За последние 30 лет было опубликовано более 10 000 научных работ, в которых рассматривались те или иные аспекты использования арифметических операций над нечеткими числами *LR*-типа.

подавляющее большинство указанных научных работ можно отнести к одной из трех групп.

Первая группа – это ряд научных работ, посвященных различным вариантам построения арифметик нечетких чисел при использовании *LR*-аппроксимация и исследованию их свойств, а также способам выполнения арифметических операций над нечеткими числами *LR*-типа. В качестве примера публикаций на русском языке, относящихся к данной группе, можно отметить [3, 5, 6, 11–13]. В частности, в работах [3, 5, 11] рассматриваются дополнительные (неклассические) операции вычитания, деления и показано, что с их помощью можно повысить точность решения нечетких уравнений.

Вторая группа – это работы, в которых рассматриваются методы и алгоритмы решения уравнений, неравенств, задач оптимизации, теории принятия решений и теории управления на множестве нечетких чисел *LR*-типа.

Третья группа научных работ является наиболее многочисленной и посвящена использованию нечетких чисел *LR*-типа в задачах прикладного характера, в которых данные числа используются с целью провести анализ в условиях неопределенности.

Настоящая статья, в соответствии с приведенной классификацией, относится к первой группе.

В статье впервые показано, что приведенные арифметические операции над нечеткими числами LR -типа можно выполнить, переходя от нечетких чисел к соответствующим им комплексным числам или матрицам, что позволяет упростить выполнение указанных арифметических операций (в частности с применением систем компьютерной математики) и использовать наглядные графические их представления на комплексной плоскости.

2. Комплексный метод выполнения арифметических операций над нечеткими числами

Приведем утверждение, определяющее связь между арифметическими операциями над симметричными нечеткими числами LR -типа и комплексными числами.

Утверждение 1. Введем в рассмотрение преобразование, ставящее в однозначное соответствие произвольное симметричное число LR -типа $\tilde{x} = (y, z, z)_{LR}$ и комплексное число $x = y + jz$, где $j = \sqrt{-1}$ т.е. $\tilde{x} \sim x$. Пусть далее имеются симметричные нечеткие числа LR -типа: $\tilde{a} = (m, \alpha, \alpha)_{LR}$, и $\tilde{b} = (n, \gamma, \gamma)_{LR}$. Сопоставим им комплексные числа: $\tilde{a} \sim a = m + j\alpha$ и $\tilde{b} \sim b = n + j\gamma$.

Тогда при $m \cdot n \gg \alpha \cdot \gamma$, $m > 0$ и $m \gg \alpha$ арифметические операции над нечеткими числами \tilde{a} и \tilde{b} соответствуют операциям над комплексными числами:

$$\tilde{a} + \tilde{b} \sim a + b,$$

$$\tilde{a} \cdot \tilde{b} \sim a \cdot b,$$

$$-\tilde{a} \sim -a,$$

$$\tilde{a}^{-1} \sim a^{-1},$$

где $\bar{a} = m - j\alpha$ – комплексное сопряженное по отношению к a .

Доказательство. Сравним результаты арифметических операций над нечеткими числами \tilde{a} , \tilde{b} и их комплексными изображениями a и b [1, 4, 9]:

$$\tilde{a} + \tilde{b} = (m + n, \alpha + \gamma, \alpha + \gamma)_{LR},$$

$$a + b = (m + n) + j(\alpha + \gamma).$$

Таким образом:

$$\tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{a} + \mathbf{b};$$

$$\tilde{\mathbf{a}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} = (m \cdot n, m \cdot \gamma + n \cdot \alpha, m \cdot \gamma + n \cdot \alpha)_{LR},$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = (m + j\alpha) \cdot (n + j\gamma) = m \cdot n + j(m \cdot \gamma + n \cdot \alpha) - \alpha \cdot \gamma.$$

С учетом того, что для нечетких чисел $m \cdot n \gg \alpha \cdot \gamma$, имеем:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \approx m \cdot n + j(m \cdot \gamma + n \cdot \alpha).$$

Таким образом:

$$\tilde{\mathbf{a}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}.$$

$$-\tilde{\mathbf{a}} = (-m, \alpha, \alpha)_{LR},$$

$$-\bar{\mathbf{a}} = -m + j \cdot \alpha.$$

Таким образом:

$$-\tilde{\mathbf{a}} \sim -\bar{\mathbf{a}}.$$

$$\tilde{\mathbf{a}}^{-1} = \left(\frac{1}{m}, \frac{\alpha}{m^2}, \frac{\alpha}{m^2} \right)_{LR}, m > 0,$$

$$\bar{\mathbf{a}}^{-1} = \frac{m + j\alpha}{m^2 + \alpha^2}.$$

С учетом того, что для нечетких чисел $m \gg \alpha$, имеем:

$$\bar{\mathbf{a}}^{-1} \approx \frac{1}{m} + j \frac{\alpha}{m^2},$$

$$\tilde{\mathbf{a}}^{-1} \sim \bar{\mathbf{a}}^{-1}.$$

Утверждение доказано. ■

Из приведенного утверждения, в частности, следует, что симметричные нечеткие числа LR -типа можно изображать на комплексной плоскости в виде векторов: проекция вектора на действительную ось – «четкая» часть нечеткого числа, проекция на мнимую – степень нечеткости.

На рис. 1 представлена графическая иллюстрация выполнения арифметических операций сложения и вычитания над нечеткими числами на комплексной плоскости.

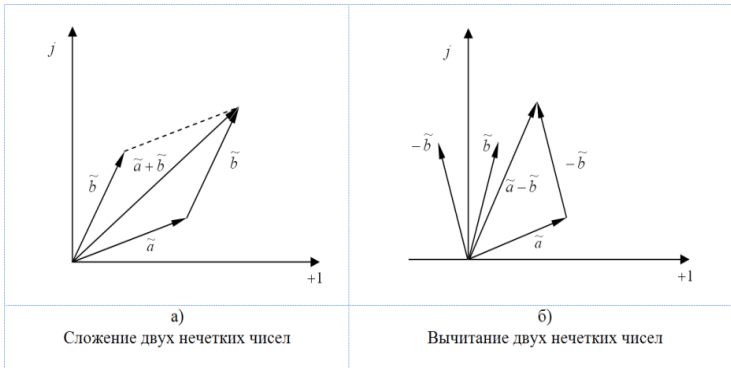


Рис. 1. Графическая иллюстрация арифметических операций над нечеткими числами на комплексной плоскости

3. Матричный метод выполнения арифметических операций над нечеткими числами

Приведем утверждение, определяющее связь между арифметическими операциями над симметричными нечеткими числами LR -типа и матрицами.

Утверждение 2. Введем в рассмотрение преобразование, ставящее в однозначное соответствие произвольное симметричное

число LR -типа $\tilde{x} = (y, z, z)_{LR}$ и матрицу $X = \begin{bmatrix} y & -z \\ z & y \end{bmatrix}$, т.е.

$\tilde{x} \sim x$. Пусть далее имеются симметричные нечеткие числа LR -типа: $\tilde{a} = (m, \alpha, \alpha)_{LR}$, и $\tilde{b} = (n, \gamma, \gamma)_{LR}$. Сопоставим им

матрицы: $\tilde{a} \sim A = \begin{bmatrix} m & -\alpha \\ \alpha & m \end{bmatrix}$ и $\tilde{b} \sim B = \begin{bmatrix} n & -\gamma \\ \gamma & n \end{bmatrix}$.

Тогда при $m \cdot n \gg \alpha \cdot \gamma$, $m > 0$ и $m \gg \alpha$ арифметические операции над симметричными нечеткими числами LR -типа \tilde{a} и \tilde{b} соответствуют операциям над матрицами:

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b} &\sim A + B, \\ -\tilde{a} &\sim -A^T, \\ \tilde{a} \cdot \tilde{b} &\sim A \cdot B, \end{aligned}$$

$$\tilde{\alpha}^{-1} \sim [A^T]^{-1}.$$

Доказательство утверждения основано на изоморфизме комплексных чисел $x = y + jz$ и матриц вида $X = \begin{bmatrix} y & -z \\ z & y \end{bmatrix}$ [2, 8], а также эквивалентности арифметических операций над нечеткими и комплексными числами (см. утверждение 1).

4. Численный пример

В качестве примера рассмотрим расчет чистого приведенного дохода (ЧПД) в условиях неопределенности [7]. Все расчеты будем проводить с использованием системы компьютерной математики *MathCAD*.

Предположим, что месячный индекс инфляции, поступления и отток денежных средств в m -м месяце заданы симметричными нечеткими числами *LR*-типа: $\tilde{i} = (0,01; 0,002; 0,002)$, $\tilde{p}_m = (P_m, p_m, p_m)$ и $\tilde{o}_m = (O_m, o_m, o_m)$ соответственно.

Сведем значения поступления и оттока денежных средств в таблицу 1.

Таблица 1. Значения поступления и оттока денежных средств

Номер месяцев	P_m	p_m	O_m	o_m
1	100	10	20	4
2	120	10	20	4
3	130	10	20	4
4	100	10	15	3
5	110	10	15	3
6	160	20	15	3
7	170	20	10	2
8	180	20	10	2
9	150	20	10	2
10	150	20	5	1

Руководствуясь утверждением 1, рассчитаем ЧПД с применением комплексных чисел. Для этого осуществим переход от нечетких симметричных чисел *LR*-типа к комплексным числам:

$$(1) \tilde{i} \sim i = 0,01 + 0,002j,$$

$$(2) \tilde{p}_m \sim p_m = P_m + p_m j,$$

$$(3) \tilde{o}_m \sim o_m = O_m + o_m j.$$

Используя формулу расчета ЧПД [4]

$$(4) \tilde{nprv} = \sum_{m=1}^N \tilde{p}_m - \tilde{o}_m \cdot \frac{1}{1 + \tilde{i}^m},$$

где N – общее количество месяцев, и утверждение 1 получим выражение для расчета ЧПД с применением комплексных чисел:

$$(5) \mathbf{nprv} = \sum_{m=1}^N \left[(p_m - o_m) \cdot \left[\overline{(1 + i)^m} \right]^{-1} \right].$$

Реализовав в *MathCAD* расчет ЧПД с применением формулы (5), получим: $\mathbf{nprv} = 1156,55 + 127,88j$.

Осуществив обратный переход от комплексных к нечетким числам получим значение ЧПД:

$$\tilde{nprv} = (1156,55; 127,88; 127,88).$$

На рис. 2 изображена векторная диаграмма определения суммарного ЧПД.

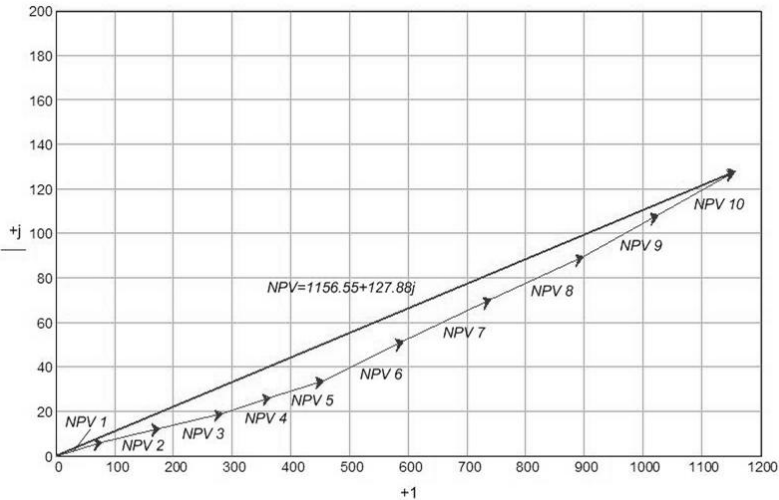


Рис. 2. Векторная диаграмма определения суммарного ЧПД

Аналогичным образом согласно утверждению 2 заменим нечеткие числа их матричными изображениями:

$$(6) \quad \tilde{\mathbf{p}}_m \sim \mathbf{P}_m = \begin{bmatrix} P_m & -p_m \\ p_m & P_m \end{bmatrix},$$

$$(7) \quad \tilde{\mathbf{o}}_m \sim \mathbf{O}_m = \begin{bmatrix} O_m & -o_m \\ o_m & O_m \end{bmatrix},$$

$$(8) \quad \tilde{\mathbf{i}} \sim \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0,01 & -0,002 \\ 0,002 & 0,01 \end{bmatrix}.$$

Адаптируя формулу (4) для операций с матрицами на основе утверждения 2, получим:

$$(9) \quad \mathbf{NPV} = \sum_{m=1}^N \left[(\mathbf{P}_m - \mathbf{O}_m) \cdot ([(\mathbf{E} + \mathbf{I})^m]^T)^{-1} \right],$$

где $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ – единичная матрица.

Реализовав в *MathCAD* расчет ЧПД с применением формулы (9), получим:

$$\mathbf{NPV} = \begin{bmatrix} 1156,55 & -127,88 \\ 127,88 & 1156,55 \end{bmatrix}.$$

Переходя от матриц к нечетким числам, получим значение $\tilde{npv} = (1156,55; 127,88; 127,88)$ – такое же, как и при использовании комплексного метода.

Как известно, широко распространенные системы компьютерной математики (*MATLAB*, *MathCAD*, *Maple* и др.) содержат средства, позволяющие выполнять арифметические операции над комплексными числами и матрицами, причем как в численном, так и в символьном виде. В тоже время указанные системы компьютерной математики в своей стандартной комплектации не содержат средств выполнения арифметических операций над нечеткими числами. Вышеприведенные утверждения позволяют сводить арифметические операции над симметричными нечеткими числами *LR*-типа к арифметическим операциям над комплексными числами и матрицами, что дает возможность упростить выполнение указанных арифметических операций с применением систем компьютерной математики.

5. Заключение

В статье впервые предложены утверждения, позволяющие сводить арифметические операции над симметричными нечеткими числами LR -типа к арифметическим операциям над комплексными числами или матрицами, что дает возможность:

1) упростить выполнение арифметических операций над нечеткими числами LR -типа (в частности с применением систем компьютерной математики, содержащих средства, которые позволяют выполнять арифметические операции над комплексными числами и матрицами, как в численном, так и в символьном виде);

2) использовать наглядное графическое представление арифметических операций над нечеткими числами LR -типа на комплексной плоскости в виде векторных диаграмм и годографов;

3) переходить в формулах от матриц с элементами в виде нечетких чисел LR -типа к матрицам большей размерности с элементами в виде действительных чисел.

Литература

1. АЛТУНИН А.Е., СЕМУХИН М.В. *Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях*. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000. –352 с.
2. БАЛК М.Б., БАЛК Г.Д. *Реальные применения мнимых чисел*. – Киев: Радянська школа, 1988. –255 с.
3. БОРИСОВ А.Н., АЛЕКСЕЕВ А.В., МЕРКУРЬЕВ Г.В. и др. *Обработка нечеткой информации в системах принятия решений*. – М.: Радио и связь, 1989. –304 с.
4. БРОНШТЕЙН И.Н., СЕМЕНДЯЕВ К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. – М.: Наука, 1986. –544 с.
5. ДРОЗДОВ А.В., СПЕСИВЦЕВ А.В., КИМЯЕВ И.Т. *Обобщение расширенных арифметических операций над нечеткими числами (LR)-типа* // Деп. ВИНТИ №2185-В-95, 1995.

6. ДЮБУА Д., ПРАД А. *Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике.* – М.: Радио и связь, 1990. –288 с.
7. КУЧАРИНА Е.А. *Инвестиционный анализ.* – СПб.: Питер, 2006. –160 с.
8. ЛАРИН С.В. *Числовые системы.* – М.: Академия, 2001. –160 с.
9. *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова.* – М.: Наука, 1986. –312 с.
10. УСКОВ А.А., КУЗЬМИН А.В. *Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика.* – М.: Горячая Линия-Телеком, 2004. –143 с.
11. УСКОВ А.А., СУРГУЧЕВА И.В., ГОРБУНОВ А.М. *Анализ систем обработки информации и управления с помощью групповых нечетких чисел // Программные продукты и системы.* – 2009. – №3. – С. 19–21.
12. ЯХЪЯЕВА Г.Э. *Алгебры с нечеткими операциями: Дис. канд. физ.-мат. наук.* – Алматы, 2000. –150 с.
13. ЯХЪЯЕВА Г.Э. *Нечеткие множества и нейронные сети.* – М.: Интернет-Университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. –316 с.
14. DUBOIS D., PRADE H. *Operations on fuzzy numbers // Int. J. Syst. Sci.* – 1978. –Vol. 9, №6. –P. 613–626.
15. DUBOIS D., PRADE H. *Fuzzy real algebra: some results // Fuzzy Sets and Systems.* –1979. –Vol. 2, №4. –P. 327–348.
16. DUBOIS D., PRADE H. *Systems of linear fuzzy constraints // Fuzzy Sets and Systems.* –1980. –Vol. 3, №1. –P. 37–48.
17. DUBOIS D., PRADE H. *Fuzzy sets and systems: Theory and Applications.* – New York: Acad. Press, 1980. –394 p.

COMPLEX-NUMBERS-BASED AND MATRIX-BASED METHODS TO PERFORM ARITHMETIC OPERATIONS ON FUZZY NUMBERS

Andrey Uskov, Russian University of Cooperation, Moscow, Doctor of Science, professor.

Igor Kiselev, Russian University of Cooperation, Moscow, Postgraduate student.

Abstract: We prove propositions which reduce arithmetic operations on fuzzy numbers of LR-type to arithmetic operations on complex numbers and matrices. This simplifies calculation (in particular, in computer computations) and allows for the intuitive graphical representation on fuzzy numbers on the plane of complex numbers (in the form of vector diagrams and hodographs).

Keywords: arithmetic, complex numbers, matrices, fuzzy numbers.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д. А. Новиковым