

УДК 519.87

О. Ф. МИХАЛЬ

ЛОКАЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ОДНОРОДНЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ ОПЕРАЦИИ КонтРАСТНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Одним из направлений исследования и моделирования объектов живой природы применительно к развитию технических систем является распознавание образов. Процесс распознавания не сводится к пассивной фиксации окружающей среды, но предполагает активное многофакторное не во всем формализуемое и не всегда детерминированное взаимодействие, включающее подстройку характеристик, регулирование пороговых значений, адаптацию рецепторов и др. При этом рецепторные системы объектов живой природы, как правило, обеспечивают параллельную обработку поступающих на них информационных потоков. За счет этого описание ситуации дополнительно осложняется. В связи с задачами подобного класса, представляет интерес подход на основе нечеткой логики (НЛ), по следующим двум причинам: 1) математический аппарат теории нечетких множеств (НМ), на которой базируется НЛ, позволяет работать с нечетко описанными объектами; 2) допустима организация параллельной обработки, в частности с использованием локально-параллельных (ЛП) алгоритмов.

В настоящей работе в рамках нечетко-логического подхода рассматривается локально-параллельный алгоритм, реализующий одну из операций, применяемых при распознавании образов – контрастную интенсификацию.

В технических приложениях НЛ применяются операции, связанные с манипулированием нечеткостью. Применительно к задачам распознавания образов, эти операции могут использоваться, в частности, при выделении объектов или их деталей на фоне окружающей среды. Степень четкости элементов нечеткого множества (НМ) $A: \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ задается указанием значений их функции принадлежности (ФП) $m_A(x_i) \in [0,1]$. Определена операция возведения в положительную степень α : $A^\alpha: \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, $\mu_{A^\alpha}(x_i) = \mu_A^\alpha(x_i)$. На ее основе определены операции *концентрации* $CON(A) = A^2$ и *растяжения* $DIL(A) = A^{0.5}$ (1), при которых происходят *однонаправленные* изменения (уменьшения или увеличения, соответственно) значений ФП; а так же определена операция *контрастной интенсификации* (КИ):

$$A': \{x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_n\}, \mu_{A'}(x'_i) = \begin{cases} 2(\mu_A(x_i))^2, & 0 \leq \mu_A(x_i) \leq 0,5 \\ 1 - 2(1 - \mu_A(x_i))^2, & 0,5 < \mu_A(x_i) \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

Функция (1), являющаяся комбинацией $CON(A)$ и $DIL(A)$, при которой происходит *разнонаправленное* изменение (уменьшение при $0 \leq m_A(x_i) \leq 0,5$ и увеличение при $0,5 \leq m_A(x_i) \leq 1$) значений ФП.

Операции над элементами НМ эффективно реализуются на локально-параллельных (ЛП) алгоритмах [2,3], которые обеспечивают повышенную производительность и поэтому позволяют моделировать более сложные системы на существующей вычислительной технике. При ЛП реализации ФП μ_A масштабируются с округлением до целочисленных значений $\bar{\mu}_i$, представляемых в виде двоичных фрагментов длиной n . Фрагменты конкатенируются по k штук в *регистровые представления* (РП) в соответствии с разрядностью $N > kn$ вычислительной системы (ВС). РП и ЛП алгоритмы называются *однородными*, если фрагменты имеют равную длину. В случае разной длины фрагментов РП и ЛП алгоритмы называются *неоднородными*. В настоящей работе рассматривается только *однородный* случай.

ЛП алгоритм представляет собой последовательность специальным образом подобранных стандартных компьютерных операций (сложение, регистровый сдвиг, поразрядные логические «И», «ИЛИ», «исключающее ИЛИ» и др.) над целыми положительными числами – исходными РП. Результатом этих операций является целое положительное число, которое может быть интерпретировано как конкатенация результатов соответствующей нечеткой операции над конкатенантами исходных РП.

Как отмечалось, принцип ЛП предполагает целочисленное масштабирование ФП. При масштабировании целесообразно выбирать число градаций значений ФП равным 2^n , где n – число двоичных позиций фрагмента. При этом $\bar{\mu}_A = 0$ соответствует значению $m=0$, $\bar{\mu}_A = (2^n - 1)$ – значению $\mu=1$, а промежуточные целочисленные $\bar{\mu}_A \in \{1, 2, \dots, (2^n - 2)\}$ – дробным значениям $0 < m < 1$, следующим с шагом $1/(2^n - 1)$. Выражение (1) при этом принимает вид :

$$\bar{\mu}_{A'}(x'_i) = \begin{cases} 2 * (\bar{\mu}_A(x_i)) * (\bar{\mu}_A(x_i)), & 0 \leq \bar{\mu}_A(x_i) \leq 2^{(n-1)} \\ (2^n - 1) - 2 * ((2^n - 1) - \bar{\mu}_A(x_i)) * ((2^n - 1) - \bar{\mu}_A(x_i)), & 2^{(n-1)} < \bar{\mu}_A(x_i) \leq (2^n - 1) \end{cases} \quad (2)$$

где символ (*) обозначает целочисленную процедуру, аналогичную умножению дробных чисел меньших единицы, с отбрасыванием избыточной части. ЛП алгоритм этой процедуры представлен в [3]. Может быть показано, что процедура (*) нарушает нормировку: НМ, являющееся произведением, всегда субнормально. Однако применительно к КИ это не существенно: согласно определению, верхние значения $\bar{\mu}_A$ симметричны нижним (заменяются разностью с максимальным значением $(2^n - 1)$), поэтому нормальность результата КИ сохраняется. Соответствие масштабированного представления КИ исходному иллюстрируется графиками рис. 1 (исходная ФП μ_A) и рис. 2 (масштабированная ФП $\bar{\mu}_A$ при $n = 5$).

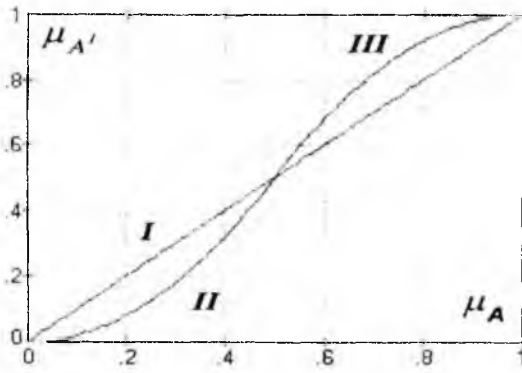


Рис. 1.

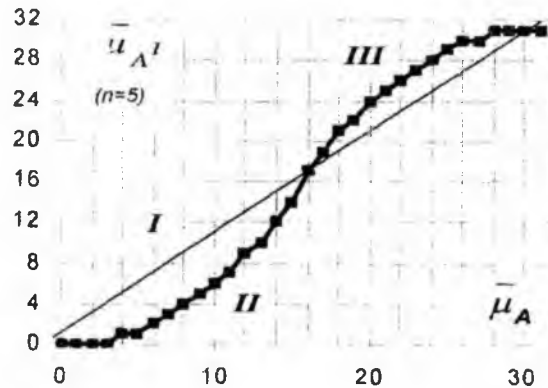


Рис. 2.

На рис. 1 римскими цифрами обозначены: I – линейно изменяющийся профиль ФП без применения КИ, $\mu_{A'} = \mu_A$; II – часть профиля, соответствующая значениям ФП $0 \leq \mu_A < 0,5$, подвергшаяся КИ $\mu_{A'} = 2(\mu_A)^2$; III – часть профиля, соответствующая ФП $0,5 \leq \mu_A \leq 1$, подвергшаяся КИ $\mu_{A'} = 1 - 2(1 - \mu_A)^2$.

На рис. 2: I – линейный профиль ФП без КИ, $\bar{\mu}_{A'} = \bar{\mu}_A$; II – часть профиля ФП $0 \leq \bar{\mu}_A \leq 15$, подвергшаяся КИ $\bar{\mu}_{A'} = 2(\bar{\mu}_A)^2$; III – часть профиля ФП $16 \leq \bar{\mu}_A \leq 31$, подвергшаяся КИ $\bar{\mu}_{A'} = 1 - 2(1 - \bar{\mu}_A)^2$. Графики рис. 1 и 2 получены непосредственным расчетом по формулам (1 и 2), соответственно.

Приведем пошаговое описание ЛП алгоритма КИ. При этом будем использовать вспомогательные константы, представленные ниже в двоичной системе счисления (группы позиций, соответствующие отдельным фрагментам, выделены круглыми скобками):

$$\begin{aligned} E_1 &: \{ \dots (1 \dots 11)(0 \dots 00)(1 \dots 11)(0 \dots 00)(1 \dots 11) \}_{(2)}, \\ E_2 &: \{ \dots (0 \dots 00)(1 \dots 11)(0 \dots 00)(1 \dots 11)(0 \dots 00) \}_{(2)}, \\ I_0 &: \{ \dots (0 \dots 01)(0 \dots 01)(0 \dots 01)(0 \dots 01)(0 \dots 01) \}_{(2)}. \end{aligned}$$

При четном количестве k конкатенированных фрагментов число значащих разрядов E_1, E_2 и I_0 – $(k-1)n, kn$ и $(kn+1)$, соответственно; при k нечетном – $kn, (k-1)n$ и $((k-1)n+1)$, соответственно. Обозначим побитовые логические «И» и «ИЛИ» – как \wedge и \vee , соответственно; регистровый сдвиг (не циклический) на i двоичных позиций влево и вправо – как $\ll i$ и $\gg i$, соответственно.

Контрастная интенсификация

Шаг 1. Формирование шаблона W для выделения фрагментов, соответствующих значениям ФП $0,5 \leq \mu \leq 1$: $C = A \wedge (I_0 \ll (n-1))$; $W = C + (C \gg 1) + (C \gg 2) + \dots + (C \gg (n-1))$.

Шаг 2. Изменение в регистровом представлении A , соответствующее замене μ на $(1-\mu)$ при $0,5 \leq \mu \leq 1$. Для этого производятся следующие действия. Вырезание из A фрагментов, соответствующих шаблону W : $B = A \wedge W$. Удаление вырезанных фрагментов из A : $A = A - B$. Вычитание вырезанных фрагментов из шаблона W : $B = W - B$. Помещение результата обратно в A : $A = A \vee B$.

Шаг 3. Получение наборов прореженных фрагментов: $A_1 = A \wedge E_1$, $A_2 = A \wedge E_2$. В A_1 остаются только нечетные, в A_2 - только четные фрагменты.

Шаг 4. Начальные установки цикла перебора разрядов фрагментов и формирования частичных сумм: $S_1 = 0$, $S_2 = 0$, $i = 0$, где $i = 0, 1, \dots, (n-1)$.

Шаг 5. Выделение i -го разряда фрагмента: $C_1 = A_1 \wedge (I_0 \ll i)$, $C_2 = A_2 \wedge (I_0 \ll i)$.

Шаг 6. Формирование i -й маски: $M_1 = C_1 + (C_1 \ll 1) + (C_1 \ll 2) + \dots + (C_1 \ll (n-1))$, $M_2 = C_2 + (C_2 \ll 1) + (C_2 \ll 2) + \dots + (C_2 \ll (n-1))$.

Шаг 7. Частичное суммирование: $S_1 = S_1 + ((A_1 \ll i) \wedge M_1)$, $S_2 = S_2 + ((A_2 \ll i) \wedge M_2)$.

Шаг 8. Приращение: $i = i + 1$. Если $i \leq (n-1)$, переход к Шагу 5.

Шаг 9. Умножение на 2 и отбрасывание избыточных младших разрядов: $S_1 = (S_1 \ll 1) \wedge E_2$, $S_2 = (S_2 \ll 1) \wedge E_1$.

Шаг 10. Составление полного произведения S из прореженных наборов S_1 и S_2 : $S = ((S_1 + S_2) \gg n)$.

Шаг 11. Формирование результата, включающее следующие действия. Вырезание фрагментов согласно шаблону W : $B = S \wedge W$. Удаление вырезанных фрагментов: $S = S - B$. Вычитание вырезанных фрагментов из шаблона: $B = W - B$. Помещение B обратно в результат S : $S = S \vee B$.

Примечания. Шаги 3 – 10 представляют собой процедуру ЛП умножения [3], модифицированную для возведения A в квадрат. Умножение на 2 есть регистровый сдвиг на одну позицию в сторону старших разрядов, что реализовано в Шаге 9. Возможен вариант, дающий качественно сходные результаты: Шаг 9 $S_1 = S_1 \wedge E_2$, $S_2 = S_2 \wedge E_1$; Шаг 10 $S = ((S_1 + S_2) \gg (n-1))$. Взаимовлияния между фрагментами в обоих случаях не происходит, поскольку во всех фрагментах находятся числа меньше единицы старшего разряда фрагмента. Это обеспечивается шаблоном W , создаваемым на Шаге 1 алгоритма.

Тестовый пример. Пусть $n=3$, $k=5$, $A = (101)(000)(100)(111)(010)_{(2)} = 20794_{10}$, $E_1 = (111)(000)(111)(000)(111)_{(2)} = 29127_{10}$, $E_2 = (111)(000)(111)(000)(111)(000)_{(2)} = 233016_{10}$, $I_0 = (1)(001)(001)(001)(001)_{(2)} = 4681_{10}$.

Шаг 1. $(I_0 \ll (n-1)) = (100)(100)(100)(100)(100)_{(2)} = 18724_{10}$, $C = (100)(000)(100)(100)(000)_{(2)} = 16672_{10}$, $W = (111)(000)(111)(111)(000)_{(2)} = 29176_{10}$.

Шаг 2. $B = (101)(000)(100)(111)(000)_{(2)} = 20792_{10}$, $A = (010)_{(2)} = 2_{10}$, $B = (010)(000)(011)(000)(000)_{(2)} = 8384_{10}$, $A = (010)(000)(011)(000)(010)_{(2)} = 8386_{10}$.

Шаг 3. $A_1 = (010)(000)(011)(000)(010)_{(2)} = 8386_{10}$, $A_2 = 0$.

Шаг 4. $S_1 = 0$, $S_2 = 0$, $i = 0$. Шаг 5. $C_1 = (1)(000)(000)_{(2)} = 64_{10}$, $C_2 = 0$.

Шаг 6. $M_1 = (111)(000)(000)_{(2)} = 448_{10}$, $M_2 = 0$.

Шаг 7. $S_1 = (011)(000)(000)_{(2)} = 192_{10}$, $S_2 = 0$. Шаг 8. $i = 1$, $i \leq 2$.

Шаг 5. $C_1 = (10)(000)(010)(000)(010)_{(3)} = 8322_{10}$, $C_2 = 0$.

Шаг 6. $M_1 = (1)(110)(001)(110)(001)(110)_{(3)} = 58254_{10}$, $M_2 = 0$.

Шаг 7. $S_1 = (100)(001)(001)(000)(100)_{(2)} = 16964_{10}$, $S_2 = 0$.

Шаг 8. $i = 2$, $i \leq 2$.

Шаг 5. $C_1 = 0$, $C_2 = 0$.

Шаг 6. $M_1 = 0$, $M_2 = 0$.

Шаг 7. $S_1 = (100)(001)(001)(000)(100)_{(2)} = 16964_{10}$, $S_2 = 0$.

Шаг 8. $i = 3$, $i > 2$.

Шаг 9. $S_1 = (1)(000)(010)(000)(001)(000)_{(2)} = 33800_{10}$, $S_2 = 0$.

Шаг 10. $S = (1)(000)(010)(000)(001)_{(2)} = 4225_{10}$.

Шаг 11. $B = (1)(000)(010)(000)(000)_{(2)} = 4224_{10}$; $S = 1$; $B = (110)(000)(101)(111)(000)_{(2)} = 24952_{10}$; $S = (110)(000)(101)(111)(001)_{(2)} = 24953_{10}$. \square

Проверка. $A=(101)(000)(100)(111)(010)_{(2)}=\{(5)_{(10)}(0)_{(10)}(4)_{(10)}(7)_{(10)}(2)_{(10)}\}$, $S=\{(7-2*(7-5)^2)_{(10)}(0)_{(10)}(7-2*(7-4)^2)_{(10)}(7-2*(7-7)^2)_{(10)}(2*2^2)_{(10)}\}$. ЛП операции возведения в квадрат и умножения на 2 выполняются блоком, после чего отбрасываются три младших разряда. $S=\{(7-1)_{(10)}(0)_{(10)}(7-2)_{(10)}(7-0)_{(10)}(1)_{(10)}\}=\{(6)_{(10)}(0)_{(10)}(5)_{(10)}(7)_{(10)}(1)_{(10)}\}=\{(110)(000)(101)(111)(001)\}_{(2)}$. Последнее двоичное число равно 24953_{10} и совпадает с результатом тестового примера.

В отличие от исходного варианта (Рис. 1), ЛП алгоритм КИ необратимо нивелирует значения ФП вблизи максимального и минимального значений. Как следует из рис. 2, значения $\bar{\mu}_A=0$ при $\bar{\mu}_A \in \{0,1,2,3\}$ и значения $\bar{\mu}_A=31$ при $\bar{\mu}_A \in \{28,29,30,31\}$ не различимы и не могут быть различены при последующей обработке. Таким образом, необратимо убираются соответствующие детали объекта. Данная особенность должна учитываться при проектировании конкретных приложений алгоритма.

Как следует из графиков рис. 1 и 2, при применении процедуры КИ крутизна ФП увеличивается вблизи значений $\mu_A=0,5$ и $\bar{\mu}_A=15$ и уменьшается вблизи $\mu_A=0, \bar{\mu}_A=1, \mu_A=0$ и $\bar{\mu}_A=31$. Таким образом, рассмотренный алгоритм повышает степень определенности (вероятность, весомости, значимость – в зависимости от контекста) для более определенных фрагментов объекта и понижает для менее определенных. Сказанное может быть пояснено на примере обработки изображений с градациями серого цвета. Наименее определены фрагменты объекта вблизи среднего уровня ($\mu_A=0,5, \bar{\mu}_A=15$). Они являются “серыми”, в отличие от “черных” ($\mu_A=0, \bar{\mu}_A=0$) и “белых” ($\mu_A=1, \bar{\mu}_A=31$). Поэтому при КИ градации “серого” максимально смещаются к “черному” и “белому”. Градации же вблизи “черного” и “белого” смещаются слабо, но наиболее близко расположенные к “абсолютно черному” и “абсолютно белому” сливаются с ними и теряются ($\bar{\mu}_A \in \{0,1,2,3\}$ и $\bar{\mu}_A \in \{28, 29, 30, 31\}$, рис. 2).

Точка $\mu_A=0,5, \bar{\mu}_A=15$, не претерпевает изменения при КИ. Это значение является опорным и соответствует в теории НМ уровню, по которому строится четкое множество, минимально удаленное от нечеткого в среднеквадратическом смысле [1]. Минимальная удаленность на интуитивном уровне соответствует *сохранению* равновесия параметров объекта (баланс “черного” и “белого” в случае обработки изображений). Таким образом, рассмотренный алгоритм КИ позволяет *равновесно* интенсифицировать контрастность объекта. Но нечеткая обработка может вестись не для сохранения, а для *нарушения* баланса и выявления некоторых отдельных интересующих элементов объекта не в “серой” области, а в градациях вблизи “белого” или “черного”. В этом случае может представить интерес модифицированная процедура - *неравновесная* КИ:

$$A^{n,l}=\{x^{n,l}_1, x^{n,l}_2, \dots, x^{n,l}_r, \dots, x^{n,l}_n\}, \mu_{A'}(x^l_i) = \begin{cases} M(\mu_A(x_i))^2, & 0 \leq \mu_A(x_i) \leq \left(\frac{1}{M}\right) \\ 1 - M(1 - \mu_A(x_i))^2, & \left(\frac{1}{M}\right) < \mu_A(x_i) \leq 1 \end{cases}$$

где $M > 1, M \neq 2$. ЛП алгоритм модифицированной процедуры КИ отличается формированием шаблона W и требует отдельного рассмотрения.

Выводы. Предложен локально-параллельный вариант нечеткого алгоритма контрастной интенсификации. Отмечено, что алгоритм не нарушает нормальности, не смотря на субнормальность результата применяемой в нем процедуры локально-параллельного умножения. Представлено пошаговое описание алгоритма и тестовый пример. Обсуждены особенности его использования, в том числе модифицированный неравновесный вариант.

Список литературы: 1. Поспелов Д.А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986, 312 с. 2. Михаль О.Ф., Руденко О.Г. Принцип локальной параллельности в задачах обработки нечеткой информации. Базовые операции // Доповіді НАН України. 1999. № 8. С. 71-75. 3. Михаль О.Ф., Руденко О.Г. Принцип локальной параллельности в задачах обработки нечеткой информации. Расширенный набор операций // Доповіді НАН України. 2000. № 1. С. 76-78.