

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 681.3

БОГУШ Рихард Петрович

**АЛГОРИТМЫ ФАКТОРИЗАЦИИ БИНАРНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ
УСКОРЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СИГНАЛОВ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2001

Работа выполнена в Полоцком государственном университете

Научные руководители:

Доктор технических наук, профессор
Абламейко С.В. (Институт технической ки-
бернетики НАН Беларуси, лаборатория обра-
ботки и распознавания изображений).
Кандидат технических наук,
Мальцев С.В. (Полоцкий государственный
университет, кафедра радиоэлектроники).

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
Крот А.М. (Институт технической кибернети-
ки НАН Беларуси, лаборатория моделирования
самоорганизующихся систем).
Кандидат физико-математических наук, доцент
Липницкий В.А. (Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлек-
тронки, кафедра высшей математики).

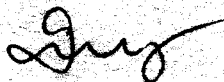
Опонирующая организация - Белорусский государственный университет,
г. Минск

Защита диссертации состоится «15» января 2002 г. в 14³⁰ на засе-
дании Совета по защите диссертаций Д 01.04.01 при Государственном
научном учреждении «Институт технической кибернетики Националь-
ной академии наук Беларуси» по адресу: 220012, Минск, ул. Сурганова,
6, тел. ученого секретаря (017) 284-21-47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государствен-
ного научного учреждения «Институт технической кибернетики Нацио-
нальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «12» декабря 2001 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор технических наук



С.Ф. Липницкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время цифровая обработка изображений и сигналов широко используется для решения множества прикладных задач в радиолокации, связи, измерительной технике, медицине и др. областях. Повышение эффективности применения цифровых систем осуществляется не только за счет развития элементной базы, но и путем совершенствования алгоритмов цифровой обработки. На современном этапе развития техники и технологии предлагается широкий спектр цифровых процессоров общего и специального назначения, т.е. существует возможность практической реализации различных эффективных алгоритмов цифровой обработки.

Формальной сущностью цифровой обработки бинарных изображений и сигналов в матричном представлении является вычисление векторно-матричного произведения. Сокращение сложности вычисления данной операции приводит к уменьшению временных затрат при выполнении ряда процедур цифровой обработки изображений и сигналов. Уменьшение вычислительных затрат достигается за счет применения быстрых алгоритмов обработки, основанных на разложении (факторизации) матрицы на ряд слаботолненных матриц-сомножителей и последовательного умножения входного вектора на каждый из сомножителей. Подобный подход применим для большинства существующих алгоритмов цифровой обработки, но использование комплексной арифметики или арифметики цифровых колец приводит к дополнительным вычислительным затратам. Для сокращения вычислительных затрат при обработке бинарных изображений и сигналов являются перспективными алгоритмы прямого вычисления векторно-матричного произведения, основанные на факторизации матриц.

Прямые методы вычисления векторно-матричного произведения, основанные на известных алгоритмах факторизации матриц произвольных бинарных сигналов, позволяют проводить обработку сигналов любой длины и структуры. Однако оценка верхней границы сложности вычислений для существующих алгоритмов и реальная вычислительная сложность значительно превышают теоретически рассчитанный нижний предел сложности. Применение таких алгоритмов для обработки бинарных изображений требует дополнительных вычислительных затрат из-за различного алфавитного представления бинарных изображений и сигналов.

Таким образом, разработка ускоренных процедур цифровой обработки бинарных изображений и сигналов с использованием факторизации растровых и сигнальных матриц является актуальной задачей.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема диссертационной работы выполнялась в Полоцком государственном университете в рамках следующих тем:

- НИР ГБ4296 «Разработка диагностических систем на основе датчиков физических величин с разработкой чувствительных элементов преобразователей неэлектрических величин в электрические», 1996-2000гг.;
- НИР ГБ2320 «Разработка алгоритмов цифровой обработки сигналов повышенного быстродействия», 2000г.;
- НИР ГБ2721 «Формирование и обработка имито - и криптостойких сигналов для широкополосных систем передачи информации», 2001г.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов факторизации бинарных матриц для ускоренного вычисления векторно-матричного произведения при корреляционной обработке изображений и сигналов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать методику факторизации растровых матриц бинарных изображений;
- оптимизировать блочное разбиение бинарных матриц при факторизации;
- разработать алгоритм факторизации матриц бинарных сигналов с использованием переупорядочивания строк по коду Грея;
- разработать корреляционный алгоритм поиска бинарных объектов на изображении на основе вычисления векторно-матричного произведения;
- разработать аппаратную и программную реализацию вычисления векторно-матричного произведения на основе полученных алгоритмов факторизации матриц.

Методология и методы проведенного исследования

В диссертационной работе использовались методы цифровой обработки сигналов и изображений, матричного анализа, комбинаторики и методы создания программных систем.

Научная новизна полученных результатов

Доказана возможность факторизации матриц бинарных изображений произвольных размеров и структуры в алфавитном представлении растровой информации. Разработан алгоритм факторизации растровых матриц бинарных изображений.

Разработан алгоритм факторизации бинарных матриц сигналов и изображений, отличающийся тем, что используется оптимизация блочного разбиения при факторизации матриц. При этом вначале осуществляется внутренняя факторизация (факторизация подматриц), а затем – внешняя.

Разработан алгоритм факторизации бинарных матриц, отличающийся от уже существующих тем, что для дальнейшего уменьшения вычислительных затрат после оптимального внешнего блочного разбиения строки подматриц переупорядочиваются по коду Грея. При факторизации полученных подматриц используются структурные свойства матриц полного кода. Представлены математические утверждения, позволяющие осуществлять факторизацию матриц полного кода.

Разработан алгоритм корреляционного поиска бинарных объектов на изображении, отличающийся тем, что без дополнительных вычислительных затрат позволяет обнаруживать объекты, повернутые относительно горизонтальной оси на 180° .

Практическая значимость полученных результатов

Разработана программная реализация для факторизации произвольных бинарных матриц и матриц нелинейных бинарных сигналов. Разработаны устройства для ускоренной синхронизации нелинейных бинарных сигналов и быстрого декодирования кодов, полученных на основе последовательностей де Брейна. Разработан программный комплекс корреляционного поиска бинарных объектов на изображении с использованием факторизации растровых матриц эталонов. Установлено, что при этом реальные вычислительные затраты в несколько раз ниже (в зависимости от структуры изображения) от максимально необходимого числа операций.

Результаты выполненных исследований внедрены и используются на Новополоцком заводе «Измеритель» при разработке устройств синхронизации систем телеметрии, на РУПТН «Дружба» в системе синхронизации ультразвукового измерителя расхода жидкостей, при проведении научно-исследовательских работ и в учебном процессе на кафедре радиоэлектроники Полоцкого государственного университета.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- алгоритм факторизации растровых матриц бинарных изображений;
- оптимизация блочного разбиения при факторизации растровых и сигнальных бинарных матриц;
- алгоритм факторизации произвольных матриц бинарных сигналов с использованием переупорядочивания строк подматриц по коду Грея при выполнении внутренней факторизации;
- алгоритм корреляционного поиска бинарных объектов на изображении;

Личный вклад соискателя

Основные научные и практические результаты диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично автором. Научные руководители принимали участие в постановке задач, определении возможных путей их решения и их предварительном анализе.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня: Международной 53-й конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА. – Минск, 1999; 3-й Республиканской конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях». - Гомель: 2000; 5-й Республиканской конференции студентов, магистрантов и аспирантов «НИРС – 2000». - Гродно, 2000; Международном научно-техническом семинаре «Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». - Новополоцк, 2000; 5-й Международной конференции «Современные средства связи» - Нарочь, 2000; 2-й Международной конференции «Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях» – Минск, 2000; 6th International Conference «Pattern

Recognition and Information Processing» - Minsk, 2001; 6th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR'01 – Seattle, USA, 2001.

Опубликованность результатов

По материалам диссертации опубликовано 12 работ. Из них, в том числе 3 статьи в научных журналах, 1 статья в сборнике научных трудов, 6 статей в сборниках материалов конференций, 1 тезис доклада и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка используемых источников и приложения, содержит 103 страницы основного машинописного текста, 28 рисунков, 19 таблиц. Библиографический список состоит из 120 наименований литературных источников. Общий объем работы составляет 117 машинописных страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко излагается состояние предметной области, и определяются основные задачи исследования.

В **первой главе** рассматривается обработка бинарных изображений и сигналов с использованием корреляционного анализа. Показано, что корреляционная обработка изображений и сигналов во многих аспектах предполагает вычисление векторно-матричного произведения. Для бинарных изображений и сигналов сокращение объема вычислений при корреляционной обработке возможно за счет разложения исходной матрицы изображения (сигнальной матрицы) на ряд слабозаполненных матриц-сомножителей (факторизации) и последовательного умножения входного вектора на каждую из матриц. Использование ряда известных методов факторизации (Гуда, Пойды, Ярославского) накладывает существенное ограничение на возможность факторизации растровых матриц изображений и сигналов. Отмечено, что оценка верхней границы сложности вычисления векторно-матричного произведения для существующих алгоритмов факторизации произвольных сигнальных матриц и реальная вычислительная сложность для ряда конкретных сигналов значительно превышают нижнюю границу. Кроме этого, известные алгоритмы факторизации произвольных бинарных матриц из-

за различного алфавитного представления бинарных сигналов и изображений не позволяют минимизировать аддитивные затраты при обработке изображений.

Следовательно, для повышения быстродействия корреляционных систем обработки бинарных изображений и сигналов необходима разработка более эффективных алгоритмов на основе прямых методов вычисления векторно-матричного произведения с использованием факторизации матриц.

Во второй главе разрабатываются алгоритмы факторизации матриц бинарных изображений и сигналов.

Факторизация растровых матриц изображений. Бинарное изображение в растровом виде может быть представлено в виде матрицы A размером $M \times N$ с элементами (пикселями) изображения $a_{ij}=1,0$. Элементы матрицы A $a_{ij}=0$ для пикселя соответствующего белой части изображения, а $a_{ij}=1$ - для пикселя темной части. Элементы i -й строки a_{ij} и a_{ik} назовем противоположными (инверсными), причем противоположность понимается в смысле инверсии представления растровой информации, т.е. если $a_{ij}=0(1)$ то $a_{ik}=1(0)$. Тогда строка a_i противоположна строке a_k , если все элементы i -й строки соответственно противоположны элементам k -й строки. Строка a_i равна строке a_k , если все элементы i -й строки соответственно равны элементам k -й строки.

Теорема 1. Любую матрицу A размером $M \times N$ состоящую из 1,0 можно представить в виде произведения:

$$A = D \times B,$$

$$M_1 \times N_1 = M_2 \times N_2$$

где: B - модифицированная матрица размером $N_1 \times N$, $N_1 \leq N$, получаемая из матрицы A после вычеркивания повторяющихся и инверсных строк.

D -матрица размером $M \times N_1$ с элементами:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } b_j = a_i \\ 0, & \text{если } b_j = \bar{a}_i \\ \text{иначе информационный символ отсутствует.} \end{cases} \quad (1)$$

Теорема 2. Любую матрицу A размером $M \times N$ состоящую из 1,0 можно представить в виде произведения h слабозаполненных матриц сомножителей с блочно-диагональной структурой, каждая из которых содержит не более двух информационных символов в строке и $h = \lceil \log_2 N \rceil + 1$, $\lceil * \rceil$ - наибольшее ближайшее целое.

Алгоритм факторизации произвольной бинарной растровой матрицы A размером $M \times N$ состоит из следующих шагов:

1. Деление растровой матрицы на блоки, состоящие из двух столбцов. Матрица A разбивается на блоки A_j , которые состоят из попарно соседних столбцов (в общем случае). Число блоков $P = \lfloor (N+1)/2 \rfloor$;

2. Формирование блочно-диагональной матрицы C_i — i -го множителя факторизации. Для каждого из блоков A_j образуется вспомогательная матрица B_j^P , которую получим путем вычеркивания в блоке повторяющихся и инверсных строк согласно теореме 1. i -ый множитель факторизации формируется из матриц B_j^P и, согласно теореме 2, имеет блочно-диагональную структуру $C_i = \text{diag } B_j^P$;

3. Формирование матрицы перестановок D_i для i -го множителя факторизации. Матрица перестановок D_i с блоками D_j образуется из вспомогательных матриц B_j^P и блоков матрицы A_j . Для этого каждая строка блока A_j сравнивается со строками матриц B_j^P и находится элемент d_{ij} согласно выражению (1);

4. Контроль числа шагов: если $h = \lfloor \log_2 N \rfloor$ то факторизация завершена, иначе повторяем п.1-3 для D_i .

Оптимизация блочного разбиения матриц при факторизации.

Установлено, что минимальный уровень сложности вычислений достигается при разбиении квадратной матрицы размером $2^n \times 2^n$ на блоки размером $m = (n-1)$. Для длин $2^n < N < 2^{n+1}$ оптимальный размер блока может быть определен как $m = \lceil \log_2 N + 0.5 \rceil - 1$, $\lceil * \rceil$ — наименьшее ближайшее целое. Факторизованная бинарная матрица с использованием оптимального блочного разбиения представляется в виде:

$$A = D_{h_2}^{ext} \cdot \prod_{i=1}^{h_2} C_i^{ext} \cdot D_{h_1}^{int} \cdot \prod_{i=1}^{h_1} C_i^{int}, \quad C_i = \begin{bmatrix} B_i^{(1)} & & \\ & B_i^{(2)} & \\ & & B_i^t \end{bmatrix},$$

$$t_{int} = \begin{cases} \left\lceil \frac{m}{2^i} \right\rceil = \frac{m}{2^i} & \text{if } m \equiv 0 \pmod{2^i} \\ \left\lceil \frac{m}{2^i} \right\rceil + 1 & \text{if } m \not\equiv 0 \pmod{2^i} \end{cases},$$

$$t_{ext} = \begin{cases} \left\lceil \frac{N}{m2^i} \right\rceil = \frac{N}{m2^i} & \text{if } N \equiv 0 \pmod{m2^i} \\ \left\lceil \frac{N}{m2^i} \right\rceil + 1 & \text{if } N \not\equiv 0 \pmod{m2^i} \end{cases},$$

$$h_2 = \lfloor \log_2(N/m) \rfloor, h_1 = \lfloor \log_2 m \rfloor.$$

При этом достигается уменьшение оценки верхней границы сложности до 17% по сравнению с известными алгоритмами.

Алгоритм факторизации:

1. Ввод исходной бинарной матрицы размером $N \times N$;
2. Деление исходной матрицы A на подматрицы A_i размером $N \times m$;
3. Формирование блочно-диагональной матрицы C на основе модифицированных матриц B^k ;
4. Формирование матрицы перестановок D ;
5. **Внутренняя факторизация**

5.1. Деление модифицированных матриц B^k на блоки и построение блочно-диагональной матрицы C_i^{int} - i -го сомножителя внутренней факторизации;

5.2. Формирование матрицы перестановок, D_i^{int} , для i -го сомножителя внутренней факторизации;

5.3. Контроль числа шагов: если $h_1 = \lfloor \log_2 m \rfloor$ то внутренняя факторизация завершена, иначе повторяем п.5.1.-5.2. для D_i^{int} ;

6. Внешняя факторизация.

6.1. Деление матрицы перестановок D на блоки размером $N \times m 2^i$;

6.2. Формирование блочно-диагональной матрицы C_i^{ext} - i -го сомножителя внешней факторизации;

6.3. Формирование матрицы перестановок, D_i^{ext} , для i -го сомножителя внешней факторизации;

6.4. Контроль числа шагов: если $h_2 = \lfloor \log_2(N/m) \rfloor$ то факторизация завершена, иначе повторяем п.6.1.-6.3. для D_i^{ext} .

Факторизация матриц бинарных сигналов с использованием переупорядочивания строк подматриц по коду Грея. Матрица полного кода имеет размер $2^n \times n$ и содержит в качестве строк (в алфавите 1, -1) все двоичные числа от 0 до $2^n - 1$.

Лемма 1. Матрицу W_n размером $2^{n-1} \times n$, строки которой упорядочены по коду Грея, можно представить в виде произведения 2^{n-1} слабозаполненных матриц:

$$W_n = \prod_k V_{n,k}, \quad (k = 2^{n-1} - 1, 2^{n-1} - 2 \dots 0),$$

где матрица $V_{n,k}$ имеет размер:

$$V_{n,k} = \begin{cases} n \times n, & \text{если } k = 0 \\ (n+k) \times (n+k-1), & \text{если } 0 < k < 2^{n-1} - 1 \\ 2^{n-1} \times (n+k-1), & \text{если } k = 2^{n-1} - 1 \\ 2^{n-1} \times 2^{n-1} & \text{если } k > 2^{n-1} - 1 \end{cases}$$

и элементы матрицы определяются как

$$V_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } k = 0, i = 0 \\ 2, & \text{если } k = 0, j = i > 0 \\ 1, & \text{если } k > 0, j = i < k \\ 1, & \text{если } k > 0, j + 1 = i = k \\ (W(n)_{k,(j-k+1)} - W(n)_{(k-1),(j-k+1)})/2 & \text{если } k > 0, i = k, j > k \\ 1, & \text{если } k > 0, j + 1 = i > k \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Примечание: Если $k > 2^{n-1} - 1$ то $V(n,k) = I$ (I – единичная матрица).

Теорема 3. Матрицу A размером $M \times n$, состоящую из 1,-1 и содержащую все строки полного кода (за исключением инверсных) можно представить в виде произведения: $A = B \cdot C$,

где: C – матрица размером $2^{n-1} \times n$, B – матрица размером $M \times 2^{n-1}$ с элементами

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } c_j = a_i \\ -1, & \text{если } c_j = -a_i \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Алгоритм факторизации бинарных матриц на основе оптимального блочного разбиения и переупорядочивания строк подматриц по коду Грея требует выполнения следующих шагов:

1. Ввод исходной бинарной матрицы размером $N \times N$;
2. Деление исходной матрицы A на подматрицы A_i размером $N \times m$;
3. Формирование блочно-диагональной матрицы C из матриц $W(n)$, $W(l)$;
4. Формирование матрицы перестановок D ;
5. **Внутренняя факторизация** - формирование блочно-диагональных матриц для i -го шага факторизации из матриц $V_{(n,b_i)}^{\text{int}}$ и $V_{(l,b_i)}^{\text{int}}$, полученных на основе леммы;

6. Внешняя факторизация

- 6.1. Деление матрицы перестановок D на блоки размером $N \times m2^i$;

6.2. Формирование блочно-диагональной матрицы C_i^{ext} - i -го сомножителя внешней факторизации;

6.3. Формирование матрицы перестановок, D_i^{ext} , для i -го сомножителя внешней факторизации;

6.4. Контроль числа шагов: если $h_2 = \lfloor \log_2(N/m) \rfloor$ то факторизация завершена, иначе повторяем п.6.1.-6.3. для D_i^{ext} .

Аддитивная сложность вычисления корреляционных функций. Общее количество операций для вычисления двумерной корреляции изображений определяется как:

$$C \approx M \cdot K \cdot \frac{N}{m} + M \cdot \left(N \cdot \left\lfloor \frac{N}{m} \right\rfloor - 1 \right).$$

Оценка верхней границы сложности вычисления векторно-матричного произведения для бинарных сигналов определяется как:

$$S = \frac{2^{m-1} - 2}{m} + \left\lfloor \frac{N}{m} \right\rfloor - 1.$$

В **третьей** главе приведены практические результаты применения разработанных алгоритмов для корреляционной обработки нелинейных бинарных сигналов.

Среди известных процедур синхронизации, беспойсковая синхронизация наиболее привлекательна для машинной обработки, поскольку позволяет осуществлять прием сигнала в «целом» и реализовать потенциальную помехоустойчивость. Сокращение времени вхождения в синхронизм возможно путем уменьшения вычислительной сложности операции векторно-матричного произведения на базе факторизации матриц. Существующие ускоренные алгоритмы векторно-матричного умножения позволяют сократить объем вычислений для циркулянтов сигналов на основе двузначных характеров по сравнению с традиционным методом. Дальнейшее сокращение вычислительных затрат при обработке таких сигналов достигается за счет использования алгоритма факторизации матриц на основе оптимального блочного разбиения и переупорядочивания строк подматриц по коду Грея.

Анализ полученных результатов исследований (рис.1-рис.3) свидетельствует о том, что использование разработанного алгоритма факторизации на основе оптимального блочного разбиения и переупорядочивание строк подматриц по коду Грея обеспечивает сокращение реальных вычислительных затрат для квадратично-вычетных кодов, характеристических последовательностей и кодов Якоби. Величина выигрыша зависит от размеров и внутренней

структуры циркулянта. Кроме этого, установлено, что для некоторых длин сигналов значения верхней границы практически совпадает с реальной сложностью вычисления векторно-матричного произведения.

В работе представлены структурные схемы универсального последовательно-параллельного вычислителя векторно-матричного умножения на основе разработанных алгоритмов и устройства быстрого декодирования кодов на основе последовательностей де Брейна методом максимального правдоподобия с использованием перестановки строк и столбцов кодовой матрицы и применении структурных свойств матриц Адамара при декодировании.

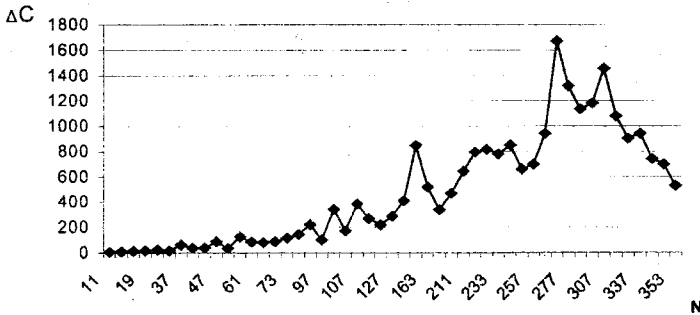


Рис.1. Уменьшение числа операций для квадратично- вычетных последовательностей

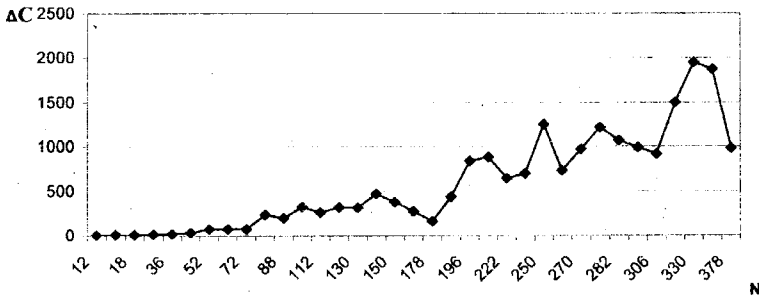


Рис.2. Уменьшение числа операций для характеристических последовательностей

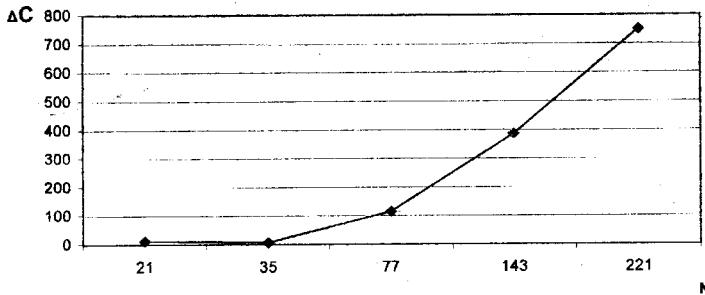


Рис.3. Уменьшение числа операций для последовательностей Якоби

Четвертая глава посвящена корреляционному поиску объектов на бинарном изображении с использованием факторизации эталонов.

Корреляционный поиск объектов на изображении. Разработанный алгоритм позволяет на основе анализа главной и второстепенной диагоналей результирующей корреляционной матрицы без дополнительных аддитивных затрат обнаруживать объекты, идентичные эталону и повернутые на 180^0 относительно горизонтальной оси. Алгоритм корреляционного поиска заданного объекта $A=\{a_{ij}\}$ размером $m \times n$ на изображении $D=\{d_{ij}\}$ размером $M \times N$. требует выполнения следующих шагов:

1. Выделение первого фрагмента изображения. Выделяется первый фрагмент размером $M \times n$ с левой части растрового изображения;

2. Вычисление двумерной корреляции между эталоном и выделенным фрагментом изображения. Вычисление осуществляется путем умножения матрицы выделенного фрагмента изображения на матрицу эталона объекта;

3. Определение наличия объекта на основе анализа значений элементов корреляционной матрицы $H=\{h_{ij}\}$. Для этого осуществляется проверка следующих условий:

если $h_{i,j}+h_{i+1,j+1}+h_{i+2,j+2}+\dots+h_{n-1,j+n-1} \geq K$ - принимается решение о наличии объекта идентичного с эталоном;

если $h_{i,j}+h_{i+1,j-1}+h_{i+2,j-2}+\dots+h_{n-1,j+n-1} \geq K$ - принимается решение о наличии объекта повернутого относительно горизонтальной оси на 180^0 ;

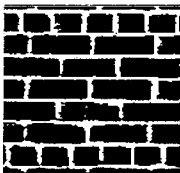
где - K - предварительно установленный числовой порог;

4. Контроль числа сдвигов. Если число сдвигов $t=N-n$ то поиск окончен;

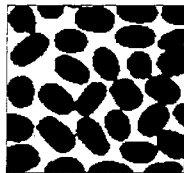
5. Выделение следующего фрагмента изображения. Сдвиг вправо на один элемент на принятом изображении, выделение следующего фрагмента размером $M \times n$ и переход к п.2.

Вычислительные затраты при обработке реальных изображений. Бинарные изображения характеризуется некоторой регулярностью структуры, что обеспечивает повторяемость фрагментов строк растровых матриц и позволяет предположить существенное уменьшение реальных вычислительных затрат по сравнению с верхней границей. Для экспериментов по оценке реальных вычислительных затрат использовались изображения с различной регулярностью структуры (рис.4).

Экспериментально определено, что при поиске объектов на изображении корреляционным методом с использованием факторизации матриц для сокращения временных затрат обрабатываемое прямоугольное изображение необходимо представлять в книжном формате. Для прямоугольных объектов уменьшение временных затрат достигается при хранении их в альбомном формате.



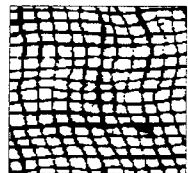
а)



б)



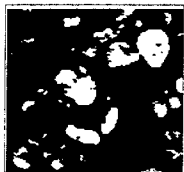
в)



г)



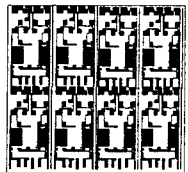
л)



е)



ж)



з)

Рис.4. Изображения с различной регулярностью структуры

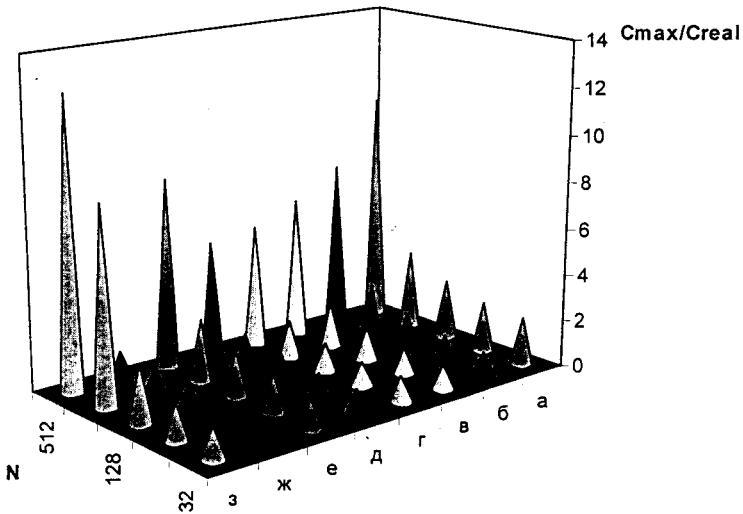


Рис.5. Уменьшение вычислительных затрат относительно верхней границы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, можно сформулировать следующим образом:

1. Корреляционная обработка изображений и сигналов характеризуется значительной вычислительной сложностью и временными затратами. Сокращение вычислительных затрат достигается за счет использования быстрых алгоритмов обработки, основанных на факторизации матриц. Однако для бинарных изображений и сигналов применение таких преобразований приводит к дополнительным вычислительным затратам за счет использования комплексной арифметики, арифметики числовых колец или других специальных математических структур. Следовательно, для бинарных изображений и сигналов существует необходимость развития прямых

методов вычисления корреляционных функций, основанных на факторизации исходных матриц [1,3-5,9].

2. Доказана возможность факторизации матриц бинарных изображений произвольных размеров и структуры в алфавитном представлении растровой информации. Разработан алгоритм факторизации растровых матриц бинарных изображений. В основе алгоритма лежит исключение на каждом этапе факторизации повторяющихся и инверсных строк [4,10,11].

3. Проведена оценка максимально необходимого числа операций типа сложение-вычитание, необходимого для вычисления двумерной корреляции с использованием факторизованного представления растровой матрицы эталона. По результатам практических исследований установлено, что при обработке изображений на основе факторизации матриц реальные вычислительные затраты при вычислении двумерной корреляции будут в несколько раз ниже максимально необходимых для любых размеров изображений. Выигрыш зависит от структуры изображения, причем с увеличением регулярности структуры выигрыш также увеличивается [4,11].

4. Разработан алгоритм факторизации произвольных бинарных матриц на основе оптимального блочного разбиения матриц. Умножение вектора, на факторизованную таким образом матрицу, представляется в виде выполнения внутренней (умножение вектора на матрицы блоки) и внешней (сложение результатов внутренних вычислений) процедур. Получено выражение для оценки верхней границы сложности вычисления векторно-матричного произведения. Сравнение с известными алгоритмами показывает, что использование данного алгоритма обеспечивает уменьшение оценки верхней границы сложности вычисления векторно-матричного произведения до 17% [6,7].

5. Разработан алгоритм факторизации произвольных матриц бинарных сигналов с использованием оптимального блочного разбиения и переупорядочивания строк полученных подматриц по коду Грея. Доказана возможность факторизации матриц, состоящих из строк полного кода. Применение алгоритма обеспечивает уменьшение оценки верхней границы сложности по сравнению с базовым методом до 25% [3,8,9].

6. Разработан корреляционный алгоритм поиска бинарных объектов на изображении. В основе алгоритма лежит анализ элементов главных и второстепенных диагоналей корреляционной матрицы, полученной в результате прямого матричного умножения. Алгоритм позволяет без дополнительных вычислительных затрат на определение

корреляционных функций обнаруживать объекты, идентичные эталону, и объекты, повернутые относительно горизонтальной оси на 180° [4].

Полученные в диссертационной работе результаты предназначены для использования в системах корреляционного поиска бинарных объектов и в радиотехнических системах, использующих корреляционную обработку бинарных сигналов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и сборниках

1. Мальцев С.В., Богуш Р.П. Быстрое декодирование кодов на основе последовательностей де Брейна // Известия ВУЗов. Радиозлектроника. – 2000. - №2. - С.79-80.

2. Мальцев С.В., Богуш Р.П. Бинарные последовательности для криптостойких систем связи // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – №1(9)/1. – С.142-143.

3. Мальцев С.В., Богуш Р.П. Уменьшение аддитивных затрат процедуры беспойсковой синхронизации бинарных сигналов на основе двужначных характеров // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. - №1(11)/2. – С.26-28.

4. Абламейко С.В., Богуш Р.П., Мальцев С.В. Сокращение вычислительных затрат при корреляционной обработке бинарных изображений // Цифровая обработка изображений. - 2001. - Вып.5.- С. 130-141.

Тезисы докладов и материалы конференций

5. Мальцев С.В., Богуш Р.П., Курилович А.В. Сокращение вычислительной сложности операции векторно-матричного умножения // Мат. 53-й Междунар. конф. БГПА, Минск, 4-6 февраля 1999г./ Мин. образ. РБ, БГПА. – Минск, 1999. – Ч.2. – С.97.

6. Мальцев С.В., Богуш Р.П., Седин А.В. Уменьшение сложности вычисления векторно-матричного произведения // Мат. III Республ. конф. студентов и аспирантов "Новые математические методы в проектировании, производстве и научных исследований", Гомель, 13-18 марта 2000г./Мин. образ. РБ, Гомельский гос. ун-т. – Гомель, 2000. – Ч.1. – С.136-137.

7. Богущ Р.П. Ускоренная синхронизация сигналов на основе двузначных характеров // Мат. V-й Республ. конф. "НИРС-2000", Гродно, 25-27 апр.2000г./ Мин. обр. РБ, ГрГУ. – 2000. – Ч.4. – С.104-107.

8. Мальцев С.В., Богущ Р.П., Седин А.В. Использование переупорядочивания данных по коду Грея при обработке бинарных сигналов // Мат. Междунар. науч.-техн. семинара "Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств", Новополоцк, 29-31 мая 2000г./ Мин. образ. РБ, НАН Беларуси, Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2000. - С.196-202.

9. Мальцев С.В., Богущ Р.П. Сокращение сложности вычисления векторно-матричного произведения при цифровой обработке бинарных сигналов // Докл. II-й Междунар. конф. "Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях", Минск, 28-30 ноября 2000г./ НАН Беларуси, Ин-т. техн. кибернетики. – Минск, 2000. – Ч.1. - С.25-30.

10. Bogush R, Maltsev S, Ablameyko S, Kamata S. Correlation on binary images processing based on matrix factorisation // Proc. of 6 Int.Conf. "Pattern Recognition and Information Processing". - Minsk, 2001. – V.1. - P.87-93.

11. Bogush R., Maltsev S., Ablameyko S., Uchida S., Kamata S. An efficient correlation computation method for binary images based on matrix factorisation // Proc. of 6th Int.Conf. on Document Analysis and Recognition. – Seattle, 2001. – P.312-316.

Патент на полезную модель

12. Пат. №207, МПК G 06 F 5/00. Устройство вычисления векторно-матричного произведения / Мальцев С.В., Богущ Р.П. - № u 20000048; Заявл. 30.03.2000; Опубл. 30.12.2000 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.— 2000.— №4—С. 236.

РЕЗЮМЕ

диссертационной работы Богуша Рихарда Петровича "Алгоритмы факторизации бинарных матриц для ускоренной обработки изображений и сигналов".

Ключевые слова: бинарные изображения и сигналы, корреляционная обработка, векторно-матричное произведение, растровые и сигнальные матрицы, факторизация.

Диссертационная работа посвящена проблеме ускоренной обработки бинарных изображений и сигналов. Ее целью является разработка и применение алгоритмов факторизации бинарных матриц, позволяющих уменьшить временные затраты при цифровой обработке изображений и сигналов.

Доказана возможность факторизации произвольных матриц бинарных изображений в алфавитном представлении растровой информации. Разработан алгоритм факторизации матриц бинарных изображений. Введено понятие внешней и внутренней процедур матричной факторизации. Дальнейшее сокращение вычислительных затрат достигается за счет оптимизации блочного разбиения при выполнении внешней процедуры факторизации. Разработан алгоритм факторизации бинарных матриц на основе оптимального блочного разбиения. Для бинарных сигналов предлагается использование переупорядочивания строк подматриц по коду Грея при выполнении внутренней процедуры факторизации, что позволяет уменьшить вычислительные затраты векторно-матричного умножения. Разработан алгоритм факторизации бинарных матриц с использованием переупорядочивания строк по коду Грея. Разработан алгоритм корреляционного поиска бинарных объектов на изображении, позволяющий без дополнительных вычислительных затрат обнаруживать объекты, идентичные эталону и повернутые относительно горизонтальной оси на 180° .

Представлено описание программных модулей, разработанных на основе предложенных алгоритмов, а также приведены результаты экспериментальных исследований по оценке реальных вычислительных затрат. Полученные в диссертационной работе результаты предназначены для применения в системах корреляционного поиска бинарных объектов и в радиотехнических системах, использующих корреляционную обработку бинарных сигналов.

РЭЗІЮМЭ

дысертацыйнай працы Богуша Рыхарда Пятровіча "Алгарытмы фактарызацыі бінарных матрыц для паскоранай апрацоўкі відарысаў і сігналаў".

Ключавыя словы: бінарныя відарысы і сігналы, карэлятыўная апрацоўка, вектарна-матрычны здабытак, растравыя і сігнальныя матрыцы, фактарызацыя.

Дысертацыйная праца прысвечана праблеме паскоранай апрацоўцы бінарных відарысаў і сігналаў. Яе мэтай з'яўляецца распрацоўка і прымяненне алгарытмаў фактарызацыі бінарных матрыц, дазваляючых зменшыць часовыя затраты пры лічбавай апрацоўцы відарысаў і сігналаў. Даказана магчымасць фактарызацыі адвольных матрыц бінарных відарысаў у алфавітным прадстаўленні растравай бінарнай інфармацыі. Распрацаваны алгарытм фактарызацыі матрыц бінарных відарысаў. Уведзена паняцце знешняй і ўнутранай працэдуры фактарызацыі. Наступнае памяншэнне вылічальнай складанасці дасягаецца шляхам аптымізацыі разбіўкі на блокі пры выкананні знешняй працэдуры фактарызацыі. Распрацаваны алгарытм фактарызацыі на падставе аптымальнай разбіўкі на блокі. Для бінарных сігналаў прапануецца прымяненне пераўпарадкавання радкоў па коду Грэя пры выкананні ўнутранай працэдуры фактарызацыі, што дазваляе зменшыць вылічальную складанасць вектарна-матрычнага здабытку. Распрацаваны алгарытм фактарызацыі бінарных матрыц на падставе пераўпарадкавання радкоў па коду Грэя. Распрацаваны алгарытм карэлятыўнага пошуку бінарных аб'ектаў на відарысах, які дазваляе выяўляць аб'екты, ідэнтычныя эталону і павернутыя, адносна гарызантальнай восі на 180° . Прадстаўлена апісанне праграмнай сістэмы, у якой рэалізаваны вышэйапісаныя алгарытмы, і прыведзены вынікі эксперыментальных даследаванняў па ацэнцы рэальных вылічальных затрат.

Вынікі дысертацыйнай працы прызначаны для прымянення ў сістэмах карэлятыўнага пошуку бінарных аб'ектаў і ў радыётэхнічных сістэмах, выкарыстоўваючых карэлятыўную апрацоўку бінарных сігналаў.

SUMMARY

of the dissertation thesis "Binary matrix factorisation algorithms for image and signal processing acceleration" by Bogush Richard Petrovich.

Key words: binary image, binary signal, object detection in image, synchronisation, correlation processing, vector-matrix multiplication (VMM), raster and signal matrix, binary matrix factorisation.

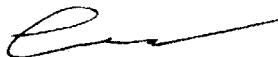
The dissertation is devoted to acceleration of binary image processing (detection of objects) and signal processing (synchronisation).

The main direction of research is to explore the possibility of computational complexity reduction for binary images and signals processing. To do it, the direct calculation of the VMM presented as main part of the processing, and analysed as combination internal and external procedures with utilisation of the binary matrix factorisation approach. Several algorithms for matrix factorisation has been proposed and optimal size of blocks, in which matrix should be decomposed, have been recommended.

The algorithms of the binary signal synchronisation presented as multiplication of the received signals and circulate matrix, and the detection of the maximum component in resulting vector, has been proposed for no-liner signals.

Correlation algorithm of the object search in binary images is developed. The algorithm allows to detect objects that turn out on 180 degrees about horizontal axes.

The results of thesis are already implemented in practise and can be used in systems of image and signal processing.



Подписан к печати 23.11.2001. Формат бумаги 60×84¹/₁₆.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Зак. № 44.

Отпечатано на ризографе Государственного научного учреждения
«Институт технической кибернетики Национальной академии наук Беларуси».
220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6.
ЛПТ № 74 от 17.04.2001.