

№ резервуаров	1	2	3	4	5		
$M_{M1}, m$	1600	4000	8000	16000	40000		
$M_{10}, m$	800	1000	2400	12800	16000		
$x_{10}$	0.50	0.25	0.30	0.80	0.40		
$d_1$	0.08	0.20	0.40	0.80	2.00		
$n$	1	2	3	4	5	$\Delta M, \%$	
5	$x_1^*$ $\Delta M_1, \%$	0.500 0.400	0.250 0.670	0.300 0.670	0.800 0.310	0.175 2.000	0.368
4	$x_1^*$ $\Delta M_1, \%$	0.500 0.400	0.250 0.670	0.300 0.570	0 0	0.395 0.467	0.373
3	$x_1^*$ $\Delta M_1, \%$	0 0	0 0	0.033 5.010	0.057 0.460	0.279 0.610	0.396
2	$x_1^*$ $\Delta M_1, \%$	0 0	0 0	0 0	0.515 0.402	0.282 0.650	0.118

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 26976-86. Нефть и нефтепродукты. Методы измерения массы.—М.: Изд-во стандартов, 1986.—14 с.
- Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование.—М.: Мир, 1975.—534 с.

ЕрIII

23. II. 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIII, № 6, 1990, с. 280—285

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.391.81

А. М. АГАНОВ

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
РАЗМЫТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ОПТИМАЛЬНЫМ  
ВЫБОРОМ ЧИСЛА ИТЕРАЦИЙ

Предлагается метод определения оптимального числа итераций и описывается основанный на нем алгоритм восстановления размытых изображений в автоматическом режиме обработки. Алгоритм вычисляет точные, удовлетворительные оценки изображений без учета широты и оптимального выбора, когда оптическая передаточная функция системы характеризуется экспоненциальным. В работе приведены результаты машинного эксперимента по восстановлению двумерных изображений.

Ил. 2. Библиогр. 1 назв.

Նկարագրված է ազազաղված պատկերների վերականգնման ալգորիթմ, հիմնված իտե-  
րացիաների նպատակահարմար ընդ որոշման առաջարկված մեթոդի վրա: Առանց օպերա-  
տորի մասնակցության կոտրելով է ազազաղված պատկերների բազարար զեա՛աաաաան:  
Ալգորիթմը ներառում է ալն դեպքը, երբ պատկեր ճազորոզ համակարգի օպտիկական փո-  
խանցման ֆունկցիան նշուաաիօն է: Աշխատանքում բերված է ն կրկափ պատկերների վե-  
րականգնման մերենաաաան փորձի արդյունքները:

Как известно [1], задача восстановления изображений, принадле-  
жащая классу некорректно поставленных, сводится к решению  
двухмерного интегрального уравнения свертки в интепсивностях,  
описывающему формирование изображения в линейной некорреп-  
тной изопланатической системе

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-x', y-y') f(x', y') dx' dy' + n(x, y), \quad (1)$$

где  $g(x, y)$ —наблюдаемое размытое изображение,  $f(x, y)$ —объект,  
подлежащий восстановлению,  $h(x, y)$ —функция рассеяния точки  
(ФРТ) системы формирования,  $n(x, y)$ —аддитивный шум регистра-  
ции. Применение тех или иных итерационных методов его решения,  
предполагающих малое время вычислений и минимальные требова-  
ния к оперативной памяти ЭВМ, существенно зависит от характера  
изменения оптической передаточной функции (ОПФ), являющейся  
преобразованием Фурье от  $h(x, y)$ . Так, например, для систем фор-  
мирования, дискретизованная ОПФ  $H(m, n)$  которых претерпевает  
инверсию фазы, целесообразно применение модифицированного ал-  
горитма Ван-Циттерта [2]. Данный алгоритм, практически инвариант-  
ный к виду ОПФ, в ряду итерационных методов решения (1) по праву  
занимает преимущественное положение. В пространственной области  
он состоит а повторном размытии наблюдаемого изображения, что  
осуществляется на основе корреляции этого изображения с ФРТ и  
последовательности итераций, когда при расчете невязки свертка-  
оценки при  $k$ -ой итерации производится не с самой ФРТ, а с ее авто-  
корреляционной функцией.

В пространственно-частотной области оценка для  $k$ -ой итерации  
в силу линейности алгоритма может быть найдена в явном виде

$$\bar{F}^{(k)}(m, n) = \frac{1 - |1 - |H(m, n)|^2| |1 - \alpha |H(m, n)|^2|^k}{|H(m, n)|} G(m, n), \quad (2)$$

где  $\bar{F}^{(k)}(m, n)$ ,  $H(m, n)$ ,  $G(m, n)$  — дискретные преобразования Фурье  
(ДПФ) соответствующих функций и (1), а  $\alpha$  — параметр экселерации,  
управляющий скоростью сходимости и удовлетворяющий на всех ча-  
стотах неравенству  $|1 - \alpha |H(m, n)|^2| < 1$ . Последующее обратное  
ДПФ над  $\bar{F}^{(k)}(m, n)$  дает искомую пространственную оценку  
 $\bar{f}_k(x, y)$ . В пределе при  $k \rightarrow \infty$  оценка (2) стремится к оценке ин-  
версного фильтра  $F_i(m, n)$  [2]

$$\tilde{F}_j(m, n) = \lim_{k \rightarrow \infty} \tilde{F}^k(m, n) = \frac{G(m, n)}{H(m, n)}$$

При моделировании на ЭВМ задачи итерационного восстановления в качестве объективного количественного критерия близости пространственной оценки  $\tilde{f}_k(m, n)$  к оригиналу  $f(m, n)$  используется относительное среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$e_k = 100 \frac{\|\tilde{f}_k - f\|}{\|f\|} \quad (3)$$

где  $\|f\| = \left[ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N |f(m, n)|^2 \right]^{1/2}$  — норма в пространственной области.

Данный критерий, предполагающий некий объект априори известным, на практике не позволяет выбрать оптимальное число итераций. Опыт использования (2) в реальной обработке изображений показал, что достижение близкого к оптимальному (с смысле минимизации (3)) числа итераций возможно лишь при принадлежности оригинала к некоторому классу характерных объектов (например, человеческих лиц, галактик и т. д.). При этом поиск удовлетворительной оценки осуществляется оператором в интерактивном режиме, с помощью визуального контроля качества [2]. В случае же отсутствия минимальной априорной информации об оригинале вопрос выбора оптимального числа итераций остается открытым.

В работе с целью автоматизации процесса обработки и устранения субъективного фактора предлагается итерационный алгоритм (2) с оптимальным выбором числа итераций, а также приведены результаты машинного эксперимента по восстановлению двумерных изображений.

Оценивая СКО флуктуаций шума  $\tilde{\sigma}_n$  в результате предварительной обработки данных, запишем справедливую для инверсного фильтра с пространстве ДПФ оценку погрешности, обусловленной шумами регистрации

$$\|F - \tilde{F}_j\| \leq \|H^{-1}\| N \tilde{\sigma}_n \quad (4)$$

где  $N \times N$  — размерность поля изображения и  $\|\cdot\|$  — согласованная с нормой в пространственной области, норма в пространстве ДПФ

$$\|F\| = \left( \frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N |F(m, n)|^2 \right)^{1/2}$$

Положив для простоты  $\sigma = 1$ , оценим погрешность оценки (2) для  $k$ -ой итерации относительно  $\tilde{F}_j$

$$\|\tilde{F}_j - \tilde{F}^{(k)}\| \leq (G) \|H^{-1}\| (1 - |H^2|)^{k-1}$$

Записав неравенство треугольника

$$|F - \widehat{F}| \leq |\widehat{F} - F_r| + |F_r - F|, \quad (5)$$

воспользуемся регуляризационным принципом согласования погрешностей [3] в правой части (5), являющегося искомым критерием оптимальности

$$\|G\| \|H^{-1}\| \cdot (1 - \|H\|^2)^{k-1} \approx \|H^{-1}\| N \widehat{\sigma}_n. \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражения для соответствующих норм, найдем оптимальное число итераций, играющее в данной задаче роль параметра регуляризации

$$k_0 \approx \left\lfloor \frac{\ln \left\{ \frac{N \widehat{\sigma}_n}{\left( \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N |G(m, n)|^2 \Lambda^2 \right)^{1/2}} \right\}}{\ln \left\{ \left( \frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N |1 - |H(m, n)|^2|^2 \right)^{1/2} \right\}} \right\rfloor. \quad (7)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  — целая часть числа.

Как видно из (7),  $k_0$  есть частное от деления относительного содержания флуктуаций амплитуды шума в данных к систематической мере искажения, вызванной ОПФ системы формирования, взятых в логарифмическом масштабе. Анализ (7) приводит к заключению, что когда ФРТ системы формирования достаточно узка, а уровень шума велик, полученное оптимальное число итераций  $k_0$  незначительно. Действительно, чтобы поднять разрешение в слабо размытом изображении, достаточно несколько первых итераций. Попытка же продлить итерации приводит к существенному усилению шума в оценке. И наоборот, в случае сильного смаза, когда дискретная ОПФ отлична от нуля лишь в малой окрестности нулевой частоты, а шум достаточно мал,  $k_0$  будет велико. В этом случае компромисс между увеличением утраченного разрешения и нарастанием шума в оценке наступит лишь после длительного итерирования смазанного изображения.

Для проверки работоспособности алгоритма и цифрового моделирования задачи восстановления был использован двумерный бинарный объект, представляющий собой стилизованное изображение собачки из класса фигур «Танграм» [4]. Объект, заключенный в рис. 1 в пределах выделенного контура, представлен на этом же рисунке в виде своей размытой и зашумленной копии в поле размером  $64 \times 64$  элемента. Для визуализации использовалась условная распечатка на АЦПУ с символьным кодированием с двойной печатью, обеспечивающим 16 условных уровней градаций. При моделировании равномерного смаза в качестве двумерной ФРТ использовалась прямоугольная дискретная функция окна размера  $8 \times 8$ , раз-



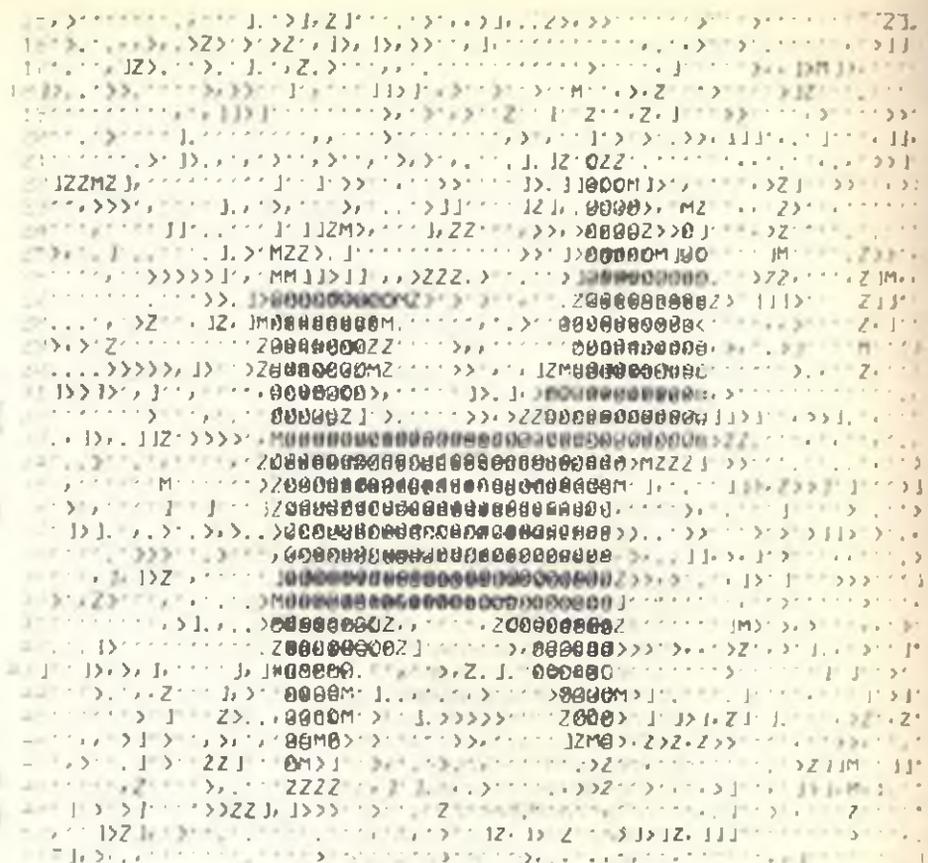


Рис. 2. Оценка объекта, полученная в результате 185 итераций.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Г. И., Тараторкин А. М. Восстановление изображений.—М.: Радио и связь, 1986.—304 с.
2. Kawata S., Ichikawa V. Iterative Image restoration for lineary degraded images: Reblurring procedure. J. Opt. Soc. Amer. 1980. — V. 70. — P. 765—771.
3. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики.—М.: Наука, 1980.—536 с.
4. Василенко Г. И. Голографическое опознание образов.—М.: Сов. радио, 1977.—328 с.

Ер. фил. ВНИИОФИ

18. II. 1989