

А. В. АВРОРИН, Ю. К. ВОЛКОВ, Е. А. КОПЫЛОВ,
И. И. КОРШЕВЕР, М. И. КОТЛЯЧКОВ, В. В. КУЗНЕЦОВ

(Новосибирск)

ЦИФРОВОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНОЙ АРИФМЕТИЧЕСКОГО РЕГИСТРА

Обычно для повышения быстродействия специализированных устройств, выполняющих преобразование Фурье, вычисления ведутся с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1]. В работах [2, 3] были получены теоретические оценки величины отношения сигнала к шуму для одномерного алгоритма БПФ. Оценка же величины отношения в двумерном случае, то есть при восстановлении изображений, с учетом ошибок в реальной информации теоретическим путем весьма затруднительна из-за большого количества факторов, влияющих на результат. Поэтому влияние цифрового шума на качество восстанавливаемых изображений изучалось экспериментально — моделированием вычислительного процесса на универсальной ЭВМ М-222.

В качестве исходной информации использовался двумерный массив данных из 128×128 8-разрядных двоичных чисел, которые были получены в результате регистрации СВЧ голограммы на длине волны 3,2 см многоканальным голографическим устройством.

Были исследованы две модели специализированного вычислительного устройства (СВУ), в одной из которых вычисления велись с фиксированной запятой, в другой — по методу поблочно плавающей запятой.

При вычислениях с фиксированной запятой положительные числа представлялись в прямом коде, отрицательные — в дополнительном коде. Результаты арифметических операций округлялись. Длина слова, представляющего тригонометрические коэффициенты, участвующие в алгоритме БПФ, коэффициенты Френеля и элементы входного массива, равнялась длине P арифметического регистра.

Переполнения арифметического регистра, возникающие при выполнении алгоритма БПФ, устранялись двумя способами: безусловным и условным масштабированием. Безусловное масштабирование заключается в том, что на каждом шаге алгоритма вводится коэффициент ослабления $1/2$. При условном масштабировании коэффициент ослабления $1/2$ или $1/4$ вводится лишь на тех шагах алгоритма, на которых происходит переполнение на 1 или 2 разряда соответственно. Второй способ дает лучшее отношение сигнала к шуму на выходе БПФ, но его аппаратная реализация сложнее, так как необходимо производить проверку на переполнение, а также вести счет числа переполнений, возникающих при преобразовании Фурье каждой строки двумерного массива.

В методе поблочно плавающей запятой числа представлялись в виде 4-разрядного порядка и M -разрядной мантиссы. Мантисса представлялась в виде знака числа и модуля. Числа входного массива и тригонометрические коэффициенты нормализовались так, чтобы их порядки равнялись 0. Нормализация результатов арифметических операций производилась только при переполнении регистра. Следовательно, порядок числа выходного массива был равен числу переполнений, возникших в результате вычислений.

В сравнении модели условного масштабирования с длиной регистра P и модели поблочно плавающей запятой с длиной мантиссы $M=P$ хорошо наблюдается отличительная особенность последнего метода. При одинаковой точности представления чисел (одинаковое число значащих цифр) диапазон представления чисел в методе поблочно плавающей запятой значительно больше за счет сохранения порядков переполнений.

Вычисленные изображения (квадрат модуля преобразования) выводились на алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ). Градации яркости в изображении передавались сочетанием печатаемых символов. Полученные таким образом изображения визуально сравнивались с эталонным изображением, которое вычислялось на той же ЭВМ с плавающей запятой при 36-разрядной мантиссе. Кроме того, вычислялся массив ошибки по правилу

$$\Delta Z = Z_{\text{мод}} 2^m - Z_{\text{эт.}}$$

Здесь $Z_{\text{мод}}$ — элемент массива, вычисленного с помощью модели СВУ; $Z_{\text{эт.}}$ — соответствующий ему элемент массива эталонного изображения; m — число делений на два при масштабировании, потребовавшихся для вычисления $Z_{\text{мод}}$. На рис. 1 приведены в логарифмическом масштабе зависимости величины отношения среднеквадратичного модуля ошибки к среднеквадратичному модулю эталонного изображения

$$\delta = (|\Delta Z|^2 / |Z_{\text{эт.}}|^2)$$

от величины L , совпадающей для метода масштабирования с длиной регистра P , а для метода поблочно плавающей запятой — с длиной мантиссы M .

На рис. 2 представлены наиболее характерные изображения, полученные с использованием различных моделей с одной и той же голограммы. На рис. 2, а приведено эталонное изображение объекта в виде слова «СВЧ». Изображение на рис. 2, б получено с использованием безусловного масштабирования при длине арифметического регистра $P=10$. Для этого случая $\delta=2,43$ (см. рис. 1). Изображение на рис. 2, в получено с использованием условного масштабирования при $P=4$ и $\delta=2,62$; на рис. 2, г — с использованием метода поблочно плавающей запятой при $M=3$ и $\delta=0,8$.

При $\delta < 0,5$ восстановленные изображения визуально не отличаются от эталонного. Такие изображения восстанавливаются при следующих значениях длины арифметического регистра: $P=12$ для безусловного масштабирования, $P=6$ для условного и $M=5$ для поблочно плавающей запятой.

Как видно из рис. 2, б, в, для методов масштабирования характерен шум, локализованный в центре плоскости изображения. Такой характер шума обусловлен эффектом уменьшения числа уровней квантования функции при ее масштабировании, что приводит к сильному всплеску в области низких пространственных частот. Изменением угла наклона опорной волны при регистрации голограммы рассматриваемые участки изображения могут быть выведены из области силь-

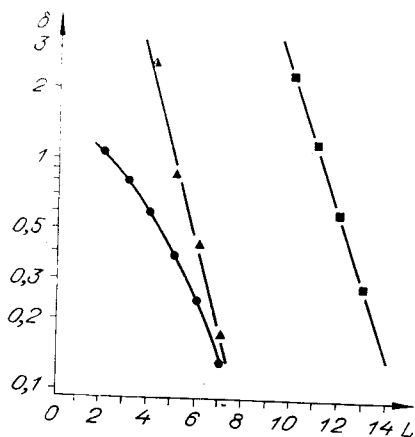


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности от длины арифметического регистра:

■ — безусловное масштабирование; ▲ — условное масштабирование; ● — поблочно плавающая запятая.

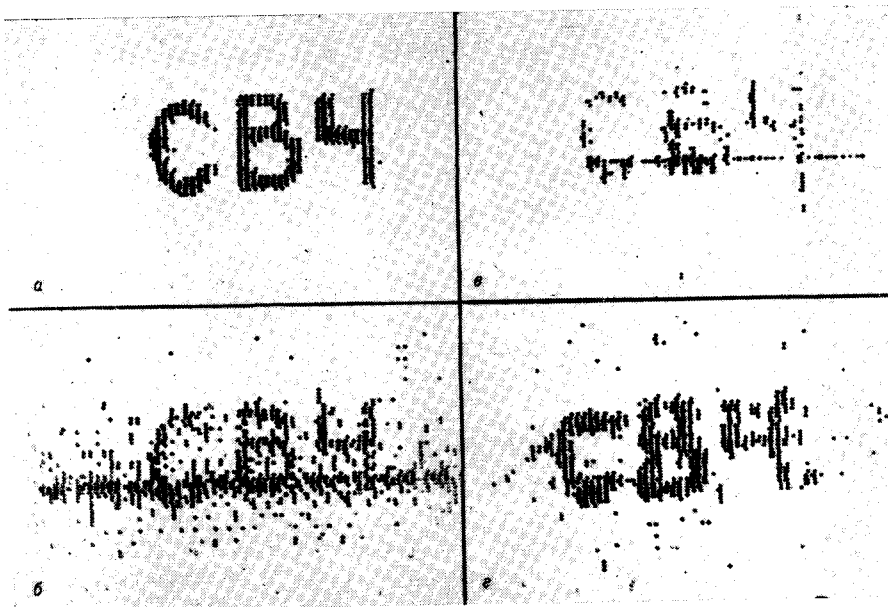


Рис. 2. Изображения, полученные с использованием различных моделей.

ного шума. При использовании метода поблочно плавающей запятой шум квантования сводится к минимуму и шумовой фон равномерен по плоскости изображения, что подтверждается рис. 2, г.

Таким образом, результаты экспериментов показали, что цифровые устройства для восстановления изображений в длинноволновой голографии, выполняющие операции с фиксированной запятой, позволяют получить изображения удовлетворительного качества с безусловным масштабированием при длине арифметического регистра 13÷14 разрядов. Использование условного масштабирования дает возможность вдвое сократить длину регистра, а следовательно, и объем оперативной памяти. Метод поблочно плавающей запятой в отличие от условного масштабирования требует большего объема памяти (на 4 разряда в каждой ячейке). Несмотря на это, последний метод является более перспективным, так как обеспечивает наиболее высокую скорость вычислений и более простую техническую реализацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврорин А. В., Волков Ю. К., Копылов Е. А., Лазаков В. В., Кузнецов В. В. Эксперименты цифрового восстановления изображений по СВЧ-голограммам.— «Автометрия», 1974, № 6, с. 101—103.
2. Оппенгейм, Вайнштейн. Влияние конечной длины регистра при цифровой фильтрации и быстром преобразовании Фурье.— «ТИИЭР», 1972, т. 60, № 8, с. 41—64.
3. Welch P. D. A fixed-point fast Fourier transform error analysis.— "IEEE Trans. Audio Electroacoust", 1969, vol. AU-17, p. 153—157.

Поступила в редакцию 19 июля 1977 г.