УДК 621.391.26

ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЕСОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ РАНГОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Cмирнов A.A., к.т.н., доцент кафедры Радиоуправления и связи Φ ГБОУ BO «РГРТУ», e-mail: al.an.smirnov@yandex.ru

Смирнов A.B., к.т.н., доцент, e-mail: ant.vas.smirnov@yandex.ru

TWO-STAGE ALGORITHM FOR PARAMETRIC OPTIMIZATION OF WEIGHTED SPACE-TIME RANK FILTERING OF IMAGES

Smirnov A.A., Smirnov A.V.

The problem of weighted space-time image filtering using rank statistics is considered. A two-stage algorithm for parametric optimization of weighted space-time image filtering is proposed, at the first stage of which dynamic programming methods were used, and at the second stage — effective local optimization algorithms of the quasi-Newtonian type were used. It is shown that the application of the proposed two-stage algorithm of weighted space-time image filtering provides high efficiency of pulse noise suppression.

Key words: parametric optimization, dynamic programming method, quasi-Newtonian methods, space-time image filtering.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, метод динамического программирования, квазиньютоновские методы, пространственновременная фильтрация изображений.

Введение

Современные системы ТВ и ИК диапазона мониторинга Земли, воздушного и космического пространств должны обеспечивать обнаружение объектов, измерение их параметров, сопровождение, распознавание, управление в со-

ставе наземных и бортовых комплексов при наличии помех и шумов [1, 2].

Решение этих задач диктует необходимость совершенствования математических и программных средств пространственно-временной фильтрации изображений.

Пространственно-временная фильтрация изображений — совокупность операций по преобразованию изображения, позволяющая осуществить обнаружение искомого объекта среди других мешающих факторов при наличии помех и шумов, в том числе и преднамеренных [1, 2, 5].

С более общей точки зрения, пространственновременная фильтрация изображений представляет собой важнейшую подготовительную операцию максимизации отношения сигнал/помеха при распознавании объекта, облегчающую принятие решения о наличии и положении искомого объекта в поле изображения [2, 3].

Основу современных методов пространственно-временной фильтрации изображений составляют эффективные нелинейные алгоритмы фильтрации при наличии помех и шумов. Алгоритмы нелинейной фильтрации изображений делятся на две большие группы: ранговые и морфологические [1, 4].

Целью работы является исследование эффективности применения численных методов оптимизации весовой ранговой пространственно-временной фильтрации изображений при наличии импульсных помех.

Рассмотрена задача весовой пространственно-временной фильтрации изображений с использованием ранговых статистик. Предложен двухэтапный алгоритм параметрической оптимизации весовой пространственно-временной фильтрации изображений, на первом этапе которого использовались методы динамического программирования, а на втором — эффективные алгоритмы локальной оптимизации квазиньютоновского типа. Показано, что применение предложенного двухэтапного алгоритма весовой пространственновременной фильтрации изображений обеспечивает высокую эффективность подавления импульсного шума.

Постановка задачи

Пространственная модель изображения размера $N_1 \times N_2$ представляет собой двумерную дискретную функцию f(x,y), координаты которой (x,y) принимают дискретные значения: $x=0,\dots,N_1-1,\quad y=0,\dots,N_2-1.$ При этом за начало координат принимается левый верхний угол изображения. Каждое дискретное значение f(x,y) называется элементом изображения или пикселем.

Изображения в процессе формирования и передачи по каналам связи обычно подвергаются воздействию различных помех и шумов. Для описания случайных воздействий используют модели аддитивного белого и импульсного шумов. Тогда линейная модель наблюдения изображения в условиях помех принимает вид [1, 2]: q(x,y) = f(x,y) + p(x,y)

$$g(x,y) = f(x,y) + n(x,y),$$

где n(x, y) – аддитивный шум.

Целью восстановления исходного изображения f(x,y) является получение из искаженного изображения g(x,y), при помощи некоторой обработки, изображения $\hat{f}(x,y)$, которое было бы близко к f(x,y) по заданному критерию.

Поскольку исходное, искаженное и восстановленное

изображения — суть матрицы размерностью $N_1 \times N_2$, в работе для оценки эффективности качества восстановления исходного изображения предлагается использовать минимум нормы матрицы невязки $\Delta(x,y)= f(x,y) - \hat{f}(x,y)$ исходного и восстановленного изображений:

$$\varepsilon = \left\| \Delta(x, y) \right\|^p = \left\| f(x, y) - \hat{f}(x, y) \right\|^p \to \min, \tag{1}$$

где P — показатель степени, а $\|\cdot\|$ — некоторая матричная норма. При этом конкретный вид матричной нормы, фигурирующей в (1), будет определять конкретный вид критерия качества восстановления исходного изображения. Так, если в выражении (1) использовать квадрат нормы Фробениуса с соответствующей нормировкой, то получится хорошо известный критерий минимума квадрата средней квадратичной ошибки (СКО) [2]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{x=0}^{N_1 - 1} \sum_{y=0}^{N_2 - 1} \left(f(x, y) - \hat{f}(x, y) \right)^2 \to \min.$$

Данный критерий является наиболее универсальным и распространенным на практике критерием качества восстановления при проектировании алгоритмов фильтрации изображений.

Пространственные методы фильтрации в общем случае описываются выражением вида [1, 4]:

$$\hat{f}(x,y) = A\{g(x,y)\},\,$$

где g(x,y) – искаженное изображение на входе фильтра, $\hat{f}(x,y)$ – восстановленное изображение на выходе фильтра, а $A\{\cdot\}$ – оператор фильтрации, определенный в некоторой окрестности S_{xy} , точки (x,y).

Определение окрестности S_{xy} вокруг точки (x,y) заключается в использовании квадратной или прямоугольной области размерностью $n=n_1\times n_2$ пикселей — подмножества изображения, центрированного в точке (x,y). Процесс фильтрации заключается в том, что центр окрестности S_{xy} передвигается от пикселя к пикселю, начиная с верхнего левого угла. Оператор $A\{\cdot\}$ выполняется в каждой точке (x,y), давая в результате выходное значение $\hat{f}(x,y)$ для данной точки — отклик фильтра.

Решение задачи оптимизации весовой пространственно-временной фильтрации изображений

С целью повышения эффективности фильтрации, т.е. для уменьшения квадрата СКО, в работе предлагается использовать весовую пространственную фильтрацию, которая задается выражением следующего вида:

$$\hat{f}(\vec{w},x,y) = A\{\vec{w},g(x,y)\}$$
. (2) где $\vec{w} = [w_1 \dots w_n]^{\rm T} - n$ -мерный вектор весовых коэффициентов, однозначно определенный в окрестности S_w .

Согласно выражению (2) каждому элементу апертуры фильтра соответствует определенное число, назы-

ваемое весовым коэффициентом $w_i, i=1, n$. При этом апертуру фильтра вместе с заданным на ней вектором \vec{w} назовем маской.

Весовая пространственная фильтрация осуществляется перемещением маски по изображению. В каждом положении маски вектор весовых коэффициентов \vec{w} поэлементно умножается на значения соответствующих пикселей апертуры фильтруемого изображения g(x,y). Полученные произведения подвергаются затем действию оператора фильтрации $A\{\}$, который и определяет отклик фильтра $\hat{f}(\vec{w},x,y)$ для данной точки. При этом вектор \vec{w} в процессе перемещения маски остается неизменным.

При временной фильтрации изображений рассматривается последовательность кадров изображения $g(x,y,1),\ g(x,y,2),...,\ g(x,y,n),$ полученных в дискретные моменты времени. Апертура S_{xy} , в этом случае, принимает временной характер, т.е. включает в себя соответственные пиксели всех n кадров.

Процесс временной фильтрации состоит в том, что апертура S_{xy} передвигается от пикселя к пикселю, начиная с верхнего левого угла, при этом в каждой точке (x,y) выполняется оператор фильтрации $A\{\cdot\}$, давая отклик фильтра

$$\hat{f}(x,y) = A\{g(x,y,k), k = \overline{1,n}\}.$$

С целью повышения эффективности временной фильтрации в работе предлагается использовать весовую временную фильтрацию, которая задается выражением вида:

$$\hat{f}(\vec{w}, x, y) = A\{\vec{w}, g(x, y, k), k = \overline{1, n}\}$$

Весовая временная фильтрация осуществляется таким же способом, что и пространственная.

В общем случае при весовой пространственновременной фильтрации выражение квадрата СКО ошибки приближения восстановленного $\hat{f}(\vec{w},x,y)$ и исходного f(x,y) изображений принимает вид нелинейной функции от \vec{w} .

$$\sigma^{2}(\vec{w}) = F(\vec{w}) = \frac{1}{N_{1}N_{2}} \sum_{x=0}^{N_{1}-1} \sum_{y=0}^{N_{2}-1} \left(f(x,y) - \hat{f}(\vec{w},x,y) \right)^{2} .$$
 (3)

Таким образом, при весовой пространственновременной фильтрации изображений возникает задача нахождения такого оптимального вектора весовых коэффициентов \vec{w}^* , который обеспечивал бы минимум квадрата СКО вида (3), т.е. минимум нелинейной целевой функции $F(\vec{w})$:

$$\vec{w}^* = \arg\min_{\vec{w} \in W} F(\vec{w}) . \tag{4}$$

на ограниченном замкнутом множестве допустимых весовых коэффициентов $W=\{\vec{w}\in R_n:\ a_i\leq w_i\leq b_i,\ i=1,\dots,n\}$, где $a_i,\ b_i$ — значения i-й компоненты вектора весовых коэффициентов, характеризующие область ее возможных значений. В общем случае это нелинейная задача условной оптимизации [6].

В связи с особенностями целевой функции вида (3) (многоэкстремальность, не выпуклость, неаналитичность, плохая обусловленность) в работе для решения задачи (4) предлагается использовать алгоритм оптимизации, состоящий из двух этапов – глобального и локального [7-11]. На первом этапе с использованием одного из методов динамического программирования находится грубое приближение оптимального вектора весовых коэффициентов \vec{w}^* (область глобального экстремума). А на втором этапе компоненты вектора \vec{w}^* определяются с заданной точностью одним из эффективных локальных методов квазиньютоновского типа.

Экспериментальные исследования

В работе, с использованием разработанной на языке Си программы [12] весовой пространственно-временной фильтрации изображений, исследована эффективность применения предложенного двухэтапного метода оптимизации при весовой пространственно-временной фильтрации изображений, основанной на использовании порядковых статистик среднего ранга (медианная фильтрация). Медианный фильтр сохраняет перепады яркости без искажений и особенно эффективен при фильтрации импульсных шумов, которые выглядят как наложение на изображение случайных черных и белых точек с соответствующими вероятностями P_a и P_b [2].

Исследования проводились на наборе из 25 тестовых черно-белых изображений с различным характером плотности распределения яркости элементов. Размеры тестовых изображений составляли 360х240 пикселей. Фильтрация изображений осуществлялась при воздействии «белого» импульсного шума с вероятностями:

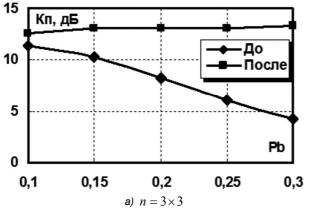
 $P_{k} = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$.

В качестве критерия эффективности использовался коэффициент подавления фильтра, определяемый по формуле: $K_{\Pi}=20\lg(\sigma_0/\sigma_1)$, где σ_0 – СКО ошибки на входе фильтра (СКО ошибки между исходным f(x,y) и искаженным g(x,y) изображениями), σ_1 – СКО ошибки на выходе фильтра (СКО ошибки между исходным f(x,y) и восстановленным $\hat{f}(\vec{w},x,y)$ изображениями).

Результаты применения двухэтапного метода оптимизации (модифицированного метода динамического программирования и квазиньютоновского метода с преобразованной BFGS-формулой) при медианной фильтрации приведены на рис. 1 и рис. 2. На рис. 1 приведены зависимости среднего коэффициента подавления (усредненного по набору тестовых изображений) от вероятности P_b до и после оптимальной весовой пространственной фильтрации. На 2 — до и после оптимальной весовой временной фильтрации.

На рис. З в качестве примеров оптимальной весовой фильтрации с использованием двухэтапного метода оптимизации приведены результаты медианной пространственной $(n=3\times3)$ и временной (n=5) фильтрации тестового изображения. На рисунке представлены: исходное изображение, изображение пораженное импульсным шумом $(P_b=0.2)$ и восстановленные изображения.

Следует отметить, что аналогичные результаты получаются и при воздействии «черного» импульсного шума.



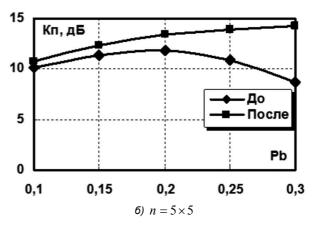
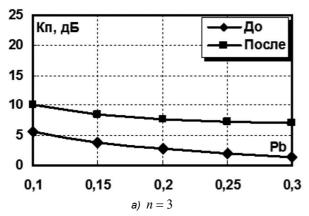


Рис. 1. Пространственная фильтрация



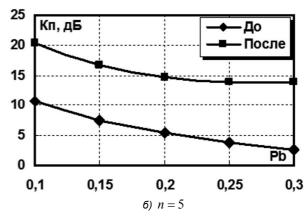


Рис. 2. Временная фильтрация



а) исходное изображение



в) пространственная фильтрация



б) зашумленное изображение



г) временная фильтрация

Рис. 3. Примеры весовой пространственно-временной фильтрации

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1. Отсутствие весовой обработки приводит к ухудшению эффективности подавления импульсного шума с ростом вероятностей P_a и P_b (средний K_Π уменьшается).
- 2. Применение двухэтапного метода оптимизации при весовой пространственно-временной фильтрации изображений, основанной на использовании медианной фильтрации, обеспечивает высокую эффективность подавления во всем диапазоне вероятностей импульсного шума (средний K_{Π} практически не изменяется), что показывает робастность алгоритма к статистическим характеристикам изображений и импульсного шума.
- 3. С точки зрения вычислительных затрат и эффективности подавления импульсных шумов наиболее эффективным является использование оптимальной весовой временной медианной фильтрации.

Литература

- 1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М: Техносфера, 2012. 1104 с.
- 2. Pratt W.K. Digital image processing, 4th edition. Wiley, 2007. 807 p.
- 3. Хуанг Т.С. (ред.) Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры. М: Радио и связь, 1984. 221 с.
- 4. Яшин В.В., Калинин Г.А. Обработка изображений на языке Си для IBM РС: Алгоритмы и программы. М.: Мир, 1994. 241 с.

- 5. Graboskwi S., Bienieck W. A two-pass median-like filter for impulse noise removal in multi-channel images. KOSYR, 2003, pp. 195-200.
- 6. Рейклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. В 2-х книгах. М.: Мир. 1986. 670 с.
- 7. Маторин А.В., Смирнов А.А. Алгоритм параметрического синтеза многоэлементных тонкопроволочных антенн и устройств СВЧ. Вестник РГРТА. 1997. Вып. 2. С. 85-92.
- 8. Маторин А.В., Смирнов А.А. Оценка эффективности двухэтапного метода нелокальной оптимизации на основе решения тестовых задач. Вестник РГРТА. 1998. Вып. 5. С. 42-45.
- 9. Маторин А.В., Смирнов А.А. Результаты разработки методики и учебно-исследовательского программного комплекса параметрического синтеза и статистического анализа устройств СВЧ. Вестник РГРТА. 1998. Вып. 4. С. 71-82.
- 10. Смирнов А.А. Исследование и разработка алгоритмов параметрического синтеза устройств СВЧ в радиотехнических системах: Автореферат дис. канд. техн. наук. Рязань: РГРТА, 2000. 24 с.
- 11. Маторин А.В., Смирнов А.А. Двухэтапный численный метод решения задач синтеза многоэлементных тонко-проволочных антенн и устройств сверхвысоких частот. Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 6.
- 12. Маторин А.В., Смирнов А.А. Оценка влияния современных Си-компиляторов на производительность вычислительных программ. Вестник РГРТА. 2000. Вып. 6.