

УДК 681.391

А.А. Брянцев

КОМБИНИРОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ РАДАРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Предлагается алгоритм комбинированной фильтрации изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой (РСА-изображения), искаженных спекл-шумом (speckle). Алгоритм основан на сегментации РСА-изображений с целью выявления участков с разной текстурой и применения для них соответствующих фильтров. Показано, что на различных участках РСА-изображения плотность распределения вероятности спекл-шума отличается от теоретической. Описывается база данных, позволяющая подбирать эффективный алгоритм фильтрации РСА-изображений с учетом вида распределения вероятности спекл-шума, его интенсивности и текстуры сегмента.

1. Введение

Радар с синтезированной апертурой (РСА) представляет собой импульсный когерентный радар, который устанавливается на движущемся носителе. РСА-изображения образуются в результате суммирования в приемном тракте станции волн, отраженных от местности, с опорной волной. Характерной проблемой РСА-изображений является наличие в них спекл-шума, обусловленного интерференцией эхосигналов от отражателей, находящихся в одном ультразвуковом луче. В РСА-изображениях спекл-шум проявляется в виде гранулированных пятен. Путем анализа РСА-изображений было получено, что на различных участках РСА-изображения плотность распределения вероятности спекл-шума отличается от теоретической [1]; например, в литературе описаны случаи гамма-распределения, K -распределения [2].

Большинство известных методов фильтрации [например, медианная фильтрация, адаптивная фильтрация (фильтры Ли, Куана, Арсено и т.п.), фильтр Винера-Хопфа, фильтрация на основе вейвлет-преобразований] предполагают обработку зашумленного изображения целиком, без предварительного анализа характера изображения, его текстуры, содержащихся объектов. Кроме того, значительная доля алгоритмов фильтрации ориентирована на случай гауссовского (белого) шума, поскольку они были математически (аналитически) получены при таком допущении. Очевидно, что применение любых подобных алгоритмов фильтрации неизбежно приводит к неудовлетворительному результату.

Таким образом, возникает необходимость разработки комбинированного подхода к фильтрации РСА-изображений, который учитывал бы вид текстуры и закон распределения спекл-шума.

2. Статистические модели РСА-изображений

Теоретическая модель РСА-изображений, использующая экспоненциальную плотность распределения вероятности для описания мультипликативного шума, впервые была предложена Goodman [1]:

$$P_{Y/X}(y/x) = \frac{L^L}{x^L \Gamma(L)} y^{L-1} e^{-Ly/x}, \quad (1)$$

где Y – наблюдаемое изображение;
 X – оригинальное (неискаженное) изображение;
 $\Gamma(L)$ – гамма-функция;
 L – число обзоров одного и того же участка поверхности.

Если в пределах некоторой окрестности оригинал X не изменяется, т.е. $E(X) = \mu_X = const$ (E – символ математического ожидания), то плотность распределения вероятности отраженного излучения совпадает с плотностью распределения вероятности спекл-шума Z . Таким образом, если случайный процесс Z нормализован, т.е. $E(Z) = \mu_Z = 1$, то для спекл-шума имеем:

$$P_Z(z) = \frac{L^L}{\Gamma(L)} z^{L-1} e^{-Lz}. \quad (2)$$

Нормализация соотношения (1) приводит к мультипликативной модели:

$$Y = X \cdot Z, \quad (3)$$

которая часто используется в литературе.

3. Определение типа текстуры

Для определения типа текстуры изображения используются локальные коэффициенты вариации, которые являются индикаторами однородности изображения [3]. Из модели (3) вытекают следующие предпосылки:

$$\mu_Y = \mu_Z \mu_X = \mu_X, \quad (4)$$

$$C_X^2 = \frac{C_Y^2 - C_Z^2}{1 + C_Z^2}, \quad (5)$$

где

$$C_Y = \sigma_Y / \mu_Y, \quad C_X = \sigma_X / \mu_X, \quad C_Z = \sigma_Z / \mu_Z \quad (6)$$

коэффициенты вариации для наблюдаемого, оригинального изображений и шума соответственно, вычисляемые через их локальные дисперсии σ_Y , σ_X , σ_Z и математические ожидания μ_Y , μ_X , μ_Z .

Локальность здесь понимается в том смысле, что статистики (4)-(6) вычисляются в пределах небольших окон, например 3×3 , 5×5 и т.п. Таким образом, можно "просмотреть" (принцип "скользящего" окна) все точки изображения с учетом краевых эффектов и получить для них оценки коэффициентов вариации (6).

Точки, у которых $C_Y \leq C_Z$, создают множество данных, принадлежащих сегменту с однородной текстурой, точки, у которых $C_Z < C_Y < C_{max}$, создают множество данных, принадлежащих сегменту с неоднородной текстурой, а точки, для которых $C_Y > C_{max}$, считаются неискаженными. Здесь $C_{max} = \max \{ C_Z \}$.

Таким образом, в результате сегментации происходит разделение матрицы изображения на несколько множеств – множество точек, принадлежащих сегменту с неоднородной текстурой, множество точек, принадлежащих сегменту с однородной текстурой, которые подвергаются фильтрации, и множество «неискаженных» точек, которые остаются неизменными.

4. Определение закона распределения спекл-шума и составление базы данных

Для решения поставленной задачи было проведено имитационное моделирование на ЭВМ с целью выявления эффективности обработки изображений, искаженных спекл-шумом, различными алгоритмами, среди которых: винеровская фильтрация, медианная фильтрация, фильтры Ли и Куана, вейвлет-фильтрация с применением различных вейвлет-фильтров и видов порогового отсека (жесткое пороговое отсека, мягкое пороговое отсека). На первом этапе по алгоритму, предлагаемому в пункте 3, определяется тип текстуры (однородная или неоднородная), таким образом, изображение делится на сегменты. Затем для каждого найденно-

го сегмента выдвигается и проверяется гипотеза по критерию χ^2 о виде закона распределения спекл-шума.

Принцип работы алгоритма определения закона распределения шума заключается в следующем. Для каждого типа текстуры выдвигается и проверяется гипотеза о виде закона распределения спекл-шума с помощью критерия χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(p_{ij}^* - p_{ij})^2}{p_{ij}}, \quad (7)$$

где p^* – наблюдаемые вероятности, p – теоретические вероятности.

Зная значение χ^2 , по специальным таблицам определяем вероятность подтверждения гипотезы. Если эта вероятность мала, гипотеза отбрасывается как неправдоподобная. В эксперименте использовались следующие виды законов распределения: нормальный, экспоненциальный, гамма-распределение.

После определения вида закона распределения шума оцениваются его параметры, а также находятся оценки математического ожидания и дисперсии шума в каждом сегменте. Для различных комбинаций вышеуказанных параметров, т.е. параметров вида текстуры и шума, определяются алгоритмы фильтрации, обеспечивающие наибольшую эффективность в смысле следующих показателей качества:

– максимума пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ)

$$ПОСШ = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \max X(i, j)^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (X(i, j) - \hat{X}(i, j))^2} \right), \quad (8)$$

где \hat{X} – оценка оригинала изображения после применения алгоритма фильтрации;

– минимума величины среднеквадратической ошибки оценивания (СКО)

$$СКО = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (X(i, j) - \hat{X}(i, j))^2; \quad (9)$$

– максимума величины нормированной корреляции (НК)

$$НК = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M X(i, j) \hat{X}(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M X(i, j)^2}; \quad (10)$$

– верности изображения (ВИ)

$$BI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (X(i, j) - \hat{X}(i, j))^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M X(i, j)^2}. \quad (11)$$

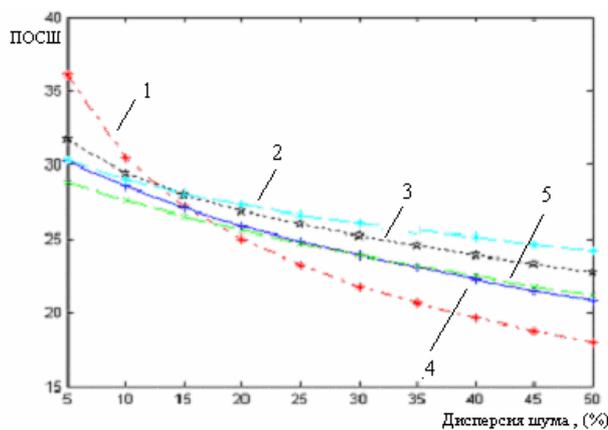
Таким образом, в результате произведенных экспериментов составлена база данных, таблицы **Таблица 1**

Вид фильтрации: вейвлет-фильтр Добеши 4-го порядка		Нормальный закон распределения				Экспоненциальный закон распределения			
		мягкое пороговое отсечение		жесткое пороговое отсечение		мягкое пороговое отсечение		жесткое пороговое отсечение	
		ско	посш	ско	посш	ско	посшг	ско	посш
Однородн. текстура	5-10%	5.46	45.2	6.23	38.2	4.37	49.2	6.7	42.9
	10-20%	7.23	38.3	8.21	33.5	6.21	43.33	9.14	37.1
	20-30%	9.02	33.2	11.1	29.7	8.3	39.7	13.2	32.4
	30-40%	15.1	27.7	15.6	24.4	13.1	34.5	18	29.6
	40-50%	18.2	24.7	25.1	19.1	17.8	27.9	21.6	25
Неоднор. текстура	5-10%	6.7	41.2	7.3	37.9	5.12	46.7	7.9	43.1
	10-20%	8.9	35.9	10.1	34.2	6.9	40.5	10.4	37.2
	20-30%	13.8	30.3	16.3	30	9.65	36.8	15.1	33
	30-40%	17.6	26.1	19.9	26.4	15.4	30.2	19.3	29.9
	40-50%	21.2	21.5	29.8	20.5	19.2	27.14	23.1	25.8

которой содержатся числовые параметры алгоритмов фильтрации, соответствующих различным комбинациям параметров текстур и шума. Таблица 1 представляет собой пример выполнения одного из экспериментов по составлению базы данных.

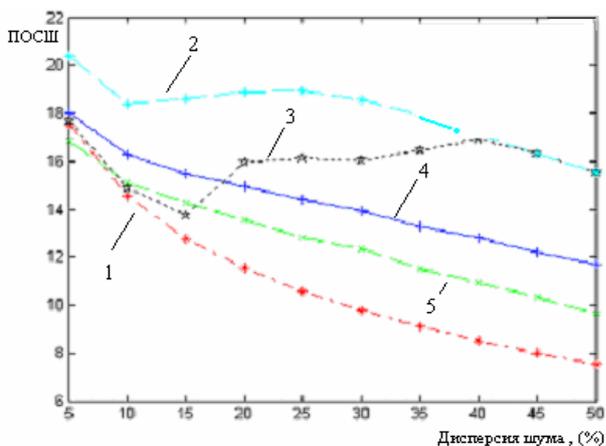
5. Результаты моделирования

Алгоритм фильтрации заключается в анализе текстуры РСА-изображения и оценивании параметров найденного закона распределения спекл-шума, по которым из таблиц выбирается соответствующий метод обработки. Эффективность выделения на РСА-изображениях областей с однородной и неоднородной текстурами для получения наилучших результатов фильтрации иллюстрируется рисунком 1. На приведенных графиках (рисунок 1) видно, что одни и те же фильтры при одинаковых интенсивностях шума дают разные значения ПОСШ в зависимости от типа текстуры.



б

Рисунок 1 – Графические зависимости значений пикового отношения сигнал/шум изображений: 1 – исходного, 2 - отфильтрованного вейвлет-фильтром с мягким пороговым отсечением, 3 – с жестким пороговым отсечением, 4 – фильтром Куана, 5 – фильтром Ли от интенсивности шума для неоднородной (а) и однородной текстур (б)



а

Данный подход был апробирован как на ряде смоделированных, так и оригинальных РСА-изображениях (рисунки 2 и 3).

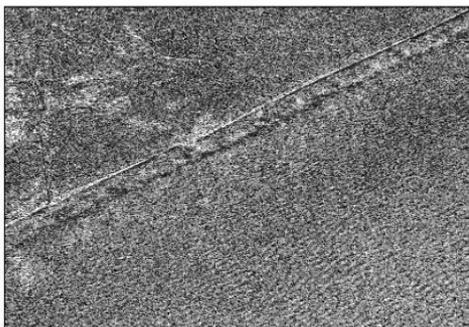


Рисунок 2 – Реальное PCA-изображение

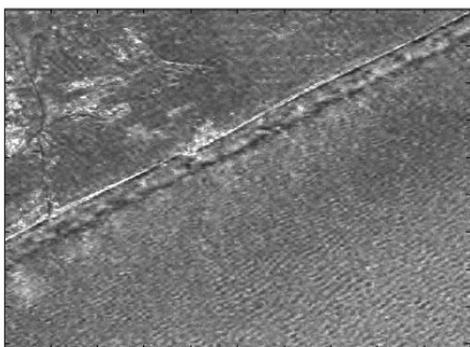


Рисунок 3 - PCA-изображение, обработанное предложенным методом

Сравнение проводилось с теми же алгоритмами фильтрации, но применяемыми ко всему изображению. Результаты экспериментов, помещенные в таблицу 2, показали почти идеальное восстановление тестовых изображений как визуально, так и численно (см. таблицу 2) по вышеуказанным критериям.

Таблица 2

Изображение	СКО	ПОСШ	НК	ВИ
Зашумленное	21.25	21.25	0.721	0.9623
Обработанное фильтром Винера	13.34	25.58	0.896	0.9933
Обработанное с помощью вейвлет-преобразования	11.93	27.5	0.912	0.99
Обработанное предложенной методикой	8.1	33.41	0.962	0.9932

Моделирование алгоритмов, использующихся для реализации комбинированной фильтрации, производилось в среде MATLAB с использованием пакетов Image Processing Toolbox и Wavelet Toolbox. Результаты, приведенные в таблицах 1 и 2, получены для изображений, взятых из библиотеки пакета MATLAB.

Выводы

1. Комбинированная фильтрация дает лучшие результаты по сравнению с фильтрацией, применяемой ко всему изображению.
2. Программная реализация данного алгоритма может работать в реальном масштабе времени, поскольку считывание таблиц является относительно быстрой операцией.

Библиографический список

1. Goodman J.W. Some Fundamental Properties of Speckle // J.Opt. Soc. Am., Vol.66. No.11.P. 1145-1150, 1976.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений –М.: Техносфера, 2005.
3. Bekhtin Yu.S. Searching an Optimal Wavelet Threshold using Noisy and non-Noisy Data of images // Proceedings of SSAB'2001, 14-15, March, 2001.