

УДК 621.396.96 : 621.391.26

Н. В. Родионова, В. П. Синило

(Фрязино Московской обл.)

СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ СПЕКЛ-ШУМА  
В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Рассмотрены три возможных подхода к подавлению спекл-шума радиолокационных изображений (РЛИ): некогерентное накопление, нелинейная фильтрация изображения и гомоморфная обработка. Радикальным способом является лишь увеличение числа некоррелированных измерений, два остальных могут привести к успеху лишь для отдельных видов тематической обработки РЛИ.

Для радиолокационных изображений характерен высокий уровень флуктуационной погрешности: даже в отсутствие теплового шума вследствие случайного характера отраженного сигнала относительная величина среднеквадратического значения погрешности измерения мощности отраженной энергии  $P$  на выходе устройства обработки равна  $\sigma_p/P = 100\%$ .

При  $K$  некогерентных усреднениях стандарт снижается до

$$\frac{\sigma_p}{P} = \frac{1}{\sqrt{K}} \frac{\sigma_p}{P} 100\% \quad (1)$$

и, как правило, остается большим, особенно в РСА с высоким разрешением, когда когерентное время велико и  $K$  составляет всего несколько единиц. Поэтому представляют интерес методы возможного снижения флуктуационной погрешности в радиоизображениях (часто называемой спекл-шумом).

В данной статье рассмотрены три возможных подхода. Радикальным является лишь увеличение числа некоррелированных измерений  $K$ ; два остальных — нелинейная фильтрация и гомоморфная обработка — могут привести к успеху лишь для отдельных видов тематической обработки РЛИ.

**Некогерентное накопление.** Улучшение качества изображения при некогерентном накоплении выражается соотношением (1). На рис. 1 представлены два радиолокационных снимка, один из которых построен по  $K = 5$  (а), а другой — по  $K = 10$  (б) независимым измерениям\*.

Наблюдаемое резкое улучшение качества восприятия свидетельствует о том, что 4—5-кратное некогерентное накопление является, скорее, минимально необходимым, нежели достаточным условием для построения легко интерпретируемого изображения.

Предельное количество некогерентных накоплений равно

$$K_{\max} = \frac{2\Delta\tau}{D},$$

где  $\Delta\tau$  — разрешающая способность по азимуту,  $D$  — диаметр антенны. Для увеличения  $K$  возможно использование нескольких зондирующих частот (раз-

\* Представленные в работе снимки синтезированы в ИРЭ РАН на ЭВМ СМ-1420 по данным, полученным АМС «Венера-15, 16».

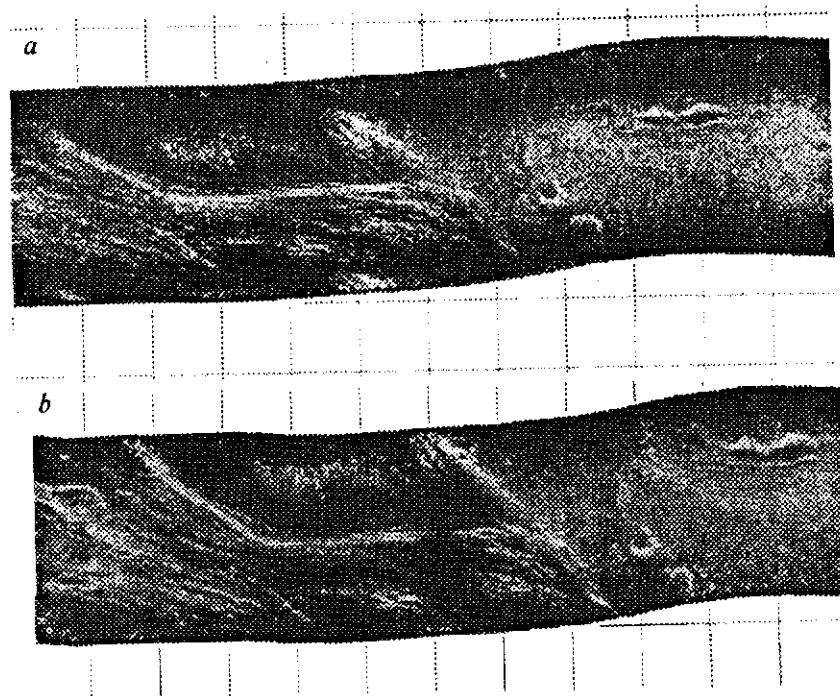


Рис. 1

несенных, по крайней мере, на полосу сигнала) либо нескольких пространственно смещенных по азимуту лучей.

**Нелинейная фильтрация изображения.** Экспериментально проверены возможности следующих трех методов сглаживания РЛИ:

1. Медианная фильтрация в окне размером  $3 \times 3$  [1].
2. Сглаживание по наиболее однородной окрестности центральной точки — МННС [2].

В пределах окна размером  $5 \times 5$  выбираются 9 окон меньшего размера, для которых вычисляются среднее и дисперсия. Среднее значение яркости окрестности с минимальной дисперсией присваивается центральному элементу большого окна размером  $5 \times 5$ .

Более быстродействующий вариант этого алгоритма описан в [3] (SADVS). В качестве показателя однородности здесь использовано выражение

$$V(m) = \sum_{l=1}^9 |f(i, j) - f_l(m)|, \quad m = 1, \dots, 9,$$

где  $f(i, j)$  — яркость центральной точки большого окна размером  $5 \times 5$ ;  $f_l(m)$  — яркость  $l$ -й точки  $m$ -го малого окна размером  $3 \times 3$ .

Яркость  $f(i, j)$  заменяется на средний уровень яркости в пределах окна с минимальным значением  $V(m)$ .

3. Сигма-фильтрация [4], предложенная специально для подавления спскл-шума.

Для окна размером  $(2n + 1) \times (2n + 1)$  элементов изображения усредненное значение яркости в центральной точке  $(i, j)$  определяется соотношением

$$\hat{f}(i, j) = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} \delta_{k,l} f(k, l)}{\sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} \delta_{k,l}}, \quad (2)$$

где

$$\delta_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } (1 - 2\sigma)f(i, j) \leq f(k, l) \leq (1 + 2\sigma)f(i, j), \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

(из усреднения в окне исключаются значения, отличающиеся от среднего более чем на два стандарта,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение шума).

Для фильтрации импульсных помех, наряду с подавлением спекл-шума, Ли [4] предложил сигма-фильтр с порогом  $B$ , зависящим от размера окна. Если число усредняемых в соответствии с (2) элементов меньше или равно порогу  $B$ , то оценке яркости для данного значения скользящего окна приписывается значение среднего четырех соседних элементов.

Большинство алгоритмов сглаживания шума приводит к некоторой потере контрастности изображения. Ли в [5] предложил так называемый "biased sigma filter" или сигма-фильтр со смещением, который усиливает контраст и обостряет наклоны. Смещение вводится отдельным усреднением пикселей в верхней  $[f(i, j), (1 + 2\sigma)f(i, j)]$  и нижней  $[(1 - 2\sigma)f(i, j), f(i, j)]$  областях интенсивности. Далее вычисляется абсолютная разность между верхним и нижним средним и  $f(i, j)$ . Центральный пиксел заменяется на среднее, которое имеет наименьшую абсолютную разность.

Все эти методы фильтрации ориентированы на подавление больших выбросов, характерных для спекл-шумов РЛИ высокого разрешения.

В качестве исходного было использовано изображение района равнины Атланты на Венере с ровным рельефом. Изображение квантовано на 256 уровней, имеет размеры  $1100 \times 900$  байт. Все алгоритмы были запрограммированы на языке Фортран.

В таблице даны характеристики перечисленных программ. Наиболее быстрой является сигма-фильтрация. На рис. 2 представлено исходное изображение и дана гистограмма распределения яркостей, на рис. 3 — одно из отфильтрованных изображений после первой итерации (см. таблицу).

Характеристики алгоритмов нелинейной фильтрации, использованных для подавления спекл-шума

Алгоритм	Размер большого окна	Форма большого окна	Число малых окон	Форма малых окон	Число итераций	Значение $\sigma$	Порог $B$	Время на 1 итерацию (мин)	Рисунок
Медианная фильтрация	$3 \times 3$	Крест	—	—	3	—	—	30	—
	$3 \times 3$	Квадрат	—	—	3	—	—	90	—
Сглаживание по наиболее однородной окрестности	$3 \times 3$	То же	4	Квадрат $2 \times 2$	3	—	—	35	—
	$5 \times 5$		9		2	—	—	55	
			$3 \times 3$		4	3	—	—	
Сигма-фильтрация	$3 \times 3$	»	—	—	3	0,28	—	25	Рис. 3
	$5 \times 5$	»	—	—	2	0,28	—	49	
	$7 \times 7$	»	—	—	1	0,28	—	80	
То же с порогом	$3 \times 3$	»	—	—	2	0,28	1	25	—
	$3 \times 3$	»	—	—	2	0,28	2	25	
	$5 \times 5$	»	—	—	2	0,28	2	49	
То же со смещением	$7 \times 7$	»	—	—	1	0,28	2	80	—
	$3 \times 3$	»	—	—	2	0,028	—	34	
	$5 \times 5$	»	—	—	1	0,0112	—	66	

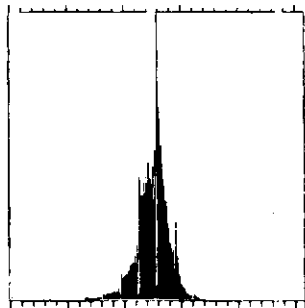


Рис. 2

Все рассмотренные алгоритмы уменьшают контрастность: гистограммы отфильтрованных изображений содержат меньший диапазон яркостей.

При медианной фильтрации гистограмма мало отличается от исходной; на изображении отмечается образование лоскутной структуры, ярче выраженной при крестообразном окне. Увеличение числа итераций до двух и более не ведет к улучшению изображения, а лишь смазывает его.

При сглаживании по наиболее однородной окрестности гистограмма становится колоколообразной (гауссовской). Лоскутность изображения усиливается при переходе от окна размером  $3 \times 3$  к окну размером  $5 \times 5$ . Увеличение числа итераций приводит к размытию изображения.

Аналогичную форму имеет гистограмма и при сигма-фильтрации. Увеличение размера окна в сигма-фильтре с  $3 \times 3$  до  $5 \times 5$  и  $7 \times 7$  приводит к уменьшению динамического диапазона яркостей и размытию изображения. То же отмечается и при увеличении числа итераций.

Сходная картина наблюдается при использовании сигма-фильтра с порогом; сигма-фильтрация со смещением разрушает гауссовскую форму гистограммы, приводя к некоторой лоскутности изображения.

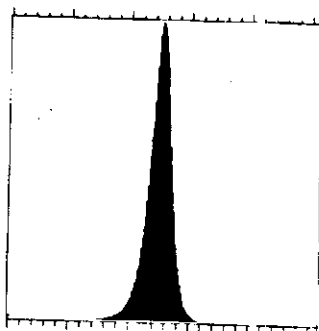
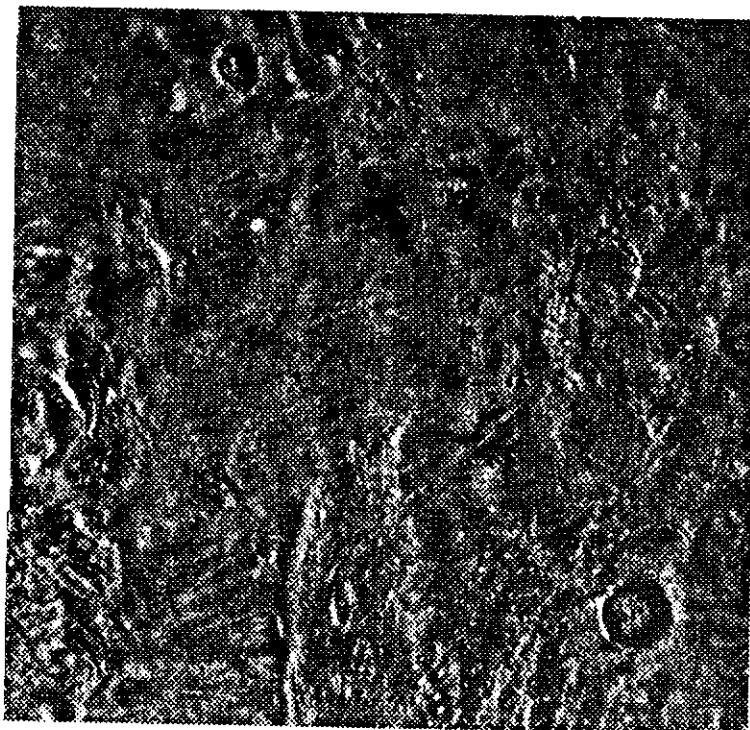


Рис. 3

Гомоморфная обработка. Мультипликативный характер спекл-шума означает, что измерение  $\tilde{c}$  сигнала  $c$  имеет вид

$$\tilde{c} = c\delta,$$

где  $\delta$  — относительная погрешность, так что после логарифмирования

$$\ln \tilde{c} = \ln c + \ln \delta$$

шум становится аддитивным и его можно попытаться подавить методами линейной фильтрации. Спекл-шум можно считать белым, спектр изображения — окрашенным, сгруппированным в области низких пространственных частот. Следовательно, можно попытаться подобрать такую полосу пропускания НЧ-фильтра, что ослабление уровня шумов будет заметным, а сглаживание изображения — приемлемым.

НЧ-фильтрация проводилась в частотной области и выполнялась после прямого 2-мерного преобразования взвешиванием гармоник окном Ханна с круговой симметрией, после чего рассчитывалось 2-мерное обратное преобра-



Рис. 4

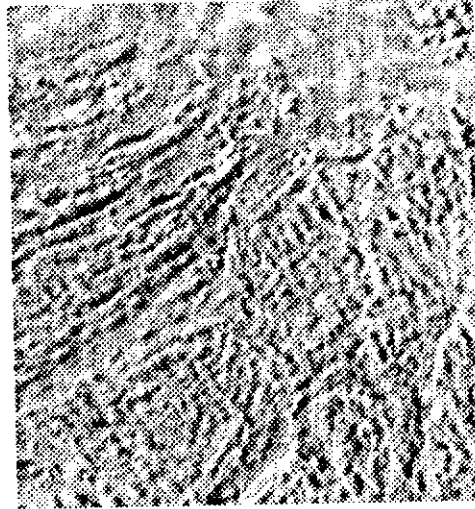


Рис. 5

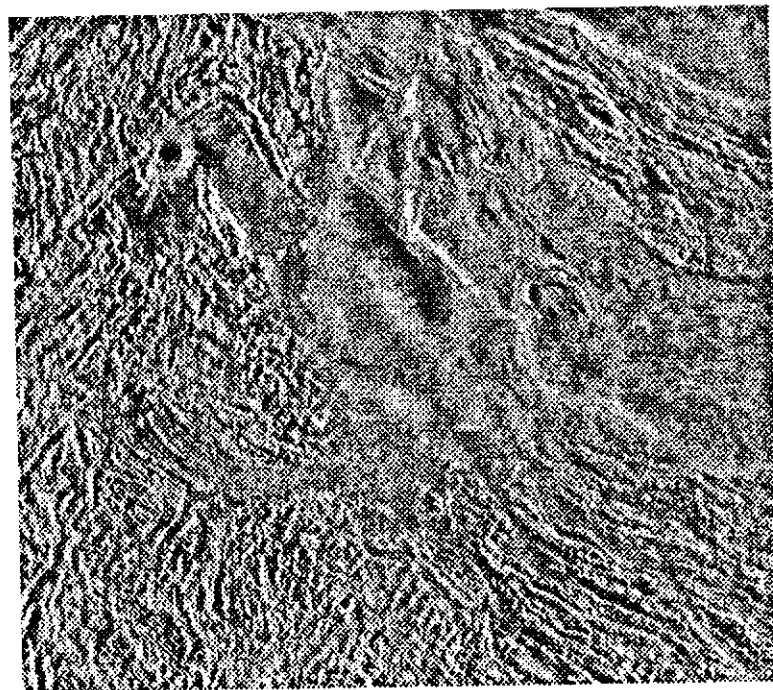


Рис. 6

зование. Использовались два вида спектров — Фурье и Уолша (последний — в связи с возможностью значительно более простой аппаратной реализации). Изображение, приведенное на рис. 4 (размером  $512 \times 512$ ), обрабатывалось посредством НЧ-фильтрации его спектра Фурье. Пространственная частота среза на нулевом уровне равна 256, 192 и 128 (рис. 5). Даже при сохранении большой доли гармоник флуктуации спекл-шумов заметно уменьшаются, по мере уменьшения числа гармоник проявляется сглаживание мелких деталей.

Результат гомоморфной обработки изображения на рис. 6 (размером  $1024 \times 1024$ ) посредством НЧ-фильтрации его спектра Уолша представлен на рис. 7 (частота среза фильтра Ханна равна 256). По-прежнему на малоконтрастных участках наблюдается сглаживание спекл-шума. Однако специфика

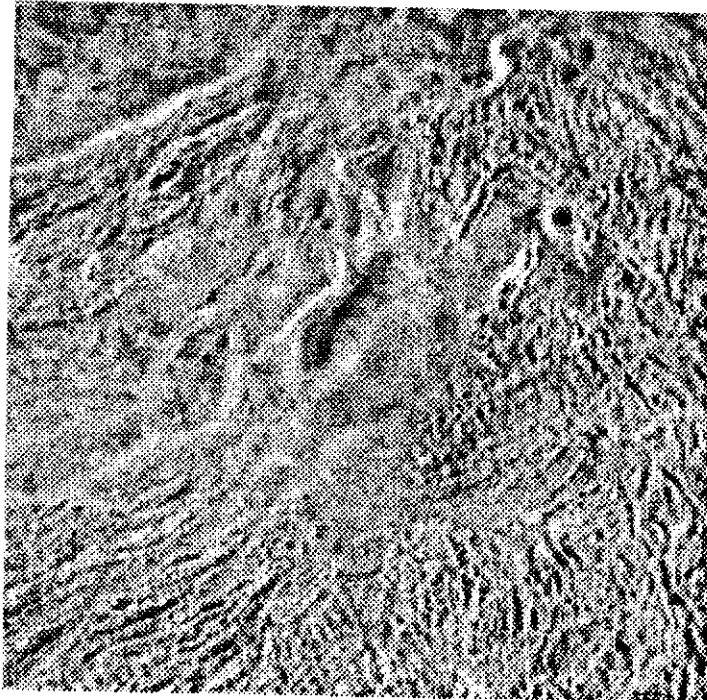


Рис. 7

функций Уолша приводит к образованию клеточной структуры, проявляющейся тем сильнее, чем меньше гармоник Уолша остается после фильтрации. При сохранении одной и той же доли гармоник оба базиса обеспечивают соизмеримое подавление спекл-шума, однако для базиса Уолша наблюдается более сильное искажение изображения. По-видимому, он в меньшей степени согласован со структурой изображения.

#### ВЫВОДЫ

Минимально необходимым для удовлетворительного восприятия РЛИ является, как правило, 4—5-кратное некогерентное накопление. Методы нелинейной фильтрации позволяют снизить уровень спекл-шума, искажения изображения носят при этом шумоподобный характер. Гомоморфная обработка также приводит к снижению уровня спекл-шума, однако искажение изображения имеет характер сглаживания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.—М.: Мир, 1982.—Т. 2.
2. Nagao M., Matsuyama // Computer Graphics and Image Process.—1979.—9, N 4.—P. 394.
3. De Albuquerque Araujo A. Sum of absolute grey level differences: an edge-preserving smoothing approach // Electron. Lett.—1985.—21, N 25/26.—P. 1219.
4. Lee J.-S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images // IEEE Trans. on Systems, Man & Cybernetics.—1983.—SMC-13, N 1.—P. 85.
5. Lee J.-S. // Computer Vision, Graphics and Image Process.—1983.—24, N 2.—P. 255.

Поступила в редакцию 24 мая 1989 г.