

Оценка эффективности нескольких локальных фильтров подавления спекл-шума на радиоизображениях

В.В. Костров, А.Ю. Антонов

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
602264 г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23. E-mail: vyk@mit.ru,
aleksandr_uran@mail.ru

Приведена сравнительная оценка подавления спекл-шума нескольких простых фильтров с классическими фильтрами по быстродействию и степени подавления. Проведено моделирование на языке программирования C++ и реальных изображениях РСА.

The comparative estimation of speckle suppression on some simple filters and classical filters on speed and strength suppression is resulted. Modelling in programming language C++ and real SAR images is spent.

Характерной особенностью изображений, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), является зернистость, называемая спекл-шумом. В последнее время разработано большое количество методов и способов борьбы со спекл-шумом, как относительно простых, так и достаточно сложных. Несмотря на это значительную долю программных модулей двух наиболее крупных фирм в области обработки радиоизображений Ракурс и Сканэкс составляют так называемые «классические» фильтры, достоинство которых заключается в простоте реализации, быстродействии и эффективности подавления спекл-шума. Поэтому возникла необходимость в сравнении относительно простых фильтров с «классическими», поскольку подобных русскоязычных работ не публиковалось.

Категорию «классических» составляют фильтры: усредняющий, медианный, Ли, Фроста, Куана, модифицированный Ли, модифицированный Фроста, сигма и гамма-МАР фильтр. Они достаточно подробно рассмотрены во многих источниках, среди которых можно выделить [1,2].

В работе [3] предложен адаптивный медианный фильтр, выходное значение которого формируется следующим образом

$$I_{\text{вых}} = \text{med}(I_1 \cdot \delta_1, I_2 \cdot \delta_2 \dots I_n \cdot \delta_n),$$

$$\text{где } \delta_k = \begin{cases} 1 & M_w - K\sigma_w \leq I_k \leq M_w + K\sigma_w; \\ 0; & \end{cases}$$

n – количество пикселей в окне;

K – весовой коэффициент (при моделировании $K=1,5$);

M_w – среднее значение в окне;

σ_w – среднеквадратическое отклонение в окне.

По сути, данный фильтр является комбинацией медианного и сигма-фильтра.

В [4] рассматривается фильтр Ли с применением t -статистики и линейным весовым коэффициентом:

$$I_{\text{вых}} = M_w + K(I_{\text{ex}} - M_w),$$

$$\text{где } K = \begin{cases} 0 & 0 \leq p \leq a; \\ \frac{p-a}{b-a} & a < p < b; \\ 1 & b \leq p \leq 1; \end{cases} \text{ – весовой коэффициент;}$$

a и b – пороговые значения (при моделировании $a=0,8$ и $b=0,95$);

$p = 1 - T_N$ – вероятность соответствия центрального пикселя распределению остальных пикселей в окне фильтра;

$$T_N = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \text{ – нормированное к интервалу } [0;1] \text{ значение } T;$$

$$T = \frac{I_{\text{ex}} - M_w}{\sigma_w} \text{ – значение } t \text{ статистики для центрального пикселя;}$$

T_{\max} и T_{\min} – максимальное и минимальное значение T для радиоизображения;

I_{ex} – значение центрального пикселя.

В [5] разработан фильтр, выходным значением которого является значение пикселя с наибольшим приоритетом

$$I_{\text{вых}} = I_k \leftarrow \max(G_1, G_2 \dots G_n),$$

$$\text{где } G_k = \begin{cases} \frac{I_k - I_{\min}}{M_w - I_{\min}} & I_k \leq M_w; \\ \frac{I_{\max} - I_k}{I_{\max} - M_w} & I_k > M_w; \end{cases} \text{ – приоритет пикселя;}$$

I_{\max} и I_{\min} – максимальное и минимальное значение в окне фильтра.

В [6] предложен фильтр на основе статистической моды, однако его практическое применение ограничено по двум причинам: отсутствие моды если значения не повторяются и наличии нескольких значений с одинаковой частотой повторения.

В [7] использован фильтр на основе адаптивного рационального оператора

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{ex}} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{I_k - I_{\text{ex}}}{\frac{K(I_k - I_{\text{ex}})^2}{(I_k + I_{\text{ex}} + 1)^2} + A},$$

где K – весовой коэффициент (при моделировании $K=2870$);

A – параметр усреднения (при моделировании $A=4,6$).

В [8] выходным значением фильтра является среднее в подокне с минимальным коэффициентом вариации

$$I_{\text{вых}} = M_{sw} \leftarrow \min(C_1, C_2 \dots C_p),$$

где M_{sw} – среднее значение в подокне размером $\frac{\sqrt{n}+1}{2} \times \frac{\sqrt{n}+1}{2}$;

C_{sw} – коэффициент вариации в подокне;

$$p = \left(\frac{\sqrt{n}+1}{2} \right)^2 \text{ – количество подокон.}$$

В качестве основных параметров оценки изображений могут быть использованы среднеквадратическое отклонение (СКО), верность изображения (ВИ), отношение сигнал шум (ОСШ), эквивалентное число наблюдений (ENL). Чем ниже СКО и выше ВИ и ОСШ, тем ближе обработанное изображение к оригиналу, поэтому совокупность данных параметров характеризуют визуальное качество изображения, с помощью

параметра ENL можно оценить степень подавления спекл-шума: чем выше значение, тем сильнее подавление. ENL определяется на однородных участках. Названные выше параметры вычисляются по следующим формулам:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [X(m,n) - Y(m,n)]^2};$$

$$BI = 1 - \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [X(m,n) - Y(m,n)]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [X(m,n)]^2};$$

$$OCШ = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [X(m,n)]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [X(m,n) - Y(m,n)]^2} \right);$$

$$ENL = \left(\frac{M}{k \cdot \sigma} \right)^2,$$

где M – математическое ожидание однородного участка поверхности;

σ – дисперсия флуктуаций для того же участка;

k – коэффициент отношения СКО к математическому ожиданию для определенного закона распределения.

Поскольку рассмотренные алгоритмы достаточно просты и не используют специальных функций, они были реализованы на C++. В качестве тестовых изображений были выбраны изображения тропических лесов в Бразилии (рис. 1а), залив в Сиднее (рис. 1б) и египетские пирамиды (рис. 1в).

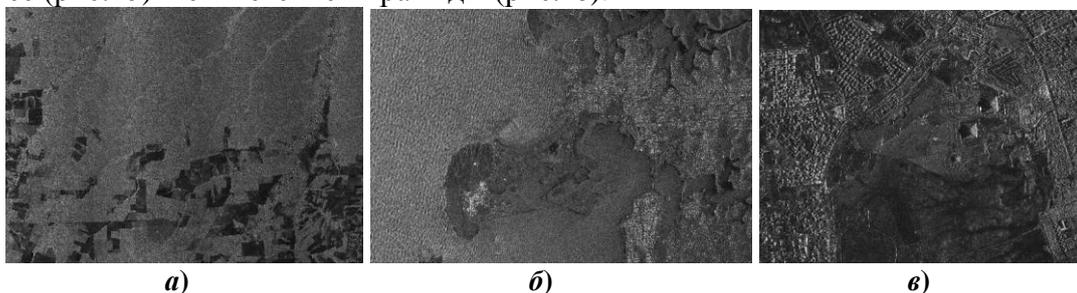


Рис. 1. Тестовые радиоизображения

В таблицах 1-3 приведены результаты обработки тестовых изображений. В скобках указан размер окна и количество итераций. Для ориентировочной оценки быстродействия также приведено время обработки T с точностью 0,1 с.

Таблица 1. Сравнительная характеристика фильтров спекл-шума рис. 1а

| Алгоритм | ENL | СКО | ВИ | ОСШ, дБ | T, с |
|-------------------------------|------|------|-------|---------|------|
| Исходное изображение | 14,3 | --- | --- | --- | --- |
| Модифицированный Ли (3x3, 2) | 48 | 15,2 | 0,963 | 14,4 | 6 |
| Сигма-фильтр (3x3, 1) | 72,6 | 17,1 | 0,953 | 13,3 | 3,5 |
| Медианный (3x3, 1) | 54,4 | 17,4 | 0,951 | 13,1 | 3,1 |
| Медианный адаптивный (5x5, 3) | 59 | 19 | 0,942 | 12,4 | 20,7 |
| На основе моды (5x5, 2) | 30 | 27,5 | 0,879 | 9,2 | 34 |
| Гибкий адаптивный (5x5, 1) | 42,3 | 14,5 | 0,966 | 14,7 | 5,9 |

| | | | | | |
|--------------------------------------|------|------|-------|------|------|
| Наибольшего приоритета (3x3, 3) | 52,7 | 23,1 | 0,915 | 10,7 | 13,5 |
| Адаптивный рац. оператор (3x3, 7) | 19,3 | 12,6 | 0,975 | 16 | 56 |
| Минимального коэф. вариации (5x5, 1) | 54,7 | 17,2 | 0,953 | 13,2 | 12 |

Наибольшее подавление спекл-шума и быстроедействие обеспечили медианный и сигма-фильтр. Гибкий адаптивный и модифицированный фильтр Ли показали чуть худшие результаты быстрогодействия и подавления спекл-шума, зато по остальным параметрам превзошли все фильтры. Фильтр наибольшего приоритета, минимального коэффициента вариации и медианный адаптивный фильтр достаточно хорошо подавляют спекл-шум, но требуют достаточно много времени при низком визуальном качестве. Самые худшие результаты у фильтров на основе моды и адаптивного рационального оператора, поэтому из дальнейших экспериментов их было решено исключить.

Таблица 2. Сравнительная характеристика фильтров спекл-шума рис.1б

| Алгоритм | ENL | СКО | ВИ | ОСШ, дБ | T, с |
|--------------------------------------|------|------|-------|---------|------|
| Исходное изображение | 21,6 | --- | --- | --- | --- |
| Модифицированный Ли (3x3, 1) | 44,1 | 9,3 | 0,989 | 19,7 | 5,6 |
| Сигма-фильтр (3x3, 1) | 45,9 | 9,9 | 0,988 | 19,2 | 6,6 |
| Медианный (3x3, 1) | 40,4 | 9,7 | 0,988 | 19,3 | 5,8 |
| Медианный адаптивный (5x5, 3) | 43,4 | 13 | 0,979 | 16,8 | 36 |
| Гибкий адаптивный (5x5, 1) | 73,2 | 15,3 | 0,971 | 15,4 | 12 |
| Наибольшего приоритета (3x3, 3) | 50,4 | 23,9 | 0,929 | 11,5 | 25,2 |
| Минимального коэф. вариации (5x5, 1) | 34,7 | 12,1 | 0,982 | 17,4 | 23 |

На втором изображении «классические» фильтры имеют практически одинаковые результаты. Гибкий адаптивный фильтр показал наибольшее подавление спекл-шума при чуть худшем визуальном качестве и вдвое низким быстроедействием. Остальные фильтры имеют наихудшее быстроедействие при сравнительно одинаковом подавлении и чуть худшем визуальном качестве.

Таблица 3. Сравнительная характеристика фильтров спекл-шума рис.1в

| Алгоритм | ENL | СКО | ВИ | ОСШ, дБ | T, с |
|--------------------------------------|------|------|-------|---------|------|
| Исходное изображение | 15 | --- | --- | --- | --- |
| Модифицированный Ли (3x3, 2) | 34,7 | 10,4 | 0,978 | 16,6 | 6,4 |
| Сигма-фильтр (3x3, 1) | 27,3 | 9,2 | 0,983 | 17,6 | 3,7 |
| Медианный (3x3, 1) | 25,3 | 9 | 0,984 | 17,8 | 3,3 |
| Медианный адаптивный (5x5, 3) | 27 | 12,4 | 0,969 | 15 | 21,3 |
| Гибкий адаптивный (5x5, 1) | 38,4 | 14,3 | 0,958 | 13,8 | 6,4 |
| Наибольшего приоритета (3x3, 3) | 30,1 | 25,8 | 0,864 | 8,6 | 14,1 |
| Минимального коэф. вариации (5x5, 1) | 21,5 | 12,4 | 0,969 | 15 | 13 |

В целом распределение параметров аналогично, однако модифицированный фильтр Ли за счет применения двух итераций занимает промежуточное положение между «классическими» фильтрами и гибким адаптивным.

Таким образом, среди рассмотренных фильтров особого внимания заслуживает гибкий адаптивный фильтр, основанный на t -статистике и фильтре Ли, поскольку он позволяет получить наибольшее подавление спекл-шума при соблюдении общего баланса параметров.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
2. Huang Y., Genderen J. Evaluation of several speckle filtering techniques for ERS-1&2 imagery // International archives of photogrammetry and remote sensing, vol. XXXI, part B2, 1996, p. 164-169.
3. Qiu F., Berglund J., Jensen J., Thakkar P., Ren D. Speckle noise reduction in SAR imagery using a local adaptive median filter // GIScience and remote sensing, vol. 41, No. 3, 2004, p. 244-266.
4. Xiao J., Li J., Moody A. A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery // International journal of remote sensing, vol. 24, No. 12, 2003, p. 2451-2465.
5. Hoque R., Rashed-al-Mahfuz A new approach in spatial filtering to reduce speckle noise // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), vol. 1, Issue 3, jul 2011, p. 29-32.
6. Talab D. Speckle noise reduction in SAR images using non-adaptive mode-filter // Al-Mustansiriya J. Sci, vol. 22, No. 2, 2011, p. 141-150.
7. Ramponi G., Moloney C. Smoothing speckled images using adaptive rational operator // IEEE signal processing letters, vol. 4, No. 3, mar 1997, p. 68-71.
8. Schulze M., Wu Q. Nonlinear edge-preserving smoothing of synthetic aperture radar images // Proceedings of the New Zealand Image and Vision Computing'95 Workshop, pp. 65-70.