

УДК 551.501: 629.195.1

**К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Доктор техн. наук	А.Ф. Мухамедгалиев
Доктор техн. наук	А.Х. Ахмеджанов
	А.Н. Искаков
	Т.К. Караданов

Радиолокационные изображения (РЛИ) земной поверхности имеют высокую зашумленность, из-за которой снижается их применимость. Рекомендуется проведение процедуры фильтрации РЛИ с устранением помех и выявлением структурных особенностей. Применение описанной методики показано на примере обнаружения нефтяных пленок на морской поверхности, и оценки состояния ледовой обстановки северо-восточной части Каспийского моря.

Радиолокационные устройства позволяют получать информацию об исследуемой поверхности независимо от ее освещенности (т.е. в любое время суток) и наличия облачного покрова. Указанное свойство радиолокационных данных представляет особую ценность при решении задач, связанных с необходимостью получения информации о состоянии земной поверхности заданной территории в сжатые сроки [1, 2]. Регулярные радиолокационные съемки территорий, осуществляемые с помощью спутниковой системой «RADARSAT-1», могут быть полезны для создания системы космического экологического мониторинга. Поэтому необходимо создание эффективных методов обработки радиолокационных изображений.

Характеристики радиолокационного отражения морской поверхности зависят от ее структуры. Здесь кроме аппаратурных факторов и угла падения необходимо учитывать состояние волнения, его направление относительно радиолокационной станции (РЛС). Основным фактором, определяющим состояние морской поверхности, является, как известно, скорость ветра. По мере увеличения скорости ветра несколько уменьшается величина зеркального отражения при нормальном падении излучения, в то время как рассеяние при малых углах наблюдения становится гораздо больше. При статистической обработке данных зондирования водной поверхности возможно усреднение данных в пределах больших участков.

Установлено, что действие местных ветров приводит к появлению на морской поверхности вторичной структуры, которая представляет собой небольшие волны и рябь. Отраженный сигнал от морской (водной) поверхности формируется мелкой структурой – рябью (длины волн, соизмеримые с длиной волны РЛС), расположенной на склонах крупных морских волн. Основной вклад в отражение вносит спектральная составляющая ряби, длина волны которой зависит от длины падающей электромагнитной волны. Крупные ветровые волны с длиной волны в десятки метров обнаруживаются (при достаточном разрешении РЛС) благодаря модуляции амплитуды ряби крупной структурой, а также наличию брызг и капель. Приборные или другие помехи могут исказить сам сигнал, поступающий с зондируемой поверхности. Для анализа высокочастотного отраженного радиосигнала требуется проведение сглаживания функции распределения. В теории радиотехники для ослабления высокочастотных колебаний применяют в одномерном случае способ сглаживания фильтрами.

Для уменьшения или устранения помех применяют методы фильтрации. Свертка, методы морфологической обработки и медианная фильтрация являются примерами фильтрации с использованием значений соседних пикселей. Свертка – операция над локальной окрестностью, где каждый результирующий пиксель представляет собой взвешенную сумму исходных пикселей. Вес определяется ядром свертки. С помощью операции свертки можно реализовать такие методы обработки изображений как сглаживание, повышение резкости и усиление границ объектов изображения. Ядро свертки – матрица весов, которая используется при выполнении свертки. Скользящие окна (маски), применяемые для обработки изображений, представляют собой таблицы действительных чисел (весовых коэффициентов). Их действие на локальную область изображения с центром в элементе f_{ij} состоит в усреднении с весами, т.е. с коэффициентами маски значений с сигналами элементов изображения в выбранном окне.

Значение сигнала элемента $g_{i,j}$ изображения – результата (отклика) для маски 3×3 определяется из соотношения

$$g_{i,j} = \sum_{n,m=-1}^1 p_{n,m} f_{i+n,j+m}, \quad (1)$$

где $p_{n,m}$ – ядро свертки.

Индексы i, j в (1) пробегают почти все значения, соответствующие

размеру исходного изображения, за исключением граничных полос (в данном случае – за исключением первой и последней строки, а также первого и последнего столбца матрицы исходного изображения). Таким образом, результат требует доопределения границ, но, учитывая, что размеры изображений обычно много больше размеров масок, неопределенными граничными элементами результата можно просто пренебречь и ограничиться изображением меньшего размера. Наиболее распространены в практике маски размера 3×3 (Лапласа, Превитта, Собела, Кирша, Робертса и т.д.) ввиду их высокой вычислительной эффективности. Выражение (1) представляет собой определение дискретной свертки $g_{i,j}$ функции $f_{i,j}$ с ядром $p_{i,j}$.

Если представить непрерывную функцию $f(x, y)$ в виде разложения в ряд Тейлора в окрестности точки (x_0, y_0) , то будем иметь

$$f(x, y) = \sum_{n,m=0}^{N,M} \frac{1}{n!m!} \frac{\partial^{m+n} f(x_0, y_0)}{\partial x^m \partial y^n} (x - x_0)^m (y - y_0)^n. \quad (2)$$

Если функция $f(x, y)$ в некоторой окрестности точки (x_0, y_0) дифференцируема любое количество раз, а остаточный член разложения в формуле Тейлора стремится к нулю, то степенной ряд имеет отличный от нуля радиус сходимости. Функция $f(x, y)$ будет аналитична в точке (x_0, y_0) . Условие аналитичности функции $f(x, y)$ означает, что эта функция должна являться решением уравнения Лапласа в точке (x_0, y_0) , а в окрестности будет отличаться на сколь угодно малую величину ε . Из последнего условия можно получить для окрестности точки (x_0, y_0) в области сходимости ряда

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} = 0, \quad (3)$$

где Δ – оператор Лапласа.

Представим частные производные в конечных разностях

$$\Delta f(x, y) = \frac{f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j+1} + f_{i,j-1} - 4f_{i,j}}{d^2}, \quad (4)$$

если ввести новую функцию $\varphi(x, y) = \Delta f(x, y)$, то в области сходимости разложения функции можем записать

$$\varphi_{m,n}^0 = \sum_{i,j=-1}^1 p_{i,j} f_{m+i,n+j}. \quad (5)$$

В результате проведения операции свертки радиолокационного

изображения будет создано изображение, близкое к начальному, но при этом оно будет сглаженным. Последовательное применение дифференциального оператора Лапласа для фильтрации РЛ изображений с целью сглаживания высокочастотных помех можно описать следующей итерационной процедурой

$$\varphi_{m,n}^k = \sum_{i,j=-1}^1 p_{i,j} \varphi_{m+i,n+j}^{k-1} \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, K. \quad (6)$$

Итерационная процедура может происходить до достижения нужной степени сглаженности или по следующему соотношению:

$$|\varphi_{i,j}^{k+1} - \varphi_{i,j}^k| \leq \varepsilon. \quad (7)$$

Проверка качества восстановленного изображения необходима, так как при достаточно большом числе итераций может происходить размывание изображения.

При достижении достаточной гладкости радиолокационного изображения можно провести анализ рельефных особенностей, повышение резкости и усиление границ объектов изображения. Для определения градиентных особенностей радиолокационного изображения возможно применение известных методов исследования функций с помощью производных. В конечных разностях производные функции с последней итерации по x и по y можно записать в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_{i,j}^k}{\partial x} = \frac{\varphi_{i+1,j}^k - \varphi_{i-1,j}^k}{2d} \\ \frac{\partial \varphi_{i,j}^k}{\partial y} = \frac{\varphi_{i,j+1}^k - \varphi_{i,j-1}^k}{2d} \end{cases}. \quad (8)$$

Значение градиента G и направление градиента L можно записать в виде

$$G_{i,j} = \sqrt{(\varphi_{i,j}^x)^2 + (\varphi_{i,j}^y)^2}, \quad L_{i,j} = \operatorname{tg} \frac{\varphi_{i,j}^y}{\varphi_{i,j}^x}, \quad (9)$$

где $\varphi_{i,j}^x$ и $\varphi_{i,j}^y$ – производные функции φ по x и по y .

Для расчета разностных производных в основном применяются двухточечные конечные разности. Однако порядок аппроксимации можно существенно улучшить, если задействовать большее количество точек. Объем вычислений при этом, конечно, возрастет, но и точность численного дифференцирования улучшится. Чтобы получить многоточечные раз-

ностные аппроксимации производной, следует действовать точно так же, как и раньше. К шести точкам аргументов: $(x_0 + id, y_0 + jd)$, где $i = \pm 0, 1$ и $j = \pm 0, 1$, добавим еще четыре: $i = \pm 2$ и $j = \pm 2$.

Рассмотрим применение описанной методики на примере выделения нефтяных пленок на морской поверхности. Проведенный обзор показывает [3, 4], что к падению величины отраженного сигнала приводят основные следующие причины: штилевая обстановка, зоны ветровой тени, дождевые пятна, растения в мелководных зонах и нефтяные пленки. В первую очередь, рассмотрим случаи проявления на радарных изображениях штилевой обстановки. Анализ изображения северной части каспийского шельфа с «RADARSAT-1» за 15.08.2006 года показал нулевой уровень сигнала. При близости морской поверхности к зеркальной, т.е. при нулевой шероховатости поверхности, отраженный сигнал отсутствует. Рассмотренный случай относился к центру штилевой зоны, поэтому рассмотрим особенности распределения отраженного сигнала в краевой области. Анализ радарных изображений показал, что на спокойной воде значение отраженного радиосигнала имеет либо нулевое значение или близко к нему. Наблюдается плавная зона перехода спокойной воды в волновую область. Как правило, зоны штилевой ситуации занимают большую площадь. В то же время стояния спокойной воды непродолжительны. Ветровое затишье (ветровая тень) может наблюдаться на относительно малой площади. В качестве примера рассмотрим изображение с «RADARSAT-1» за 13.10.2006 г.

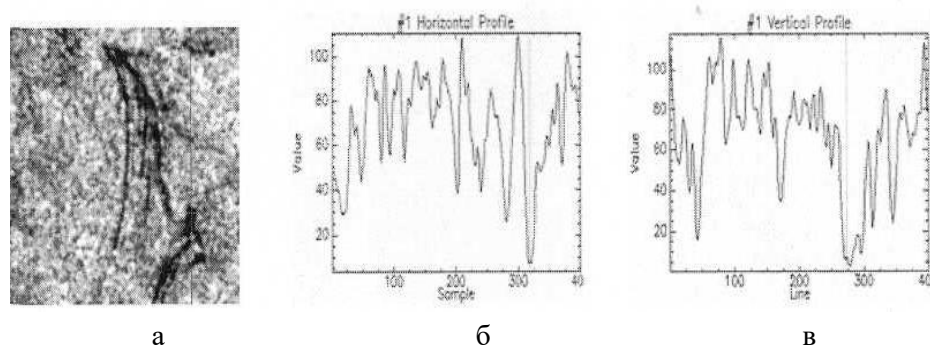


Рис. 1. Сглаженное РЛ изображение (а) участка акватории Северного Каспия 22.07.2006 г. с нефтяной пленкой, горизонтальный и вертикальный профили распределения радиосигнала (б, в).

Водная поверхность у западного побережья Каспийского моря (рис. 1а), где имеются фактические загрязнения морской воды нефтью.

Выбранный участок характеризуется наличием полос загрязнений нефтью. Анализ сглаженных горизонтальных и вертикальных профилей показывает, что наличие нефтяных пленок на морской воде характеризуется резким высоко градиентным провалом в графиках распределения радиосигнала (рис. 1б, 1в).

На РЛ космическом снимке «RADARSAT-1» ледового покрова в северной части Каспийского моря за 16 февраля 2006 года выбран участок (рис. 2а) с трещиной в верхнем левом углу и скоплением битого льда, проходящего белой полосой через весь снимок.

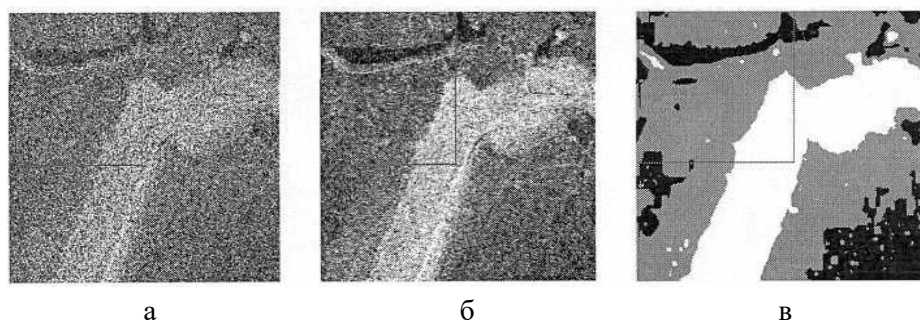


Рис. 2. Космический снимок «RADARSAT-1» северной части Каспийского моря за 16 февраля 2006 года (а), сглаженное изображение (б) и результат текстурного анализа (в).

В заключение можно отметить, что для устранения помех и выявления структурных особенностей успешно применимы процедуры фильтрации радиолокационных изображений. В результате детальной обработки космических изображений и анализа сглаженных профилей распределения отраженного радиосигнала, полученных с помощью радиолокационного спутника «RADARSAT-1», появляется возможность ведения ледового мониторинга и выявления нефтяных пленок на поверхности Каспийского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загородников А.А. Радиолокационная съёмка морского волнения с летательных аппаратов. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 240 с.
2. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от морской поверхности. – М.: Советское радио, 1968. – 224 с.
3. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне / Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И., Александров Д.В / – М.,

2003 – 143 с.

4. Kennedy I.M., Wermund E.G. Oil spills. IR and microwave. // Photogramm. Eng. – 1971. – P.1235–1242.

ДГП Институт космических исследований, г. Алматы
РГП ЦАФИ НКА РК, г. Алматы

РАДИОЛОКАЦИЯЛЫҚ КОСМОСТЫҚ БЕЙНЕЛЕРДІ ӨНДЕУ МӘСЕЛЕСІ

Техн. ғылымд докторы	А.Ф. Мухамедгалиев
Техн. ғылымд докторы	А.Х. Ахмеджанов
	А.Н. Искаков
	Т.К. Караданов

Жер бетінің радиолокациялық бейнесінің шулылығы жоғары болатындықтан, оларды қолдану қиындайды. Кедергілерді жоятын және құрылымдық ерекшеліктерді анықтайтын радиолокациялық бейнелерді филтрлеу тәсілін жүргізу ұсынылады. Ұсынылған әдісті қолдану теңіз бетіндегі мұнай таңбаларын табу және Каспий теңізінің солтүстік-шығыс бөлігіндегі мұздану жағдайын бағалау мысалдарымен көрсетілген.