

# Исследование алгоритмов обнаружения малых изменений контента радиолокационных снимков Земли из космоса

Л.Г. Доросинский<sup>1</sup>, Н.С. Виноградова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Мира, 19, Екатеринбург, Россия, 620002

**Аннотация.** При решении различных задач космического мониторинга возникает проблема определения наличия или отсутствия небольших изменений состояния отражающей поверхности во время сеанса наблюдения, а также определения характеристик этих изменений, таких как положение, размер и средние значения мощностей отражённых сигналов. Статья посвящена разработке метода, предназначенного для обнаружения таких изменений, а также исследованию эффективности этого метода на основании оценок ошибок измерения. Даны конкретные рекомендации по внедрению указанного метода на основании данных о реальных ЭПР местности.

## 1. Введение

Проблема определения малых изменений отражающих свойств поверхности при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) является одной из наиболее актуальных задач анализа данных при наблюдении поверхности радиолокационными средствами, расположенными на космических носителях. В качестве примера можно привести мониторинг ледовой обстановки, когда влажные участки льда должны быть обнаружены на однородном фоне, наблюдение сельскохозяйственных культур, мониторинг несанкционированных вырубок леса и так далее. Эффективное решение проблемы зачастую невозможно лишь на основании полевых исследований в виду существенной удаленности объектов интереса, и как следствие, высокой стоимости такого рода работ [1,2]. Также объективные данные зачастую невозможно оперативно получить с использованием наблюдений в оптическом диапазоне по причине зависимости результата съемки как от погодных условий, так и от времени суток. Таким образом, важным источником получения объективной информации о состоянии местности являются данные радиолокационных наблюдений земной поверхности [9]. С целью повышения эффективности мониторинга земной поверхности с использованием радиолокационных наблюдений возникает проблема решения задачи о автоматизации процедуры выявления изменений, ассоциированной с вопросами распознавания образов и сцен [3-5].

Настоящая работа посвящена разработке метода выявления малых изменений, получении информации об их положении и свойств, а также анализу точности предложенного метода.

## 2. Разработка и исследование алгоритма обнаружения области с отличающимися характеристиками отражающей поверхности по методу максимального правдоподобия

Сигнал на входе процессора первичной обработки представляет собой вектор случайных отсчётов мощности отражённых сигналов от  $N$  последовательно расположенных участков поверхности, что представляет собой общепринятый способ моделирования радиолокационного изображения после этапа апертурного синтеза [1,6]. Каждый такой участок формирует сигнал с одинаковой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) за исключением  $\delta$  отсчётов, начинающихся с элемента поверхности, имеющего неизвестный номер  $d$  и отношение ЭПР  $\sigma_1^2/\sigma_0^2$ , которые и следует определить с минимально возможной ошибкой. Пример возможного размещения последовательности отсчётов в одном канале дальности (азимута) показан на рисунке 1. Задача заключается в том, чтобы найти параметры  $d$  и  $\delta$ .

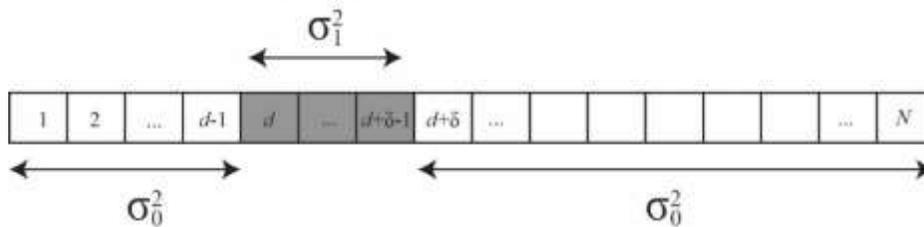


Рисунок 1. Модель сигнала с участком аномальной ЭПР величиной  $\delta$  [7].

Решаем задачу способом многоальтернативной проверки гипотез [8]. Плотность вероятности отсчётов мощности отражённого сигнала (при нормальном распределении квадратурных составляющих на входе устройства первичной обработки) имеет экспоненциальное распределение [9]:

$$p(\vec{y}) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{y_i}{\sigma}}. \quad (1)$$

Тогда функция правдоподобия для вектора наблюдаемых данных определяется следующим выражением:

$$W(\vec{y} | \hat{q}, d, \delta) = \frac{\prod_{i=1}^d \frac{1}{\sigma_0} e^{-\frac{y_i}{\sigma_0}} \cdot \prod_{i=d+1}^{d+\delta} \frac{1}{\sigma_1} e^{-\frac{y_i}{\sigma_1}} \cdot \prod_{i=d+\delta+1}^N \frac{1}{\sigma_0} e^{-\frac{y_i}{\sigma_0}}}{\prod_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_0} e^{-\frac{y_i}{\sigma_0}}} = \prod_{i=d+1}^{d+\delta} \frac{\sigma_1}{\sigma_0} e^{-\frac{y_i}{\sigma_1} + \frac{y_i}{\sigma_0}}. \quad (2)$$

После логарифмирования:

$$\ln(W) = \left( \frac{1}{\sigma_0} - \frac{1}{\sigma_1} \right) \sum_{i=d}^{d+\delta} y_i - \delta \ln \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right). \quad (3)$$

После очевидных преобразований получаем:

$$\ln(W) = \sum_{i=d}^{d+\delta} \left( y_i - \frac{q \ln(q)}{q-1} \right), \quad q = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}. \quad (4)$$

Начало области с отличающейся ЭПР (индекс  $d$ ) и размер окна неоднородности  $\delta$  определяются как те их значения, при которых выражение (4) принимает наибольшее значение. Типичные сечения

зависимостей (4) при количестве отсчетов, равном 400,  $d=50$ ,  $\delta=200$  и  $\sigma_1^2/\sigma_0^2 = 50$  приведены на рисунке 2.

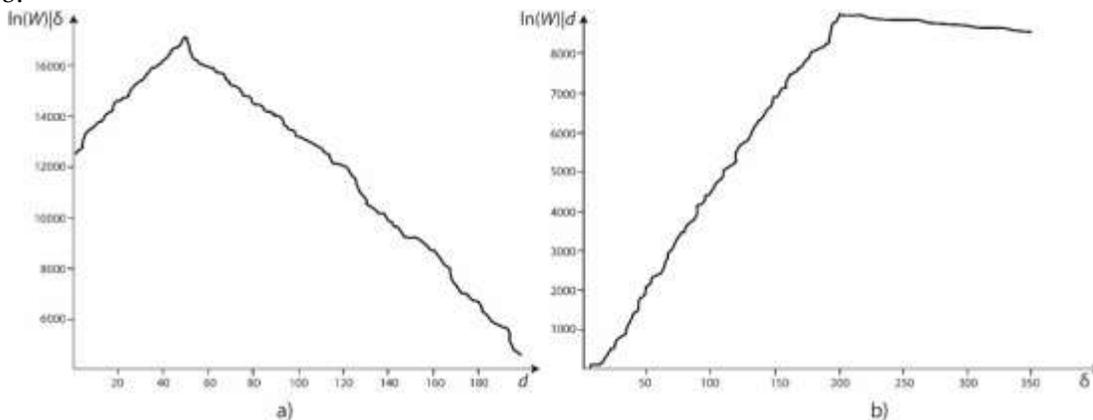
Далее необходимо оценить величину  $\sigma_1^2/\sigma_0^2$ :

$$\frac{\partial W}{\partial q} = \frac{q - q + 1}{q^2} \sum_{i=d}^{d+\delta} y_i - \frac{\delta}{q} = 0, \quad q = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}. \quad (4)$$

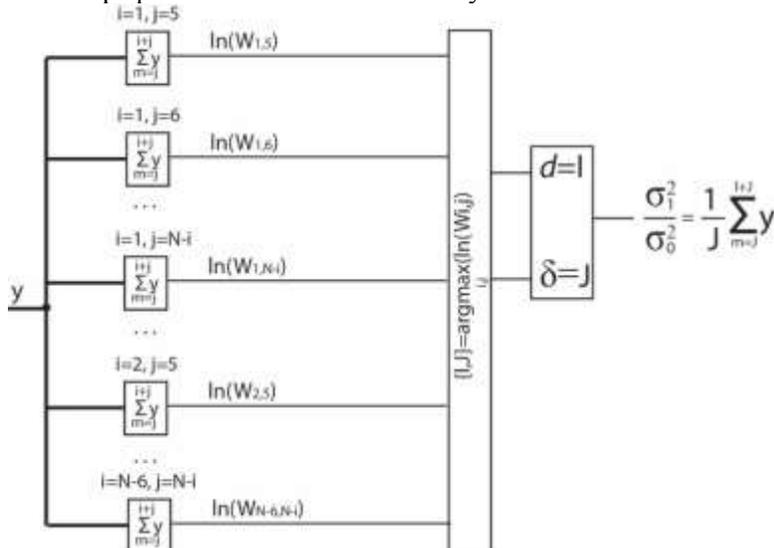
Тогда оценка для отношения дисперсии может быть найдена как

$$\hat{q}^2 = \frac{1}{\delta} \sum_{i=d}^{d+\delta} y_i. \quad (5)$$

На рисунке 3 представлена блок-схема алгоритма. Моделирование выполнено в среде MATLAB 2018, b.



**Рисунок 2.** а) Типичный график сечения зависимости суммы отсчетов сигнала от величины индекса  $d$ ; б) Типичный график сечения зависимости суммы отсчетов сигнала от размера цели  $\delta$ .

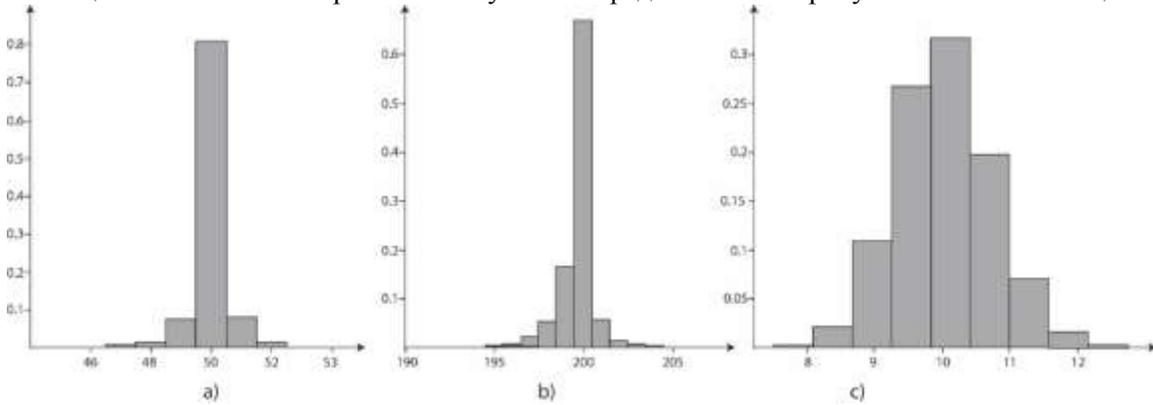


**Рисунок 3.** Блок-схема алгоритма, основанного на методе статистического моделирования.

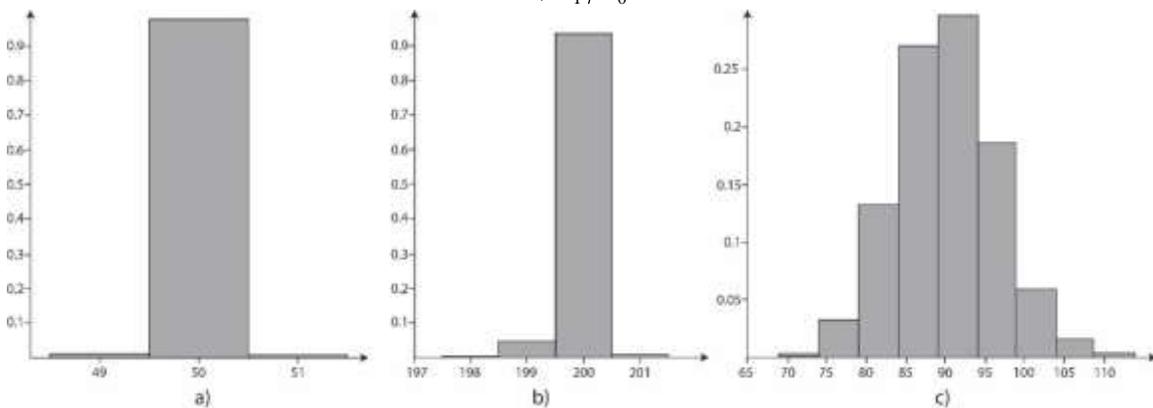
### 3. Анализ эффективности предлагаемого метода

Эффективность предлагаемого алгоритма проанализирована на тестовых данных с целью оценки статистических характеристик возможных ошибочных решений. Размер тестовой строки составил  $1 \times 400$  элементов, при этом в ней генерировались случайным образом размер окна неоднородности

$\delta$ , координата начала окна неоднородности  $d$  и ее глубина  $\sigma_1^2/\sigma_0^2$  (относительная дисперсия). Далее была выполнена серия экспериментов ( $N=5000$ ), в ходе которых подсчитывалась математическое ожидание и дисперсия величин  $\delta$  и  $d$  при различных энергетических соотношениях сигналов от различающихся областей поверхности. Результаты представлены на рисунках 4-5 и в таблицах 1-3.



**Рисунок 4.** Гистограммы величины оценок: а) начального индекса; б) размера участка окна неоднородности; в) отношения дисперсии. Истинные величины параметров следующие:  $d=50$ ,  $\delta=200$ ,  $\sigma_1^2/\sigma_0^2 = 10$ .



**Рисунок 5.** Гистограмма величины оценок: а) начального индекса; б) размера участка окна неоднородности; в) отношения дисперсии. Истинные значения параметров следующие:  $d=50$ ,  $\delta=200$ ,  $\sigma_1^2/\sigma_0^2 = 90$ .

**Таблица 1.** Математическое ожидание и дисперсия параметров окна неоднородности  $d$  и  $\delta$  при различных отношениях дисперсий  $\sigma_1^2/\sigma_0^2$ . Истинные значения величин  $d=50$ ,  $\delta=100$ .

$\sigma_1^2/\sigma_0^2$	5	10	25	50	75	100
$\bar{d}$	49,9	49,6	50,1	50,0	50,0	50,0
$\sigma(d)$	1,33	0,50	0,40	0,22	0,14	0,10
$\bar{\delta}$	99,7	99,8	99,8	100,0	100,0	100,0
$\sigma(\delta)$	2,10	0,84	0,46	0,28	0,20	0,10
$\sigma_1^2/\sigma_0^2$	5,03	10,25	25,06	50,01	75,75	99,43
$\sigma(\sigma_1^2/\sigma_0^2)$	0,49	0,97	2,55	5,15	7,41	9,68

**Таблица 2.** Математическое ожидание и дисперсия параметров окна неоднородности при различных значениях размера окна неоднородности  $\delta$ . Истинные значения  $d=10$ ,  $\sigma_1^2/\sigma_0^2 = 50$ .

$\delta$	5	10	50	100	150	200	250	300
$\bar{d}$	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\sigma(d)$	0,30	0,24	0,20	0,20	0,17	0,14	0,10	0,00
$\bar{\delta}$	5,0	10,0	50,0	100,0	150,0	200,0	250,0	300,0
$\sigma(\delta)$	0,55	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,35	0,36
$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$	50,07	49,47	50,39	50,02	50,62	50,64	49,91	50,20
$\sigma(\sigma_1^2/\sigma_0^2)$	22,39	13,35	6,90	4,85	3,92	3,16	3,22	2,68

**Таблица 3.** Математическое ожидание и дисперсия параметров окна неоднородности при различных значениях начального индекса  $d$ . Истинные значения величин  $\delta=100$ ,  $\sigma_1^2/\sigma_0^2 = 50$ .

$d$	1	10	50	100	150	200	250	300
$\bar{d}$	1,0	10,0	50,0	100,0	150,0	200,0	250,0	300,0
$\sigma(d)$	0,21	0,20	0,22	0,22	0,17	0,17	0,20	0,14
$\bar{\delta}$	100,1	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0
$\sigma(\delta)$	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,31
$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$	50,48	50,46	49,98	50,77	49,52	50,26	49,86	49,81
$\sigma(\sigma_1^2/\sigma_0^2)$	4,89	4,87	5,22	5,06	5,02	5,27	4,54	4,81

#### 4. Результаты

По мере приближения отношения дисперсий к минимуму точность оценки уменьшается. С увеличением размера окна неоднородности разброс точность измерений увеличивается, что вызвано увеличением числа отсчётов от участка неоднородности. Выбор начальной позиции окна неоднородности практически не влияет на характеристики искомых величин, за исключением незначительного уменьшения в сторону роста индекса, что связано с увеличением числа суммируемых отсчётов и соответствующим повышением достоверности формируемой статистики. На практике отношение ЭПР реальных объектов на местности, как правило, оказывается достаточно небольшими. Так, отношение дисперсий при наблюдении пахотных земель на фоне лесной растительности составляет 20, пахотных земель на фоне луговой растительности – уже 16, луговой растительности на фоне лесной – 8 [3]. Поэтому для своевременного обнаружения малых изменений наблюдаемой поверхности, например, присутствия несанкционированных вырубок, либо всходов посевов сельскохозяйственных культур необходимо иметь возможность многократного оценивания изменений ЭПР. В этом случае применение одиночного радиолокационного наблюдения может оказаться недостаточным, и для повышения точности классификации целесообразно использовать комплексирование данных несколькими средствами наблюдения [7].

#### 5. Заключение

Рассмотрена методика получения алгоритма обнаружения малых изменений отражающих свойств поверхности и приведены результаты анализа эффективности названного алгоритма, заключающиеся в оценке точности измерения положения аномальной области и её размеров в одном канале дальности типового радиолокационного изображения однородной подстилающей

поверхности, содержащей аномальный участок – участок с отличающимися отражающими свойствами.

## 6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-29-09022\19.

## 7. Литература

- [1] Коберниченко, В.Г. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии / В.Г. Коберниченко, А.В. Сосновский // Труды СПИИРАН. – 2013. – Т. 5, № 28. – С. 194-208.
- [2] Boori, M.S. Comparison of hyperspectral and multi-spectral imagery to building a spectral library and land cover classification performance / M.S. Boori, R. Paringer, K. Choudhary, A. Kupriyanov // Computer Optics. – 2018. – Vol. 42(6). – P. 1035-1045. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1035-1045.
- [3] Вапник, В.Н. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения) / В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис – М.: Наука, 1974. – 616 с.
- [4] Горелик, А.Л. Методы распознавания / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин – М.: Высшая школа, 1984. – 208 с.
- [5] Большаков, И.А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума / И.А. Большаков – М.: Советское радио, 1969. – 464 с.
- [6] Бакут, П.А. Сегментация изображений: методы выделения границ областей / П.А. Бакут, Г.С. Колмогоров // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 10. – С. 25-47.
- [7] Dorosinsky, L.G. The investigation of change detection algorithms for radar images using the multi-position space monitoring system / L.G. Dorosinsky, N.S. Vinogradova // Ural Radio Engineering Journal. – 2019. – Vol. 3(2). – P. 132-156.
- [8] Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции / Г. Ван Трис – М.: Советское радио, 1971. – Т. 1. – 344 с.
- [9] Skolnik, I. Radar handbook / I. Skolnik, I. Merrill. – New York: MC-Grow-Hill, 1990. – Vol. 1. – 456 p.

# Research of algorithms for detecting small changes over the data of a radar image of the Earth from space

L.G. Dorosinskii<sup>1</sup>, N.S. Vinogradova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, Mira street 19, Ekaterinburg, Russia, 620002

**Abstract.** When solving various problems of space monitoring, the problem arises of determining the presence or absence of small changes in the state of the reflecting surface during the observation session, as well as determining the characteristics of these changes, such as the position, size and average power values of the reflected signals. The article is devoted to the development of a method designed to detect such changes, as well as the study of the effectiveness of this method based on estimates of measurement errors. Concrete recommendations are given for the implementation of these method based on data on real scattering cross-section of the region.