

Моделирование и обработка радиолокационных изображений

Н.А. Андриянов^{1,2}, Д.А. Андриянов²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина», Вокзальная 2а, к.1, Фрязино, Россия, 141190

²Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

Аннотация. Статья посвящена методу имитации радиолокационных изображений на основе гармонического анализа. Рассматриваются возможности формирования малоразмерных и распределенных объектов в координатах наклонной и путевой дальности. Более того, для ряда эталонных объектов реализован и исследован алгоритм обнаружения по критерию Неймана-Пирсона и предложен алгоритм распознавания эталонных целей.

1. Введение

Обработка данных дистанционного зондирования Земли в наши дни представляет особый интерес. При этом такие данные, как правило, представлены многомерными массивами информации. Широкое распространение получили методы обработки спутниковых изображений на базе математических моделей случайных полей (СП) [1-4]. Действительно, в ходе такой обработки решается ряд прикладных задач. В частности, работа [1] посвящена методам фильтрации и восстановления спутниковых изображений на основе дважды стохастических моделей. Работа [2] описывает метод сегментации изображений, который в сочетании с другими алгоритмами сегментации позволяет улучшить качество сегментации. Широкое исследование методов обработки спутниковых снимков с помощью дважды стохастических моделей представлено в [3]. Помимо дважды стохастических моделей, для описания и обработки изображений были предложены модели на базе авторегрессий с кратными корнями характеристических уравнений [4].

Тем не менее, в основном в литературе по обработке изображений речь идёт об обработке двумерных полей яркости в градациях серого цвета или двумерных полей яркости в нескольких цветных каналах. При этом имеются в виду оптические изображения. Однако, несмотря на широкое распространение, таким снимкам свойственны некоторые недостатки. Одним из них является зависимость работы регистраторов от погодных условий. Нередко на изображениях могут встречаться облака и другие мешающие природные факторы. Чтобы вне зависимости от погодных условий, вести регистрацию земной поверхности, могут применяться радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), результатом работы которых являются радиолокационные изображения (РЛИ) [5-8]. По большому счету, такие изображения также представляют собой двумерный массив элементов яркости, однако интерес представляет метод их формирования. В настоящей работе рассмотрим пример моделирования РЛИ и

объектов на них. Также рассмотрим характеристики обнаружения малоразмерных точечных объектов.

2. Радиолокационные станции с синтезированной апертурой

Качество получаемых с помощью РЛС изображений характеризуется их разрешающей способностью. Для определения линейной разрешающей способности по азимуту можно воспользоваться выражением

$$\delta x = \theta_A r = r \lambda / d_A, \quad (1)$$

где θ_A – ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости, r – наклонная дальность, λ – длина волны, d_A – горизонтальный размер апертуры антенны.

Разрешающие способности по наклонной дальности δr и по горизонтальной дальности δy определяются соответственно длительностью зондирующего импульса τ_u и углом визирования (наблюдения) γ

$$\delta r = \frac{c \tau_u}{2}, \delta y = \delta r \sec \gamma, \quad (2)$$

где c – скорость света.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что добиться улучшения разрешающей способности можно увеличивая размер апертуры антенны и уменьшая длительность зондирующих импульсов. Однако во втором случае снижается энергия зондирующего сигнала, а вместе с ней и дальность наблюдения. Горизонтальный размер антенны ограничивается размерами самолёта, с которого выполняется зондирование. Поэтому параметр d_A искусственно увеличивают, синтезируя изображение на пути следования самолёта. А такие системы получили название радиолокационных станций с синтезированной апертурой.

3. Математическая модель процесса формирования РЛИ

Для адекватного моделирования процесса формирования РЛИ необходимо смоделировать ряд процессов и факторов, важных для формирования такого изображения. В [6] предложено использовать следующие модели:

1) Модель отражения (рассеяния) электромагнитной волны (ЭМВ) земной (морской) поверхностью и объектами. Пусть такая модель описывается оператором L_{pp} .

2) Модель формирования радиолокационного сигнала, включающая 2 процедуры: преобразование рассеянного наблюдаемой поверхностью электромагнитного поля (ЭМП), описывающуюся оператором зондирования L_s , и процедуру развертки ЭМП, имеющего двухмерные координаты, в одномерный радиолокационный сигнал. Последняя процедура описывается оператором пространственно-временного сканирования L_{nvc} .

3) Модель шумов и мешающих факторов, для описания которой используется оператор искажений L_u .

4) Модель обработки комплексной огибающей сигнала и формирования РЛИ, которая также как модель формирования радиолокационного сигнала представлена двумя процедурами: непосредственно процедурой обработки и процедурой преобразования радиолокационного сигнала в изображение. Первая описывается оператором обработки $L_{обp}$, вторая – оператором, обратным оператору пространственно-временного сканирования L_{nvc}^{-1} .

Таким образом, согласно [6], для описания математической модели РЛИ используется 6 операторов и функция радиолокационного рельефа (ФРР)

$$\dot{e}(r, x) = e(r, x) \exp[j\psi(r, x)], \quad (3)$$

где $e(r, x)$ и $\psi(r, x)$ – амплитудная и фазовая характеристики рассеянного ЭМП.

На рисунке 1 представлено РЛИ точечного объекта.



Рисунок 1. РЛИ точечного объекта.

Следует отметить, что на изображении четко видна не только сама точка, но и область по соседству.

4. Моделирование РЛИ методом гармонического анализа

Пусть траекторный сигнал $\dot{s}(m, n)$ – сигнал, отраженный вдоль m -й полосы дальности. Тогда он представляет собой сумму сигналов от элементарных отражателей $\dot{s}_i(m, n)$. Переходя к непрерывному времени, получаем

$$\dot{s}_{mi}(t) = U_i G(t - t_i) \exp\{-j[\alpha(t - t_i)^2 - \varphi_{0i}]\} = U_i G(t - t_i) \exp(-j\alpha t^2) \exp[j(\omega_{0i}t + \varphi_i)], \quad (4)$$

где $U_i G(t - t_i)$ – огибающая сигнала, определяемая формой диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости,

$$\alpha = \frac{2\pi V_n^2}{\lambda r_0}, r_m \leq r_0 < r_m + \Delta r,$$

$\omega_{0i} = \frac{4\pi V_n^2 t_i}{\lambda r_0} = \frac{4\pi V_n x_i}{\lambda r_0}$ – круговая доплеровская частота в центре наблюдаемого от i -го точечного объекта сигнала ($t = 0$), $x_i = V_n t$, $\varphi_i = \varphi_{0i} - 2\pi V_n^2 t_i^2 / \lambda r_0 = \text{const } V_n$ – путевая скорость самолёта.

Опорная функция сигнала (4) запишется в виде

$$\dot{h}_{m0}(t) = H(t) \exp(j\alpha t^2), \quad (5)$$

где $H(t)$ – огибающая опорной функции на интервале синтезирования.

Метод получил название «гармонический анализ», поскольку умножение сигналов (4) на опорную функцию (5) соответствует их линейно-частотной (ЛЧМ) демодуляции и для их выделения из смеси с шумами $\dot{\xi}_{mi}(t)$ применяется гармонический анализ. Таким образом, совокупность откликов на точечные отражатели можно получить для m -й полосы, взяв преобразование Фурье от произведения (4) и (5).

Возвращаясь к дискретному времени, для представления строки сигнала РЛИ нужно взять модуль дискретного преобразования Фурье (ДПФ)

$$\hat{e}(m, k) = \left| \sum_{n=0}^{N_c-1} \dot{\xi}(m, n) \dot{h}_0(m, n) \exp(-j2\pi nk / N_c) \right|, \quad (6)$$

где $m = 0, 1, \dots, N_r - 1$; $k = 0, 1, \dots, N_c - 1$, N_r и N_c – размеры РЛИ.

На рисунке 2а и рисунке 2б показаны примеры формирования с помощью метода гармонического анализа точечного малоразмерного объекта (а) и протяженного распределенного объекта (б) на РЛИ с параметрами: $\lambda = 10^{-2} \text{ м}$, $V_n = 200 \text{ м/с}$, $\tau_u = 10^{-7} \text{ с}$ и отношении сигнал/шум (сигнал/фон) $q = 10$.

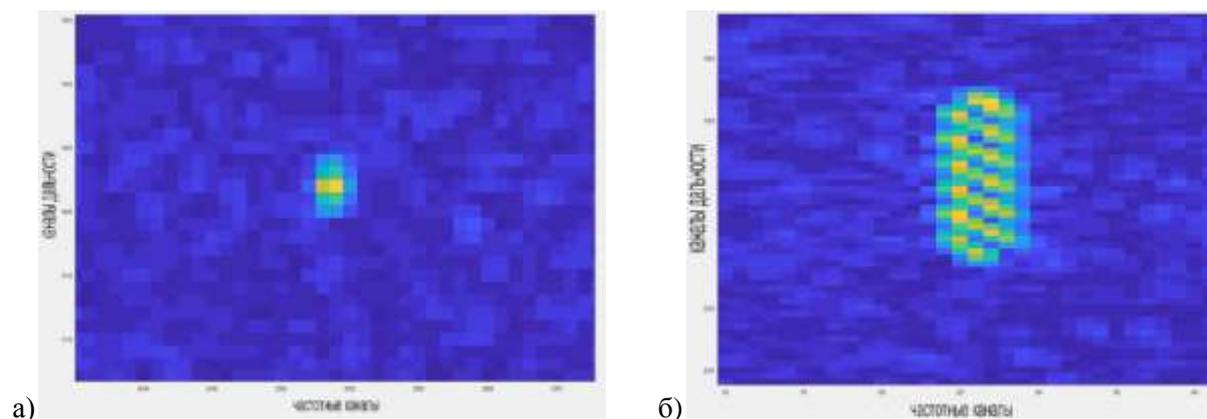


Рисунок 2. Имитация точечного (а) и протяженного (б) объекта на РЛИ.

Анализ рисунка 2 показывает, что и при предложенном методе моделирования точечный объект на РЛИ представлен несколькими точками. Это связано с моделью формирования такого изображения, одним из этапов реализации которой является применение ДПФ.

5. Обнаружение и распознавание объектов на РЛИ

На вход обнаружителя попадает смесь сигналов от объекта (если он присутствует, в противном случае его можно принять равным нулю) и фона с шумами

$$\dot{\xi}(m, k) = \dot{s}_o(m, k) + \dot{s}_o(m, k) + \dot{n}(m, k). \quad (8)$$

Для обнаружения в этом случае также можно использовать классическое сравнение отношения правдоподобия с порогом h , найденным из критерия Неймана-Пирсона, обеспечивающего заданную вероятность ложной тревоги

$$l[\dot{\xi}(r, x)] = \begin{cases} p_1(\dot{\xi}) \geq h \rightarrow H_1 \\ p_0(\dot{\xi}) < h \rightarrow H_0 \end{cases}. \quad (9)$$

Здесь H_1 – гипотеза о наличии сигнала от объекта, H_0 – гипотеза об отсутствии сигнала от объекта. Выражение (9) может быть использовано в случае полной априорной определенности. В случае использования неопределенных параметров отношение правдоподобия определяется с точностью до конечных совокупностей λ_1 и λ_0 неопределенных параметров. Тогда перепишем (9) в виде

$$l[\dot{\xi} / \lambda_0, \lambda_1] = \begin{cases} p_1(\dot{\xi} / \lambda_1) \geq h \rightarrow H_1 \\ p_0(\dot{\xi} / \lambda_0) < h \rightarrow H_0 \end{cases}, \quad (10)$$

где λ_0 и λ_1 – множество информационных и неинформационных неизвестных параметров распределений $p_0(\dot{\xi})$ и $p_1(\dot{\xi})$ при гипотезах H_0 и H_1 .

Функции правдоподобия в (10) можно найти при известных параметрах шума наблюдения

$$\begin{aligned} p_1[\dot{\xi}(m, k / \lambda_1)] &= k_n \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \sum_{m=0}^{N_r-1} \sum_{k=0}^{N_c-1} |\dot{\xi}(m, k / \lambda_1) - \dot{s}_o - \dot{s}_\phi(r, x)|^2 \right\}, \\ p_0[\dot{\xi}(m, k / \lambda_0)] &= k_n \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \sum_{m=0}^{N_r-1} \sum_{k=0}^{N_c-1} |\dot{\xi}(m, k / \lambda_0) - \dot{s}_\phi(r, x)|^2 \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где k_n – нормирующий множитель, N_0 – спектральная плотность шума наблюдения.

На рисунках 3–5 показаны характеристики обнаружения. Рисунок 3 представляет зависимость правильного обнаружения от отношения уровня сигнала к уровню фона при различном числе накапливаемых кадров, рисунок 4 показывает зависимость вероятности правильного обнаружения от числа накапливаемых кадров, рисунок 5 – зависимость

вероятности правильного обнаружения от значения порога. При этом вероятность ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-3}$.

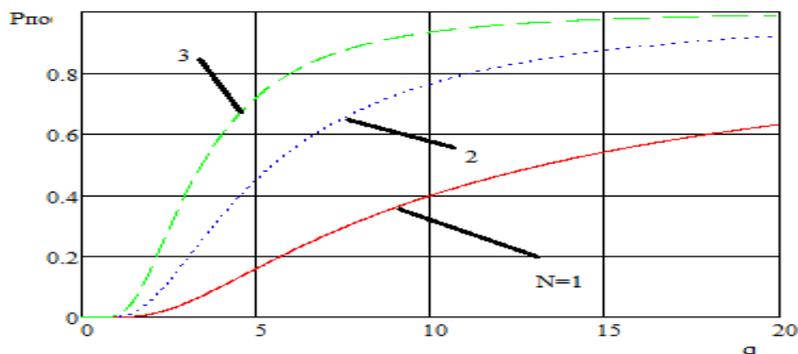


Рисунок 3. Эффективность обнаружения в зависимости от отношения сигнал/шум.

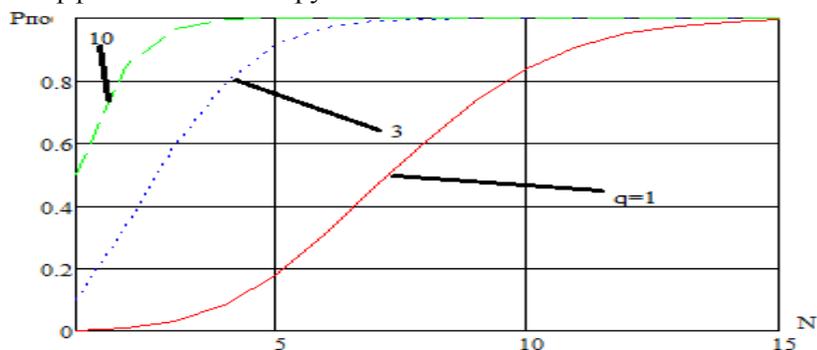


Рисунок 4. Эффективность обнаружения в зависимости от числа накапливаемых кадров.

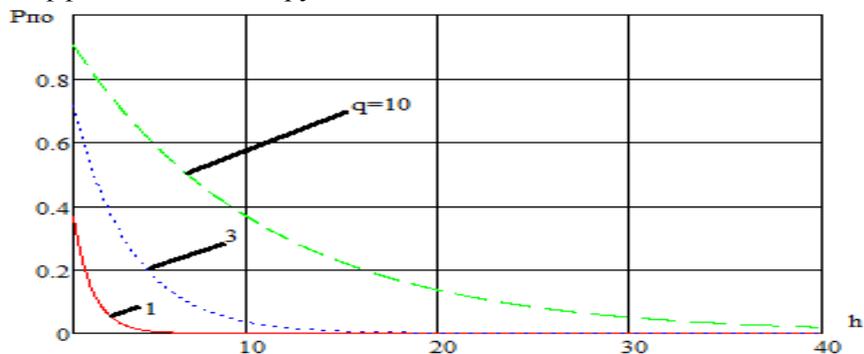


Рисунок 5. Эффективность обнаружения в зависимости от порога.

Анализ кривых на графиках рисунков 3–5 показывает, что лучшие характеристики обнаружения обеспечиваются в условиях накопления нескольких информационных кадров, а при $N=5$, если $q>1$, достигаются хорошие показатели обнаружения. Также видно, что для малых q следует аккуратно выбирать порог, поскольку с его увеличением резко падает эффективность обнаружения.

Наконец, на основе обнаружения в дальнейшем можно проводить различение объектов. Для этого в найденной области считается корреляция с известным эталоном и выбирается тот объект, для которого она составила наибольшее значение

$$R_i = \sum_{m=0}^{N_r-1} \sum_{k=0}^{N_c-1} (\hat{\xi}(m, k) - \hat{s}_\phi) \hat{s}_{oi}. \quad (12)$$

Таким образом, рассмотрены характеристики обнаружения малоразмерных объектов на РЛИ и предложен алгоритм их различения.

6. Заключение

В статье рассмотрены основные особенности формирования РЛИ и принцип действия РЛС типа РСА. Показано, как можно формировать РЛИ с использованием метода гармонического анализа. Кроме того, получены характеристики эффективности обнаружения малоразмерных объектов. Выявлено, что при вероятности ложной тревоги 10^{-3} хороших показателей обнаружения ($P_{no} > 0.9$) можно добиться при накоплении не менее 3 кадров РЛИ и отношении уровня сигнала к уровню фона не менее 10.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ, Проект № 19-29-09048.

8. Литература

- [1] Vasiliev, K.K. Filtration and restoration of satellite images using doubly stochastic random fields / K.K. Vasiliev, V.E. Dementiev, N.A. Andriyanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1814. – P. 10-20
- [2] Andriyanov, N.A. Application of mixed models of random fields for the segmentation of satellite images / N.A. Andriyanov, V.E. Dement'ev // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2210. – P. 219-226.
- [3] Vasiliev, K. Representation and processing of multispectral satellite images and sequences / K. Vasiliev, V. Dementiev, N. Andriyanov // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 126. – P. 49-58. DOI: doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.208.
- [4] Andriyanov, N.A. Optimal filtering of multidimensional random fields generated by autoregressions with multiple roots of characteristic equations / N.A. Andriyanov, K.K. Vasiliev // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2391. – P. 72-78. DOI: 10.18287/1613-0073-2019-2391-72-78.
- [5] Кондратенков, Г.С. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов. Радиовидение / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов – М.: "Радиотехника", 2005. – 368 с.
- [6] Школьный, Л.А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского – М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
- [7] Доросинский, Л.Г. Оптимальная обработка радиолокационных изображений, формируемых в РСА: монография – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 212 с.
- [8] Коберниченко, В.Г. Обработка радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли: лаборатор. практикум / В.Г. Коберниченко, О.Ю. Иванов, А.В. Сосновский // М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 64 с.

Modeling and processing of SAR images

N.A. Andriyanov^{1,2}, D.A. Andriyanov²

¹JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Vokzalnaya street 2a, b.1, Fryazino, Russia, 141190

²Ulyanovsk State Technical University, Severny Venets street 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

Abstract. The article is devoted to the method of simulating radar images based on harmonic analysis. The possibilities of forming small and distributed objects in the coordinates of inclined and track ranges are considered. Moreover, for a number of reference objects, a detection algorithm based on the Neyman-Pearson criterion was implemented and investigated, and an algorithm for recognizing reference targets was proposed.