

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОНТУРНОЙ МОДЕЛИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

*Б.В. Лежанкин, А.Н. Малов, Н.П. Малисов, И.И. Ушаков*

*Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище (Военный институт)*

Представлены результаты исследования статистических характеристик радиолокационного изображения и математическая модель процесса формирования отсчетов яркости применительно к задачам цифровой обработки изображений. Методом имитационного моделирования проведено исследование возможности использования свойств разрывности и однородности при формировании РЛИ. Полученные характеристики свидетельствуют о возможности использования предлагаемой модели в задачах цифровой обработки изображений.

### 1. Введение

В настоящее время радиолокационная станция (РЛС) в режиме синтезирования апертуры антенны позволяют получать радиолокационные изображения (РЛИ) земной поверхности и находящихся на ней объектов независимо от метеорологических условий и уровня естественной освещенности местности. При этом наблюдаемый участок может располагаться на большом удалении от носителя РЛС и иметь значительные размеры. Кроме этого современные методы повышения разрешающей способности таких РЛС обеспечивают детальность радиолокационного изображения земной поверхности, сравнимую с аэрофотоснимками. Это, в свою очередь, открыло широкие возможности использование РЛС для решения военных и народнохозяйственных задач, например, съемка в СВЧ диапазоне, используемая в военных целях для обнаружения объектов с хорошими отражающими свойствами, например боевой техники или движущихся войск.

С повышением разрешающей способности системы, а также ширины полосы обзора увеличивается объем потока данных, получаемых с помощью РЛС. Невозможность обработки такого потока данных на борту носителя РЛС требует поиска возможностей его передачи на наземный пункт обработки, обладающего большими вычислительными и людскими ресурсами. Проведенный анализ возможностей передачи данных РЛС – радиолокационного изображения [1] позволяет сделать вывод о невозможности передачи такого массива данных в реальном времени по радиоканалу с борта носителя РЛС. Очевидной становится задача сокращения объема РЛИ для передачи по радиоканалу для дальнейшего дешифрирования. При решении данной задачи необходимо использовать алгоритмы цифровой обработки изображений, корректность использования которых необходимо продемонстрировать, зная статистические характеристики РЛИ.

Цель данной работы – построение математической модели РЛИ и алгоритмов его цифровой обработки на основе базовых свойств сигнала яркости - разрывности и однородности [2] и с учетом построчного сканирования.

### 2. Статистические характеристики РЛИ

РЛИ представляет собой – совокупность сигналов и шумов различной физической природы, которые можно разделить на три группы:

- сигналы от объектов, представляющие собой узкие выбросы (группы выбросов) большой амплитуды;
- сигналы средней амплитуды, обусловленные отражением от фона местности, имеющие вид равномерного шумового процесса, средняя мощность которого определяется типом местности;
- внутренний шум приемника и системы обработки, имеющий вид равномерного шумового фона малой интенсивности.

В цифровом виде РЛИ определяется как двумерная функция  $f(x, y)$ , где  $x$  и  $y$  – координаты в пространстве (конкретно, на плоскости), и значение  $f$  которой в любой точке, задаваемая парой координат  $(x, y)$ , называется интенсивностью или уровнем «серого». Заметим что, РЛИ в цифровом виде состоит из конечного числа элементов, каждый из которых расположен в конкретном месте и принимает определенное значение. Эти элементы называются элементами РЛИ или пикселями. У каждого элемента РЛИ имеются четыре соседа по вертикали и горизонтали. Т.е. РЛИ можно представить как двумерное случайное поле последовательности отсчетов, отсчетов яркости пикселей, каждый из которых представляет собой случайную величину. РЛИ отражает распределение интенсивностей отраженной энергии микроволнового диапазона, от земной поверхности, принятую антенной РЛС. Основной характеристикой РЛИ для цифровой обработки изображений является корреляционная функция. С помощью функции корреляции изображения можно определить, на каком расстоянии между пикселями статистическая зависимость значений яркости в среднем ослабевает. Для определения вида связи между элементами находятся функции корреляции по вертикали, горизонтали и диагонали. Объектом исследования было выбрано РЛИ участка местности с объектами, полученное РЛС в режиме синтезирования апертуры антенны установленной на искусственном спутнике «Алмаз-М» (рис. 1). На рисунке показано РЛИ, где выделены области расчета корреляционной функции, по строке, столбцу, диагонали: вода – 1; суша – 2; объект – 3.

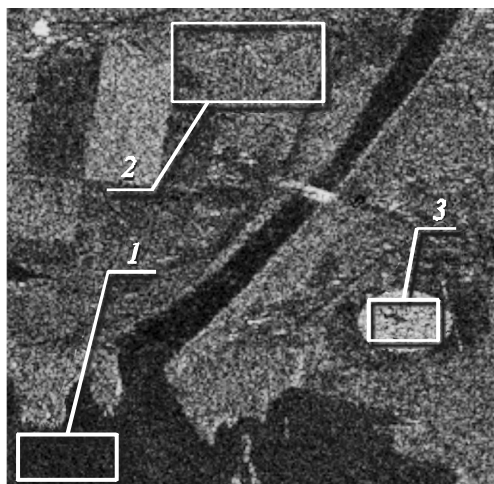


Рис.1. РЛИ участка местности.

Вид корреляционной функции представлен на рисунках 2, 3, 4.

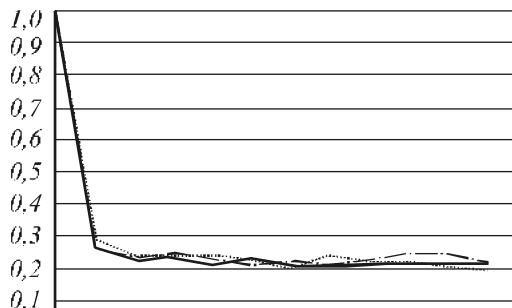


Рис.2. Корреляционная функция водной поверхности (объект 1).

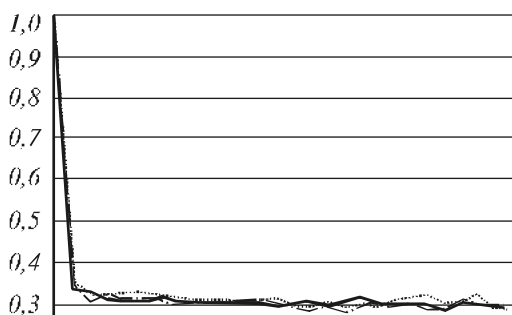


Рис.3. Корреляционная функция водной поверхности (объект 2).

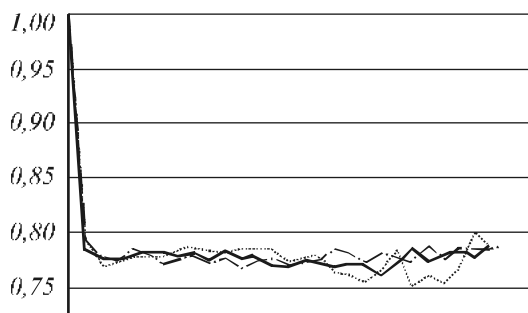


Рис.4. Корреляционная функция водной поверхности (объект 3).

Из графиков видно, что значения функций корреляции для столбцов, строк и диагоналей практически одинаковы, разница возникает между выделенными областями, чем однородней область, тем больше функция корреляции, т.е. статическая зависимость значений яркости, увеличивается. Для всех когерентных РЛС характерна слабая связь между элементами, что связано с зернистостью изображения (так называемая спекл-структура). Вид корреляционных связей не зависит от направления на изображении, и не зависит от типа подстилающей поверхности. Поэтому является справедливым описание радиолокационного изображения вероятностной моделью, состоящей из совокупности однородных областей.

### 3. Вероятностная модель описания РЛИ

Традиционный подход к описанию изображения, используемый в задачах сегментации, распознавания, анализа сцен и ряде других задач, основывается на представлении изображения как совокупности некоторого множества связанных областей, каждая из которых обладает какими-то свойствами, отличающими ее от соседних областей; при этом контурами называются границы между областями [3]. В дальнейшем не будем касаться свойств самих областей, а остановимся на рассмотрении контуров. В связи с этим для упрощения терминологии везде под словом “изображение” будем понимать контурное изображение, представляющее собой двумерный бинарный сигнал  $x(u,v)$ , принимающий значение 1 в контурных и 0 в остальных точках.

Возможность описания произвольного контурного рисунка (контурного препарата, полученного обработкой реального изображения) отрезками прямых линий сводится к приближению кривой линии последовательностью линейных сегментов. Для этого на кривой следует отметить точки высокой кривизны, которые затем соединить прямыми линиями.

Вероятностная модель контурного изображения описывает изображения со следующими свойствами:

- изображение состоит из прямых линий, которые могут иметь произвольные направления, но не могут иметь обрывов (т. е. каждая линия должна начинаться и заканчиваться либо соединением с какими-то другими линиями, либо на границах изображения);
- изображение является однородным и изотропным, т. е. его статистические свойства не зависят от выбранной точки или направления;
- статистические свойства изображения определяются конечным числом параметров.

Рассматривая всевозможные соединения линий, становятся очевидными следующие базовые конфигурации, показанные на рис.5. Будем называть точку изображения, в которой происходит излом (2—5) или стык нескольких линий (6—9), узловой точкой (узлом).

Назовем узлы, в которых соединяются две, три или четыре линии, узлами Z, Y и X соответственно. В принципе на изображении можно допустить и более сложные узлы, в которых сходятся пять или большее число линий, однако можно считать, что вероятности таких узлов ничтожно малы (или что их можно представить как объединения нескольких близко расположенных узлов типа Y или X), а поэтому ограничимся представленными конфигурациями.

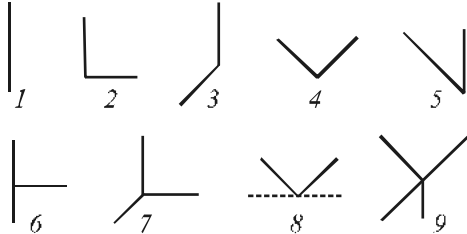


Рис.5. Конфигурация узловых точек

1 – линия без излома; 2 – 5 – изломы; 2, 3 – узел Z; 4 – узел Y; 5 – узел X; 6 – узел Y; 7 – узел Z; 8 – узел S; 9 – узел X.

Используя другой подход, изображение можно рассматривать как совокупность множества узловых точек на плоскости и соединяющих их прямых линий, возможные варианты проведения которых определяются набором условных вероятностей узлов. Прямую, проходящую от одного узла до другого, назовем линией изображения (в дальнейшем просто «линия»).

Несмотря на изотропность изображения, описание его статистических свойств, тем не менее, связано с выбранным направлением. Покажем это. Представим себе, что на плоскости уже имеется некоторая реализация изображения, удовлетворяющая заданным свойствам. Пусть  $r_l(x)$  – распределение вероятностей длин линий; в силу изотропности оно одинаково для всех направлений  $\alpha$ , т. е.  $r_l(x, \alpha) = r_l(x)$ . В этом случае можно говорить о средней длине линии  $l$ . Проведем через изображение под произвольным углом прямую, называемую секущей. Очевидно, вероятность пересечения секущей и произвольной линии изображения пропорциональна  $l \cdot \cos \alpha$ , где  $l$  — длина линии, а  $\alpha$  — угол между линией и перпендикуляром к секущей. Тогда плотность распределения вероятностей углов между линиями, пересекаемыми секущей, и перпендикуляром к ней будет равна

$$p_\alpha(x) = \cos \alpha, \quad -\pi/2 < \alpha \leq \pi/2, \quad (1)$$

т. е. данное распределение вероятностей уже не имеет круговой симметрии.

Полагаем, что дискретизация осуществляется на квадратной решетке размером  $M \times N$ , в узлах которой находятся элементы изображения  $X$ :  $x_{mn} \in \{0, 1\}, 0 \leq m < M, 0 \leq n < N$ .

В действительности же способ дискретизации совершенно не существен и выбор квадратной решетки обусловлен лишь соображениями удобства и

традиции; с тем же успехом можно было бы рассматривать дискретизацию, например, на гексагональной решетке (в некоторых ситуациях это было бы даже удобнее).

Одна из особенностей описания изображения на дискретном растре состоит в том, что узловые точки, равно как и сами линии, могут располагаться между точками растра.

Введем понятие  $\epsilon$ -окрестности ( $\epsilon_{mn}$ ) растровой точки  $(m, n)$  как множества из  $(u, v)$ , окружающего точку  $(m, n)$ . Будем считать: пересечения  $\epsilon$ -окрестностей растровых точек есть множество меры ноль; размеры  $\epsilon$ -окрестностей ограничены:

$$(m - u)^2 + (n - v)^2 \leq \epsilon^2, \quad x(u, v) \in \epsilon_{mn};$$

множество  $\epsilon$ -окрестностей точек дискретного растра является полным на  $(u, v)$ .

Припишем события, происходящие в  $\epsilon_{mn}$ , самой точке  $(m, n)$ . Таким образом, если через  $\epsilon_{mn}$  проходит линия или в  $\epsilon_{mn}$  находится узел, то будем говорить, что линия проходит через точку  $(m, n)$ , или что узел находится в точке  $(m, n)$ .

Для квадратного растра с шагом  $h$  естественной  $\epsilon$ -окрестностью точки  $(m, n)$  становится квадрат, который определяется как совокупность точек  $x(u, v)$ , удовлетворяющих условию

$$m - h/2 \leq u < m + h/2, \quad n - h/2 \leq v < n + h/2.$$

В этом случае наклонная линия отобразится в виде ступенек (горизонтальных и вертикальных сегментов) аналогично вектору, отображаемому на экранах растровых дисплеев.

Чтобы определить статистические свойства модели, рассмотрим процесс генерации изображения. Для определенности положим, что изображение формируется в процессе построчной развертки (каузальная модель [3]), причем строки располагаются горизонтально.

Возьмем прямую линию, заданную на дискретном растре и проходящую под углом наклона  $\alpha$  к вертикали (рис. 6). Естественно полагать, что линия формируется сверху вниз (горизонтальная – слева направо), а значит,  $-\pi/2 < \alpha \leq \pi/2$ . Рассмотрим строку  $m$ , пересекаемую линией. Линия занимает на этой строке горизонтальный отрезок, в несколько элементов, который назовем сегментом. Первый элемент сегмента, имеющий координаты  $(m, n)$ , будем называть корнем сегмента. Пусть  $l$  — длина сегмента.

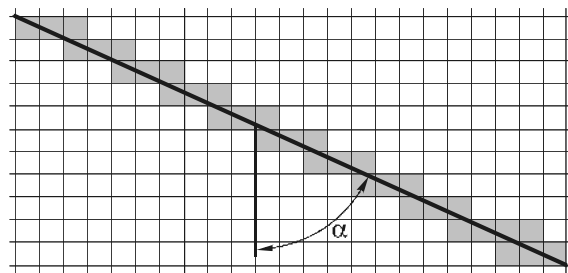


Рис.6. Представление прямой линии, имеющей наклон  $\alpha$  на дискретном растре.

Предполагаем, что линия формируется из сегментов так, как представлено на рис. 3, т. е.

$$P\{l = 1 + [\operatorname{tg}\alpha]\} = 1 - (\operatorname{tg}\alpha - [\operatorname{tg}\alpha]),$$

$$\text{а } P\{l = 2 + [\operatorname{tg}\alpha]\} = \operatorname{tg}\alpha - [\operatorname{tg}\alpha],$$

где  $[x]$  означает целую часть от  $x$ . Очевидно, математическое ожидание длины сегмента произвольной линии равно

$$Ml = 1 + \operatorname{tg}\alpha. \quad (2)$$

Таким образом, точку  $(m, n)$ , являющуюся корнем сегмента, можно рассматривать как источник линии на строке  $m$ , причем здесь перестает быть существенной вся предыстория на строках от 0 до  $m-1$ . На следующей строке корень сегмента данной линии будет находиться в точке  $(m+1, n_1)$ , причем  $M(n_1-n) = \operatorname{tg}\alpha$ . Величину  $\operatorname{tg}\alpha$  назовем смещением. Заметим, что общее число элементов, занимаемых линией из точки  $(m, n)$  в точку  $(m', n')$ , равно

$$N_L = |m'-m| + |n'-n|.$$

Отвлекаясь от стохастичности длин сегментов, можно сделать вывод, что состояние элементов (0 или 1) любой строки изображения полностью задано координатами корней всех проходящих через нее линий,  $n_1, \dots, n_k$  и значениями углов наклона линий  $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ .

С определенной степенью вероятности должно происходить наложение сегментов, означающее пересечение линий на изображении. Следовательно, в точке наложения должен оказаться один из узлов вида  $Y, X$  или  $V$  (см. рис. 2). Перейдем к определению вероятностей этих и некоторых других событий. Будем считать, что вероятность появления корня в каждой точке изображения одинакова и равна  $p$  ( $0 < p < 1$ ), а значение угла  $\alpha_k$  распределено равномерно на  $(-\pi/2, \pi/2)$ . Обозначим  $q = 1 - p$ . Вероятность того, что корень  $k+1$  отстоит от корня  $k$  на расстояние  $x$ , равна  $p \cdot q^x$ . Среднее расстояние между соседними корнями будет равно

$$M(n_{k+1} - n_k) = 1/p.$$

Определим среднюю длину сегмента  $L$  в предположении отсутствия пересечения. Воспользовавшись (1) и (2), найдем

$$L = \int_0^{\pi/2} (1 + \operatorname{tg}\alpha) \cos \alpha \, d\alpha / \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \, d\alpha = 2 \quad (3)$$

Таким образом, средняя длина сегмента является величиной постоянной и не зависит от параметров изображения.

Отсюда легко определяется средний размер свободного промежутка  $\Delta$  между сегментами соседних линий на одной строке:

$$\Delta = M(n_{n-1} - n_k) - L = 1/p - 2. \quad (4)$$

Найдем вероятность пересечения (стыка) пары линий  $p_s$  (узел  $S$  рис.5). Чтобы сегменты пары линий не пересеклись ни в одной точке, корень второго

сегмента, имеющего среднюю длину  $L$ , должен попасть в промежуток средней длины  $\Delta - L + 1$ . Таким образом, вероятность пересечения  $p_s$  равна

$$p_s = 1 - (\Delta - L + 1) / M(n_{k+1} - n_k) = 3p. \quad (5)$$

Событие  $S$ , как было сказано, является объединением следующих трех событий: узла  $Y$ , узла  $X$  и узла  $V$ . Сумма их условных вероятностей равна единице:

$$P(Y|S) + P(X|S) + P(V|S) = 1. \quad (6)$$

Обозначим данные условные вероятности через  $p_Y, p_X, p_V$ . Тогда вероятности того, что в произвольно взятом сегменте должен оказаться соответствующий узел, будут равны

$$P(Y) = p_s p_Y, \quad P(X) = p_s p_X, \quad P(V) = p_s p_V. \quad (7)$$

Рассмотрим узел  $\lambda$ , т.е. ветвление линии на две. Поскольку узел  $\lambda$  является симметричным по отношению к узлу  $Y$ , то, очевидно, их вероятности должны быть взаимосвязаны. Рассмотрим две соседние строки изображения ( $m$  и  $m+1$ ). Пусть на строке  $m$  имеется  $N_1$  линий, причем с вероятностью  $\beta$  одна из линий сливается с другой (узел  $Y$ ), а с вероятностью  $\gamma$  линия ветвится на две (узел  $\lambda$ ). Тогда на строке  $m+1$  число линий  $N_2 = N_1(1 - \beta - \gamma) + N_1\beta/2 + 2N_1\gamma$ . Приравнявая в силу однородности  $N_1 = N_2$ , получим  $\gamma = \beta/2$ . Здесь  $\beta$  есть вероятность слияния линии, и она равна  $p_s p_Y$ . Тогда вероятность ветвления линии равна  $p_s p_Y/2$ . Считая ветвление равновероятным в любой точке сегмента, получим вероятность ветвления линии в точке:

$$p_\lambda = p_s p_Y / 2L = \frac{3}{4} p p_Y.$$

Перейдем к узлу  $Z$  и аналогичным ему. Очевидно, что излом есть не что иное, как повернутый на  $90^\circ$  узел  $V$ ; если же его повернуть еще на  $90^\circ$ , то получим узел  $\Lambda$ . В силу изотропности вероятности их появления на изображении должны быть одинаковыми. Чтобы определить соотношения вероятностей, рассмотрим следующую ситуацию. Пусть из некоторой точки исходят две линии под произвольными углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ,  $0 \leq \alpha_1, \alpha_2 < 2\pi$  в общепринятой ориентации. Очевидно, если  $0 \leq \alpha_1, \alpha_2 < \pi$ , то это будет узел  $V$ ; если  $\pi \leq \alpha_1, \alpha_2 < 2\pi$ , то узел  $\Lambda$ , иначе будет узел  $<$  - излом. Легко подсчитать распределение вероятностей между этими тремя событиями:

$$P(V) = P(\Lambda), \quad P(<) = 2P(V). \quad (8)$$

Вероятность  $P(V)$  знаем из (7). В среднем на строке имеется  $NpP(V) = Npp_s p_V$  узлов  $V$ , а значит, и такое же число узлов  $\Lambda$ . Число незанятых элементов строки из (4)  $NpM\Delta = N(1 - Lp)$ . Значит, вероятность появления узла  $\Lambda$  в свободной точке изображения есть

$$P(\Lambda) = Npp_s p_V / (N(1 - Lp)) = 3p^2 p_V / (1 - 2p). \quad (9)$$

Вероятность излома  $p_z$  найдем следующим образом. Используя (7) и (8), очевидно, что вероятность наличия излома в сегменте есть  $2p_s p_v$ . Нормируя на среднюю длину сегмента, получим вероятность излома в произвольной точке линии:

$$p_z = 2p_s p_v / L = 3pp_v.$$

Таким образом, свойства изображения полностью определены тремя параметрами:  $p$  – вероятностью появления корня сегмента в точке и любой парой из трех условных вероятностей в (6), например  $p_v$  – вероятностью слияния и  $p_x$  – вероятностью пересечения пары линий.

Некоторой особенностью является задание линии на границе. В силу формирования изображения сверху вниз необходимо задавать конфигурацию линий лишь на верхней и двух боковых границах, причем на боковых границах генерироваться должна лишь половина линий (так, на левой границе – в диапазоне углов  $0 < \alpha < \pi/2$ ), поскольку другая половина будет на границе заканчиваться. Таким образом, вероятность генерации корня линии в точке составляет величину  $p$  для верхней и  $p/2$  для левой и правой границ. Распределение вероятностей углов наклона линий должно совпадать с (1) для верхней и должно быть повернутым на  $90^\circ$  для левой и правой границ.

В соответствии с описанной моделью была реализована программа-генератор случайных изображений. Некоторые примеры сформированных случайных изображений с различными значениями параметров  $p$ ,  $p_y$  и  $p_x$  представлены на рис. 7.

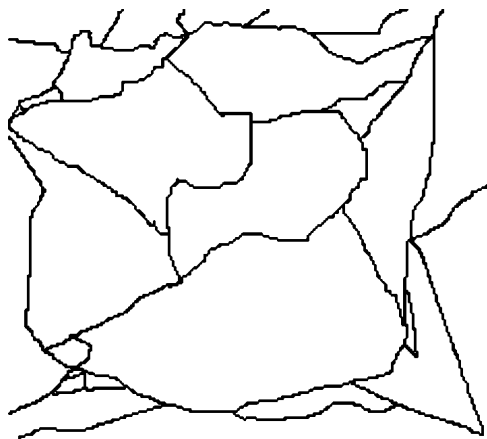


Рис. 7. Пример реализации случайного контурного изображения при значениях параметров:  $p=0,025$ ;  $p_y=0,85$ ;  $p_x=0,15$ .

Анализируя полученные соотношения для вероятностей  $p_s$ ,  $p_x$ ,  $p_z$  и  $P(\Lambda)$ , отметим, что все они естественным образом зависят от вероятности появления корня  $p$ . Данный параметр может рассматриваться поэтому в качестве масштабного коэффициента, или, что то же самое, параметра точности дискретизации. Интересно подметить, что  $L$  не зависит от  $p$  (3), т. е. независимо от дискретизации средняя длина сегмента составляет два элемента. Из (5) или (9) легко видно, что имеются ограничения на вероятность появления корня:  $p < 1/3$ .

#### 4. Заключение

Проведение экспериментов по генерации случайных контурных изображений показывает, что данная вероятностная модель описывает довольно широкий спектр контурных изображений, некоторые из которых по своей структуре напоминают контурные препараты, получаемые обработкой реальных изображений.

Наряду с полученными результатами остается открытым вопрос, насколько хорошо данная модель описывает свойства реальных изображений. Для ответа на него требуется проведение анализа достаточно большого числа реальных изображений, различающихся по своей структуре. Такой анализ должен включать этапы получения контурных препаратов, определения узловых точек, прослеживания контурных линий, оценки значений параметров.

Дальнейшее развитие модели может идти по пути многоуровневого представления заключающегося в следующем. Случайное изображения, сформированное с некоторыми заданными параметрами, содержит целый ряд связанных областей. Рассматривая данные области как самостоятельные, внутри них может быть сформировано изображение с другими статистическими свойствами (значениями параметров). Этот процесс может быть повторен многократно.

#### Литература

1. **Скрыпник О.Н.**, Формирование классификационной карты подстилающей поверхности по изображениям от когерентного лоатора // Скрыпник О.Н., Лежанкин Б.В., Малов А.Н., Миронов Б.М., Галиев С.Ф. Компьютерная оптика, 2006. В. 29. С. 151-159.
2. **Р. Гонсалес**, Цифровая обработка изображений // Р. Гонсалес, Р. Вудс. Москва: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. **П.А. Чочиа**. Вероятностная модель контурного изображения. // Иконика. Цифровая обработка видеoinформации. М.: Наука, 1989. – 128 с.

## PROBABILITIES OF CONTOUR MODELS IN RADAR IMAGES

*B.V. Lezhankin<sup>1</sup>, A.N. Malov<sup>1</sup>, N.P. Malisov<sup>1</sup>, I.I. Ushakov<sup>1</sup>*  
*<sup>1</sup> Irkutsk Higher Air Force Engineering School (Military Institute)*

### **Abstract**

We now present research statistic results in radar images and a mathematical model of brightness setting with regard to digital-image-processing problems. Using a simulation method, we studied opportunities for disconnection and homogeneity in forming radar images. The obtained features indicate applicability of the proposed model in digital image processing.

*Keywords:* radar images, digital-image-processing.

*Citation:* Lezhankin BV, Malov AN, Malisov NP, Ushakov II. Probabilities of contour models in radar images [In Russian]. Computer Optics 2008; 32(1): 96-100.

### **References**

- [1] Skripnik ON, Lezhankin BV, Malov AN, Mironov BM, Galiev SF. Formation of spreading surface classification map on coherent radar images [In Russian]. Computer Optics 2006; 29: 151-159.
- [2] Gonzales R, Woods R. Digital Image Processing [In Russian]. Moscow: "Technosphere" Publisher 2005; 1072 p.
- [3] Chochia PA. Probability model of a contour image [In Russian]. Iconics. Digital processing of video information. Moscow: "Nauka" Publisher 1989; 128 p.