

УДК 621.396

В.Г. Андреев, С.А. Юкин

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ЦИФРОВОЙ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ КАРТЕ

Предложена методика формирования детального радиолокационного изображения поверхности земли на основе цифровой топографической карты местности и параметров бортовой когерентно-импульсной РЛС. Сформированное изображение представляет собой модель доплеровского портрета радиоотражений от подстилающей поверхности, которая используется в процессе обнаружения неподвижных объектов и навигационного обеспечения в условиях маловысотного полета носителя РЛС. Выигрыш в сравнении с классическим методом составляет 7,31 дБ для анализируемой карты.

Введение. Бурное развитие авиации повышает требования к адекватности и своевременности информации об окружающем летательный аппарат (ЛА) пространстве. Необходимая информация предоставляется бортовой цифровой вычислительной машиной (БЦВМ), обеспечивающей высокую вычислительную производительность, которая постоянно наращивается и на текущий момент составляет более 10 миллиардов операций в секунду при реализации модулей цифровой обработки сигналов на базе сигнальных процессоров и ПЛИС. Поэтому на современных БЦВМ возможна обработка больших массивов данных в реальном масштабе времени, что делает актуальной задачу синтеза алгоритмов моделирования радиоотражений от сложных пространственно-распределенных объектов.

Проблема формирования и анализа радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности остается одной из актуальных задач [1–5]. Можно выделить два типа бортовых систем обзора: оптические системы и радиолокационные. Основным недостатком формирования изображения оптическими системами заключается в их высокой чувствительности к погодным условиям и освещенности. Обзор основных подходов к решению задач обнаружения объектов оптическими системами рассмотрен в [1,2].

Среди бортовых источников информации важную роль играют бортовые радиолокационные системы (БРЛС), обладающие высокой степенью инвариантности к погодным, климатическим и временным условиям функционирования.

Вместе с тем БРЛС уступают оптическим системам по детальности изображения. Использование доплеровской фильтрации позволяет обнаруживать и различать подвижные объекты, но при этом не используется информация с выходов доплеровских каналов, соответствующих направлению главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА), ввиду большой мощности пассивной помехи (отражений от подстилающей поверхности). Это не позволяет обнаруживать неподвижные объекты на фоне пассивных помех.

Цель работы – разработка методики формирования детального радиолокационного изображения на основе заранее известной цифровой топографической карты местности для обнаружения неподвижных объектов когерентно-импульсной БРЛС.

Краткий обзор существующих методик. Известны [3–7] методики получения радиолокационных изображений подстилающей поверхности и обнаружения объектов на ее фоне. Однако, не обладая априорной информацией об ожидаемом изображении на индикаторе РЛС, возможно осуществлять обнаружение лишь тех объектов, параметры отражений от которых отличны от фона. При этом аппаратная реализация подобных методов осложнена, т.к. предполагает большое время накопления сигнала или наличие нескольких разнесенных приемных каналов [1]. Поэтому на практике для обнаружения неподвижных объектов используется методика, базирующаяся на сравнении эталонного и получаемого РЛИ [1]. При этом эталонное изображение формируется за-

ранее локационными методами путем создания матрицы ячеек, размеры которых обусловлены отражающей площадкой (сечение ДНА земной поверхностью). Каждой ячейке ставится в соответствие эффективная площадь рассеивания (ЭПР). Формируемая таким образом карта (записываемая в ПЗУ), являясь двумерной матрицей, требует малый объем памяти, но ее использование возможно только на достаточно большой высоте над рельефом, когда допустимо не учитывать изменения геометрии области затенения по мере движения ЛА.

Отметим, что адекватность радиолокационной информации снижается при работе на малых высотах, что обусловлено увеличением отражений по боковым лепесткам ДНА, появлением областей радиолокационных теней и ухудшением условий для навигации. Под радиолокационной тенью понимается отсутствие отражений от тех точек пространства, на которые не попадает энергия зондирования ввиду их экранирования расположенными ближе к РЛС отражающими объектами (складками местности, зданиями и т.п.). Ухудшение адекватности информации особенно актуально в горной местности и при наличии высотных сооружений (вышек, линий электропередач, мостов и т.д.) [10].

Принцип и модель формирования поверхности. Предлагается использовать вместо традиционной в РЛС карты ЭПР цифровую топографическую карту (ЦТК), дополненную коэффициентами отражения, что позволяет оценить ЭПР участка земной поверхности на любой высоте и под любым углом к поверхности [1].

Величина этих коэффициентов оценивается на основе априорно известной информации о составе поверхности или измеряется скатеометрами – специализированными БРЛС, предназначенными для измерения характеристик рассеяния радиоволн различными видами земной поверхности.

Таковыми характеристиками являются диаграммы отражения – зависимости параметров матрицы рассеяния от угла падения облучающей волны или угла визирования РЛС [11].

Используемая ЦТК представляет собой тензор \mathbf{T} , каждый элемент которого – четырехкомпонентный вектор:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} x \\ y \\ z_{0,0} \\ \delta_{0,0} \end{matrix} & \begin{matrix} x+d \\ y \\ z_{0,1} \\ \delta_{0,1} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} x+M d \\ y \\ z_{0,M} \\ \delta_{0,M} \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y+d \\ z_{1,0} \\ \delta_{1,0} \\ \vdots \end{matrix} & \begin{matrix} x+d \\ y+d \\ z_{1,1} \\ \delta_{1,1} \\ \vdots \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} x+M d \\ y+d \\ z_{1,M} \\ \delta_{1,M} \\ \vdots \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y+N d \\ z_{N,0} \\ \delta_{N,0} \end{matrix} & \begin{matrix} x+d \\ y+N d \\ z_{N,1} \\ \delta_{N,1} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} x+M d \\ y+N d \\ z_{N,M} \\ \delta_{N,M} \end{matrix} \end{pmatrix},$$

где d – шаг карты, определяющий ее точность и, следовательно, адекватность модели поверхности. Удобно интерпретировать введенный тензор \mathbf{T} как послойное наложение четырех $(N+1) \times (M+1)$ -мерных матриц: \mathbf{X} , компоненты которой $(x+jd)$, $j=0 \dots M$, определяют координаты на оси OX , устремленной с юга на север; \mathbf{Y} , компоненты которой $(y+kd)$, $k=0 \dots N$, определяют координаты на оси OY , устремленной с запада на восток; \mathbf{Z} , компоненты которой $z_{j,k}$ характеризуют абсолютную высоту точки элемента карты; $\mathbf{\Delta}$ с компонентами $\delta_{j,k}$, соответствующими коэффициентам отражения элементов карты (их удельным ЭПР) [11].

Следует отметить, что с уменьшением d увеличивается плотность заполнения пространства карты. Это делает модель поверхности ближе к реальной, т.е. непрерывной. Вместе с тем дискретный характер цифровой обработки эхо-сигналов и их отображения на экране РЛС в форме двумерной матрицы яркостей в координатах «азимут-дальность» позволяет ограничить требования к модели поверхности заданным разрешением. Однако надо учитывать, что с увеличением d сильнее проявляется эффект взаимопроникновения сегментов модели поверхности, определяющих области теней, что порождает нечеткие границы затенений (см. рисунок 1).

Простой и достаточно адекватный способ математического описания поверхности основывается на триангуляции, при которой каждый элемент поверхности аппроксимируется треугольником, построенным по трем точкам карты. При расчете эталонного РЛИ используется центр треугольника и коэффициент его отражения, усредненный по трем образующим точкам (вершинам). Таким образом, РЛИ формируется как

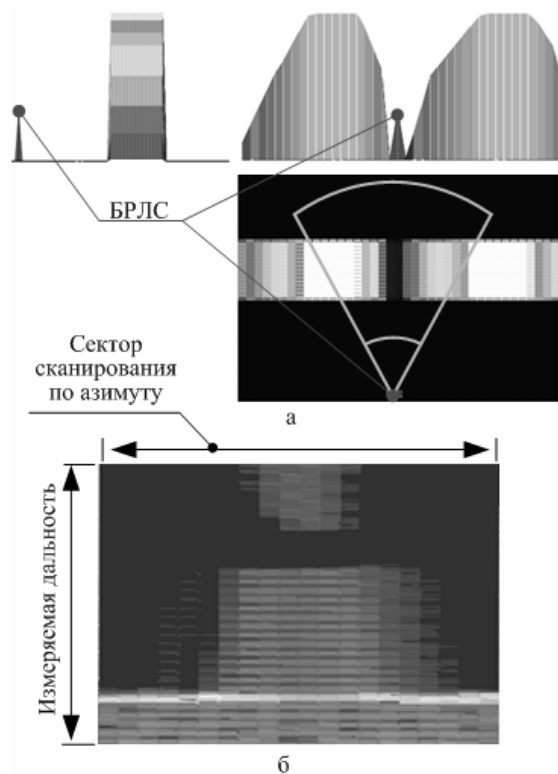


Рисунок 1

совокупность точечных фрагментов определенной яркости. Каждому i -му фрагменту (треугольнику) ставится в соответствие ряд определяющих его признаков, позволяющих определить его координаты «азимут-дальность».

Выделив в эталонной карте опорные сегменты поверхности – радиоконтрастные области (мосты, озера, береговая линия), осуществляем привязку обнаруживаемых объектов и точки позиционирования ЛА к географическим координатам местности. Это особенно актуально при сложных условиях навигации, например, когда носитель попадает в область тени для спутника (невозможен прием сигнала системой спутниковой навигации).

На рисунке 2 представлен алгоритм расчета эталонного РЛИ на основе ЦТК. Предусмотрено использование не только модели ДНА, но и реальной ее формы посредством введения экспериментального массива данных, что позволяет более точно учитывать коэффициент направленного действия антенны при оценивании отраженной от поверхности мощности на входе приемного устройства РЛС. Результатом работы данного алгоритма является РЛИ, каждый элемент которого представляет собой спектральную плотность мощности (СПМ) отраженного от подстилающей поверхности сигнала в пределах кольца дальности.



Рисунок 2

Методика обработки формирования РЛИ.

Оптимальная обработка сигналов на фоне помех предполагает декорреляцию помеховой составляющей обесцвечивающим фильтром (ОФ), импульсная характеристика которого сводится к первому вектору-столбцу матрицы \mathbf{R}^{-1} , где \mathbf{R} – корреляционная матрица помехи [12]. Она является теплицевой и может быть получена на основе автокорреляционной функции помехи $S_n(f)$ при использовании преобразования Винера-Хинчина. Дискретные отсчеты $S_n(f)$ оцениваются в каждом элементе РЛИ на основе предложенного алгоритма (см. рисунок 2).

Сигнал $y(n)$ на выходе ОФ, в качестве которого может использоваться фильтр авторегрессии-скользящего среднего (АРСС), имеет вид:

$$y(n) = \sum_{k=0}^q b(k)x(n-k) - \sum_{k=1}^p a(k)y(n-k), \quad (1)$$

где $x(n)$ – входная последовательность, $a(k)$ и $b(k)$ – авторегрессионные (АР) и скользящего среднего (СС) коэффициенты модели соответственно.

Рассмотрим процесс формирования входного сигнала для i -го фрагмента карты. Принимаемый сигнал $U_c(t)$ можно представить в виде:

$$U_C(t) = E_C(t - t_R) \cdot \cos[(\omega_0 \pm 2\pi F_{\text{ДС}})t - \phi_C(t - t_R) - \phi_0], \quad (2)$$

где $E_C(t)$ – огибающая сигнала; ϕ_0 – начальная фаза; $\phi_C(t)$ – закон фазовой модуляции сигнала; $F_{\text{ДС}} = 2V_r / \lambda$ – доплеровский сдвиг частоты отраженного сигнала; V_r – радиальная скорость фрагмента поверхности; λ – длина волны излучаемого сигнала; $t_R = 2R_{tr} / c$ – время запаздывания отраженного сигнала; R_{tr} – дальность до центра треугольника; c – скорость света. Энергия принимаемого сигнала от i -го фрагмента карты зависит от ряда параметров: пространственного положения относительно ЛА и ДНА; коэффициента отражения; площади и угла между нормалью к поверхности фрагмента и направлением на носитель РЛС, что определяет эквивалентную площадь фрагмента. Рассмотрим три основных параметра.

1. Доплеровская составляющая отраженного сигнала определяется положением треугольника относительно вектора путевой скорости ЛА и вычисляется по формуле:

$$V_i = V_n \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\beta_i), \quad (3)$$

где V_i – радиальная скорость i -го фрагмента, V_n – путевая скорость носителя РЛС, α_i и β_i – азимут и угол места i -го фрагмента соответственно. Так как сортировка фрагментов идет по доплеровским каналам, то оценивается соответствующий номер l_i канала:

$$l_i = \text{floor}\left(\frac{V_i}{\delta V}\right), \quad (4)$$

где δV – разрешение по скорости, определяемое шириной доплеровского канала, функция $\text{floor}(\bullet)$ находит наименьшее целое. В результате формируется вектор $\mathbf{L} = \|l_i\|$, элементы l_i которого принимают целочисленные значения в интервале $[0; L - 1]$, где L – число доплеровских каналов.

2. Номер строба, которому соответствует центр i -го треугольника. Присвоение номеров стробов всем треугольникам имитирует стробирование по дальности.

3. Бинарный признак ζ_i наличия отражения от i -го треугольника:

$$\zeta_i = \begin{cases} 1 - \text{отражает;} \\ 0 - \text{не отражает (затенен).} \end{cases}$$

Для нахождения значений массива ζ_i была создана оригинальная процедура построения тени.

Общеизвестная методика выявления областей затенений основана на формировании пучка векторов, вокруг каждого из которых создается окаймляющая область, форма сечения которой определяется поставленной задачей, допустимыми вычислительными затратами и требуемой точностью. При этом формируется пучок векторов, направляемый в рассматриваемую область пространства. Вектор, наталкиваясь на препятствие (затеняющий объект), формирует в последующих элементах дальности тень в соответствии с окаймляющей областью. На рисунке 3, а приведен пример построения затенений с круговым сечением окаймлений.

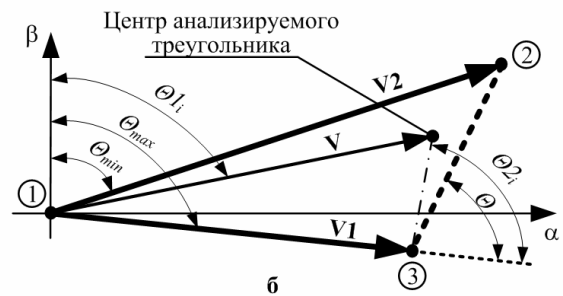
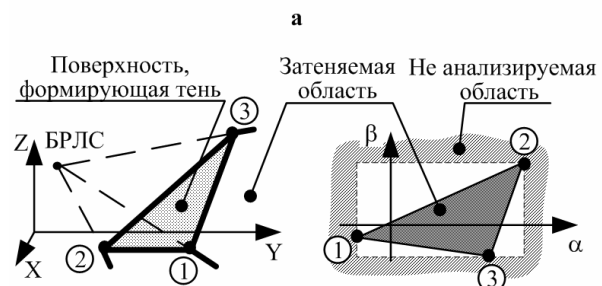
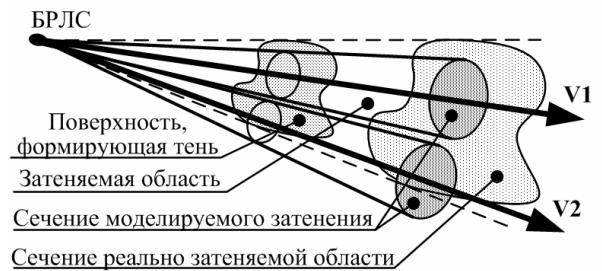


Рисунок 3

Данный метод является универсальным, так как не требует априорной информации о форме и размере сегмента поверхности. Плата за универсальность – нарастание погрешности с увеличением дальности до сегмента поверхности вследствие увеличения линейных размеров сечения окаймляющей области. На рисунке 3, а вектор $\mathbf{V2}$ формирует большой объем ложной тени, зависящий от принятых размеров окаймления. Существенное влияние на адекватность модели оказывает количество векторов в пучке: при недостаточном их числе наблюдается расхождение между моделируемой и реальной тенями (см. рисунок 3, а).

Учитывая наличие априорной информации об анализируемых сегментах поверхности (удаленность, угловые координаты центров фрагментов, их форма и ориентация в пространстве относительно БРЛС), целесообразно воспользоваться другой методикой. Отметим, что построение тени в декартовой системе координат традиционным методом предполагает построение уравнений плоскости и последующее их решение, таким образом, с фрагментом в форме треугольника потребуются составление четырех уравнений плоскости (для каждого отражающего треугольника) и поиск их решения для каждой точки поверхности (центра треугольника), в связи с чем предлагается переход в сферические координаты, что не потребует дополнительных вычислений вследствие наличия ранее полученных для оценивания доплеровской составляющей фрагмента поверхности угловых координат.

Переход к сферическим координатам позволяет упростить процедуру построения тени, т.к. при этом необходимо составить уравнения трех линий, а не четыре уравнения плоскости в декартовой системе координат.

Для дополнительного сокращения вычислительных затрат на построение модели РЛИ предлагается перейти к другой сферической системе координат с центром в крайней формирующей треугольник точке (имеющей минимальный или максимальный азимут или угол места). На рисунке 3, б выбрана точка 1 с минимальным азимутальным углом. Кроме того, можно отбросить все неанализируемые области. Поиск затеняемых фрагментов поверхности сводится к анализу углов, поясненных на рисунке 3, б, и проверке выполнения следующих условий:

$$(\theta_{\min} \leq \theta_{I_i} \leq \theta_{\max}) \wedge (\theta_{2_i} \geq \theta).$$

Нахождение этих углов реализуется по формулам векторной алгебры, где в качестве направляющих векторов используются орты сферической системы координат (в приводимом примере использован орт угла места $\|\alpha \ \beta\|^T = \|\ 0 \ 1 \|^T$):

$$\theta_{\min} = \arccos\left(\frac{\mathbf{V}_{2_1}}{|\mathbf{V}_{2_1}|}\right); \theta_{\max} = \arccos\left(\frac{\mathbf{V}_{1_1}}{|\mathbf{V}_{1_1}|}\right);$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{(\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1) \cdot \mathbf{V}_1}{|\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1| \cdot |\mathbf{V}_1|}\right); \quad (5)$$

$$\theta_{I_i} = \arccos\left(\frac{\mathbf{V}_i}{|\mathbf{V}_i|}\right); \theta_{2_i} = \arccos\left(\frac{(\mathbf{V} - \mathbf{V}_i) \cdot \mathbf{V}_i}{|\mathbf{V} - \mathbf{V}_i| \cdot |\mathbf{V}_i|}\right).$$

Все векторы и углы в соотношениях (5) показаны на рисунке 3, б и являются двумерными $\|\alpha \ \beta\|^T$. Следует отметить, что расхождение в

моделируемой тени и реально затеняемой области зависит только от точности ЦТК (чем точнее карта, т.е. меньше d , тем корректнее строится триангуляционная модель поверхности и, следовательно, граница радиолокационной тени).

Для улучшения разрешения РЛС по углам α и β на этапе первичной обработки может быть использован режим узкополосной доплеровской фильтрации (доплеровское обужение или фокусирование ГЛ ДНА) [8,10]. При этом поверхности постоянной доплеровской скорости, пересекая элемент разрешения РЛС, образуют доплеровские элементы разрешения, соответствующие изодопам [6]. Поверхности постоянной доплеровской скорости имеют вид прямых круговых конусов с вершинами в точке нахождения БРЛС и осями симметрии, совпадающими с вектором путевой скорости V_i движения ЛА. Положение конкретного доплеровского элемента разрешения, который соответствует определенному номеру l узкополосного доплеровского фильтра (канала), определяется углом между образующей γ_l конкретного конуса и его осью симметрии по соотношению: $\cos(\gamma_l) = \cos \alpha \cdot \cos \beta$.

Разрешение по углу связано с разрешением по скорости δV зависимостью (3) при фиксированной скорости V_i движения и равномерном разбиении всей полосы частот. Выигрыш за счет использования доплеровского обужения особенно заметен при попадании в сектор сканирования ДНА радиоконтрастных объектов. Отражения от них просачиваются по боковым лепесткам ДНА и попадают в элемент разрешения, соответствующий текущему направлению ГЛ (в одном строке дальности), см. рисунок 4.

Экспериментальная часть. С целью оценки работоспособности предложенной методики была построена имитационная модель функционирования, связывающая расчетную математическую модель с процедурой генерации случайного процесса, подобного реальным сигналам. Для синтеза алгоритмов цифровой обработки сигналов применялась параметрическая модель АРСС (1).

На рисунке 1 представлены: ЦТК в трех проекциях, точки которой для наглядности соединены плоскостями (рисунок 1, а), и формируемое на ее основе радиолокационное изображение (на рисунке 1, б представлено развернутое РЛИ).

Результаты обработки (работы алгоритма обнаружения неподвижных объектов) представлены на рисунке 4, где явно выделяются новые объекты. Получаемое после фильтрации изобра-

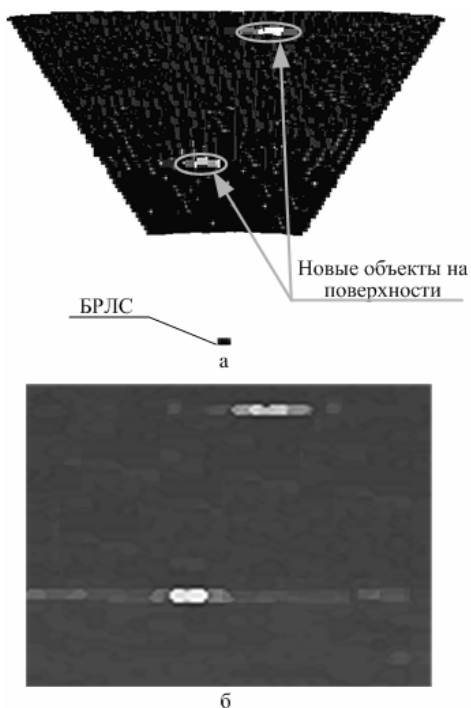


Рисунок 4

жение представлено в координатах «азимут-дальность»: на рисунке 4, а – секторное изображение, рисунок 4, б – развернутое секторное изображение. Размытость яркостной отметки от цели по нескольким азимутальным элементам разрешения (в пределах одного кольца дальности) обусловлена приемом сигнала от новых объектов боковыми лепестками ДНА. Использование режима доплеровского обужения луча позволяет получить более контрастное РЛИ, отфильтровывая отражения по боковым лепесткам ДНА, что устраняет размытость отметок целей.

Для оценки эффективности обнаружения вычислено отношение K сигнал-фон (6), которое является определяющим при обнаружении объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности:

$$K = \frac{P_c}{P_\phi}, \quad (6)$$

где P_ϕ – усредненная мощность фона, P_c – мощность в элементе разрешения, соответствующего положению объекта на поверхности.

Выигрыш предложенного метода оценен посредством сопоставления достигаемого при его использовании отношения K_m сигнал-фон с аналогичной величиной $K_{кл}$ для классического метода, в качестве которого был использован метод вычитания усредненной мощности предыдущего и последующего элементов разрешения из мощности анализируемого элемента разрешения.

Для приведенной ЦТК выигрыш составил

$$\frac{K_m}{K_{кл}} = 10 \lg \left(\frac{382,72}{71,07} \right) = 7,31 \text{ дБ}.$$

Следует также отметить тот факт, что при подавлении отражений по боковым лепесткам сужается спектр обрабатываемого сигнала и, в соответствии с выбираемым приоритетом, можно либо снизить требования к обесцараживающему фильтру, либо повысить точность аппроксимации спектра для повышения вероятности обнаружения объектов.

Выводы. Предложена оригинальная методика формирования детального радиолокационного изображения поверхности земли на основе трехмерной цифровой топографической карты местности, дополненной характеристикой рассеяния радиоволн различными видами поверхностей и объектов; изложена методика формирования радиолокационных теней при триангуляционном методе аппроксимации поверхности. На основе доплеровского портрета разработанной модели отражений в каждом элементе разрешения РЛИ получены коэффициенты обесцараживающего фильтра, что дало возможность обнаружить новые неподвижные объекты на фоне подстилающей поверхности путем декорреляции входной выборки (см. рисунок 4). Выигрыш в сравнении с классическим методом составил (для приведенной ЦТК) 7,31 дБ.

Отметим, что на основе формируемого эталонного радиолокационного изображения подстилающей поверхности можно осуществлять позиционирование летательного аппарата на местности с привязкой координат обнаруживаемых объектов к топографической карте.

Библиографический список

1. Алтатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 45-51.
2. Аксенов О.Ю. Обнаружение объектов на изображениях при изменяющихся условиях наблюдения // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 40-44.
3. Клочко В.К. Пространственно-временная обработка бортовой РЛС при получении трехмерных изображений поверхности // Радиотехника. 2004. № 6. С. 3-11
4. Витязев В.В., Колодыко Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского обужения луча // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 3. С. 31-41.
5. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение в передней зоне обзора бортовой радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны // Радиотехника. 2004. № 1. С. 47-49.

6. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

7. Мельников Ю.П., Попов С.В. Возможности кинематического определения дальности до источника радиоизлучения движущимся наблюдателем // Радиотехника. 2006. № 9. С. 17-21.

8. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. М.: ИПРЖР, 2002. 176 с.

9. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы. М.: Радиотехника, 2005. 224 с.

10. Савостьянов В.Ю. Использование доплеровского обострения луча в режиме обхода препятствий одноканальных РЛС // Радиотехника. 2006. № 11. С. 35-39

11. Мельник Ю.А., Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. и др. Радиолокационные методы исследования Земли. М.: Советское радио, 1980. 264 с.

12. Кошелев В.И. АРСС модели случайных процессов. Прикладные задачи синтеза и оптимизации. М.: Радио и связь, 2002. 112 с.