

УДК 621.396.962.2

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГАБАРИТНОЙ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

*Иванников К. С., директор НПК специального программного обеспечения, главный конструктор,
e-mail: ivannikov_ks@radar-mms.com;*

Купряшкин И. Ф., д.т.н., доцент, доцент кафедры Военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж), e-mail: ifk78@mail.ru;

*Рязанцев Л. Б., к.т.н., докторант Военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж),
e-mail: kernel386@mail.ru.*

AN ALGORITHM FOR GENERATING THE TERRAIN CONTOUR WITH THE USE OF SMALL-SIZED HIGH RESOLUTION SYNTHETIC APERTURE RADAR

Ivannikov K. S., Kupryashkin I. F., Ryzantsev L. B.

The article proposes an algorithm to improve angular resolution of airborne radar altimeters and to increase the detail level of the terrain contour due to the application of SAR methods. The results of the experimental verification of the developed algorithm which uses data from a small-sized C-band radar are presented, which illustrate the possibility of classifying areas of the earth's surface according to the calculated height estimates of the terrain, vegetation, constructions and buildings.

Key words: FMCW SAR, radar image, terrain contour matching.

Ключевые слова: РЛС с синтезированной апертурой антенны, непрерывное излучение, радиолокационное изображение, корреляционно-экстремальное наведение.

Введение

Одной из наиболее эффективных мер борьбы с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) сегодня является постановка помех их каналам приема спутниковых навигационных сигналов. Использование сравнительно простых с точки зрения конструкции и применения передатчиков помех способно практически полностью исключить автономные полеты БПЛА в пределах заданных районов.

Среди существующих решений задачи автономной навигации БПЛА особый интерес вызывают те из них, которые основаны на сопоставлении оцененного с помощью радиовысотомера профиля высот полета с цифровой картой местности, записанной в бортовое запоминающее устройство БПЛА [1]. В первую очередь этот интерес обусловлен возможностью получения высокоточных оценок собственных координат БПЛА в широком диапазоне высот полета независимо от состояния естественной освещенности поверхности и метеоусловий на участке коррекции.

Как правило, в силу массогабаритных ограничений, антенны радиовысотомеров, устанавливаемых на БПЛА, характеризуются небольшими размерами и, как следствие, широкими диаграммами направленности (ДН). Это приводит к тому, что формирование оценки профиля с протяженностью, достаточной для сопоставления с цифровой картой местности, требует довольно продолжительного времени (десятки секунд и более).

Предложен алгоритм, позволяющий улучшить разрешение бортовых радиовысотомеров по угловым координатам и повысить детальность формируемого профиля рельефа местности за счет применения методов синтеза апертуры антенны. Представлены результаты экспериментальной проверки разработанного алгоритма с использованием малогабаритной РЛС с синтезированной апертурой С-диапазона, иллюстрирующие возможность классификации участков земной поверхности по сформированным оценкам высот рельефа местности, растительности и сооружений.

В то же время достигнутый к настоящему моменту уровень развития науки и техники обеспечил возможность создания малогабаритных широкополосных РЛС и высокопроизводительных вычислительных платформ, массогабаритные характеристики которых допускают их размещение даже на малых БПЛА. Значительный объем памяти и высокое быстродействие бортовых систем обработки сигналов обеспечивает возможность улучшения разрешения радиовысотомеров по угловым координатам за счет применения методов синтеза апертуры антенны. В сочетании с высокой разрешающей способностью по высоте это позволяет их рассматривать как средства формирования профиля рельефа местности с детальностью, обеспечивающей существенное повышение точности и оперативности определения собственных координат БПЛА на основе сопоставления измеренных оценок высоты с цифровой картой местности.

Целью статьи является создание алгоритма обработки эхо-сигналов поверхности в малогабаритной широкополосной РЛС, обеспечивающего формирование детального профиля рельефа местности.

Синтез алгоритма формирования профиля рельефа местности

Для измерения высоты полета летательных аппаратов наиболее широкое применение нашли РЛС с непрерывным излучением (НИ), характеризующиеся невысокой пиковой мощностью, простотой конструкции и низким энергопотреблением. Определение высоты полета в таких РЛС основано на излучении сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в направлении поверхности, находящейся под летательным аппаратом, приеме отраженного сигнала, его демодуляции путем перемножения с зондирующим сигналом, усилении, оцифровки с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сжатии по дальности путем выполнения быстрого преобразования Фурье, обнаружении альтиметровых отражений и оценки их дальности.

Траекторный сигнал на выходе демодулятора РЛС НИ в отдельном k -м периоде зондирования представляет собой сумму сигналов от всех элементов разрешения в пределах следа диаграммы направленности (ДН) (рис. 1) [2, 3]

$$\dot{S}_z(t_m, k) = \sum_u \dot{S}_{p_u}(t_m, k) + \dot{\eta}(t_m, k), \quad t_m \in [0, T_m], \quad (1)$$

где $R_{p_u}(t_m, k)$ – эхо-сигнал u -го элемента разрешения, расположенного на земной поверхности на дальности R_{p_u} (рис. 1), описываемый выражением [6, 7]

$$\dot{S}_{p_u}(t_m, k) = A_{p_u} \exp \left(j \frac{4\pi R_{p_u}(t_m, k)}{c} \left(f_0 + \mu t_m - \mu \frac{R_{p_u}(t_m, k)}{c} \right) \right); \quad (2)$$

A_{p_u} – амплитуда эхо-сигнала u -го элемента разрешения; f_0 – начальная частота зондирующего сигнала; $\mu = \Delta f_c / T_m$; Δf_c и T_m – ширина спектра и период модуляции зондирующего сигнала соответственно; c – скорость света; $k = \overline{0, N_k - 1}$; $N_k = \text{int}[T_c / T_m]$; $\text{int}[x]$ – целая часть x ; T_c – длительность интервала когерентного накопления сигнала; $\dot{\eta}(t_m, k)$ – реализация комплексного шума приемного канала на k -м зондировании.

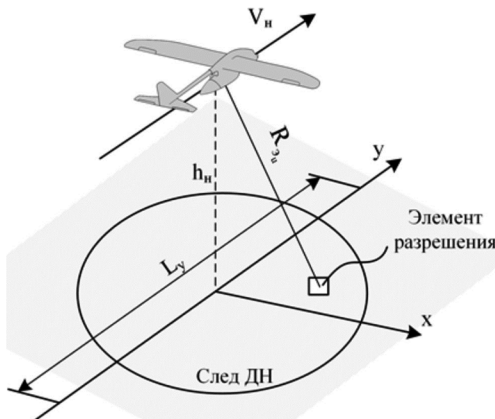


Рис. 1. Геометрия обзора земной поверхности

В предлагаемой реализации алгоритма формирования детального профиля рельефа местности обработка эхо-сигналов поверхности основана на применении алго-

ритма свертки, широко используемого в РЛС с синтезированием апертуры для формирования радиолокационных изображений (РЛИ) в режиме полосовой съемки [4].

Работа алгоритма свертки носит циклический характер, причем каждый n -й цикл включает последовательное выполнение следующих этапов.

На первом этапе оцифрованный траекторный сигнал (1) запоминается в виде блока, представляющего собой матрицу комплексных отсчетов \mathbf{B} (рис. 2), количество строк которой составляет $N_s = F_s T_m$, а количество столбцов – $N_B = \Delta y / (V_n T_m)$, где F_s – частота дискретизации АЦП; V_n – скорость полета БПЛА. Значение Δy соответствует шагу выходного изображения профиля рельефа по координате поперечной дальности, определяемому из условия $\Delta y \leq \delta l$, где $\delta l = h_n \lambda / (2V_n T_c)$ – разрешение по поперечной дальности; h_n – априорная высота полета БПЛА; $\lambda = c / f_0$.

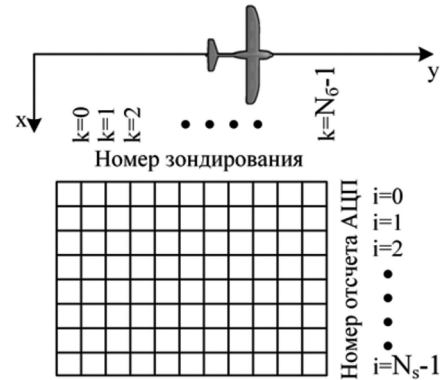


Рис. 2. Формирование блока отсчетов оцифрованного траекторного сигнала

Продолжительность интервала N_s выбирается исходя из времени нахождения точечного отражателя в элементе разрешения по высоте δh

$$T_c \leq \frac{2\sqrt{h_n \delta h + \delta h^2}}{V_n}, \quad (3)$$

где $\delta h = c / (2\Delta f_c)$.

Над каждым m -м столбцом матрицы \mathbf{B} выполняется операция одномерного дискретного преобразования Фурье, результатом которой является сжатие сигналов, зарегистрированных в течение отдельных зондирований, по координате наклонной дальности

$$\mathbf{B}_{сж} = \mathcal{F}\{\mathbf{B}\}, \quad (4)$$

где $\mathcal{F}\{\}$ – оператор одномерного дискретного преобразования Фурье.

На втором этапе осуществляется поблочное заполнение матрицы $\dot{S}_{сж}$, количество строк которой составляет N_s , а количество столбцов N_k определяется количеством зондирований в течение интервала когерентного накопления T_c . Перед заполнением все строки матрицы

$\dot{S}_{сж}$ сдвигаются влево на N_B отсчетов, и, далее, в ее освободившиеся элементы записываются элементы мат-

рицы $\dot{\mathbf{B}}_{\text{сж}}$, т.е.

$$\dot{S}_{\text{сж},k} = \dot{S}_{\text{сж},k+N_0} \quad (5)$$

$$\dot{S}_{\text{сж},iN_k-N_0+m} = \dot{B}_{\text{сж},i,m} \quad (6)$$

где $i = \overline{0, N_s - 1}$, $k = \overline{0, N_k - N_B - 1}$, $m = \overline{0, N_B - 1}$.

На третьем этапе выполняется процедура фокусировки, включающая поэлементное перемножение отсчетов матрицы $\dot{\mathbf{S}}_{\text{сж}}$ с соответствующими отсчетами матрицы опорных сигналов $\dot{\mathbf{S}}_{\text{оп}}$

$$\dot{S}_{\Phi,i,k} = \dot{S}_{\text{сж},k} \dot{S}_{\text{оп},i,k} \quad (7)$$

Элементы матрицы $\dot{\mathbf{S}}_{\text{оп}}$ определяются как

$$\dot{S}_{i,k} = \exp\left(-j \frac{2\pi f_0 T_m^2 V_n^2}{h_{i,c}} (k - N_k/2)^2\right), \text{ где } h_i = ih_{\text{max}}/N_s;$$

h_{max} – максимальная высота полета БПЛА.

На четвертом этапе формируется n -й столбец выходного изображения профиля рельефа местности путем выполнения операции

$$I_{i,n} = \sum_{k=0}^{N_k-1} \dot{S}_{\Phi,i,k} \quad (8)$$

Общее количество циклов $N_y = \text{int}[L_y/\Delta y]$ (количество столбцов матрицы \mathbf{I}) определяется протяженностью участка формирования профиля рельефа L_y и заданным шагом Δy .

Схема, иллюстрирующая последовательность выполнения перечисленных этапов, представлена на рис. 3.

Скорость обработки может быть существенно увеличена за счет снижения размерности матриц $\dot{\mathbf{S}}_{\text{сж}}$ и \mathbf{I} путем копирования лишь тех строк матрицы $\dot{\mathbf{B}}_{\text{сж}}$, которые содержат альтиметровые отражения. Начальный i_n и конечный i_k номера этих строк могут определяться с помощью следующих соотношений

$$i_n = \text{int}\left[\frac{\bar{h} - \Delta h}{2} \frac{N_s}{h_{\text{max}}}\right], \quad i_k = \text{int}\left[\frac{\bar{h} + \Delta h}{2} \frac{N_s}{h_{\text{max}}}\right] \quad (9)$$

где \bar{h} – среднее значение высоты полета носителя; Δh – максимальное значение перепада высот на участке формирования профиля рельефа местности.

Кроме того, принимая во внимание эффект сверхдискретизации [5], может быть достигнуто дополнительное увеличение скорости работы алгоритма без заметного ухудшения качества формируемого изображения профиля рельефа за счет уменьшения разрядности регистрируемых данных до 1-2 бит.

Алгоритм работы детектора основан на сравнении статистики обнаружения с порогом, для расчета которых используются одномерные выборки отсчетов столбца матрицы \mathbf{I} в пределах двух смещенных друг относительно друга скользящих окон с одинаковыми апертурами равными N_w . При этом между апертурами скользящих окон устанавливается «защитное» окно размером

N_g , по аналогии с тем, как это делается в детекторе CFAR [7]

$$\hat{h}_{i,n} = \begin{cases} i\delta h, I_{i,n} \geq I_{0,i,n}; \\ 0, I_{i,n} < I_{0,i,n}; \end{cases} \quad (10)$$

где $I_{i,n} = \sum_{u=i}^{i+N_w} I_{u,n}$ – статистика обнаружения;

$I_{0,i,n} = \text{erf}^{-1}[2(1-F_{\text{лт}})-1] \sqrt{2\sigma_{i,n}^2} + m_{i,n}$ – порог обнаружения по критерию Неймана-Пирсона, рассчитываемый исходя из гауссовской вероятностной модели отсчетов n -го столбца матрицы \mathbf{I} при заданной вероятности ложной тревоги $F_{\text{лт}}$;

$m_{i,n} = \frac{1}{N_w} \sum_{u=i-N_w-N_g}^{i-N_g} I_{u,n}$ и

$\sigma_{i,n}^2 = \frac{1}{N_w-1} \sum_{u=i-N_w-N_g}^{i-N_g} (I_{u,n} - m_{i,n})^2$ – оценки среднего значения и дисперсии отсчетов n -го столбца \mathbf{I} в пределах скользящего окна, формируемые для расчета порога обнаружения, соответственно; $\text{erf}^{-1}[x]$ – обратная функция ошибок; $i = \overline{N_w + N_g, N_s - N_w - 1}$.

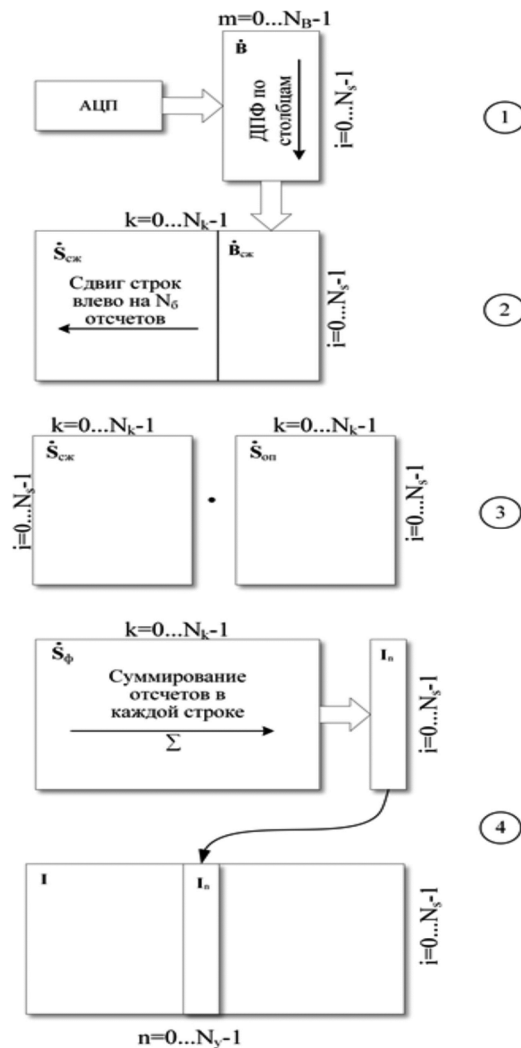
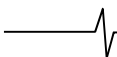


Рис. 3. Схема алгоритма формирования детального профиля рельефа местности с целью снижения допустимого уровня ложной тре-



воги выполнению операции (10) может предшествовать операция фильтрации вида

$$I_{i,n} = \sum_{u=0}^{N_i-1} I_{u,n} A_{i-u}, \quad (11)$$

где $A_i = \exp(-\alpha i)$ – весовые коэффициенты фильтра, рассчитываемые исходя из экспоненциальной модели альтиметровых отражений [6]; $\alpha \in [0, 1]$.

В случае, если в n -м столбце матрицы \hat{h} имеется более одной ненулевой оценки, может делаться вывод о наличии растительности (деревьев) в точке, расположенной под БПЛА в соответствующий момент времени. При этом наименьшая высота соответствует высоте крон деревьев \hat{h}_d , а наибольшая – высоте рельефа \hat{h}_p .

Для повышения достоверности и точности результата

тов могут применяться методы вторичной обработки, например, калмановская фильтрация оценок высот, последовательно формируемых для различных столбцов матрицы \mathbf{I} .

Экспериментальная проверка алгоритма

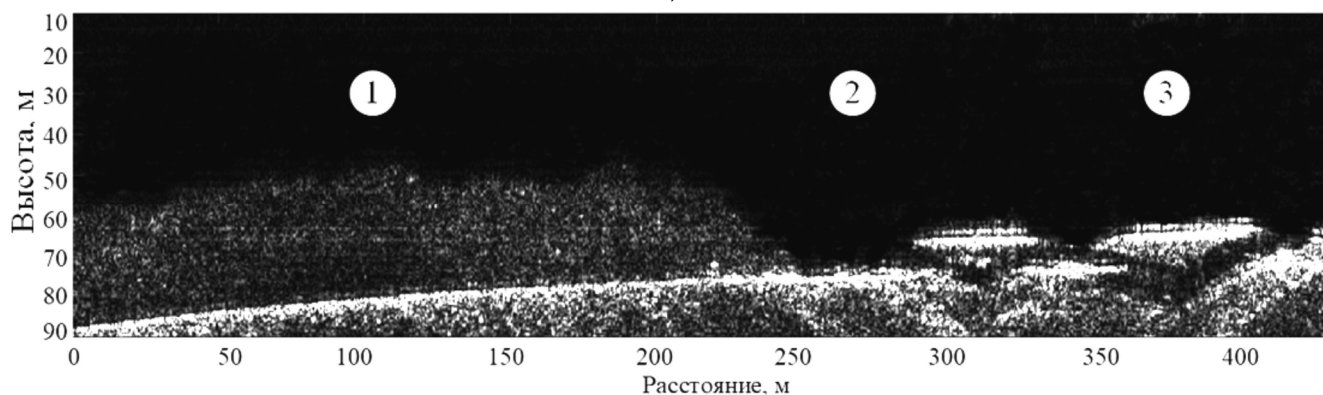
Экспериментальная проверка осуществлялась с использованием малогабаритной РЛС С-диапазона, являющейся совместной разработкой Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная Академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) и АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург). Характеристики РЛС и параметры ее зондирующего сигнала приведены в табл. 1. РЛС устанавливалась на вертолете Robinson R44 (рис. 4), при этом антенны ориентировались в наadir. Полет вертолета осуществлялся на высотах от 50 до 200 м над земной поверхностью со скоростью 80...130 км/ч.



Рис. 4. Вид установленной РЛС С-диапазона на вертолете Robinson R44



а)



б)

Рис. 5. Участок маршрута полета (а) (начало в точке 51046°21.55'С 39011°56.72'В, окончание в точке 51046°32.95'С 39011°41.86'В) и соответствующий ему вид сформированного РЛИ профиля рельефа местности (б): 1 – лесной массив; 2 – асфальтированный участок; 3 – промышленные здания

Табл. 1. Характеристики РЛС С-диапазона

Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	5,25-5,75
Ширина спектра зондирующего сигнала, МГц	500
Период модуляции зондирующего сигнала, мс	2,1
Дальность действия, км	9...11
Мощность зондирующего сигнала, Вт	0,05; 1 (с усилителем мощности)
Потребляемая мощность, Вт	36
Масса, кг	0,16 (модуль РЛС) 2x1 (приемная и передающая антенны)

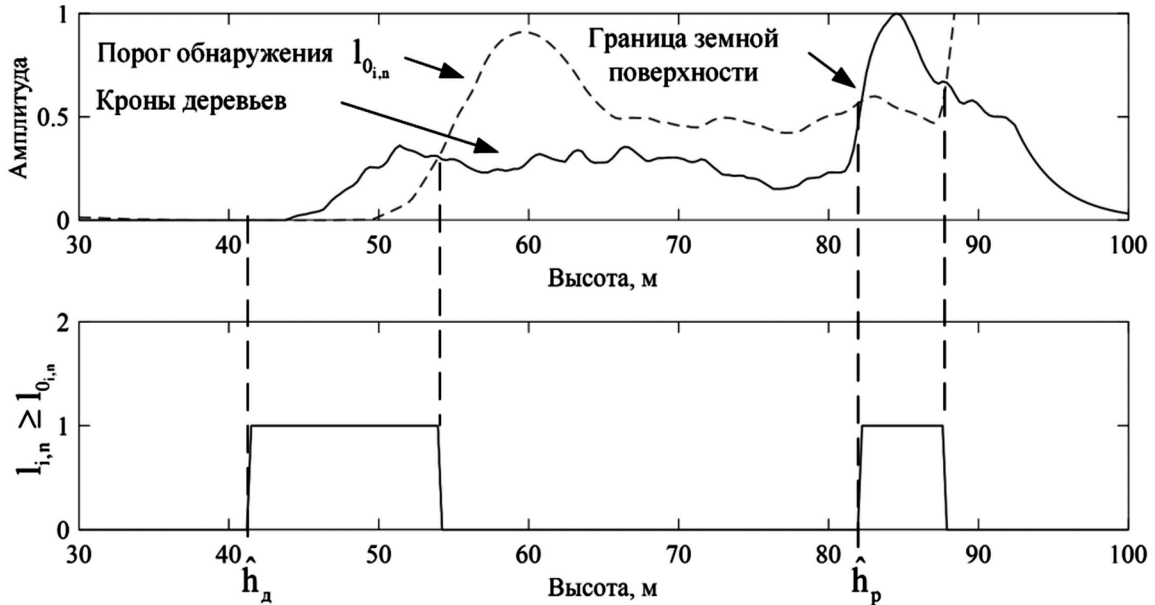


Рис. 6. Сечение РЛИ профиля местности и соответствующие ему значения оценок $\hat{h}_{i,n}$

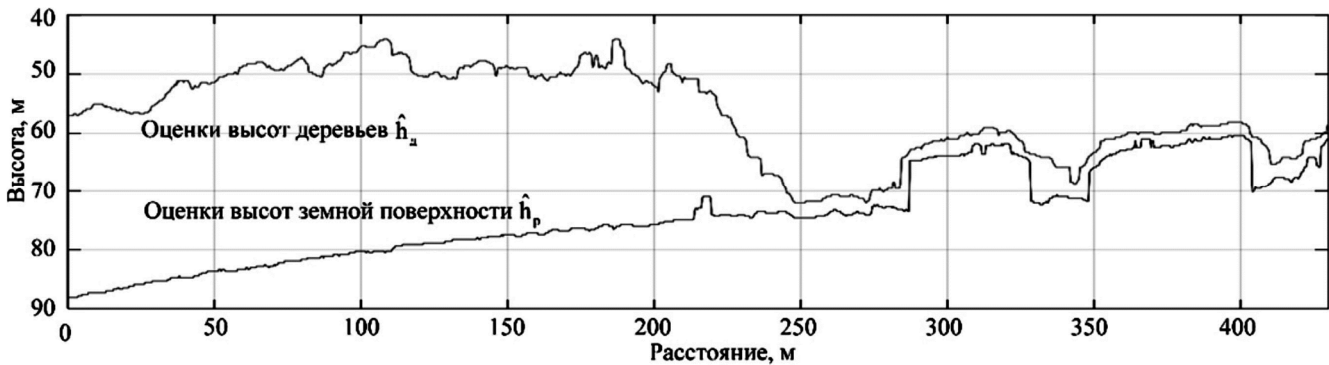


Рис. 7. Оценки высот рельефа местности и деревьев

Вид участка маршрута полета и сформированное на этом участке изображение профиля рельефа местности описанным алгоритмом при $N_k = 128$ и $N_6 = 5$ представлены на рис. 5,а и 5,б соответственно. Сечение изображении профиля местности и значения оценок $\hat{h}_{i,n}$, соответствующие расстоянию 108 м на рис. 5,б, после выполнения операций (11), (10) при $N_w = 40$, $N_g = 20$, $F_{\text{IT}} = 1 \cdot 10^{-8}$ и $\alpha = 0,1$, представлены на рис. 6, а сформированные по изображению профиля оценки высот рельефа местности и деревьев – на рис. 7.

Из анализа рис. 7 следует, что различия оценок \hat{h}_p и \hat{h}_d могут свидетельствовать о наличии участков расти-

тельности (участок полета 0 до 220...250 м), а их близкое соответствие при наличии резких перепадов (участки 270...330 и 350...405 м) – о наличии искусственных сооружений.

Заключение

Таким образом, применение бортовых радиовысотомеров с широкополосными зондирующими сигналами, реализующих методы синтеза апертур антенны при обработке эхо-сигналов поверхности, позволяет существенно повысить детальность формируемого профиля рельефа местности. Установлено, что помимо оценки собственно профиля рельефа также может решаться задача классификации зондируемой поверхности, что обеспечивает возможность определения соб-

ственных координат БПЛА с использованием данных не только о высотах поверхности на участке коррекции, но и семантической информации, включаемой с состав цифровых карт местности.

Литература

1. Наумов А.И., Кичигин Е.К., Сафонов И.А., Мох А.М. Бортовой комплекс высокоточной навигации с корреляционно-экстремальной навигационной системой и цифровой картой рельефа местности // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2019. Том 9, выпуск 6-1, С. 51-55.

2. Рязанцев Л.Б., Лихачев В.П. Оценка дальности и радиальной скорости объектов широкополосной радиолокационной станцией в условиях миграции отметок по каналам дальности // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 61-64.

3. Рязанцев Л.Б., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Гнездилов М.В. Алгоритм формирования радиолокационных изображений с субметровым разрешением в малогаба-

ритных РЛС с синтезированной апертурой // Цифровая обработка сигналов. 2018. №2. С. 53-58.

4. Авиационные системы радиовидения. Монография / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: «Радиотехника», 2015. 648 с.

5. Рязанцев Л.Б., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Методика обоснования требований к аналого-цифровому преобразованию в РЛС с синтезированной апертурой непрерывного излучения // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 2. С. 49-52.

6. Phalippou L., Demeestere F. Optimal re-tracking of SAR altimeter echoes over open ocean: Theory versus results for SIRAL2 data [Электронный ресурс] // https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/OSTST/2011/oral/01_Wednesday/Splinter%201%20IP/02%20OSTST-2011-Phalippou-Demeestere.pdf (дата обращения: 17.01.2019).

7. Constant False Alarm Rate (CFAR) Detection [Электронный ресурс] // <https://www.mathworks.com/help/phased/examples/constant-false-alarm-rate-cfar-detection.html> (дата обращения: 17.01.2019).

Секция 4: Обработка сигналов в радиотехнических системах

Обсуждение проблем и задач обработки радиотехнических сигналов велось по трем основным направлениям: обнаружение сигналов и оценивание их параметров; радиолокация, пеленгация и навигация; пространственно-временная обработка сигналов.

На секции обсуждались следующие актуальные научные проблемы:



- цифровая обработка эллиптически-поляризованного линейно частотно модулированного сигнала;
- алгоритм обнаружения с сопровождением в задаче шумопеленгации в гидроакустической системе;
- алгоритм обработки статистических характеристик джиттера сигналов цифровых интерфейсов;
- об одном способе построения программируемого генератора случайных чисел с распределением Гаусса;

- цифровое генерирование и цифровая обработка сигналов для перспективных радиолокационных визиров на беспилотных летательных аппаратах;
- сравнительная оценка алгоритмов траекторной фильтрации;
- особенности распознавания сигналов со сложной формой в сенсорных системах связи;
- варианты схем построения антенных систем мобильных РЛС;
- оптимальный прием сигналов с высоким разрешением;
- определение местоположения источника радиоизлучения на поверхности земли по данным группы из двух космических аппаратов;
- ошибки самонастройки автокомпенсатора двух шумовых помех реализующего алгоритм LMS;
- применение инверсной фильтрации в задаче подавления боковых лепестков в ультразвуковом локаторе;
- снижение дифракционных лепестков в плоской цифровой антенной решетке с неэквидистантным размещением фазовых центров групп подрешеток.