

УДК 621.396.96

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА ВЕРТОЛЕТНОГО БАЗИРОВАНИЯ

П. Е. Шимкин, А. А. Комаров

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2018 г.

Аннотация. Работа посвящена имитационному моделированию уникальной бортовой радиолокационной системы, позволяющей вертолетам с высокой степенью безопасности осуществлять посадку на неподготовленную площадку, предварительно определив наличие опасных неровностей, уклонов, посторонних средств и механизмов на этой площадке. В статье представлены результаты расчета потенциальной точностной характеристики такой системы, а также приведен один из вариантов алгоритмической реализации имитационной компьютерной модели, реализованной в пакете прикладных программ MATLAB. Показаны результаты моделирования на примере посадки вертолета на приближенный к реальному неоднородный рельеф поверхности.

Ключевые слова: интерферометрический радиолокатор, цифровая модель рельефа, трехмерное изображение, безопасная посадка вертолета.

Abstract. The work is devoted to the simulation of a unique on-board radar system, which allows helicopters with a high degree of safety to land on an unprepared site, having previously determined the presence of dangerous irregularities, inclines, foreign means and mechanisms on this site. The results of the calculation of the potential accuracy characteristics of such a system are presented, as well as one of the variants of the algorithmic implementation of a simulation computer model implemented in the MATLAB application software package. Visual results of modeling are shown by the example of a helicopter landing on a non-uniform surface relief close to real.

Key words: interferometry radar, digital terrain model, three-dimensional image, radar cross section diagram, safe helicopter landing.

1. Введение

Одной из основных причин аварий вертолетов [1, 2] является ненадежность средств для обеспечения их посадки на неподготовленную посадочную площадку (ПП) в сложных метеоусловиях в дневное и ночное время при плохой визуальной видимости. Даже при хороших погодных условиях, но запыленной земной поверхности возникает опасность для жизни летчика и экипажа при посадке. Дело в том, что массивное пылевое облако, образующееся вихрями воздуха из-за винтов вертолета, существенно маскирует ПП. При этом неровности высотой 0,5 м и более и уклоны ПП более 15° уже представляют опасность для посадки вертолета, особенно при сильном ветре. Существующие бортовые системы (спутниковые навигационные системы, бортовые радиовысотомеры), которыми оборудованы большинство вертолетов, не могут обеспечить необходимую информацию о состоянии рельефа, уклонах ПП и наличии посторонних объектов на ней.

На сегодняшний день, можно выделить два основных направления исследований в данной области [3 – 7]. Первое – применение лазерных локаторов в системах безопасной посадки вертолета (СБПВ). Достигается высокая детализация рельефа, информация о рельефе ПП выводится на экран в кабине пилота. Основными недостатками лазерных СБПВ являются сильная зависимость от погодных условий, т.е. невозможность проведения съемки поверхности ПП в условиях дождя, тумана, снега, а также высокая стоимость по сравнению с радиолокационными системами. Второе – применение радиолокационных систем в сочетании со специальной обработкой сигналов, отраженных от посадочной площадки. Применяются как непрерывные, так и импульсные системы со сложными сигналами. Известно несколько методов, позволяющих выделить из радиолокационных данных информацию о возвышениях рельефа поверхности: стереоскопический, интерферометрический, клинометрический и поляриметрический. Стереоскопический и интерферометрический методы требуют двух снимков одного и того же участка поверхности с разных позиций, клинометрический

работает только с одним снимком, а поляриметрический требует набора изображений, сделанных с разными поляризациями сигнала.

В силу ряда особенностей этих методов, а также требований летного регламента [8], говорящих о необходимости обязательного облета предполагаемой зоны посадки с нескольких сторон, практическое использование при оценивании рельефа поверхности находит сочетание стереоскопического и интерферометрического метода.

Цель работы – показать основные этапы одного из вариантов алгоритмической реализации имитационной модели радиолокационной СБПВ (РСБПВ) интерферометрическим методом, а также продемонстрировать работоспособность предлагаемого решения безопасной посадки вертолета на основе результатов компьютерного моделирования.

2. Описание РСБПВ

Для обеспечения безопасной посадки вертолета при заходе на нее со скоростью не превышающей 15 м/с производится облет согласно летному регламенту [8] с высоты порядка 50 – 100 м. Размер ПП при этом обычно равен двум диаметрам вертолетного винта, что примерно составляет 100 на 100 м. Во время облета производится радиолокационная съемка ПП в виде естественного, по мере перемещения носителя, построчного сканирования зоны обзора узким лучом приемо-передающей волноводно-щелевой антенны в азимутальной плоскости без синтеза апертуры, и широким лучом в угломестной плоскости для подсвета необходимой зоны обзора ПП (рис.1). Важно отметить, что при радиолокационном наблюдении ПП полёт вертолётá должен проходить на постоянной высоте с постоянной скоростью.

В качестве инструмента по измерению рельефа ПП и оценке наличия посторонних предметов на ПП используется интерферометр с «жесткой» базой [9] в виде пары пространственно разнесенных на расстояние интерферометрической базы волноводно-щелевых антенн, закрепленных на хвостовой балке [10]. Одна из антенн работает на прием и передачу, а другая только на прием.

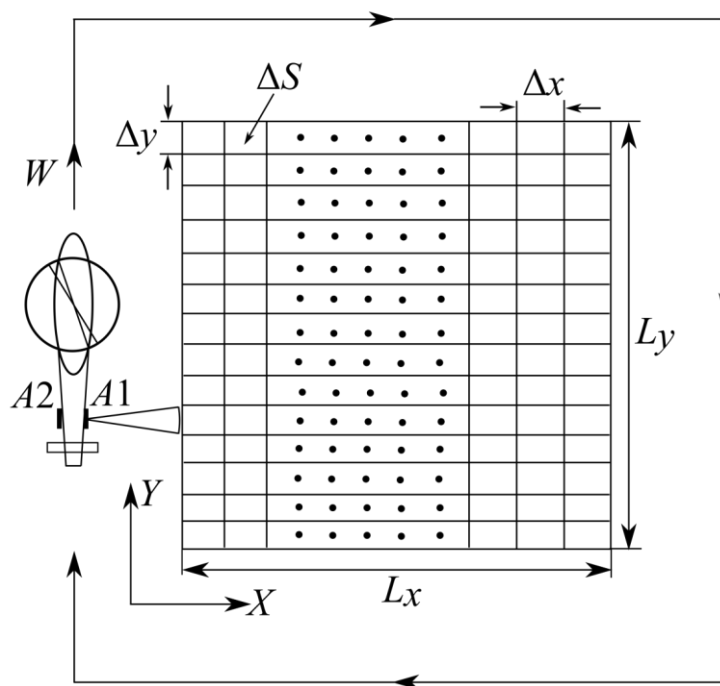


Рис. 1. Геометрия облучения ПП при обзоре места посадки с вертолѐта

Рабочая частота системы выбрана в *Ka* диапазоне, что обусловлено минимизацией размеров антенн, обеспечением высокой разрешающей способности бортовой РЛС, а также уменьшением влияния потерь на распространение радиоволн.

Высокая разрешающая способность по горизонтальной дальности

$$\Delta x = \frac{c}{2\Delta f \sin \theta_1}$$

обеспечивается использованием зондирующего радиосигнала с наносекундной длительностью, где Δf — ширина спектра зондирующего

сигнала; c — скорость распространения радиоволны; $\theta_1 = \arccos\left(\frac{h}{r_1}\right)$ — угол

места; h — высота полета вертолѐта; r_1 — наклонная дальность до центра кадра.

Разрешающая способность в азимутальном направлении Δy определяется размерами антенны, поскольку при выбранных высотах полета вертолѐта и размерах ПП работа РЛС в азимутальной плоскости происходит в ближней зоне антенн.

Однозначная связь между параметрами наблюдения и интерферометрической разностью фаз (ИРФ) ϕ на входе пространственно-

разнесенных приемников, несущая информацию об аппликате элемента разрешения, определяется по соотношению [11]:

$$z_i = h - r_1 \sqrt{1 - \left(\left(r_1^2 + b^2 - \left(r_1 - \frac{\lambda}{4\pi} \phi \right)^2 \right) / (2r_1 b) \right)^2}. \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны передатчика РСА, b – расстояние между антеннами.

3. Потенциальная точность РСБПВ

В соответствии с (1) аппликата элемента разрешения является функцией многих переменных и теоретически, при условии некоррелированности отдельных составляющих, результирующая погрешность оценки рельефа ПП определяется суммой погрешности каждого из параметров, входящих в (1). Для того чтобы определить потенциальную точностную характеристику измерения рельефа ПП с помощью РСБПВ необходимо получить соотношение только для флуктуационной погрешности $\sigma_{z\hat{\phi}}$, так как остальные погрешности по своей сути являются систематическими и могут быть скомпенсированы. Определяющая погрешность измерения рельефа ПП, как известно [12, 13], связана с оценкой ИРФ $\hat{\phi}$.

$$\sigma_{z\hat{\phi}} = \frac{\lambda h \tan \theta_1}{4\pi b \cos \theta_1} \sigma_{\hat{\phi}}; \quad \sigma_{\hat{\phi}} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}. \quad (2)$$

где $\sigma_{\hat{\phi}}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) ИРФ; N – кратность некогерентного накопления; γ – коэффициент корреляции между двумя РЛИ, образующими интерферометрическую пару.

Для используемого интерферометра с жесткой базой характерны декорреляции парных эхо-сигналов, приходящих на пространственно-разнесенные антенны двух приемников – $\gamma_{spatial}$ и за счет теплового шума в системе РСА – γ_{noise} .

Для каждого из факторов выводятся аналитические выражения и определяется результирующий коэффициент корреляции (3), в предположении

о том, что реальная поверхность является распределенной радиолокационной целью, состоящей из набора независимых парциальных отражателей внутри элемента разрешения, аппликаты которых распределены по нормальному закону [14]:

$$\gamma = \gamma_{spatial} \cdot \gamma_{noise},$$

$$\gamma_{spatial} = \left(1 - \frac{2b \cos \theta_1}{\lambda r_1 \tan \theta_1} \Delta r\right) \cdot \exp \left[-2\pi^2 \left(\frac{\sigma_h b \cos \theta_1}{\lambda r_1 \sin \theta_1} \right)^2 \right], \quad \gamma_{noise} = \frac{1}{1 + snr^{-1}}, \quad (3)$$

где Δr – разрешение по наклонной дальности; σ_h – СКО аппликат мелких неровностей на поверхности крупного рельефа; snr – отношение сигнал/шум.

Окончательные выражения для СКО оценки аппликат рельефа через СКО оценки ИРФ получаются в результате подстановки (3) в (2).

В результате, при параметрах радиолокационной РСБПВ: $f_c = 35$ ГГц, $h = 75$ м, $\theta = 30^\circ \dots 60^\circ$, $N = 4$, $\Delta r = 0,5$ м, $\Delta y = 0,8$ м, $\sigma_h = 7,77 \cdot 10^{-3}$ м, $snr = 13$ дБ, имеем следующую зависимость СКО оценки рельефа от размера базы интерферометра при различном визировании по углу места, рис. 2.

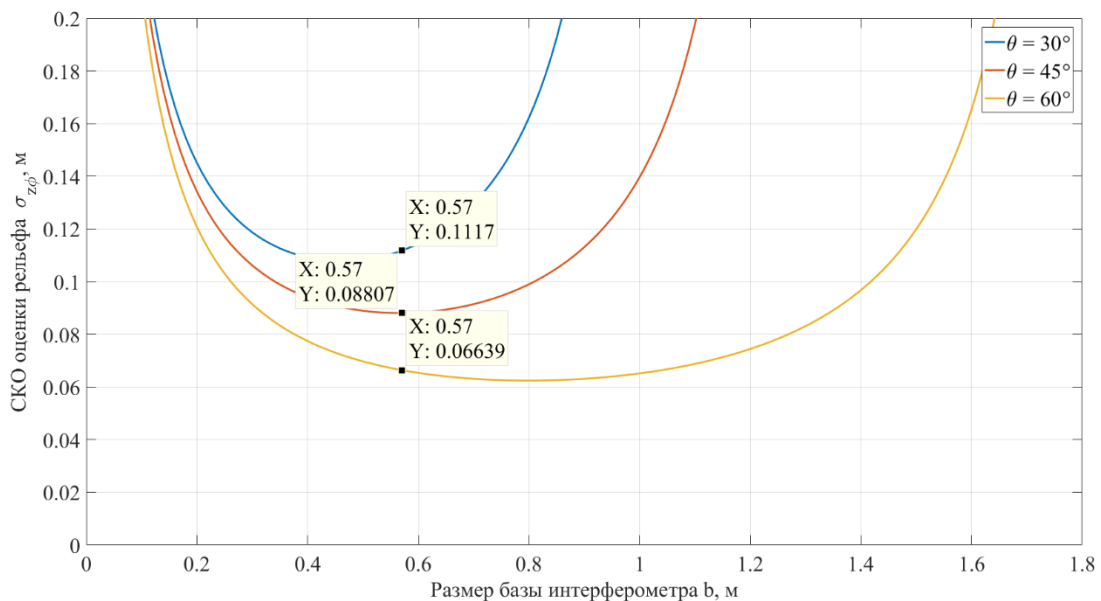


Рис. 2. Потенциальная точностная характеристика РСБПВ

Согласно рис. 2, предпочтительно выбрать размер жесткой базы интерферометра равным 0,57 м, при котором потенциальные значения точности

измерений рельефа ПП будут находиться в диапазоне примерно от 6 до 11 см.

4. Имитационная модель РСБПВ

В качестве целевой платформы моделирования использовался пакет прикладных программ MATLAB, в котором основным представителем набора инструментов для компьютерного моделирования РЛС является Phased Array System Toolbox (PAST) [15]. PAST включает в себя алгоритмы для генерации сигналов, формирования луча, оценки направления прихода сигнала, обнаружения целей, и пространственно-временной адаптивной обработки сигналов. Кроме того, возможность использования отдельных встраиваемых объектов в алгоритмическую структуру моделирования собственной разработки в среде MATLAB делает PAST предпочтительным инструментом для моделирования таких сложных систем как РСБПВ. В связи с вышеописанным, общую структуру имитационного моделирования работы ИРСА с использованием PAST в MATLAB можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рис. 3.

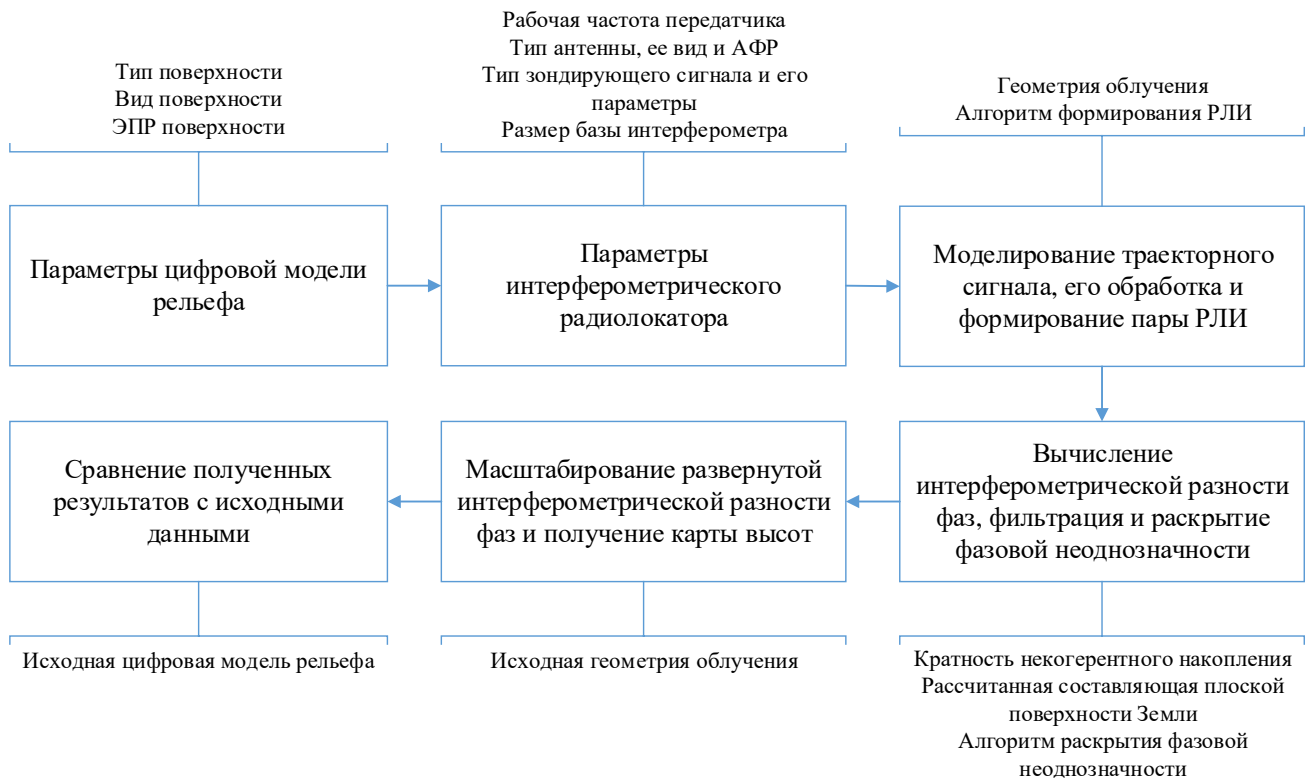


Рис. 3. Блок-схема структуры имитационной модели РСБПВ

Запрограммированная в среде MATLAB алгоритмическая структура [16], рис. 3, удобно представлена в виде графического интерфейса пользователя, изображенного на рис. 4.

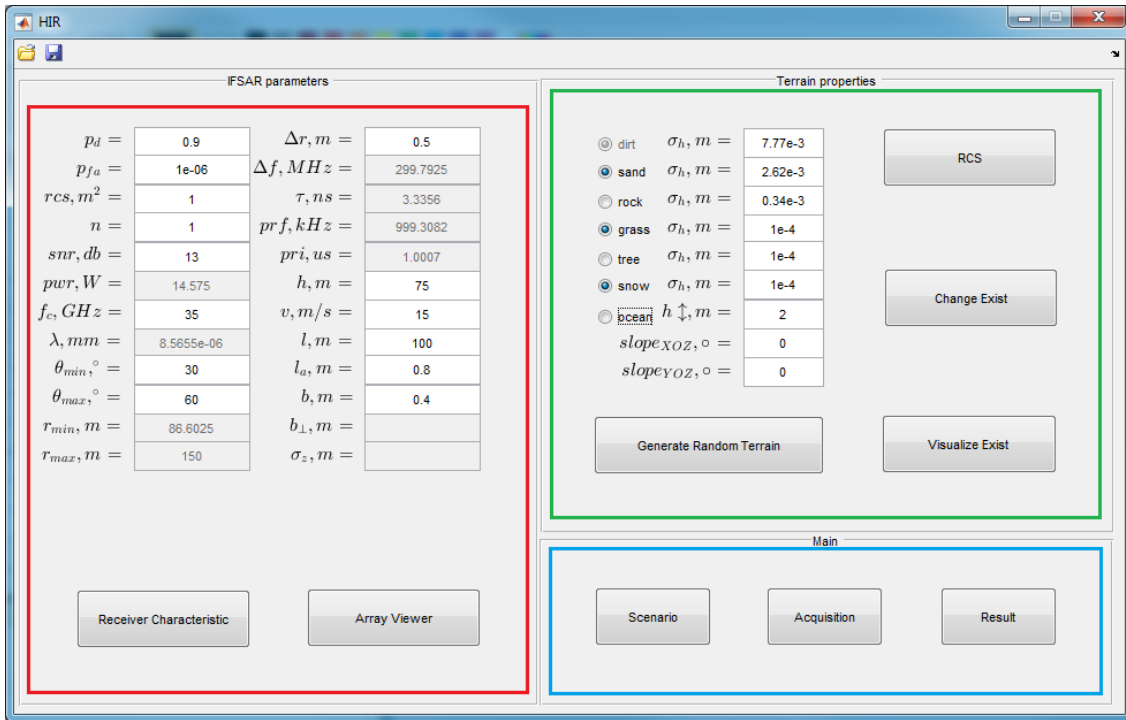


Рис. 4. Графический интерфейс пользователя модели РСБПВ

Разработанный интерфейс позволяет в интерактивном режиме задать следующие параметры моделирования: красная рамка – параметры РСБПВ, такие как p_d – вероятность правильного обнаружения; p_{fa} – вероятность ложной тревоги; r_{cs} – ЭПР цели; n – кратность некогерентного накопления; snr – отношение сигнал/шум; f_c – центральная частота передатчика; $\theta_{min}, \theta_{max}$ – пределы наблюдения по углу места; Δr – разрешающая способность по наклонной дальности; h – высота полета вертолета; v – скорость полета вертолета; l – размеры посадочной площадки; l_a – линейный размер антенны; b – размер интерферометрической базы. Кнопка *Receiver Characteristic* позволяет построить вероятностные характеристики РСБПВ, а *Array Viewer* позволяет наглядно рассмотреть амплитудно-фазовое распределение используемой волноводно-щелевой антенны в двумерных сечениях, рис. 5.

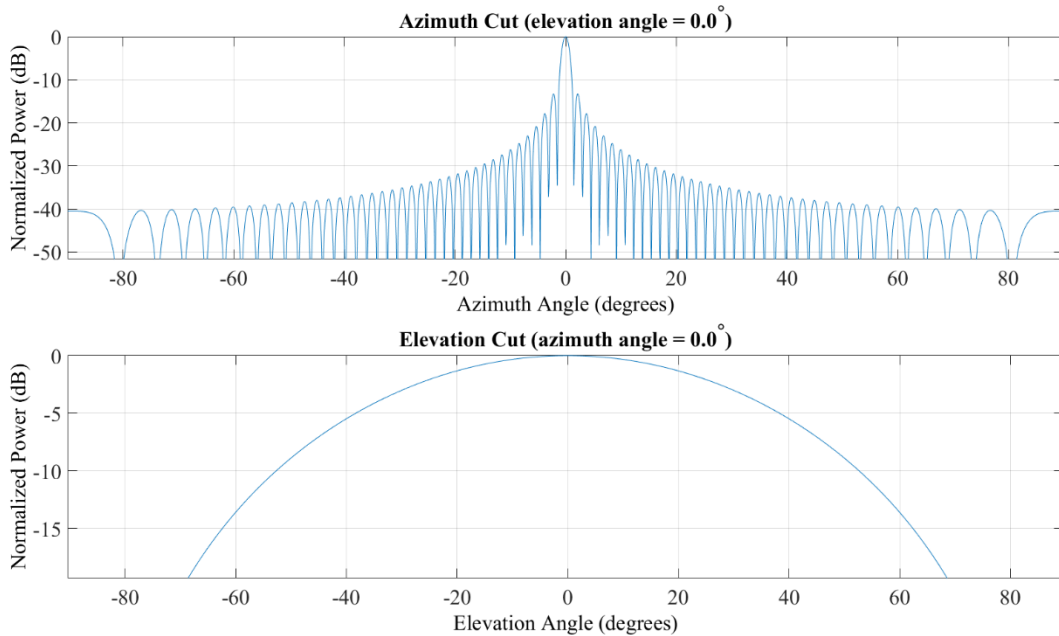


Рис. 5. Диаграмма направленности используемой антенны: сечения в азимутальной и угломестной плоскостях

Параметры, выделенные в зеленую рамку, позволяют задать тип поверхности в виде смеси почвы (*dirt*), песка (*sand*), камней (*rock*), травы (*grass*), деревьев (*tree*), снега (*snow*) и воды (*ocean*), для каждого из типа указать параметр мелкой шероховатости – σ_h , задать общий перепад высот – $h \updownarrow$ и углы наклона плоскости (*slope*) в соответствующих плоскостных сечениях (*XOZ*, *YOZ*). Интерактивные кнопки позволяют: сгенерировать квазислучайное распределение рельефа, близкое к натурным данным – *Generate Random Terrain*, посмотреть вид заданного рельефа местности – *Visualize Exist*, распределение ЭПР по посадочной площадке – *RCS*, а также внести необходимые изменения – *Change Exist*.

Кнопки, выделенные в синюю рамку, позволяют запустить полный процесс моделирования – *Acquisition*, анимированно посмотреть геометрию наблюдения – *Scenario* и результаты моделирования *Result*.

Наглядные результаты моделирования показаны на примере задаваемой пользователем ЦМР, изображенной на рис. 6 а. По типу поверхность состоит из воды, песка, почвы, травы и снега, оптическое изображение которой представлено на рис. 6б.

В качестве модели удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) для поверхностей типа травы, деревьев и снега используется экспериментально полученная натурная модель УЭПР для различного типа поверхностей, которая справедлива для СВЧ диапазона частот от 3 ГГц до 95 ГГц. Она учитывает СКО аппликаты мелкой шероховатости поверхности σ_h , угол падения на поверхность θ и длину волны λ и имеет следующий вид [16] (4):

$$\sigma^0(\theta, \sigma_h, \lambda) = A \left(\frac{\pi}{2} - \theta + C \right)^B \exp \left[-D / \left(1 + \frac{0.1\sigma_h}{\lambda} \right) \right], \quad (4)$$

где A, B, C, D – коэффициенты эмпирической модели. В [17] приведены значения для этих констант в диапазоне частот от 3 до 95 ГГц для указанных типов поверхностей.

Моделью УЭПР для поверхностей типа почвы, песка и камня служит полуэмпирическая модель обратного рассеяния земной поверхности [18] для трех типов поляризации, УЭПР которых (5):

$$\sigma_{VV}^0 = g \frac{\cos^x \theta}{\sqrt{p}} [\Gamma_{VV}(\theta) + \Gamma_{HH}(\theta)], \quad \sigma_{HH}^0 = p\sigma_{VV}^0, \quad \sigma_{HV}^0 = q\sigma_{VV}^0, \quad (5)$$

где

$$p = \left[1 - \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{\frac{1}{3\Gamma_0}} \exp(-0,4k\sigma_h) \right]^2; \quad g = 2,2 [1 - \exp(-0,2k\sigma_h)];$$

$$q = 0,23\Gamma_0^{0,5} [1 - \exp(-0,5k\sigma_h \sin\theta)]; \quad x = 3,5 + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} [10(1,64 - k\sigma_h)];$$

$\Gamma_{VV}(\theta)$ и $\Gamma_{HH}(\theta)$ – коэффициенты отражения Френеля для соответствующей поляризации; $\Gamma_0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2$ – коэффициент отражения в надир.

На рис.6 представлены характеристики ЦМР, для которой производится имитационное моделирование работы РСБПВ.

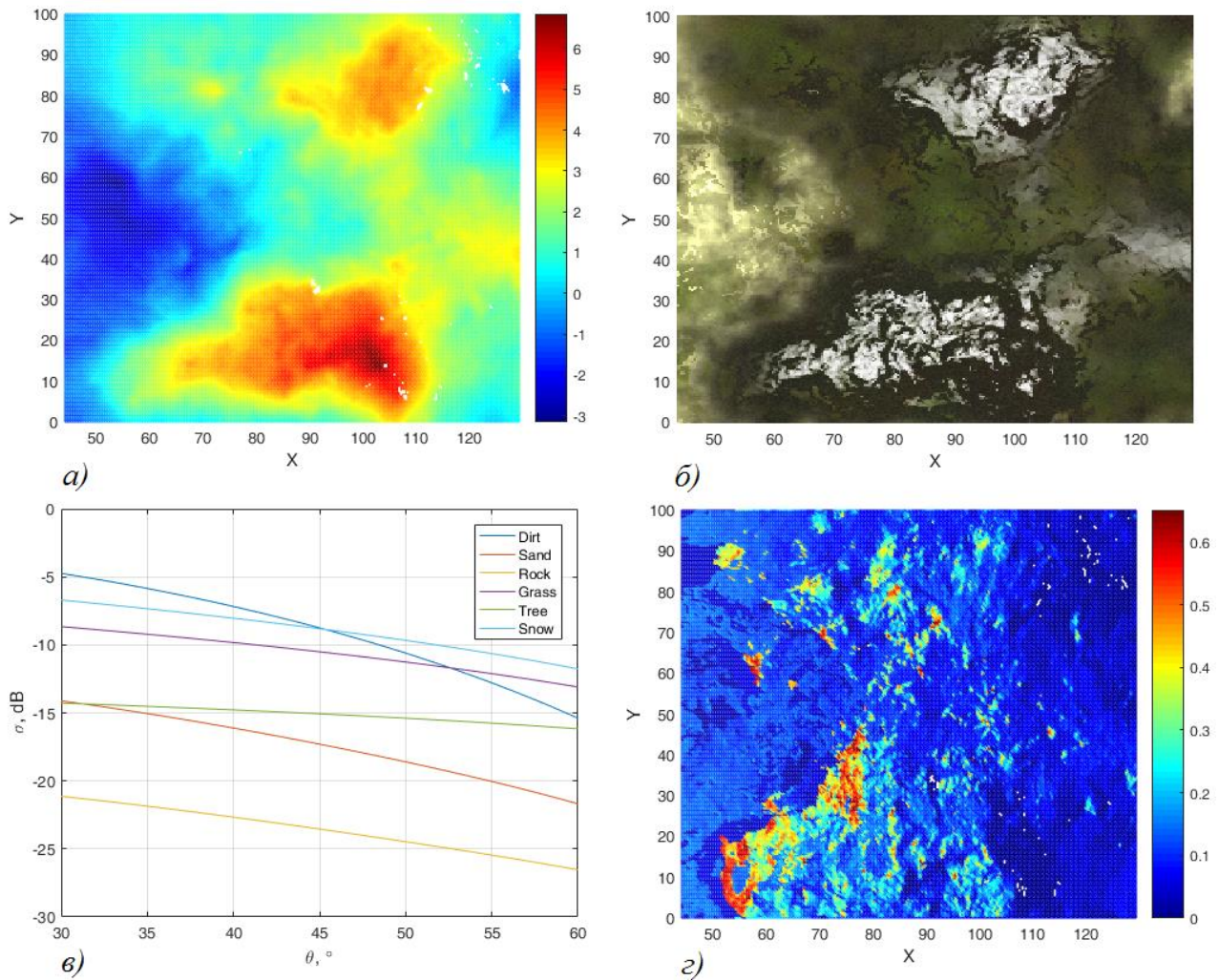


Рис. 6. Характеристики пользовательской ЦМР: а) высотная ЦМР; б) оптическое изображение ЦМР; в) УЭПР типов поверхностей, используемых при задании ЦМР; г) УЭПР заданной ЦМР в первом из сеансов наблюдения

Обработка траекторного сигнала по дальности происходит по алгоритму быстрой свертки с копией зондирующего сигнала наносекундной длительности с гауссовой огибающей. Синтез апертуры вдоль координаты азимута не производится. Результатом данного этапа обработки являются четыре пары комплексных РЛИ, амплитудная составляющая одного из пары которых изображена на рис. 7.

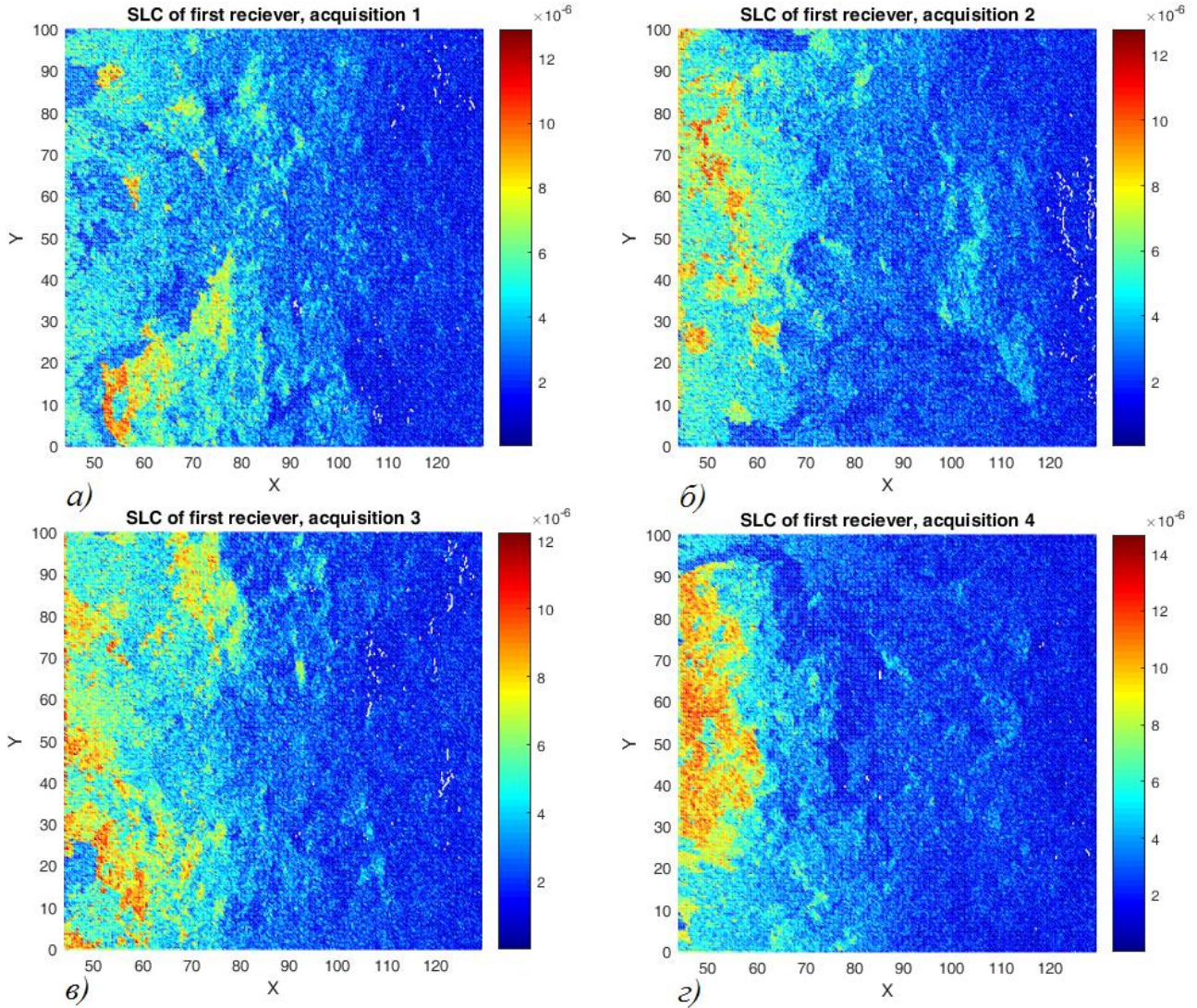


Рис. 7. Одно из пары РЛИ, полученное с: а) первого прохода; б) второго прохода; в) третьего прохода; г) четвертого прохода

Если обозначить РЛИ, полученных одновременно с каждого из приемников РСБПВ как \dot{P}_1 и \dot{P}_2 , то интерферограмма получается в результате их попиксельного комплексно-сопряжённого перемножения (6), а ИРФ определяется как аргумент от результата перемножения (7) или с помощью функции арктангенса (8):

$$I_{P_1 P_2}(x, y) = \dot{P}_1(x, y) P_2^*(x, y) = |P_1(x, y)| \cdot |P_2(x, y)| \exp\{j[\phi_{P_1}(x, y) - \phi_{P_2}(x, y)]\}, \quad (6)$$

$$\phi_{P_1 P_2}(x, y) = \sum_{n=1}^N \arg\{I_{P_1 P_2}(x, y)\}, \quad (7)$$

$$\phi_{R_1 P_2}(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\operatorname{Im} \left[\sum_{n=1}^N I_{R_1 P_2}(x, y) \right]}{\operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^N I_{R_1 P_2}(x, y) \right]} \right\} \quad (8)$$

Стандартная интерферометрическая обработка пары синтезированных РЛИ в каждом из пролетов РСБПВ [19, 20] состоит из следующих этапов: 1) получение ИРФ согласно (8); 2) операцию устранения линейного набега фазы по дальности, связанную с эффектом влияния «плоской» поверхности Земли, заключающуюся в вычитании из исходной ИРФ рассчитанную ИРФ для «плоской» поверхности; 3) операцию раскрытия фазовой неоднозначности, связанную с тем, что высотная разностно-фазовая составляющая ИРФ может изменяться на несколько интервалов кратных 2π , заключающуюся в восстановлении истинной разности фаз по значениям, приведенным к промежутку $(-\pi; \pi]$; здесь применен известный алгоритм 2-D разворачивания фазы – алгоритм Гольдшейна-Вернера-Зебкера [21], являющийся типичным представителем методов следящих за путями; 4) масштабирование развернутой ИРФ и получение карты высот рельефа согласно однозначной связи между изменениями ИРФ и изменениями высоты рельефа поверхности (1). Результаты каждого этапа последовательно изображены на рис. 8 – 12.

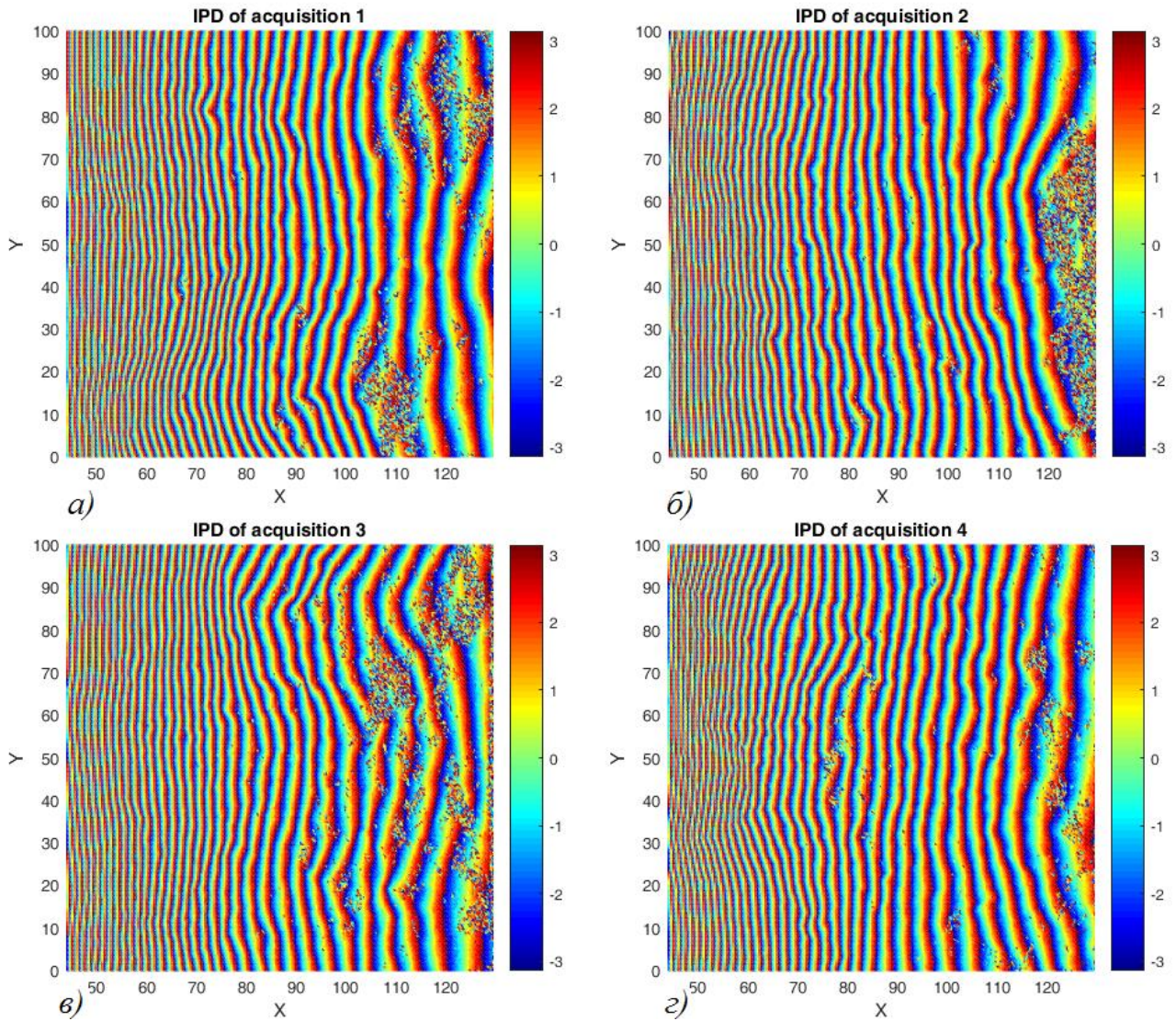


Рис. 8. – ИРФ, полученная с: а) первого прохода; б) второго прохода; в) третьего прохода; г) четвертого прохода

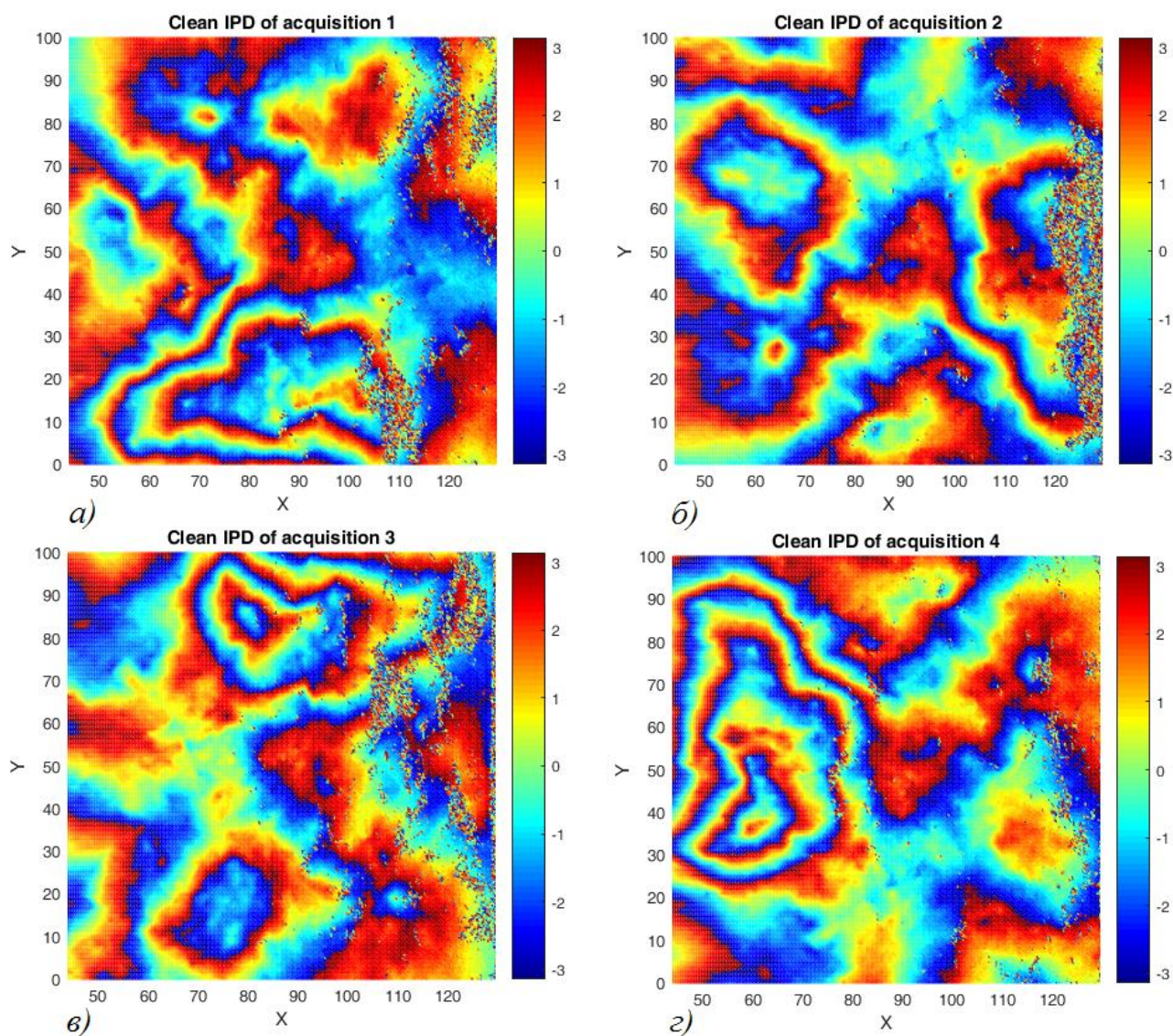


Рис. 9. –ИРФ с отфильтрованным линейным набегом ИРФ, полученная с: а) первого прохода; б) второго прохода; в) третьего прохода; г) четвертого прохода

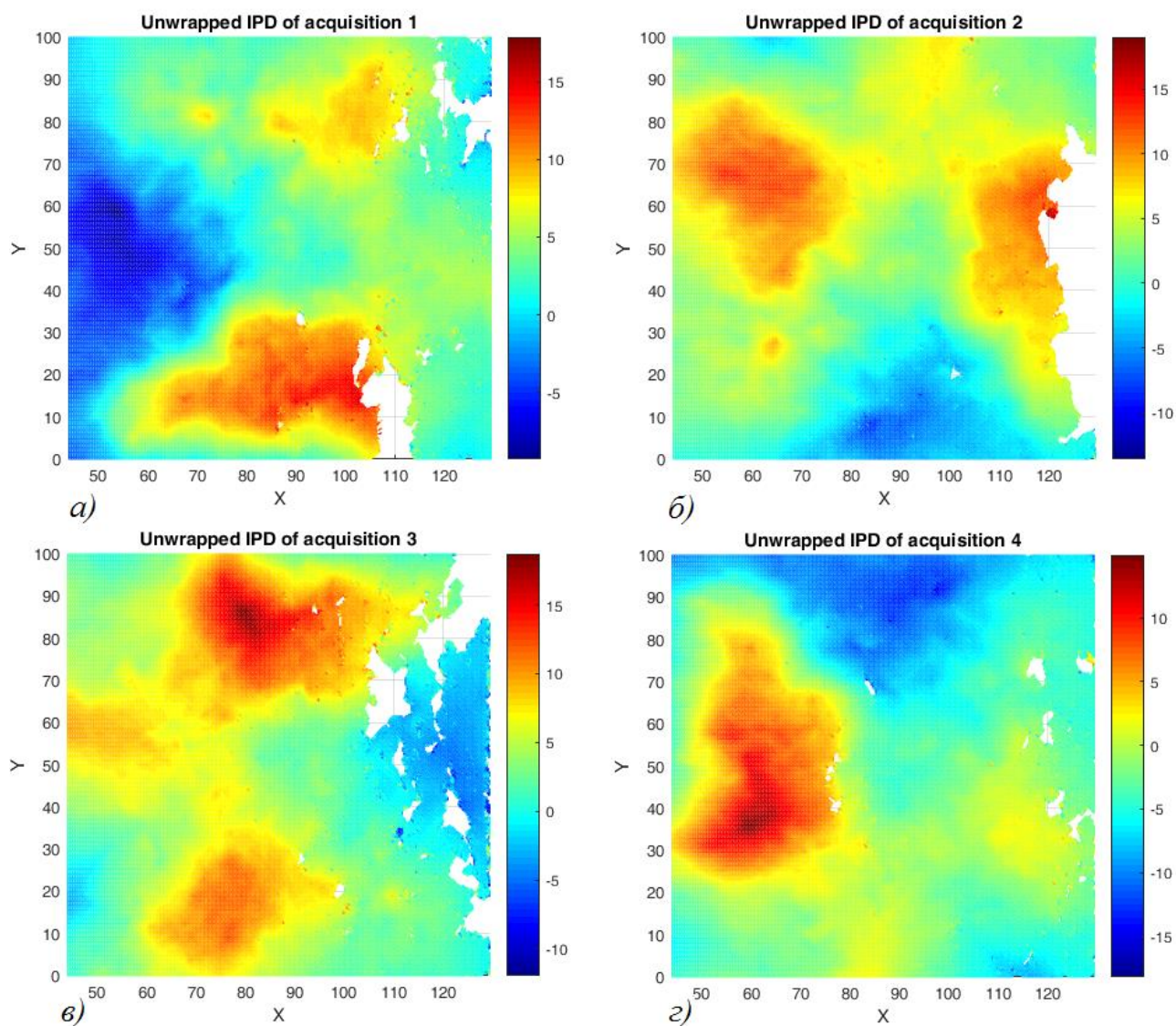


Рис. 10. – Развернутая ИРФ по алгоритму раскрытия фазовой неоднозначности Гольдштейна-Вернера-Зибкера, полученная с: а) первого прохода; б) второго прохода; в) третьего прохода; г) четвертого прохода

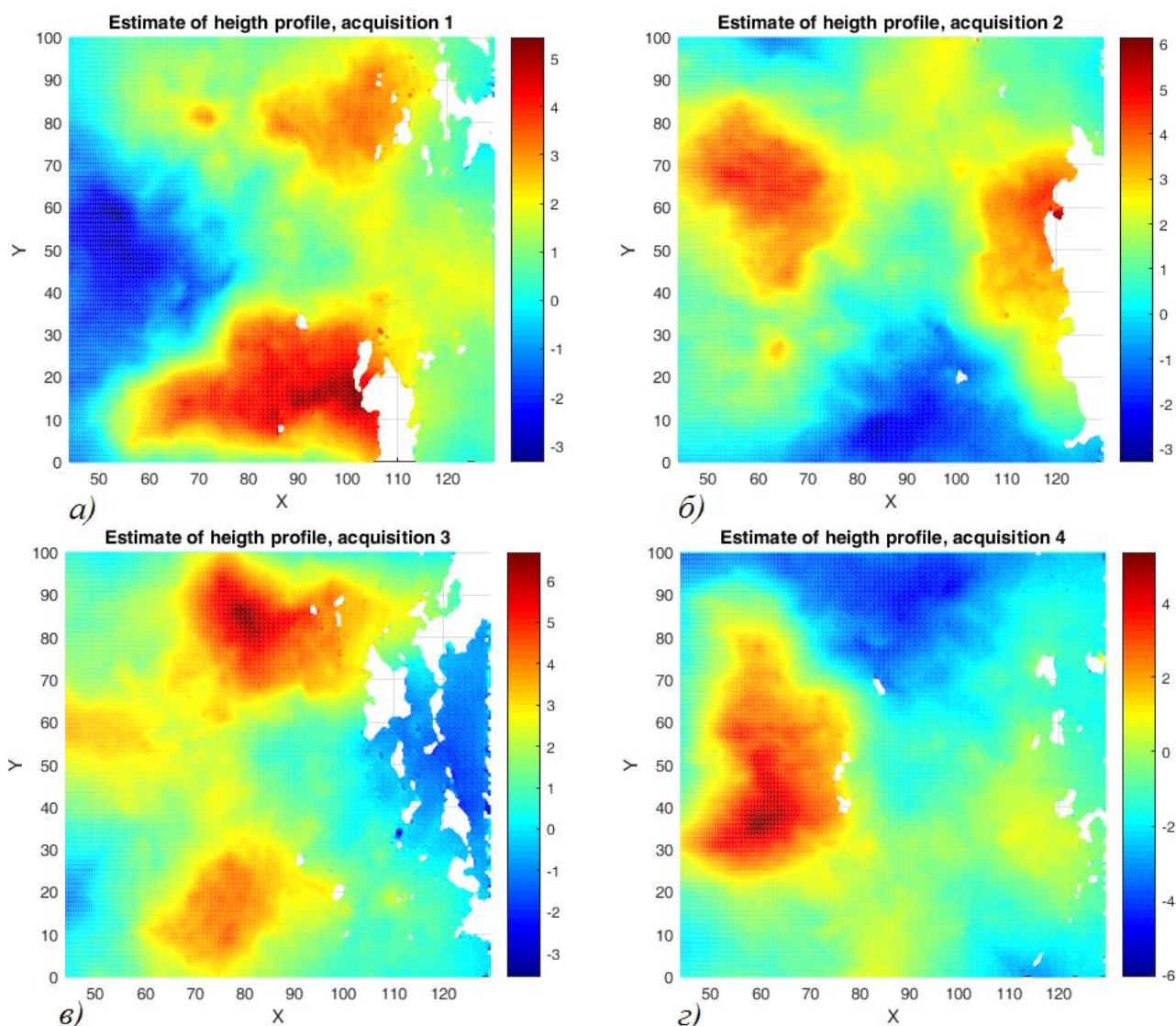


Рис. 11. –Восстановленный рельеф ПП, оцененный с: а) первого прохода; б) второго прохода; в) третьего прохода; г) четвертого прохода

Полученные в результате моделирования точности оценки рельефа ПП $\hat{\sigma}_{z\phi} \approx 7...12$ см близки к потенциально возможным.

5. Заключение

В работе проведено имитационное моделирование алгоритма радиолокационной интерферометрической съемки поверхности ПП для бортовой РЛС, которая дает возможность получения высококачественного трехмерного изображения ПП с определением характера рельефа с требуемой точностью.

Результаты имитационного моделирования интерферометрической обработки сигналов РСБПВ подтвердили возможность его использования в качестве перспективного инструмента при решении задач определения опасных неровностей и посторонних объектов на посадочной площадке по полученным разностно-фазовым интерферометрическим изображениям с борта вертолета.

Основным преимуществом использования РСБПВ по сравнению с другими методами безопасной посадки вертолета на неподготовленную площадку является независимость его работы от погодных условий и времени суток.

Материалы статьи докладывались на XII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» [11].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00184.

Литература

1. Rotary–Wing Brownout Mitigation: Technologies and Training // A Technical Report by NATO Science and Technology Organization, 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/234675186_Rotary-wing_Brownout_Mitigation_Technologies_and_Training
2. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в первом полугодии 2016 года. Управление инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта Российской Федерации, 2016. URL: <https://docplayer.ru/31805703-Analiz-sostoyaniya-bezopasnosti-poletov-v-grazhdanskoy-aviacii-rossiyskoy-federacii-v-pervom-polugodii-2016-goda.html>
3. F. Previc, W. Ercoline. Nonvisual Spatial Orientation Mechanisms // Spatial Disorientation in Aviation. Progress in Astronautics and Aeronautics, 2004, Vol. 203, pp. 37–94, DOI: [10.2514/5.9781600866708.0037.0094](https://doi.org/10.2514/5.9781600866708.0037.0094).

4. Cross J.; Schneider J., Cariani P. MMW radar enhanced vision systems: the Helicopter Autonomous Landing System (HALS) and Radar-Enhanced Vision System (REVS) are rotary and fixed wing enhanced flight vision systems that enable safe flight operations in degraded visual environments // Proc. SPIE 8737, Degraded Visual Environments: Enhanced, Synthetic, and External Vision Solutions, 16 May 2013, 87370G, DOI: [10.1117/12.2016302](https://doi.org/10.1117/12.2016302).
5. Sykora B. BAE systems brownout landing aid system technology (BLAST) system overview and flight test results // Proc. SPIE 8360 Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications IX, 83600M, 1 May 2012. DOI: [10.1117/12.918506](https://doi.org/10.1117/12.918506).
6. Savage J.; Harrington W.; McKinley A. R.; Burns H.M.; Braddom S., et al. 3D-LZ helicopter lidar imaging system // Proc. SPIE 7684 Laser Radar Technology and Applications XV, 768407, April 29, 2010. DOI: [10.1117/12.853625](https://doi.org/10.1117/12.853625).
7. Murray J.T., Seely J., Plath J; Gotfreson E., Engel J., et al. Dust-Penetrating (DUSPEN) “see-through” lidar for helicopter situational awareness in DVE // Proc. SPIE 8737, Degraded Visual Environments: Enhanced, Synthetic, and External Vision Solutions 2013, 87370H, 16 May 2013. DOI: [10.1117/12.2016439](https://doi.org/10.1117/12.2016439).
8. Руководство по лётной эксплуатации вертолётa Ми-8. М.: Департамент воздушного транспорта министерства транспорта РФ, 1996 г. URL: http://airspot.ru/book/file/237/mi-8_rle.pdf
9. Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. Локационные методы исследования объектов и сред. Учебник для студентов высших учебных заведений; под редакцией А.И. Баскакова. М.: Издательский центр «Академия», 2011, 384 с.
10. Комаров А.А., Климова А.П. Выбор оптимальных параметров антенной системы бортовой РЛС безопасной посадки вертолётa // Доклады XII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, Москва, 26–28 ноября 2018 г., с. 60-63.

11. Комаров А.А., Шимкин П.Е. Определение опасных неровностей и посторонних объектов на посадочной площадке по полученным разностно-фазовым интерферометрическим изображениям с борта вертолѐта // Доклады XII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, Москва, 26–28 ноября 2018 г., с. 246-250.
12. Rodriguez E., Martin J.M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. // IEE Proceedings (Radar and Signal Processing), 1992, Vol. 139, No.2, pp. 147–159.
13. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems, vol. 14, 1998, pp. R1–R54.
14. Баскаков А.И., Ка Мин Хо. Анализ влияния фазовых шумов на точностные характеристики интерферометрических РСА с «жесткой» базой // Исследование Земли из космоса, 1998, № 2, с. 43 — 50.
15. Phased array system toolbox. URL: <https://matlab.ru/products/phased-array-system-toolbox/Phased-array-system-toolbox-Ru.pdf>
16. Интерферометрическая модель интерферометрического радиолокатора вертолетного базирования: свидетельство 2018663114 / П.Е. Шимкин; заявл. 10.10.2018 г.; опубл. 22.10.2018 г.
17. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of Modern Radar: Basic Principles. SciTech Publishing. Raleigh, NC, 2010, 934 p.
18. Adib Nashashibi, Fawwz T., Ulaby, and Kamal Sarabandi. Measurement and modeling of the millimeter-wave backscatter response of soil surfaces. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 34, No. 2, March 1996. pp. 561–572.
19. Richards M.A. A beginner’s guide to interferometric SAR concepts and signal processing [AESS tutorial IV]. // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, Vol. 22, No. 9. pp. 5–29.

20. Melvin W.L., Sheer J.A. Interferometric SAR and coherent exploitation // Principles of modern radar: advanced techniques / SciTech Publishing. Edison, NJ, 2013, pp. 337 – 398.
21. Goldshtein R.M., Zebker H.A., Werner C.L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. Radio Science, Vol. 23, № 4, 1988, pp. 713–720.

Для цитирования:

П. Е. Шимкин, А. А. Комаров. Имитационная модель интерферометрического радиолокатора вертолетного базирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.4