

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.396

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА
ПОВЕРХНОСТИ НЕПОДГОТОВЛЕННОЙ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ
С БОРТА ВЕРТОЛЕТА

© 2019 г. А. И. Баскаков¹, О. В. Чернояров^{1,2,3,*}, А. А. Комаров¹, М. С. Михайлов¹

¹Национальный исследовательский университет “МЭИ”,

Российская Федерация, 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

²Международная лаборатория статистики случайных процессов и количественного финансового анализа
Томского государственного университета,

Российская Федерация, 634050 Томск, просп. Ленина, 36

³Майкопский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 385000 Майкоп, ул. Первомайская, 191

*E-mail: chernoyarovov@mpei.ru

Поступила в редакцию 29.01.2018 г.

После доработки 29.01.2018 г.

Принята к публикации 02.02.2019 г.

Рассмотрены возможности радиолокационной интерферометрической съемки поверхности посадочной площадки с борта вертолета. Показано, что если полученную таким образом разностно-фазовую зависимость наложить на радиояркостную картину отражения по элементам разрешения после облучения исследуемой поверхности, то удастся реконструировать высококачественное трехмерное изображение посадочной площадки и с высокой точностью определить ее возможный уклон, характеристики ее рельефа и контуры находящихся на ней посторонних объектов.

DOI: 10.1134/S0033849419060019

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин аварий вертолетов является ненадежность средств обеспечения их посадки на неподготовленную посадочную площадку (ПП) в сложных метеоусловиях в дневное и ночное время при плохой визуальной видимости. Даже в случае хороших погодных условий, но при запыленной или заснеженной земной поверхности возникает опасность для жизни летчика и экипажа при посадке. Дело в том, что массивное пылевое или снежное 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. Большинство вертолетов оборудованы спутниковыми навигационными системами и бортовыми радиовысотомерами, обеспечивающими летчику при полете и при снижении точное определение координат, но эти системы не обеспечивают необходимую информацию о состоянии рельефа ПП и возможных посторонних объектах на ней. Известны также современные методы синтеза алгоритмов многоканальной адаптивной обработки с использованием антенных решеток при обнаружении и разрешении сигналов в усло-

виях параметрической априорной неопределенности [1, 2]. В данной работе предложен иной подход: показано, что при известных характеристиках антенной системы и геометрии облучения задача обработки сигналов, отраженных от посторонних объектов на ПП и от элементов рельефа поверхности, может быть эффективно решена с использованием алгоритма радиолокационной интерферометрической съемки, обеспечивая наглядную визуализацию поверхности ПП.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние годы радиолокационные интерферометрические методы используются для оперативного высокоточного картографирования больших участков подстилающей поверхности, поскольку функциональные возможности и информативность комплекса бортовых средств дистанционного радиозондирования существенно возрастают при получении трехмерных изображений местности в широкой полосе обзора и сохранении необходимой разрешающей способности. Интерферометрический метод предполагает получение информации о возвышениях рельефа в каждом элементе разрешения путем измерения

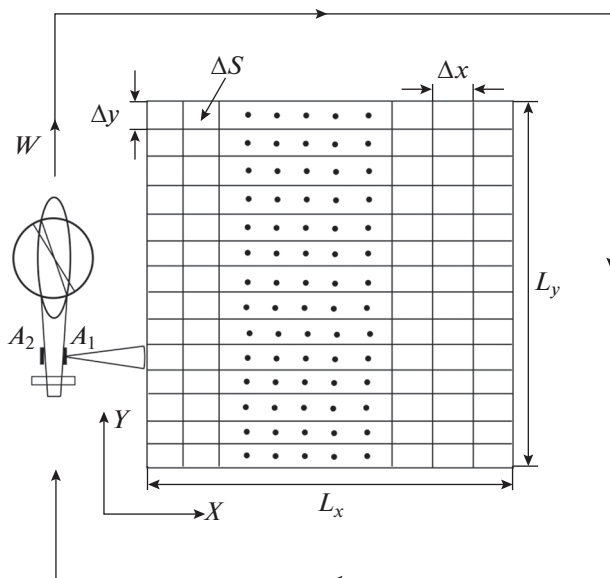


Рис. 1. Траектория полета вертолета при обзоре места посадки: L_x , L_y – размеры ПП по осям x и y , Δx , Δy – разрешающая способность по дальности и азимуту соответственно, ΔS – площадь элемента разрешения.

разности фаз отраженных сигналов на входах двух разнесенных антенных систем [3, 4]. При этом возможны три варианта реализации интерферометрической съемки:

1) с “мягкой” базой, где предполагается съемка одной и той же области поверхности с однопозиционной РЛС на двух или более последовательных пролетах с некоторым временным интервалом;

2) с “жесткой” базой, при которой расстояние между антеннами фиксировано и реализовано на одном носителе, при этом одна из антенн работает на излучение и прием, а другая – только на прием;

3) с переменной базой, сформированной из однопозиционных РЛС на разных носителях, находящихся на синхронно связанных траекториях полета.

Для оперативного (в реальном времени) получения необходимой информации о состоянии рельефа ПП и возможных посторонних объектах на ней наиболее подходит интерферометрическая съемка с “жесткой” базой.

Радиолокационная съемка поверхности ПП для обеспечения безопасности вертолета при заходе на посадку со скоростью не более 15 м/с должна производиться с высоты $H = 50 \dots 100$ м. В начале съемки координаты вертолета уточняются с помощью спутниковой навигационной системы. Согласно летному регламенту [5] необходимо, чтобы размер ПП составлял не менее двух диаметров

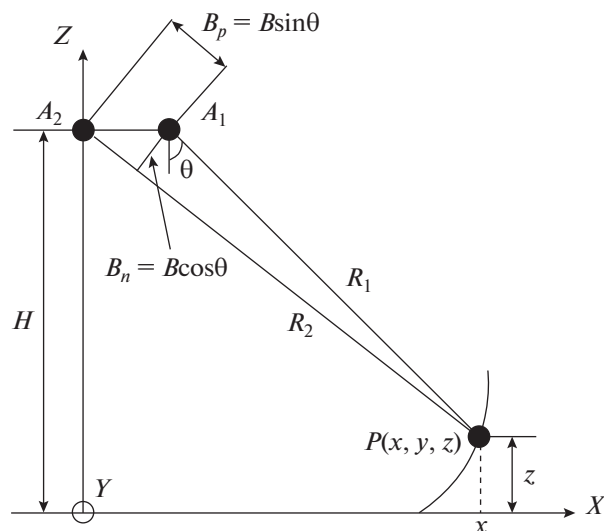


Рис. 2. Геометрия облучения для расчета параметров зондирующего сигнала.

вертолетного винта, т.е. порядка 90×90 м. При этом перед посадкой на неподготовленную ПП вертолет должен совершить маневр, траектория которого соответствует облету выбранной ПП, как показано на рис. 1. Выбор рабочей частоты системы в Ка-диапазоне обусловлен минимизацией размеров антенн, обеспечением высокой разрешающей способности бортовой РЛС, а также влиянием потерь на распространение радиоволн.

Антенная система РЛС состоит из двух антенн, направленных на один и тот же участок поверхности ПП, – приемопередающей A_1 и приемной A_2 , реализованных как волноводно-щелевые решетки, связанные “жесткой” базой размером B , параллельно укрепленных на хвостовой балке вертолета и движущихся вдоль оси y со скоростью W (рис. 2). Координаты фазовых центров антенн A_1 и A_2 бортовой РЛС при горизонтальной ориентации базы соответствуют значениям (x_1, y_0, z_1) и (x_2, y_0, z_1) , а координаты текущего элемента облучения поверхности P – значениям (x, y, z) . Соотношение линейной длины антенны l_a и длины радиоволны λ позволяет формировать узкий луч в азимутальной плоскости Δy . Ширина диаграмм направленности антенн A_1 и A_2 в угломестной плоскости идентична и охватывает диапазон углов, определяемый размером ПП при выбранной высоте полета H .

Высокая разрешающая способность по дальности

$$\Delta x = c / (2\Delta f \sin \theta)$$

обеспечивается использованием зондирующего радиосигнала с наносекундной разрешающей спо-

Таблица 1. Параметры поверхностей

Тип поверхности	s , мм	l , мм	ϵ_r	Ссылка
Влажное вспаханное поле	7.77	20	$5.9 + j3.5$	[6, 7]
Сухой песок	2.62	30	$3.1 + j0.3$	[7, 8]
Бетонная полоса	0.34	4.2	$2.5 + j0.65$	[5, 8]
Мокрый асфальт с дождевой водой	0.34	0.5	$7.4 + j4.8$	[9]

способностью. Здесь c – скорость света, Δf – ширина спектра зондирующего сигнала, $\theta = \arccos(H/R_1)$ (R_1 – расстояние от приемопередающей антенны А1 до участка облучаемой поверхности). Разрешающая способность в азимутальном направлении Δu определяется размерами антенны, поскольку при выбранных высотах полета вертолета и размерах ПП в конкретных условиях полета работа РЛС в азимутальной плоскости происходит в ближней зоне антенн.

2. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При разработке теоретической модели обратного рассеяния земной поверхностью в Ка-диапазоне частот были рассмотрены четыре типа открытой поверхности: 1) влажное вспаханное поле с большими комьями почвы, 2) сухой песок, 3) бетонная полоса, 4) мокрая асфальтированная дорога с дождевой водой толщиной 0.5 мм. В таблице 1 приведены среднеквадратичная ордината шероховатостей s , корреляционная длина l и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r данных поверхностей.

Обозначим через σ^0 удельную эффективную поверхность рассеяния (ЭПР). Используя описанную в работах [6, 7] полуэмпирическую модель для трех типов поляризации – горизонтальной (HH), вертикальной (VV) и кросс-поляризации (HV), представим обратное рассеяние радиоволн от указанных выше поверхностей следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{VV}^0 &= g \frac{\cos^2 \theta}{\sqrt{p}} [\Gamma_{VV}(\theta) + \Gamma_{HH}(\theta)], \\ \sigma_{HH}^0 &= p \sigma_{VV}^0, \quad \sigma_{HV}^0 = q \sigma_{VV}^0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь θ – угол падения, Γ_{VV} и Γ_{HH} – коэффициенты отражения Френеля для соответствующей поляризации, $\Gamma_0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2$ – коэффициент отражения в надир, $g = 2.2 [1 - \exp(-0.2ks)]$, $b = 3.5 + (1/\pi) \arctg [10(1.64 - ks)]$, $p = [1 - (2\theta/\pi)^{1/3} \exp(-0.4ks)]^2$, $q = 0.23 \sqrt{\Gamma_0} \times [1 - \exp(-0.5ks \sin \theta)]$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Согласно [10] оценка интенсивности фоновое сигнала от поверхности ПП рассчитывается с учетом потерь в антенно-фидерном тракте и в наихудших погодных условиях, т.е. в дожде. Отношение фон/шум определяется основным уравнением радиолокации:

$$q = 10 \lg \left[\frac{PG^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 N_0 \Delta F} \right] + \sigma_{\Delta S} - \gamma - \eta, \quad (2)$$

где P – мощность передатчика, G – коэффициент усиления антенны, R – дальность действия, N_0 – спектральная плотность мощности шума на входе приемника, ΔF – полоса приемника, $\sigma_{\Delta S} = \sigma_{pp}^0 \Delta S$ – ЭПР поверхности элемента разрешения ПП, σ_{pp}^0 – удельная ЭПР поверхности (1) для соответствующей поляризации pp (VV , HH или HV), γ – потери радиоволн в дожде, запыленной или заснеженной среде, η – потери в антенно-фидерном тракте.

Процесс восстановления поля крупномасштабных неровностей поверхности ПП проводится в предположении линейной трехмасштабной модели отражающей поверхности. Согласно этой модели высота неровности в каждой точке наблюдаемой области поверхности представляет собой линейную суперпозицию трех пространственно-временных полей: поля мелких неровностей, сравнимых с длиной облучающей радиоволны и образующих диффузно-рассеянный сигнал, поля крупных неровностей, существенно превышающих λ и придающих отраженному сигналу дополнительную амплитудно-фазовую модуляцию, и поля мезомасштабного рельефа, определяющего средний уклон подстилающей поверхности. Предполагается, что характеристики мезомасштабного рельефа постоянны в области поверхности ПП. Поля мелких и крупных неровностей считаем взаимно независимыми однородными случайными полями в пространственно-временной области наблюдения.

Отражения от элементарной разрешаемой площадки ΔS_n образуют единичный отсчет принимаемого сигнала, соответствующий n -му интервалу дальности. Будем считать, что Δz – неизвестная высота разрешаемой площадки, складывающейся из крупномасштабных неровностей и приращений мезомасштабного рельефа, отсчитываемых от

плоскости $z_0 = 0$. Необходимо отметить, что в результате обратного рассеяния от поверхности Земли создается фон, заметно влияющий на характеристики обнаружения посторонних объектов на ПП. При таких условиях обнаружение посторонних объектов должно проводиться с учетом отношения сигнал/(фон + шум).

В недавних публикациях отечественных авторов [11–14 и др.] разработаны новые эффективные алгоритмы автоматизации обнаружения неподвижных и медленно движущихся техногенных объектов по контрасту их ЭПР на фоне отражений от поверхности Земли и по поляризационным признакам. Найдены энергетические соотношения сигнал/(фон + шум) при реализации процедуры поиска техногенных объектов на ПП вертолета, обеспечивающие приемлемое качество функционирования этих алгоритмов обнаружения на практике. Ниже рассмотрен способ, позволяющий существенно повысить визуализацию техногенных объектов на ПП при использовании разностно-фазовой информации отраженных сигналов, приходящих на две антенны. Показано, что, поскольку обнаружение опасных неровностей рельефа ПП, таких как холмы и овраги, должно проводиться с учетом отношения фон/шум, разностно-фазовая информация дает возможность выделить на радиолокационных изображениях крупные неровности рельефа с определением их относительной высоты.

3. АЛГОРИТМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ ДЛЯ БОРТОВОЙ РЛС

Радиолокационные эхо-сигналы, излучаемые первой антенной и полученные в двух приемниках, после соответствующей обработки формируют интерферограмму [15]. Алгоритм расчета высоты z элемента разрешения по разности фаз сигналов, приходящих на две антенны с одного и того же элемента разрешения, из геометрии визирования определяется следующим выражением (см. рис. 2):

$$z = H - R_1 \left\{ \cos \alpha \sqrt{1 - \left[\frac{R_1^2 + B^2 - (R_1 - \Phi/k)^2}{2BR_1} \right]^2} + \sin \alpha \left[\frac{R_1^2 + B^2 - (R_1 - \Phi/k)^2}{2BR_1} \right] \right\}, \quad (3)$$

где R_1 – наклонная дальность, H – высота полета вертолета, α – угол наклона базы относительно горизонта, в рассматриваемом случае равный нулю, B – антенная база интерферометра, $\Phi = (2\pi/\lambda) B \sin \theta$ – разность фаз, k – волновое число.

Общая погрешность измерения высоты неровности z элемента разрешения вызвана следующими причинами: дисперсией оценки высоты элемента разрешения $\sigma_{z\Phi}^2$ из-за погрешности оценки разности фаз, погрешностью юстировки угла наклона базы $\sigma_{z\alpha}^2$, погрешностью измерения высоты полета вертолета σ_{zH}^2 , погрешностью измерения расстояния до элемента разрешения $\sigma_{zR_1}^2$, погрешностью неточного знания размера базы σ_{zB}^2 . При определении высоты полета вертолета среднеквадратичную ошибку оценки высоты H можно уменьшить до нескольких сантиметров с помощью современных радиовысотометров, значения других составляющих определяются конструктивными особенностями антенной системы и стабильностью пилотирования вертолета. Наиболее существенное влияние на точность измерения высоты неровности z оказывает погрешность измерения разности фаз сигналов интерферометра.

Интерферограмма радиолокационной съемки формируется в РЛС умножением одного изображения на комплексно-сопряженное второе изображение того же сюжета, но полученное с другой антенны. Модель радиолокационной интерферометрической съемки, использующей два комплексных изображения, показана на рис. 3, где $\exp(\cdot)$ представляет сдвиг фазы, появляющейся из-за распространения радиоволн, $J_{1,2}$ – импульсная характеристика тракта, n – тепловой шум, \hat{g}_{1n} – комплексный выходной сигнал РЛС, B_p – задержка для компенсации запаздывания сигнала на базе.

Для анализа разности фаз воспользуемся методом максимального правдоподобия. Тогда оценка разности фаз с каждого элемента разрешения на поверхности запишется в виде [16]

$$\hat{\Phi} = \arctg \left[\frac{\text{Im} \left(\sum_{n=1}^N \hat{g}_{1n} \hat{g}_{2n}^* \right)}{\text{Re} \left(\sum_{n=1}^N \hat{g}_{1n} \hat{g}_{2n}^* \right)} \right], \quad (4)$$

где N – кратность некогерентного накопления.

Погрешность оценки разности фазы σ_Φ , которая возникает при обработке эхо-сигналов, можно записать в виде

$$\sigma_\Phi = \sqrt{(\hat{\Phi} - \langle \hat{\Phi} \rangle)^2} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1 - \gamma_q^2}}{\gamma_q}, \quad (5)$$

где

$$\gamma_q = f(\Omega_\eta) M_\chi(\Omega_\chi) / (1 + 1/q) \quad (6)$$

– корреляционная связь эхо-сигналов, приходящих на две антенны [16, 17],

$$f(\Omega_\eta) = \exp \left[-(B \cos \theta / k_1 \lambda R \text{tg} \theta)^2 (c/2\Delta f)^2 \right]$$

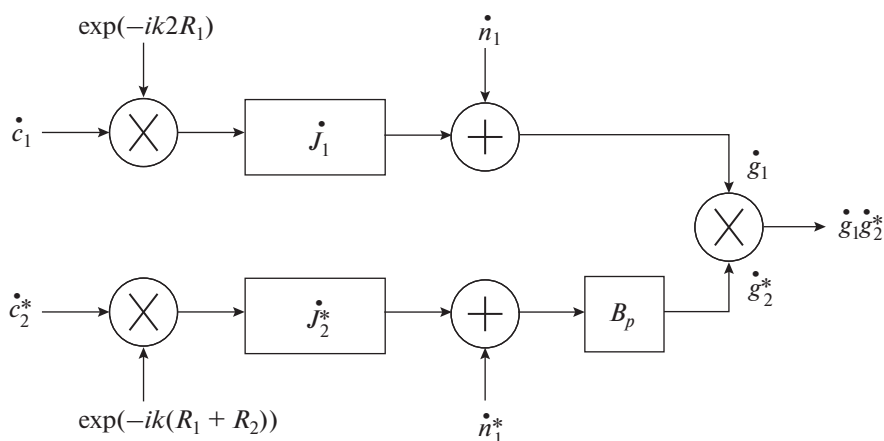
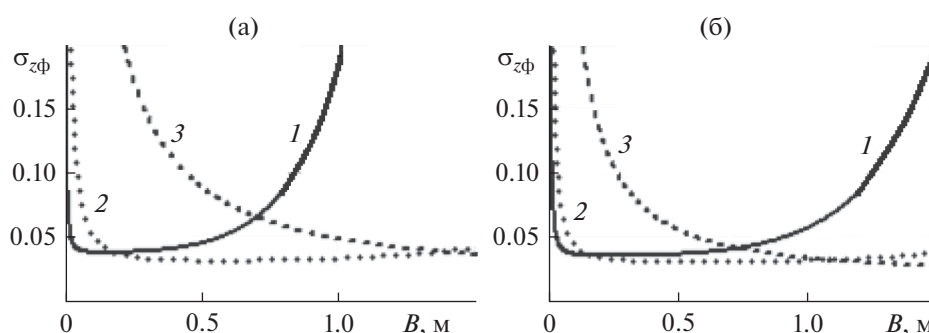


Рис. 3. Модель радиолокационной интерферометрической съемки.

Рис. 4. Зависимость флуктуационной погрешности измерения ординат элемента разрешения $\sigma_{z\Phi}$ от размера антенной базы B при $\sigma_\chi = 7.8$ (а) и 2.62 мм (б) и различных углах визирования: $\theta = 30^\circ$ (1), 45° (2) и 60° (3).

– функция “база-декорреляция”, характеризующая декорреляцию сигналов из-за разнеса двух антенн и за счет изменения размеров элемента разрешения на поверхности,

$$M_\chi(\Omega_\chi) = \exp\left[-2\pi^2 (\sigma_\chi B \cos(\alpha - \theta) / \lambda H \operatorname{tg} \theta)^2\right]$$

– характеристическая функция мелких неровностей поверхности в пределах элемента разрешения, определяющая степень декорреляции сигналов за счет наличия мелкой шероховатости со среднеквадратичной ординатой σ_χ на крупном рельефе ПП, k_1 – константа аппроксимации, которая определяется из соотношения $(\sin x/x)^2 \approx \exp[-(k_1 x)^2]$, q – отношение сигнал/шум.

При данной геометрии облучения флуктуационная ошибка измерения координаты z элемента разрешения $\sigma_{z\Phi}$ определяется соотношением [17]

$$\sigma_{z\Phi} = \frac{\lambda H \operatorname{tg} \theta}{2\pi B \cos(\alpha - \theta)} \sigma_\Phi. \quad (7)$$

Исследования показывают, что существует оптимальная антенная база радиоинтерферометра B , которая выбирается по минимальной погрешности измерения ординаты z . Для примера зададим значения: высота полета вертолета $H = 75$ м, длина радиоволны $\lambda = 8.6$ мм, кратность некогерентного накопления с каждого элемента разрешения $N = 16$. Ширина диаграммы направленности антенн в угломерной плоскости идентична и охватывает размеры, определяемые ПП в диапазоне углов $30^\circ \dots 60^\circ$, что дает величину наклонной дальности от $R_{\min} = 85$ м до $R_{\max} = 150$ м при выбранной высоте полета.

На рис. 4 показана рассчитанная потенциальная точность метода – зависимость флуктуационной погрешности измерения высоты элемента разрешения $\sigma_{z\Phi}$ от размера антенной базы B при $\theta = 30, 45$ и 60 град и двух значениях σ_χ [17, 18]. Видно, что при малой антенной базе чувствительность системы к рельефу слабая, а при больших значениях B возникает раскорреляция сигналов, приходящих на две антенны, вследствие чего

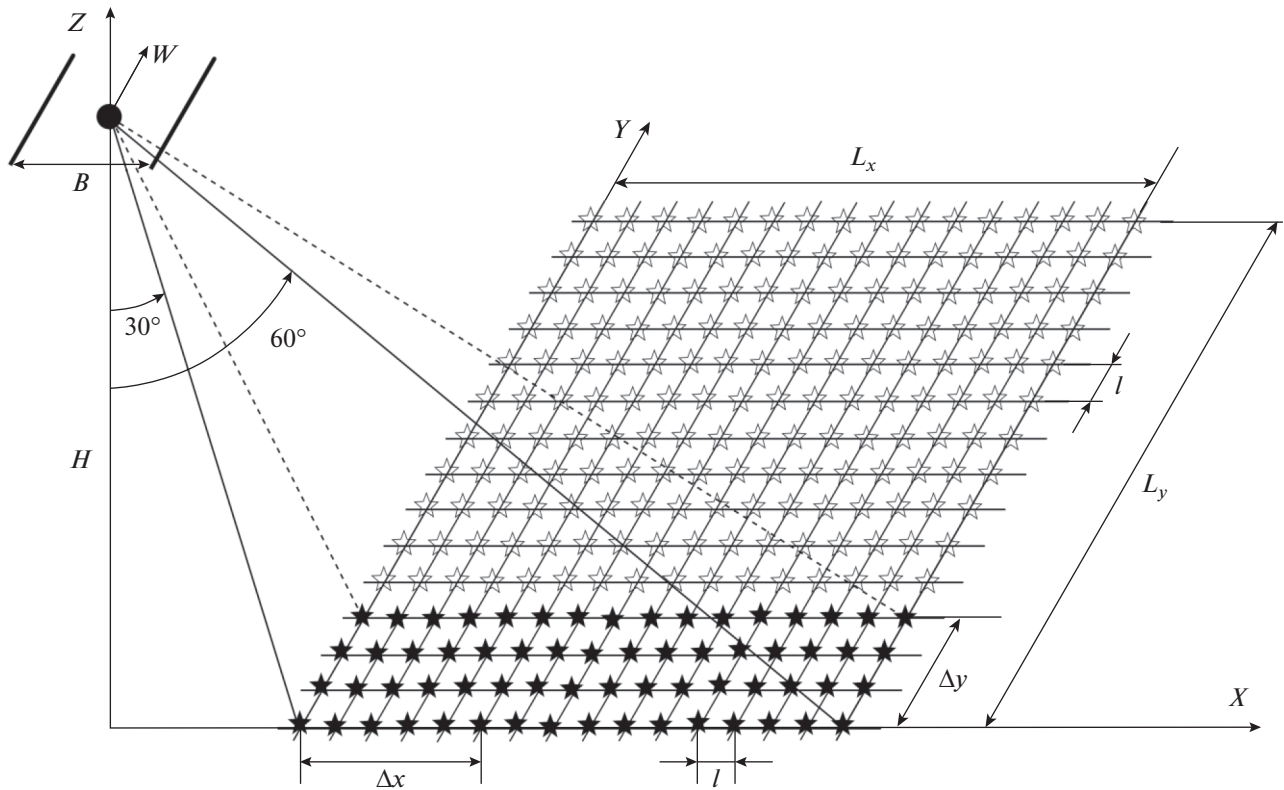


Рис. 5. Схема расположения отражателей на ПП.

уменьшается коэффициент корреляции. Это приводит к ухудшению точности измерений. Таким образом, оптимальный размер антенной базы B , при которой погрешность оценки ординат рельефа ПП минимальна, равен 70...80 см.

При данной геометрии облучения размер антенной базы сильно зависит от характеристик мелкой шероховатости σ_χ на поверхности более крупного рельефа ПП, что также приводит к заметной раскорреляции отраженных сигналов, принятых антеннами. В результате облучения поверхности ПП получаем радиояркую картину отражения по элементам разрешения, на которую накладывается разностно-фазовая зависимость, охватывающая все элементы разрешения ПП. Это является исходным материалом для построения рельефа ПП.

4. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ И ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ НА ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКЕ ВЕРТОЛЕТА

Предложенный алгоритм визуализации и оценки опасных неровностей и посторонних предметов на ПП вертолета, использующий интенсивности рассеянных поверхностью радиолокационных

сигналов с разных углов наблюдения и результаты радиолокационной интерферометрической съемки, проверяли с помощью компьютерного моделирования в пакете OCTAVE. Для модели поверхности ПП и формирования радиолокационного рельефа была выбрана феноменологическая модель [15]. Согласно этой модели отражающая поверхность, показанная на рис. 5, моделируется в виде совокупности независимых элементарных отражателей – “блестящих точек”, находящихся на расстоянии интервала корреляции поверхности l_z . Ординаты отражателей мелких неровностей поверхности $\chi(x, y)$ распределены по нормальному закону. При таком подходе сигнал, отраженный от каждого элемента разрешения, является суммой парциальных сигналов от отражателей внутри этого элемента

$$\dot{U}_{\Delta S}(t) = \sum_{i=0}^{n_x-1} \sum_{j=0}^{n_y-1} U_{i,j\Delta S}(t), \quad (8)$$

где n_x и n_y – число парциальных отражателей по осям x и y соответственно.

На рис. 5 более темным цветом показаны отражатели, участвующие на данном такте моделирования. Для формирования радиолокационного рельефа выбирались следующие параметры: длина линейной антенны $l_a = 0.8$ м, антенная база интерферометрической съемки $B = 0.7$ м и высота

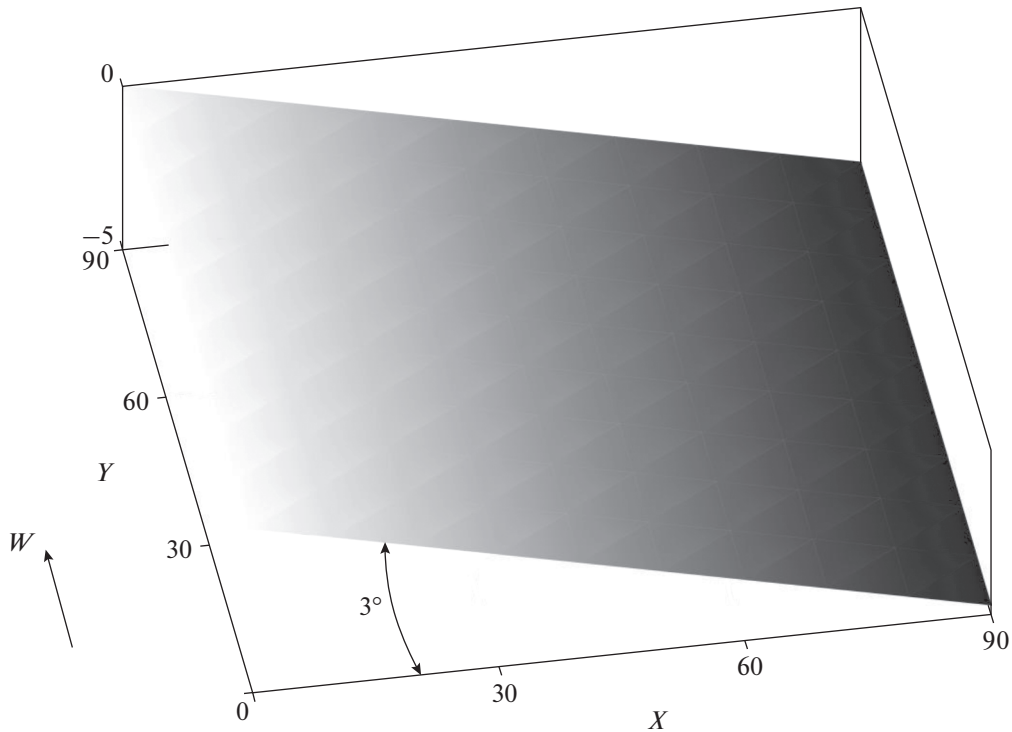


Рис. 6. Поверхность крупного рельефа с уклоном 3° .

полета вертолета $H = 75$ м, диапазон углов визирования от вертикали $\theta = 30^\circ \dots 60^\circ$, корреляционный интервал поверхности $l = 0.2$ м. Число отражателей n_x и n_y , участвующих в формировании эхо-сигнала от каждого элемента разрешения, определялось по осям x и y как $n_x = \Delta x/l$, $n_y = \Delta y/l$ соответственно.

После получения разностно-фазового изображения осуществлялась операция устранения составляющей плоской поверхности Земли. Для решения задачи развертывания фазы был выбран один из основных алгоритмов двумерного развертывания фазы, называемый методом наименьших квадратов [19]. Нетрудно показать, что зависимость между разностно-фазовыми значениями в каждом элементе разрешения и изменениями высоты рельефа определяется выражением

$$z = \frac{\lambda H \operatorname{tg} \theta}{4\pi B \cos \theta} \delta\Phi' = k_2 \delta\Phi', \quad (9)$$

где $\delta\Phi'$ – развернутая фаза. Тогда из (9) следует, что для получения данных об ординатах рельефа восстановленные фазовые значения должны быть умножены на коэффициент масштабирования развернутой фазы, зависящий от длины волны, размера базы, высоты полета вертолета и угла места цели.

Рассмотрим результаты моделирования интерферометрической обработки сигналов, полученных

при облучении поверхности ПП в виде вспаханного поля с уклоном 3° (рис. 6). Среднеквадратичная ордината шероховатостей для вспаханного поля и его неровностей составляет 7.8 мм, диэлектрическая проницаемость равна $5.9 + j3.5$. На рис. 7 приведены полученные интерферограммы до устранения составляющей плоской поверхности Земли и после устранения.

На рис. 8а представлена модель ПП в виде вспаханного поля с двугорбым холмом, максимальная высота которого 2 м, а на рис. 8б – разностно-фазовая интерферограмма поверхности. Результаты по восстановлению рельефа после устранения составляющей плоской поверхности представлены на рис. 9. Погрешность определения высоты холма по интерферограмме составила 3.5 см.

На рис. 10 приведены результаты моделирования асфальтированной поверхности с расположенным на ней автомобилем. Как видим, при использовании разностно-фазовой информации отраженных сигналов, приходящих на две антенны, визуализация техногенных объектов на ПП существенно повышается. Среднеквадратичная ордината шероховатостей асфальтированной поверхности составляет 1.5 мм, диэлектрическая проницаемость равна $2.5 + j0.65$.

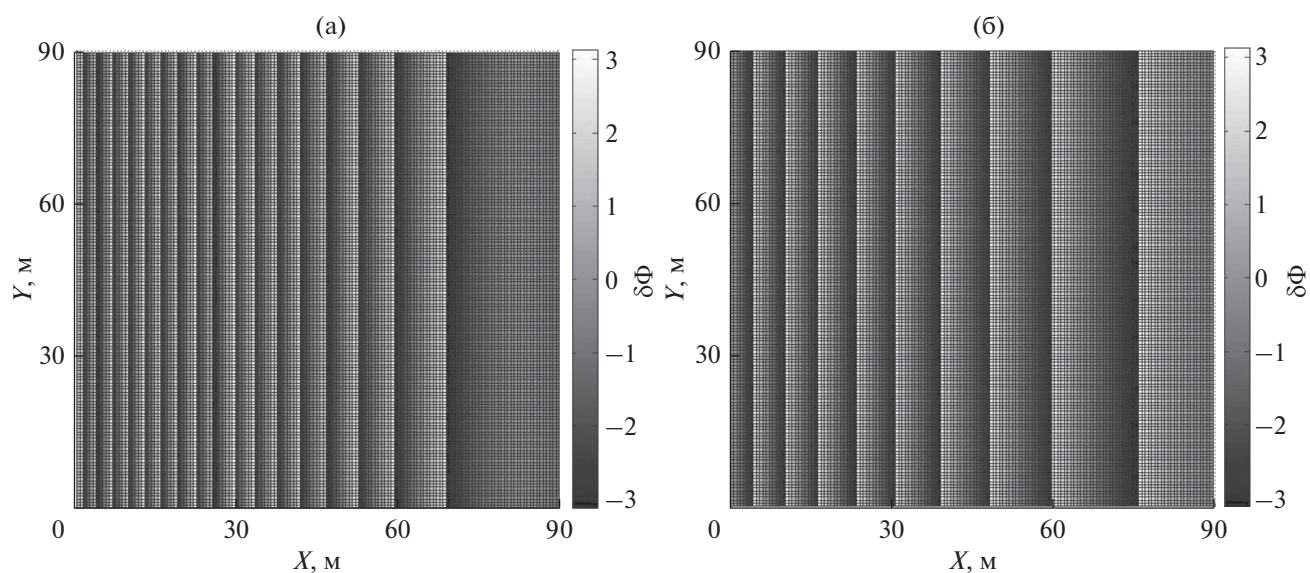


Рис. 7. Интерферограмма поверхности крупного рельефа с уклоном 3° (а) и окончательная интерферограмма (б), полученная после устранения составляющей плоской поверхности Земли, отношение фон/шум = 20 дБ.

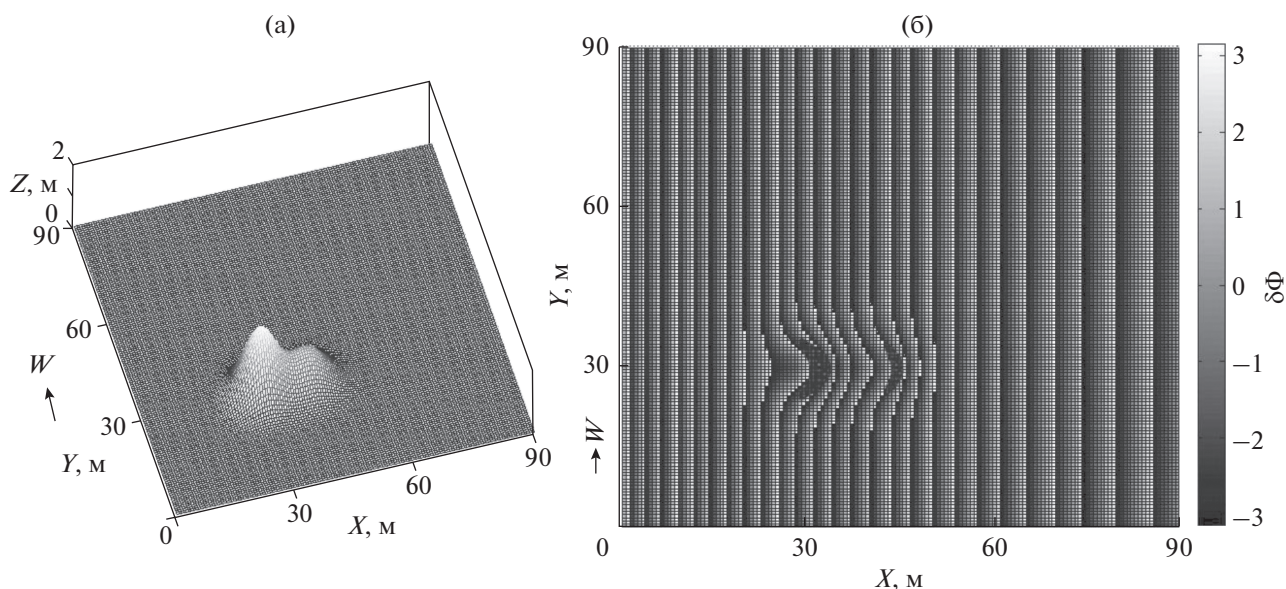


Рис. 8. Вспаханное поле с двугорбым холмом (а), соответствующая интерферограмма (б), отношение фон/шум = 20 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализирован алгоритм радиолокационной интерферометрической съемки поверхности ПП для бортовой РЛС. Показано, что результаты интерферометрической съемки при использовании линейной трехмасштабной модели отражающей поверхности позволяют с требуемой точностью реконструировать высококачественное трехмерное изображение ПП с определением характера рельефа.

Исходным материалом для построения рельефа ПП является радиояркая картина отражения по элементам разрешения, полученная после облучения поверхности ПП, на которую накладывается разностно-фазовая зависимость, охватывающая все элементы разрешения ПП. Визуализация техногенных объектов на ПП при применении указанных преобразований существенно возрастает. Наиболее существенное влияние на точность измерения ординаты неровности оказывает погреш-

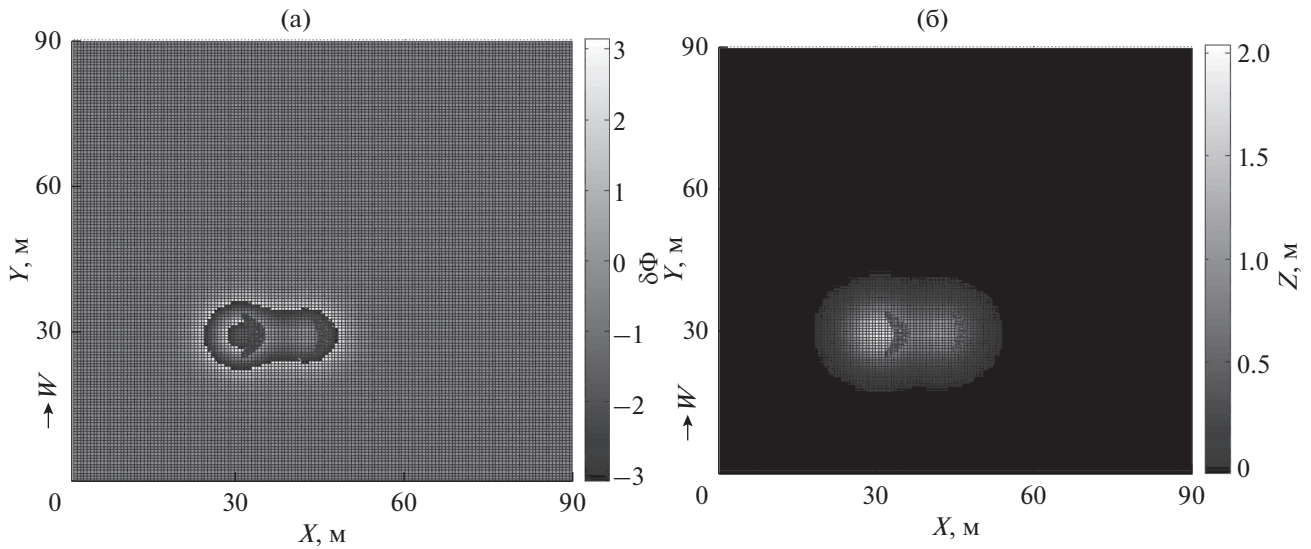


Рис. 9. Интерферограмма, полученная после устранения составляющей плоской поверхности (а) и восстановленный рельеф (б), отношение фон/шум = 20 дБ.

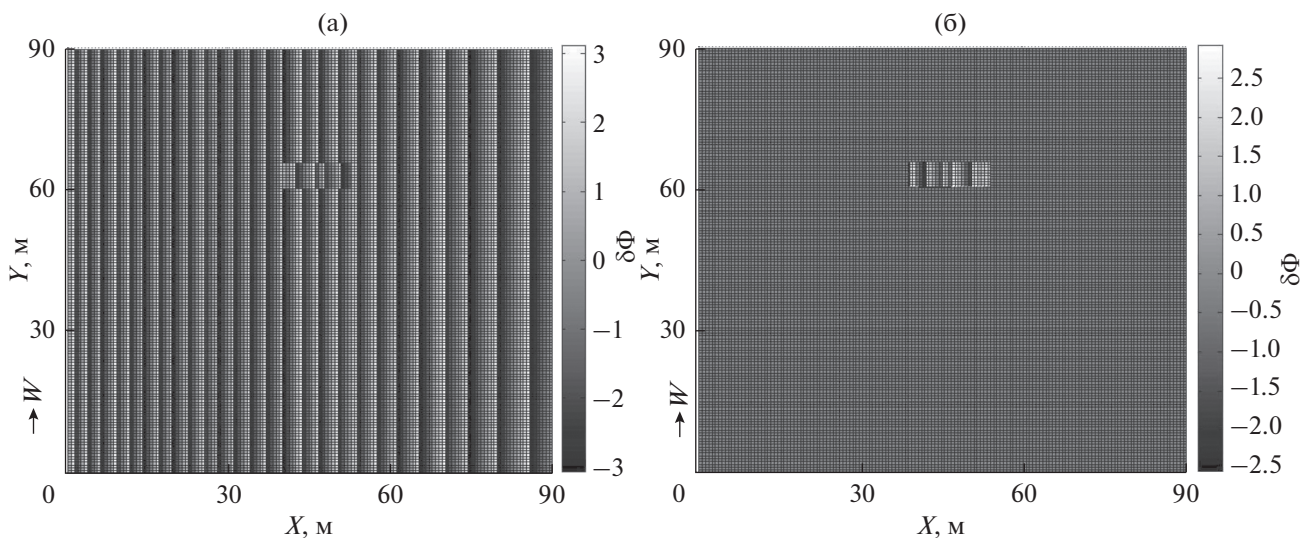


Рис. 10. Интерферограмма, соответствующая наличию автомобиля на асфальтированной дороге (а), и интерферограмма, полученная после устранения составляющей плоской поверхности (б), отношение фон/шум = 20 дБ, отношение сигнал/(фон + шум) = 5 дБ.

ность измерения разности фаз сигналов интерферометра. При этом надежность обнаружения повышается с увеличением кратности измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-49-00079) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-37-00184).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болховская О.В., Мальцев А.А., Родюшкин К.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 5. С. 446.
2. Ермолаев В.Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38. № 8. С. 841.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005.
4. Kutuza V., Bondarenko M., Dzenkevich D. et al. // Proc. 6th Europ. Conf. on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2006). Dresden. May 16–18. 2006. P. 637.
5. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8. М.: Авиа-Медиа, 2005.
6. Nashashibi A., Fawwz T. Ulaby F.T., Sarabandi K. // IEEE Trans. 1996. V. GRS-34. № 2. P. 561.

7. *Сейн Хту, Баскаков А.И.* // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 49.
8. *Gatesman A.J., Goyette T.M., Dickinson J.C. et al.* // Proc. SPIE. 2001. V. 4370. P. 440070.
9. *Shih-Syou Li E.* Millimeter Wave Polarimetric Radar System as an Advanced Vehicle Control and Warning Sensor. A Doctoral Dissertation for a Degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering). Ann Arbor: Univ. of Michigan, 1998. 220 p. <http://www.eecs.umich.edu/radlab/html/techreports/RL965.pdf>.
10. *Быстров Р.П., Садыков А.В., Чеканов Р.Н.* // Радиотехника. 2005. № 1. С. 19.
11. *Верба В.С.* // Радиотехника. 2004. № 9. С. 32.
12. *Борзов А.Б., Соколов А.В., Сучков В.Е.* // Зарубеж. радиоэлектроника. 2001. № 5. С. 55.
13. *Борзов А.Б., Быстров Р.П., Петров А.В. и др.* // Электромагнитные волны и электрон. системы. 2000. № 6. С. 17.
14. *Акиниин Н.С., Быстров Р.П., Петров А.В., Садыков Р.Р.* // Научн. вестн. МГТУ ГА. Сер. “Радиофизика и радиотехника”. 2000. № 24. С. 94.
15. *Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И.* Локационные методы исследования объектов и сред. М.: Академия, 2011.
16. *Баскаков А.И., Ка Мин Хо* // Исследование Земли из космоса. 1998. № 2. С. 43.
17. *Сейн Хту, Баскаков А.И.* // Вестн. МЭИ. 2013. № 6. С. 213.
18. *Сейн Хту, Баскаков А.И.* // Электронный журнал “Труды МАИ”. 2012. № 57. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30698>.
19. *Ghiglia D.C., Romero L.A.* // J. Opt. Soc. Amer. 1994. V. 11. № 1. P. 107.