УДК 621.396.96

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАЛЬНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКИХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ С БОРТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рязанцев Л.Б., *д.т.н. доцент, доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), e-mail: kernel386@mail.ru*
Бабич О.А., *адъюнкт Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), e-mail: oleg9mufc5fan@mail.ru*
Маклаков Д.Ю., *ведущий программист АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург), e-mail: maklakov_dju@radar-mms.com*

MODELING OF RANGE-DOPPLER REFLECTIONS FROM THE EARTH'S SURFACE DURING RADAR SENSING FROM AN AIRCRAFT

Ryazantsev L.B., Babich O.A., Maklakov D.Ju.

The article is devoted to the study of Range-Doppler portraits of the Earth's surface when probing with coherent signals of a radar sensor placed on board an aircraft. The patterns of portrait formation with different characteristics and orientation of antennas in space, parameters of probing radiation and reflective properties of the surface are revealed. It is proposed to use developed model to evaluate the flight parameters of the radar carrier in the interests of solving the problems of autonomous navigation.

Key words: unmanned aerial vehicle, autonomous navigation, Doppler speed meters, altitude estimation, Earth's surface sensing.

Ключевые слова: корреляционная матрица, радиотехника, разладка, собственные числа, спектр, цифровая обработка сигналов.

Статья посвящена исследованию дальностно-доплеровских портретов земной поверхности при зондировании когерентными сигналами радиолокатора, размещенного на борту летательного аппарата. Выявлены закономерности формирования портретов при различных характеристиках и ориентации антенн в пространстве, параметрах зондирующих излучений и отражательных свойств поверхности. Предложено использовать разработанную модель для оценки параметров полета носителя РЛС в интересах решения задач автономной навигации.

Введение

В последние десятилетия наметилась стойкая тенденция к использованию приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) для измерения параметров собственного движения беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) и их навигации. Большая часть БпЛА не может осуществлять полет без использования таких приемников. Слабая помехозащищенность и подверженность уводящим помехам зачастую не позволяют их использование для решения навигационных задач, а существующие радионавигационные корреляционно-экстремальные системы навигации являются весьма дорогими. Кроме того, их массогабаритные характеристики не позволяют обеспечить установку на БпЛА малого класса.

Для определения высоты полета БпЛА существуют миниатюрные радиовысотомеры [1], позволяющие в отличие от барометрических высотомеров и приемников ГНСС с высокой точностью определять высоту полета носителя относительно земной поверхности. Для определения скорости полета и угла сноса летательных аппаратов применяются радиолокационные доплеровские измерители скорости и угла сноса (ДИСС) [2]. Такие измерители, как правило, строятся по принципу радиолокационных станций (РЛС) с непрерывным частотно-модулированным излучением, что позволяет снизить требования к аппаратуре и уменьшить массогабаритные характеристики. Однако для исключения влияния изменений углового положения носителя в пространстве измерители делаются трех и четырехлучевыми, что увеличивает их габариты и затрудняет установку на малоразмерные носители.

В то же время активное развитие аналоговой и цифровой микроэлектроники, появление миниатюрных СВЧ интегральных схем, реализующих принципы программно-определяемого радио, и цифровых систем на кристалле, обладающими высокими вычислительными возможностями позволило перейти к созданию РЛС с высокой разрешающей способностью, характеризующихся небольшими массой и габаритами [3, 4], и позволяющих решать задачи определения собственных координат и параметров движения носителя в интересах его автономной навигации по характеру доплеровских отражений от подстилающей поверхности.

Таким образом, целью данной работы является разработка модели дальностно-доплеровских отражений от подстилающей поверхности в интересах обоснования способов оценки собственной скорости и высоты полета беспилотного летательного аппарата с использованием установленной на него малогабаритной РЛС.

Модель сигналов, отраженных от подстилающей поверхности

Вид спектра доплеровских частот сигнала, отражённого от подстилающей поверхности зависит от таких

факторов как форма диаграммы направленности антенны (ДНА) и уровень ее боковых лепестков, тип подстилающей поверхности и углы ее облучения, скорость полета носителя и параметры сигналов РЛС [5, 6]. При зондировании подстилающей поверхности РЛС с непрерывным линейно-частотномодулированным (ЛЧМ) сигналом, установленной на воздушном носителе (рисунок 1), сигнал разностной частоты на выходе приемного устройства, представляющий результат перемножения зондирующего сигнала с отраженным от подстилающей поверхности сигналом, будет иметь вид [3]

$$\dot{S}_p(x_э, y_э, t) = A_э(\varepsilon(x_э, y_э), \beta(x_э, y_э)) \times \\ \times \exp\left(j2\pi \frac{2R_{эн}(x_э, y_э, t)}{c}(f_0 + \mu t) \right) + \dot{\eta}(t), \quad (1)$$

где $A_э$ – амплитуда сигнала, отраженного от элемента разрешения на подстилающей поверхности; $R_{эн}(x_э, y_э, t) = \sqrt{h^2 + y_э^2 + (x_э - Vt)^2}$ – наклонная дальность до элемента разрешения; h и V – высота и путевая скорость полета носителя РЛС; f_0 – начальная частота ЛЧМ сигнала; $\mu = \Delta f_c / T_м$ – скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала; Δf_c и $T_м$ – ширина спектра и период модуляции зондирующего ЛЧМ сигнала соответственно; $x_э$ и $y_э$ – координаты элемента разрешения на подстилающей поверхности; $\dot{\eta}(t)$ – белый гауссовский шум; $t = t_м + kT_м$; $t_м \in [0, T_м)$; k – номер периода зондирования; $\varepsilon(x, y) = arctg(y/x)$ и $\beta(x, y) = arctg(\sqrt{x^2 + y^2}/h)$ – азимут и угол места соответственно.

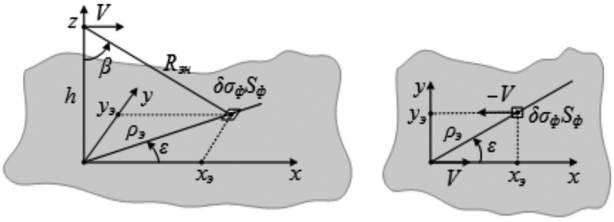


Рисунок 1 – Геометрия зондирования подстилающей поверхности

Амплитуда сигнала может быть аппроксимирована зависимостью

$$A_э(\varepsilon, \beta) = \frac{G(\varepsilon, \beta)\lambda}{R_{иэ}^2} \sqrt{\frac{P_{прд}\delta\sigma_\phi S_\phi(\varepsilon, \beta)}{(4\pi)^3 L}\cos(\beta)}, \text{ где} \quad (1)$$

$$G(\varepsilon, \beta) = G_0 f_{бл} + G_0(1 - f_{бл}) \exp\left(-2,78\left(\frac{(\varepsilon - \varepsilon_a)^2}{\Theta_\varepsilon^2} + \frac{(\beta - \beta_a)^2}{\Theta_\beta^2} \right) \right)$$

– аппроксимированная ДНА; G_0 – коэффициент усиления антенны РЛС по главному лепестку диаграммы направленности; ε_a и β_a – углы установки антенны в азимутальной и угломестной плоскости относительно вертикали; Θ_ε и Θ_β – ширина диаграммы направленности по мощности на уровне 0,5 по азимуту и углу места соответственно; $f_{бл}$ – усредненный уровень боковых лепестков относительно максимума ДНА; $P_{прд}$ – импульсная мощность передатчика; L – суммарные потери на трассе распространения и в приемно-передающем тракте РЛС; $\delta\sigma_\phi$ – удельная ЭПР фона; $S_\phi(\varepsilon, \beta)$ – площадь элемента разрешения на подстилающей поверхности; $\cos(\beta)$ – множитель, характеризующий изменение амплитуды сигнала от угла облучения земной поверхности.

Для построения зависимости амплитуды сигнала (2) в координатах «наклонная дальность-доплеровская частота» необходимо рассчитать площади элементов разрешения S_ϕ, ограниченных линиями равных наклонных дальностей и доплеровских частот (рисунок 2). При расчете площадей элементов разрешения для упрощения вычислений целесообразно учитывать симметрию линий доплеровских частот и наклонных дальностей относительно осей системы координат и ограничиться расчетами только лишь для первого квадранта с последующим использованием этих расчетов для определения площадей элементов разрешения остальных трех квадрантов.

Уравнение m-й линии равных наклонных дальностей на плоской земной поверхности в полярной системе координат описывается выражением

$$\rho_r(m, \varepsilon) = \rho_r(m) = \sqrt{(h + m\delta r)^2 - h^2}, \quad (3)$$

где $\delta r = c/(2\Delta f_c)$ – разрешающая способность РЛС по наклонной дальности; c – скорость света; Δf_c – ширина

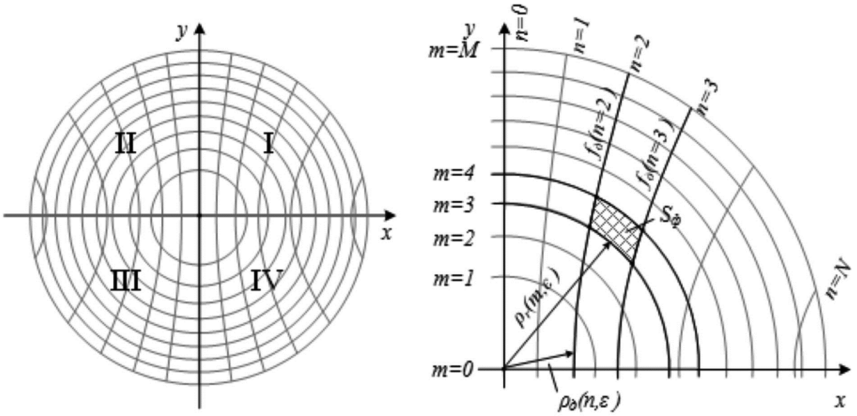


Рисунок 2 – Иллюстрация формы линий равных наклонных дальностей и доплеровских частот на плоской земной поверхности

спектра зондирующего сигнала РЛС; $m = 0,1,\ldots,M$; $M = \text{int}[R_{\max}/\delta r]$; $\text{int}[\cdot]$ – оператор выделения целой части; $R_{\max}$ – максимальная дальность действия РЛС, определяемая ее энергетическими и конструктивными характеристиками.

Исходя из того, что характер изменения доплеровских частот в зоне обзора определяется проекцией максимальной доплеровской частоты на линию визирования

$$f_д(n) = f_{д\max}\sin(\beta(n))\cos(\varepsilon), \quad (4)$$

где $\beta(n) = arc\,\text{t}\,g(\rho_д(n)/h)$, то уравнение для n-й линии равных доплеровских частот на плоской поверхности в полярной системе координат может быть получено из уравнения (4) и представлено в виде

$$\rho_д(n,\varepsilon) = \frac{f_д(n)h}{\sqrt{f^2_{д\max}\cos^2(\varepsilon) - f^2_д(n)}},\ |\varepsilon| < \arccos\left(\frac{f_д(n)}{f_{д\max}}\right), \quad (5)$$

где $f_{д\max} = 2V/\lambda$ – максимальное значение доплеровской частоты; $f_д(n) = n\,\delta f_д$; $n = 0,1,\ldots,N$; $N = \text{int}[f_{д\max}/\delta f_д]$; $\delta f_д = 1/T_c$ – разрешение РЛС по доплеровской частоте; T_c – время когерентного накопления сигналов.

Для нахождения площади элемента разрешения можно воспользоваться интегрированием по области, ограниченной кривыми равных наклонных дальностей и доплеровских частот. Для этого необходимо найти точки пересечения этих кривых. Расчет координат точек пересечения между n-й линией равных доплеровских частот и m-й линией равных наклонных дальностей может быть осуществлен по выражениям

$$\varepsilon(m,n) = \arccos\left(\frac{f_д(n)}{f_{д\max}}\frac{(h+m\delta r}{\sqrt{(h+m\delta r)^2 - h^2}}\right), \quad (6)$$

$$\beta(m,n) = \arccos\left(\frac{h}{h+m\delta r}\right), \quad (7)$$

$$\rho(m,n) = \sqrt{2hm\delta r + m^2\delta r^2}. \quad (8)$$

Выражения (6) и (7) могут быть использованы для пересчета индексов m и n в координаты цилиндрической системы координат.

Анализ формы фигур элементов разрешения (рисунок 2) показывает наличие пяти различных вариантов, которые характеризуются различным количеством (двух, четырех и шести) точек пересечения. Варианты фигур, соответствующих пяти типам элементов разрешения, представлены на рисунке 3. Для корректного расчета амплитуд отражений в зоне обзора необходимо также учитывать и шестой вариант, при котором отсутствуют точки пересечения. Это соответствует нулевой площади поверхности и, как следствие, отсутствию сигналов из этой области пространства.

Для реализации алгоритма автоматического расчета площади элементов разрешения необходимо определить признаки, на основе которых будет осуществляться нахождение координат точек пересечения и выбор дальнейшего порядка расчета площади каждого $S_ф(m,n)$-го элемента разрешения в зоне обзора. В качестве таких признаков можно рассматривать наличие пересечений между кривыми $\rho_r(m)$ и $f_д(n)$, $\rho_r(m)$ и $f_д(n+1)$, $\rho_r(m-1)$ и $f_д(n+1)$, $\rho_r(m-1)$ и $f_д(n)$. В таблице 1 приведены логические условия пересечений кривых, по совместному выполнению которых осуществляется определение типа поверхности элемента разрешения и выбор выражений для вычисления элементов вектора координат точек пересечений $\mathbf{P}_{m,n} = \{p_0(\varepsilon_0,\rho_0), p_1(\varepsilon_1,\rho_1),\ldots\}$ для дальнейшего вычисления площади элементов разрешения.

Сформированный вектор $\mathbf{P}_{m,n}$ позволяет найти площадь элемента разрешения через интегрирование по области $R_{m,n}$ [7], заданной точками, являющимися компонентами этого вектора, и ограниченной кривыми равных доплеровских частот и наклонных дальностей

$$S_ф(m,n) = \iint_{R_{m,n}} \rho\alpha_{m,n}(\varepsilon)d\rho d\varepsilon, \quad (9)$$

где в качестве функции $\alpha_{m,n}(\varepsilon)$ в процессе интегрирования выбирается одна из двух функций $\rho_r(m)$ или $\rho_д(n,\varepsilon)$ в зависимости от пределов интегрирования и типа поверхности элемента разрешения.

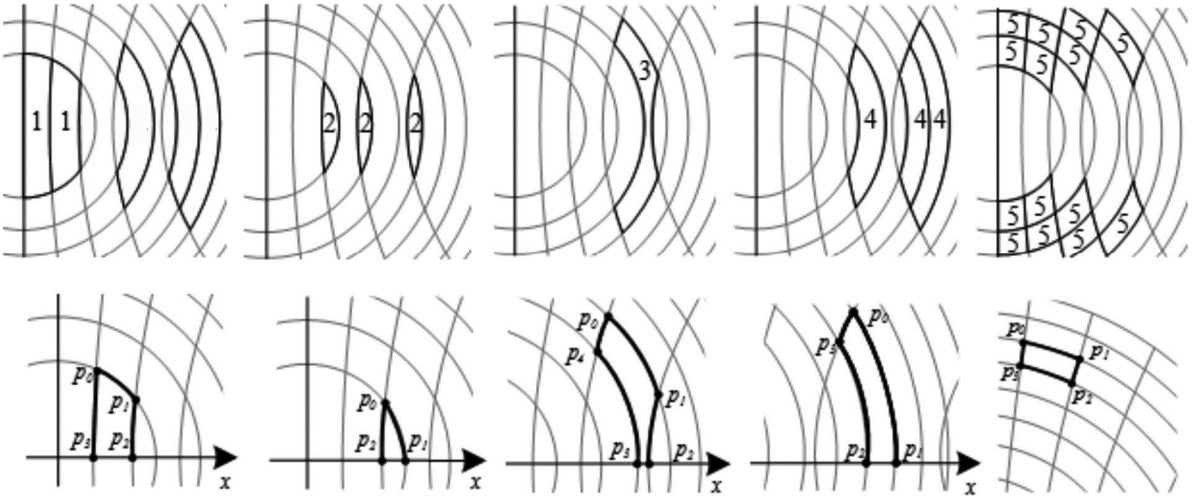


Рисунок 3 – Варианты фигур элементов разрешения и расположение точек пересечения линий для последующего вычисления площади

Таблица 1 – Логические условия для вычисления точек пересечения

Тип поверхности	Условия пересечений	Координаты точек
1	$\rho_r(m) \cap f_\partial(n) = True$, $\rho_r(m) \cap f_\partial(n+1) = True$, $m \geq 0$	$\varepsilon_0 = \varepsilon(m,n)$, $\rho_0 = \rho(m,n)$ $\varepsilon_1 = \varepsilon(m,n+1)$, $\rho_1 = \rho(m,n+1)$ $\varepsilon_2 = 0$, $\rho_2 = \rho_\partial(n+1, \varepsilon = 0)$ $\varepsilon_3 = 0$, $\rho_3 = \rho_\partial(n, \varepsilon = 0)$
2	$\rho_r(m) \cap f_\partial(n) = True$, $\rho_r(m) \cap f_\partial(n+1) = True$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n+1) = False$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n) = False$	$\varepsilon_0 = \varepsilon(m,n)$, $\rho_0 = \rho(m,n)$ $\varepsilon_1 = 0$, $\rho_1 = \rho_0$ $\varepsilon_2 = 0$, $\rho_3 = \rho_\partial(n, \varepsilon = 0)$
3	$\rho_r(m) \cap f_\partial(n) = True$, $\rho_r(m) \cap f_\partial(n+1) = True$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n+1) = False$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n) = True$	$\varepsilon_0 = \varepsilon(m,n)$, $\rho_0 = \rho(m,n)$ $\varepsilon_1 = \varepsilon(m,n+1)$, $\rho_1 = \rho(m,n+1)$ $\varepsilon_2 = 0$, $\rho_2 = \rho_\partial(n+1, \varepsilon = 0)$ $\varepsilon_3 = 0$, $\rho_3 = \rho(m-1,n)$ $\varepsilon_4 = \varepsilon(m-1,n)$, $\rho_4 = \rho(m-1,n)$
4	$\rho_r(m) \cap f_\partial(n) = True$, $\rho_r(m) \cap f_\partial(n+1) = False$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n+1) = False$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n) = True$	$\varepsilon_0 = \varepsilon(n,m)$, $\rho_0 = \rho(n,m)$ $\varepsilon_1 = 0$, $\rho_1 = \rho_0$ $\varepsilon_2 = 0$, $\rho_2 = \rho_3$ $\varepsilon_3 = \varepsilon(n,m-1)$, $\rho_3 = \rho(n,m-1)$
5	$\rho_r(m) \cap f_\partial(n) = True$, $\rho_r(m) \cap f_\partial(n+1) = True$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n+1) = True$, $\rho_r(m-1) \cap f_\partial(n) = True$	$\varepsilon_0 = \varepsilon(n,m)$, $\rho_0 = \rho(n,m)$ $\varepsilon_1 = 0$, $\rho_1 = \rho(n+1,m)$ $\varepsilon_2 = \varepsilon(n+1,m-1)$, $\rho_2 = \rho(n+1,m-1)$ $\varepsilon_3 = \varepsilon(n,m-1)$, $\rho_3 = \rho(n,m-1)$
6	$\rho_r(m) \cap f_\partial(n) = False$	$\mathbf{P}_{m,n} = \varnothing$

Порядок расчета амплитуд отраженных сигналов

Учитывая, что количество элементов разрешения при облучении земной поверхности современными радиолокаторами может достигать десятков и сотен тысяч, то целесообразно рассмотреть порядок расчета амплитуды отражений для его реализации на ЭВМ с использованием специализированных программ или программных пакетов математического моделирования. Структурно порядок расчета может быть представлен в виде схемы, изображенной на рисунке 4.

Нахождение интеграла (9) может быть основано на применении формулы площади Гаусса (алгоритма «шнурования») [8], при котором фигуры поверхностей представляются в форме простых многоугольников, вершины которых заданы точками, являющихся компонентами вектора $\mathbf{P}_{m,n}$. В этом случае

$$S_\phi(m,n) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{P}\left(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i\right), \qquad (10)$$

где P – количество компонентов вектора $\mathbf{P}_{m,n}$; $x_P = x_0$; $y_P = y_0$; $x_{P+1} = x_1$; $y_{P+1} = y_1$; $x_i = \rho_i \cos(\varepsilon_i)$; $y_i = \rho_i \sin(\varepsilon_i)$.

На рисунке 5 представлен результат вычисления площадей элементов разрешения в соответствии с представленным на рисунке 4 порядком при следующих исходных данных: $h = 500$ м; $R_{\max} = 1$ км; $\delta r = 20$ м; $\delta f_\partial = 20$ Гц; $V = 120$ км/ч; $\lambda = 5{,}5$ см.

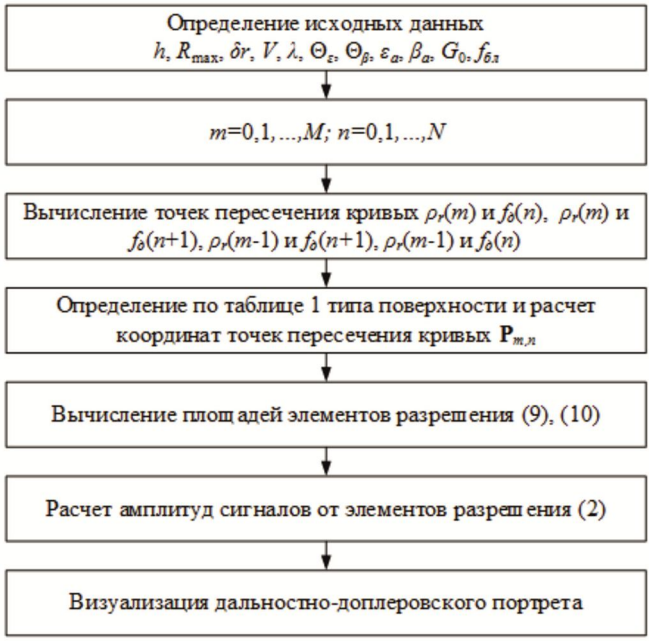


Рисунок 4 – Порядок расчета амплитуд сигналов в координатах «наклонная дальность – доплеровская частота»

Анализ полученных результатов показывает следующее.

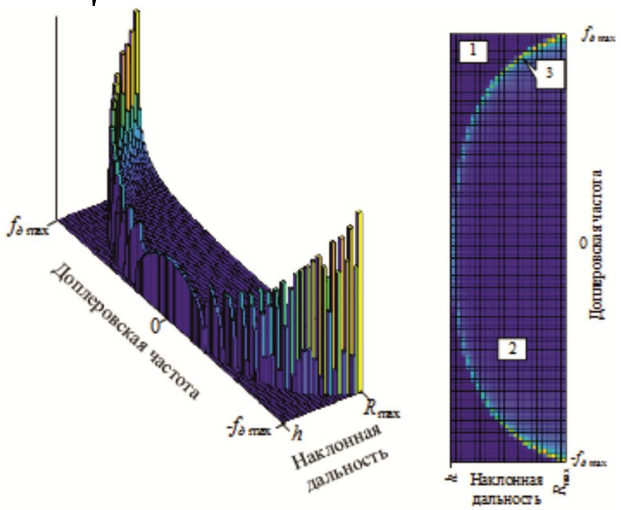


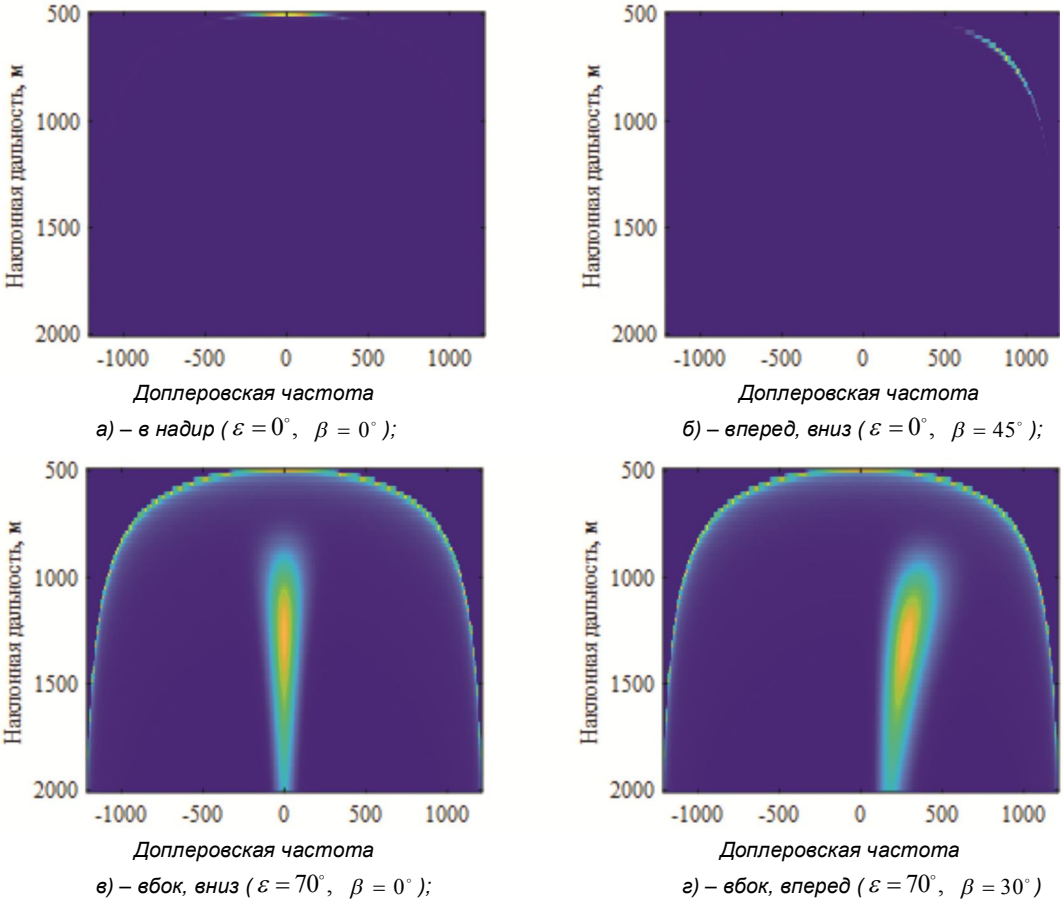
Рисунок 5 – Результат расчета площадей элементов разрешения

Первое. Площадь элементов разрешения с увеличением наклонной дальности возрастает (рисунок 5). Однако учитывая, что амплитуда сигналов убывает пропорциональна квадрату наклонной дальности и значению $\cos(\beta)$, то амплитуда отражений с увеличением наклонной дальности достаточно быстро снижается.

Второе. Дальностно-доплеровский портрет имеет три характерные области (рисунок 5). В области 1 отсутствуют отражения от подстилающей поверхности. Эта область соответствуют наклонным дальностям, величина которых не превышает расстояния до подстилающей поверхности. Для элементов разрешения этой области отсутствуют пересечения линий доплеровских частот и наклонных дальностей. Область 2 представлена пятым типом поверхности (рисунок 3) и имеет наибольшее количество элементов разрешения. Область 3 представляет собой границу «раздела сред» и характеризуется мощными всплесками амплитуд сигналов. Отражения в этой области имеют значительный уровень даже при приеме по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (рисунки 6, *в*, *г*). Данная граница формируется отражениями от элементов разрешения первых четырех типов. Именно поэтому при разработке модели доплеровских отражений описанию таких элементов разрешения было уделено наибольшее внимание. Выражение для формы границы «раздела сред» может быть получено из выражения (4) при условии $\varepsilon = 0,$ т.е.

$$R(f_\partial) = h \Big/ \sqrt{1-\left(\frac{\lambda f_\partial}{2V}\right)^2}, \quad f_\partial \le f_{\partial\max}. \qquad (11)$$

На рисунке 7 представлены полученные на основе (11) зависимости $R(f_\partial)$ при различных V. Анализ зависимостей показывает, что с увеличением скорости носителя форма кривой расширяется по координате доплеровской частоты, при этом ее положение по наклонной дальности не изменяется. Это свойство может служить информативным признаком для определения путевой скорости полета носителя по форме отражений от «границы сред». Крутизна формы кривой увеличивается с увеличением доплеровской частоты. Поэтому для более точной оценки путевой скорости по ее форме целесообразно использовать участки с большей крутизной.



а) – в надир ($\varepsilon = 0^\circ,\ \beta = 0^\circ$);

б) – вперед, вниз ($\varepsilon = 0^\circ,\ \beta = 45^\circ$);

в) – вбок, вниз ($\varepsilon = 70^\circ,\ \beta = 0^\circ$);

г) – вбок, вперед ($\varepsilon = 70^\circ,\ \beta = 30^\circ$)

Рисунок 6 – Иллюстрация зависимости амплитуды сигнала в координатах «наклонная дальность-доплеровская частота»

при различных ориентациях антенн

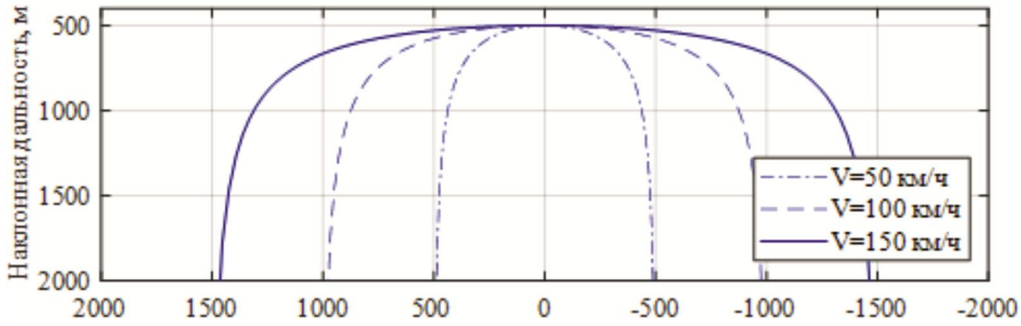


Рисунок 7 – Зависимости $R(f_д)$ при различных V

Третье. Форма и ориентация диаграммы направленности определяет вид доплеровских отражений, который может использоваться для извлечения различных признаков об ориентации и параметрах движения летательного аппарата относительно подстилающей поверхности. Так, на рисунке 6 представлены иллюстрации зависимости амплитуды сигнала в координатах «наклонная дальность-доплеровская частота» при различных ориентациях антенн. Моделирование дальностно-доплеровских портретов осуществлено при следующих условиях: $h = 500$ м; $R_{\max} = 1$ км; $\delta r = 20$ м; $\delta f_д = 5$ Гц; $V = 120$ км/ч; $\lambda = 5{,}5$ см; $G_0 = 1$; $f_{бл} = -13$ дБ; $\Theta_\varepsilon = \Theta_\beta = 20^\circ$.

Вид дальностно-доплеровского портрета, представленного на рисунке 6, *а* соответствует ориентации антенн в надир. Такая ориентация может быть использована для измерения высоты полета носителя и оценки его путевой скорости по форме кривой доплеровских частот. Рисунок 6, *б* соответствует ориентации антенн с установкой под углом 45 градусов относительно вертикали вперед по направлению движения носителя. Такая ориентация антенн может использоваться для измерения скорости полета носителя по значению средней доплеровской частоты спектра отраженных от поверхности сигналов. Рисунок 6, *в* соответствует установке антенн, характерного для режима синтезирования апертуры антенны при боковом обзоре, а рисунок 6, *г* – для режима синтезирования апертуры при переднебоковом обзоре или при наличии угла сноса.

Результаты экспериментальной проверки

Для подтверждения полученных результатов проведена экспериментальная проверка на образце малогабаритной РЛС С-диапазона «Квазар», разработанной АО «НПП «Радар ммс» при научно-техническом сопровождении ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

При проведении эксперимента характеристики РЛС и параметры ее зондирующего сигнала были следующие: ширина диаграммы направленности антенн – 20х20 град., ширина спектра сигнала – 300 МГц, период повторения – 1,5 мс, время когерентного накопления сигналов – 0,2 с. РЛС устанавливалась на беспилотном вертолете БВС ВТ-45 (рисунок 8), при этом антенны ориентировались в надир. Полет вертолета осуществлялся на высоте около 100…130 м над земной поверхностью со скоростью 54 км/ч.

Дальностно-доплеровский портрет, сформированный в процессе полета, представлен на рисунки 9, *а* и *б*. Изображение на рисунке 9, *а* соответствует участку местности с ровной песчаной поверхностью. Рисунок 9, *б* отображает участок местности с лесным массивом и неровностями рельефа. Анализ кривизны дальностно-доплеровского портрета, представленного на рисунок 9, *а* показывает его соответствие с кривой, рассчитанной по выражению (11) для условий $V = 54$ км/ч и $h = 112$ м, что подтверждает соответствие практических результатов теоретическим зависимостям. Маршрут полета и вид земной поверхности показан на рисунке 9, *в*.

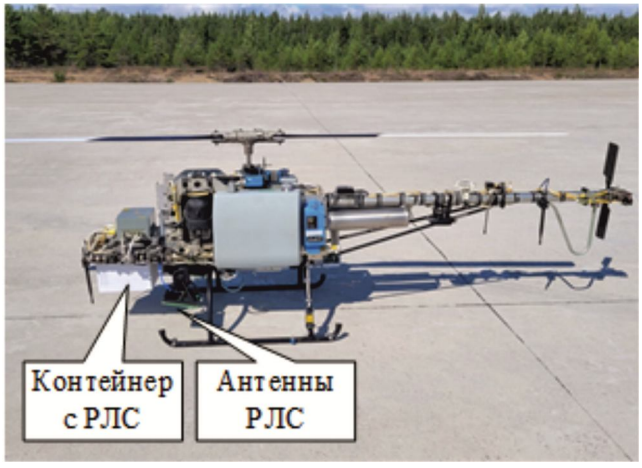


Рис. 8. Вид носителя БВС ВТ-45 (АО «НПП «Радар ммс») с установленной РЛС

Заключение

Таким образом, разработанная модель позволяет рассчитать вид доплеровских отражений от подстилающей поверхности для различных параметров полета носителя РЛС (скорость и высота), условий облучения поверхности (ориентация диаграммы направленности антенны в пространстве и ее форма), характеристиках фона (удельная ЭПР), разрешающей способности РЛС и времени когерентного накопления сигналов. Использование разработанной модели в дальнейшем позволит провести обоснование способов обработки сигналов в когерентных малогабаритных РЛС для получения оценок высоты, путевой скорости и углов сноса в интересах решения задач автономной навигации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.

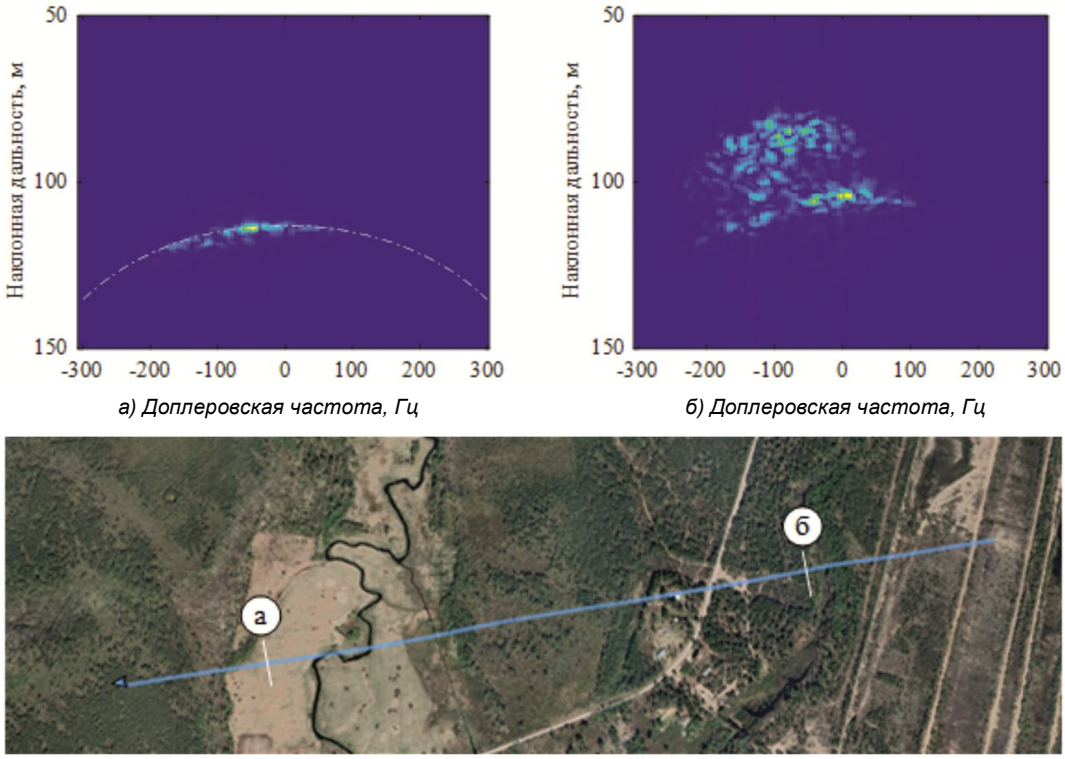


Рисунок 9 – Вид дальностно-доплеровских портретов (а и б) и соответствующие им участки местности (в)

Литература

1. 24GHz Alimeter Radar NRA24 [Электронный ресурс]. http://en.nanoradar.cn/Article/detail/id/372.html (дата обращения: 04.02.2024).

2. Колчинский В.Е., Мандуровский И.А., Константиновский М.И. Автономные допплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. М.: «Советское радио», 1975. 430 с.

3. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 288 с.

4. Иванников К.С., Купряшкин И.Ф., Рязанцев Л.Б. Алгоритм формирования профиля рельефа местности с использованием малогабаритной РЛС с синтезированной апертурой антенны высокого разрешения. Цифровая обработка сигналов, 2019. № 1. С.31-36.

5. Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М.: Дрофа, 2007. 283 с.

6. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

7. George B. Thomas, Jr. Thomas' Calculus Early Transcendentals. Pearson Education, 2014. 1206 pp.

8. Rhoad R., Milauskas G., Whipple R. Geometry for Enjoyment and Challenge. McDougal Littell, 1991, pp. 717-718.

НОВЫЕ КНИГИ



Шарамет А.В.
Информационное обеспечение систем защиты летательных аппаратов от управляющих средств поражения: Научное издание, М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 178 с.: ил.

Рассмотрены вопросы повышения информативности бортового комплекса обороны летательного аппарата для увеличения эффективности его защиты от управляемого ракетного оружия за счет согласованного помехового, маневренного и огневого противодействия. Изложены и систематизированы основные проблемы по защите летательного аппарата от управляемых средств поражения, а также рассмотрены основные пути повышения эффективности его защиты от них. Даны оценочные расчеты отражательных свойств головок самонаведения управляемых ракет класса «воздух-воздух» и «земля-воздух», как объектов радиолокационного наблюдения. Представлено описание и проведен анализ результатов полунатурного экспериментального исследования. На основе векторно-алгебраического подхода к формализации задач определения координат объектов в многопозиционной измерительной системе проведен синтез алгоритма оценки декартовых координат атакующей ракеты по суммарно-дальномерной информации.

Для специалистов, занимающихся вопросами защиты летательных аппаратов, научных работников и инженеров. Может быть полезна аспирантам и студентам вузов.