

## Численное моделирование для проверки режима обнаружения сдвига ветра в имитаторах радиолокационных сигналов для бортовых РЛС

*М.Б. Рыжиков, Ю. А. Новикова, Г. В. Терещенко,*

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

**Аннотация:** Для проверки эффективности и корректности выполнения алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов в бортовых радиолокационных системах арктического назначения в функциональных задачах обнаружения потенциально опасных для полета погодных условий целесообразно использовать численное моделирование имитаторов радиолокационных сигналов. Это связано с тем, что на предварительных испытаниях при сложных метеоусловиях есть потенциальная опасность потери управления над полетом носителя РЛС, особенно в случае разработки беспилотных авиационных платформ. Кроме того, существуют очень редкие погодные явления, такие, например, как сдвиг ветра, обнаружение которого во время испытаний – маловероятное событие. Все это приводит к тому, что разработку, отладку бортовых РЛС для маловысотных носителей, которые решают задачу метеонавигации в процессе полета, целесообразно проводить методом полунатурного моделирования, используя для формирования отраженных сигналов базы данных, которые содержат в своем составе набор исходных параметров, позволяющих производить имитацию или в реальном масштабе времени или по заранее спланированному сценарию полета и подготовленному специальному набору записей сигнальных сигнатур. В настоящей статье предложен алгоритм работы с базой данных и последующего численного моделирования, позволяющий оценивать необходимые спектральные компоненты сигнатур сигнала для импульсно-доплеровской РЛС, оценивающей в каждом элементе разрешения радиальную составляющую скорости ветра, которая используется для дальнейшего расчета  $F$ -фактора опасности сдвига ветра.

**Ключевые слова:** бортовая РЛС, база данных, имитация, численное моделирование, метеонавигация, Арктика, сдвиг ветра.

### Введение

Реализация информационной поддержки для судоходства по Северному Морскому Пути, может быть осуществлена в том числе посредством использования комплекса беспилотных авиационных платформ, осуществляющих как ледовую разведку, так и доставку, и сброс грузов в труднодоступные осваиваемые регионы, в том числе при оперативной необходимости в случае проведения поисково-спасательных операций, в том числе при относительно сложных погодных условиях [1]. Учитывая, что при этом вопрос безопасности самого полета зависит от качества и

эффективности решения задач метеонавигации в том числе с информированием о пространственных границах областей, отличающихся высокими значениями  $F$ -фактора, по которому оценивается опасность явления сдвига ветра для полета авиационной платформы с учетом скорости ее движения, высоты и характера изменения скорости ветра по траектории полета. Алгоритмы оценивания  $F$ -фактора представлены в работах [2,3], требования и рекомендации к аппаратуре бортовых импульсно-доплеровских РЛС в стандартах [4,5].

В настоящей статье решена задача разработки алгоритма, позволяющего создавать сигнатуры радиолокационных сигналов, используемых в имитаторах полунатурного моделирования [6]. Их же можно использовать и на случай моделирования обнаружения сдвига ветра. Такой опыт активно используется в международной практике для сертификации бортовых РЛС, которые оснащены бортовыми РЛС переднего обзора с функцией обнаружения опасного сдвига ветра [4]. В этом случае принято использовать систему моделирования системы моделирования условий в районе аэродрома [5], в которой данные о распределении скорости перемещения воздушных потоков, определенных в базе данных (БД) посредством задания в узлах пространственной трех-размерной сетки значений проекций скорости ветра (северной, восточной и вертикальной).

Любые варианты моделей или записей реальных сигналов, которые планируется использовать для формирования сигнатур в полунатурных имитаторах для проверки наличия сдвига ветра, также могут быть ориентированы на обработку данных из базы данных с аналогичным заданием векторного поля в трехмерном пространстве. Настоящая работа содержит разработанный математический аппарат для формирования значения радиальной составляющей скорости ветра в элементах разрешения импульсно-доплеровской бортовой РЛС.

---

## Численная интерполяция дискретного поля скоростей ветра

Для интерполяции дискретного поля скоростей ветра (ДПСВ), заданного составляющими скорости ветра в узлах пространственной сетки с регулярным шагом, будем применять двухступенчатую интерполяцию: на первом шаге – кубические сплайны для осей, ориентированных в горизонтальных плоскостях, на втором – одномерную кубическую сплайновую интерполяцию в вертикальном направлении.

Введем системы координат, так как это показано на рис.1. Первая система задает пространство координат для параметров базы данных, вторая – систему координат, привязанную к текущему положению летательного аппарата (ЛА) в процессе имитации.

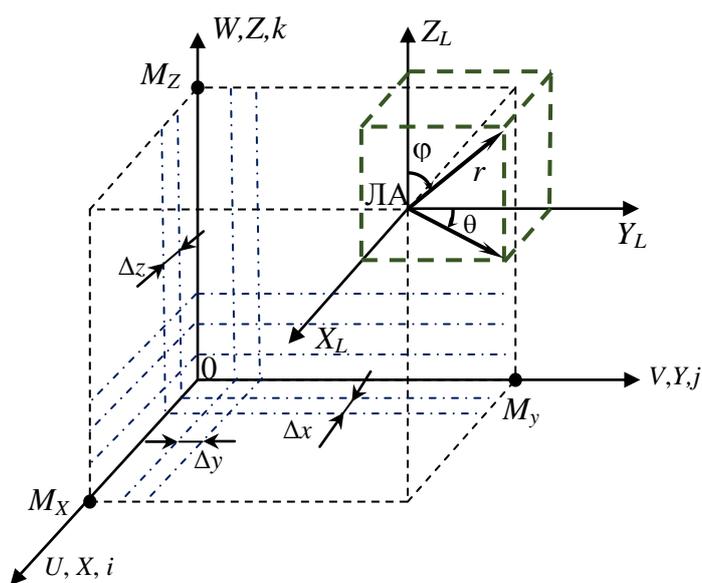


Рис. 1 Системы пространственных координат для реализации процедур интерполяции и для подготовки имитационных радиолокационных параметров

Приняты следующие обозначения для системы координат, связанной с БД:  $OX$  – ось, направленная на север;  $OY$  – ось, направленная на восток;  $OZ$  – ось, направленная вертикально вверх;  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  – размеры области

пространства с заключенными в ней имитируемыми метеообъектами, содержащими значения радиолокационной отражаемости и составляющие скоростей ветра в узлах пространственной сетки, определенной внутри области  $(M_x, M_y, M_z)$ , задаваемой с шагами  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  и порядковыми номерами шагов  $i, j, k$ .

Сама интерполяция в некоторой точке  $(x; y; z)$ , производится рядом с ближайшим узлом сетки (точкой  $A$ ) – центром области интерполяции, осуществляется в ограниченном пространстве (см. рис.2).

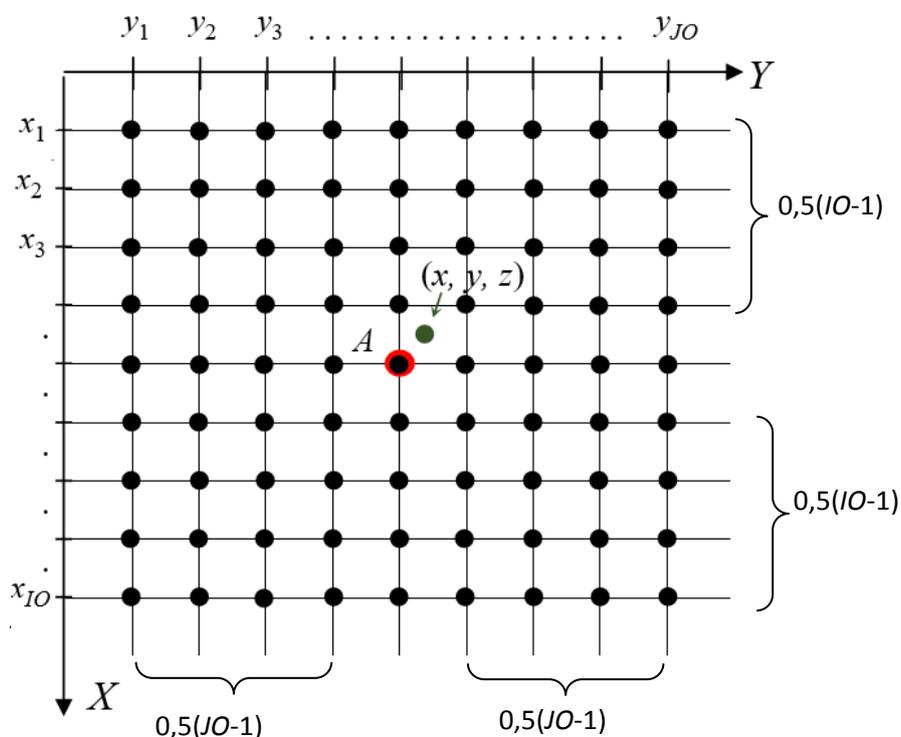


Рис. 2. – К интерполяции по горизонтали вокруг точки анализа  $(x, y, z)$

Для горизонтальной интерполяции может служить квадрат размером (800 м на 800 м), так как опасным сдвигом ветра считается такой, радиальная протяженность которого не менее 700 м [3].

«Вырезанная» для интерполяции горизонтальная область берется на высоте, близкой к точке  $A$ . Мера близости заданной координаты  $(x,y,z)$  к точке  $A(x_A, y_A, z_A)$  – норма 1 (расстояние между точками в смысле 1-й нормы

равно сумме разностей соответствующих модулей координат точек). Число отсчетов интерполяции (т.е. отсчетов из базы данных, принадлежащих области интерполяции) по координатам  $X, Y, Z$  соответственно равно  $IO, JO, KO$  ( $IO = JO$  – в горизонтальном сечении выделяется квадратная область анализа данных).

Кроме системы координат БД на рис.1 введена и система координат, связанная с носителем РЛС и содержащая декартовы оси  $(X_L; Y_L, Z_L)$ . Для оценки радиолокационных параметров необходимо ввести и привязанную к ней сферическую систему координат в которой отсчитывается дальность  $R$ , азимут  $\theta$  и угол места  $\varphi$ .

Сама интерполяция может выполняться с использованием известных математических пакетов. При использовании среды Mathcad алгоритм реализации первого этапа интерполяции (в горизонтальной плоскости) выглядит следующим образом:

а) значения проекций скоростей, заданные в трехмерной БД преобразуются в *одномерные* вектора в соответствии с заданным правилом перебора шагов в пространственной сетке. Так на первом цикле для формирования итогового вектора перебираются все шаги пространственной сетки по  $i$  от 1 до  $I$ , при  $j=1$  и  $k=1$ ; на втором цикле все шаги по  $i$  от 1 до  $I$ , при  $j=2$  и  $k=1$ ; далее идет выполнение циклов по  $i$ , с увеличением  $j$  до  $j=J$  при  $k=1$ , а затем повторение аналогичных последовательностей переборов шагов для  $k=2$  и т.д. Таким образом завершающий цикл реализуется по  $i$  от 1 до  $I$ , но уже при  $j=J$  и  $k=K$ . Таким образом формируются три одномерных вектора для проекций скоростей -  $U, V, W$ . Индекс вектора  $p$  и номеров узлов БД  $(i,j,k)$  связаны соотношениями

$$p = i + (j-1) \cdot I + (k-1) \cdot I \cdot J; \quad \begin{cases} k = \text{целое} \left[ \frac{\rho-1}{I \cdot J} \right] + 1 \\ j = \text{целое} \left[ \frac{\rho - (k-1) \cdot I \cdot J - 1}{I} \right] + 1, \\ i = \rho - I \cdot J \cdot (k-1) - I \cdot (j-1) \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho \in [1 \dots I \cdot J \cdot K]$ ,  $i \in [1 \dots I]$ ,  $j \in [1 \dots J]$ ,  $k \in [1 \dots K]$ .

б) формируется вспомогательная матрица  $\mathbf{M}_{xy}(x;y;z)$ . Состоит из двух столбцов. Первый столбец задает последовательность значений абсцисс, а второй столбец последовательность ординат точек, для которых из БД выбираются отсчетные значения из векторов  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{W}$ , формируют вектора  $\mathbf{U}_0$ ,  $\mathbf{V}_0$ ,  $\mathbf{W}_0$  в области проведения интерполяции. Её можно записать в виде

$$\mathbf{M}_{xy} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{j_0} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{j_0} \end{pmatrix}^T. \quad (2)$$

с) далее оцениваются вспомогательные вектора вторых производных  $\mathbf{vPU}_0(x;y;z)$ ,  $\mathbf{vPV}_0(x;y;z)$ ,  $\mathbf{vPW}_0(x;y;z)$  для каждой координатной составляющей скорости отдельно. Нахождение последних реализуется функцией `cspline` (встроенная функция Mathcad). Аргументами функции `cspline` являются матрица  $\mathbf{M}_{xy}$  и каждый отдельный вектор  $\mathbf{U}_0$ ,  $\mathbf{V}_0$ ,  $\mathbf{W}_0$ .

д) последний пункт алгоритма реализации поиска интерполированного значения для составляющих скоростей ветра по «вырезанной» горизонтальной области  $\mathbf{gU}(x;y;z)$ ,  $\mathbf{gV}(x;y;z)$ ,  $\mathbf{gW}(x;y;z)$  выполняется посредством функцией `interp` (встроенная функция Mathcad). Аргументами функции `interp` являются:  $\mathbf{M}_{xy}$ ; вектора  $\mathbf{vPU}_0$ ,  $\mathbf{vPV}_0$ ,  $\mathbf{vPW}_0$ ; вектора  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{W}$  и вектор аргументов  $(x, y)^T$ .

Второй шаг интерполяции проиллюстрирован на рис. 3. В этом случае это одномерная интерполяция. Здесь мы повторяем пункт б) предыдущего шага процедуры, но вместо вспомогательной матрицы используем  $\mathbf{vZ}(x;y;z)$  – вспомогательный вектор, который задает совокупность дискретных высот

ДПСВ, между функциями  $\mathbf{gU}|_{z=z_i}$  ( $\mathbf{gV}|_{z=z_i}$ ,  $\mathbf{gW}|_{z=z_i}$ ) которых реализуется данная интерполяция.

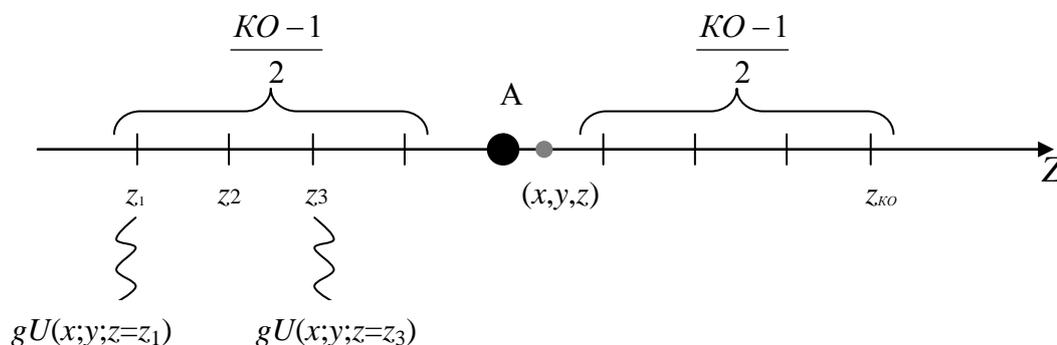


Рис. 3. – K интерполяции по вертикали вокруг точки анализа  $(x, y, z)$

Инициализируются функциональные вектора:  $\mathbf{vgU}(x; y; z)$ ,  $\mathbf{vgV}(x; y; z)$ ,  $\mathbf{vgW}(x; y; z)$  – задающие совокупность функций  $gU|_{z=z_i}$ ,  $gV|_{z=z_i}$ ,  $gW|_{z=z_i}$ , а именно  $\mathbf{vgU} = [gU|_{z=z_1}; gU|_{z=z_2}; \dots; gU|_{z=z_{ko}}]$ . Далее повторяется пункт с, то есть формируются вектора вторых производных  $\mathbf{vPU}_1(x; y; z)$ ,  $\mathbf{vPV}_1(x; y; z)$ ,  $\mathbf{vPW}_1(x; y; z)$ .

Конечные интерполированные значения составляющих скорости ветра в любой точке пространства, относящейся к заданному объему ДПСВ, а именно  $U(x; y; z)$ ,  $V(x; y; z)$ ,  $W(x; y; z)$  получаются посредством интерполяции, которую можно реализовать функцией *interp*. Аргументами функции *interp* являются: один из векторов  $\mathbf{vPU}_1$ ,  $\mathbf{vPV}_1$ ,  $\mathbf{vPW}_1$ ; вектор  $\mathbf{vZ}$ ; один из векторов  $\mathbf{vgU}$ ,  $\mathbf{vgV}$ ,  $\mathbf{vgW}$  и координата  $z$  точки для которой ведется интерполяция по вертикали.

Таким образом можно сформировать непрерывное поле скоростей ветра, посредством двухступенчатой интерполяции ДПСВ. Предварительное создание самих ДПСВ можно провести или непосредственно на БД для разных случаев сдвига ветра при моделировании района посадки [5] или

подготовив такие случаи за с использованием полуэмпирических моделей точечного сдвига ветра на базе работ [7,8]

### Оценка радиальной составляющей скорости воздушных потоков в элементе разрешения

Для дальнейшей имитации сигнала нужно получить оценку радиальной составляющей скорости ветра, чтобы иметь возможность суммировав данного значение со скоростью ЛА, спроецированной на данное направление, получить суммарную скорость сближения, которую можно пересчитать в доплеровскую частоту формируемой сигнатуры [1]. Для этого вначале реализуем проецирование интерполированного поля скоростей на радиальное направление – найдем значение функции  $Ur(x, y, z)$ .

Учтем, что в привязанной к местоположению ЛА системе координат  $(X_L, Y_L, Z_L)$  для упрощения имитации оси коллинеарны осям системы к которой определено ДПСВ. Это означает, что значения составляющей скорости ветра, определенные в точке ДПСВ будут точно такими же и для системы координат  $(X_L, Y_L, Z_L)$ . Координаты  $(x, y, z)$  определяют положение точки визирования в системе  $XYZ$ , угловые координаты в сферической системе координат  $(\theta, \varphi)$  определяют направление, под которым происходит визирование данной точки.

Согласно векторной алгебре, проецирование можно осуществить посредством скалярного произведения вектора скорости и орта линии, которая соответствует радиальному направлению. Орт линии, которая соответствует радиальному направлению задается для координатной системы, связанной с ЛА, в виде  $\mathbf{r} = (\sin\varphi \cdot \cos\theta; \sin\varphi \cdot \sin\theta; \cos\varphi)$  [9]. Таким образом, выражение для оценки радиальной составляющей скорости цели для отдельной точки пространства можно записать в виде

$$U(x, y, z, \theta, \varphi) = U(x, y, z) \cdot \sin\varphi \cdot \sin\theta + V(x, y, z) \cdot \sin\varphi \cdot \cos\theta + W(x, y, z) \cdot \cos\varphi. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет получить выражение для непрерывного скалярного поля радиальных скоростей ветра в пределах любого элемента разрешения, который находится по линии визирования РЛС. Это, в свою очередь, позволяет найти и некоторое среднее значение для каждого отдельно взятого элемента разрешения и сформировать заранее для каждого текущего углового направления сканирования некий вектор значений из оценок радиальной составляющей скорости ветра для каждого дискрета дальности, лежащего в характерном для определения опасности сдвига ветра масштабе дальности работы РЛС, включающем в себя диапазон дальностей до 10,5 км. При предлагаемой для зондирования в [4] типовой длительности импульса в 1 мкс, получаем порядка 70 дискретов дальности в интервале моделирования и от 0 до 10,5 км. Но если для уменьшения влияния помех от подстилающей поверхности на оценку доплеровской составляющей скорости ветра взять меньшую длительность импульса, около 0,8 мкс согласно рекомендациям [10], то число дискретов дальности для имитируемого радиального направления вырастет до 105-ти.

Поскольку РЛС получает информацию о средней радиальной скорости в каждой дискете дальности (элементе разрешения), необходимо выработать методику интегрирования непрерывного поля  $U(x, y, z, \theta, \varphi)$  по области элемента разрешения. Интегрирование целесообразно проводить конечным образом (т. е. посредством замены интеграла конечной суммой). Задача сводится к нахождению совокупности точек в области элемента разрешения, значения  $U$  в этих точках входят в слагаемые суммы конечного интегрирования, которое затем усредняется по числу интегрированных точек. Сам элемент разрешения в пространстве можно представить в виде усеченного конуса, взять в нем несколько сечений перпендикулярных радиальному направлению, которые представляют собой соответствующие окружности и далее равномерно распределить в них точки. Распределение

---

равномерное можно реализовать с динамически подбираемым шагом разбиения прямоугольной сетки (в диапазоне  $\pm 5\%$  от заданного) и незначительно смещаемым от радиального направления центром от которого начинается разбиение (в диапазоне  $\pm 3\%$  от заданного) для симметричного размещения точек в круге (с заданным критерием симметричности, например, по числу точек в каждом квадранте). После расстановки точек мы знаем их координаты в пространстве и можем их все спроецировать на радиальное направление с последующим усреднением.

Для увеличения качества обнаружения сдвига ветра необходимо предпринимать меры по снижению влияния переотражений от земной поверхности, а беспилотная авиационная платформа должна отличаться точностью и достоверностью оценок значений проекций собственной скорости движения на оси пространственной системы координат [11,12].

### **Результаты численного моделирования обнаружения сдвига ветра на базе разработанного подхода**

Приведем примеры результатов задания, интерполяции и моделирования обнаружения точечного опасного сдвига ветра, масштаб, пространственный размер и значения скоростей ветра заданы в соответствии с первым случаем обнаружения сдвига ветра, подробно описанном в стандарте [5]. Задать поле ветра для указанного случая можно при помощи соотношений из [7].

Рассматриваемое цифровое поле имитирует сдвиг ветра, который привел к катастрофе коммерческий реактивный лайнер в районе аэропорта Форт-Уорт в городе Даллас (США). Он является симметричным и характеризуется высокой радиолокационной отражательной способностью. Векторные графики на рис. 4, представляют собой вертикальные и горизонтальное сечения БД и отражают направление и величину воздушных потоков моделируемого сдвига ветра.

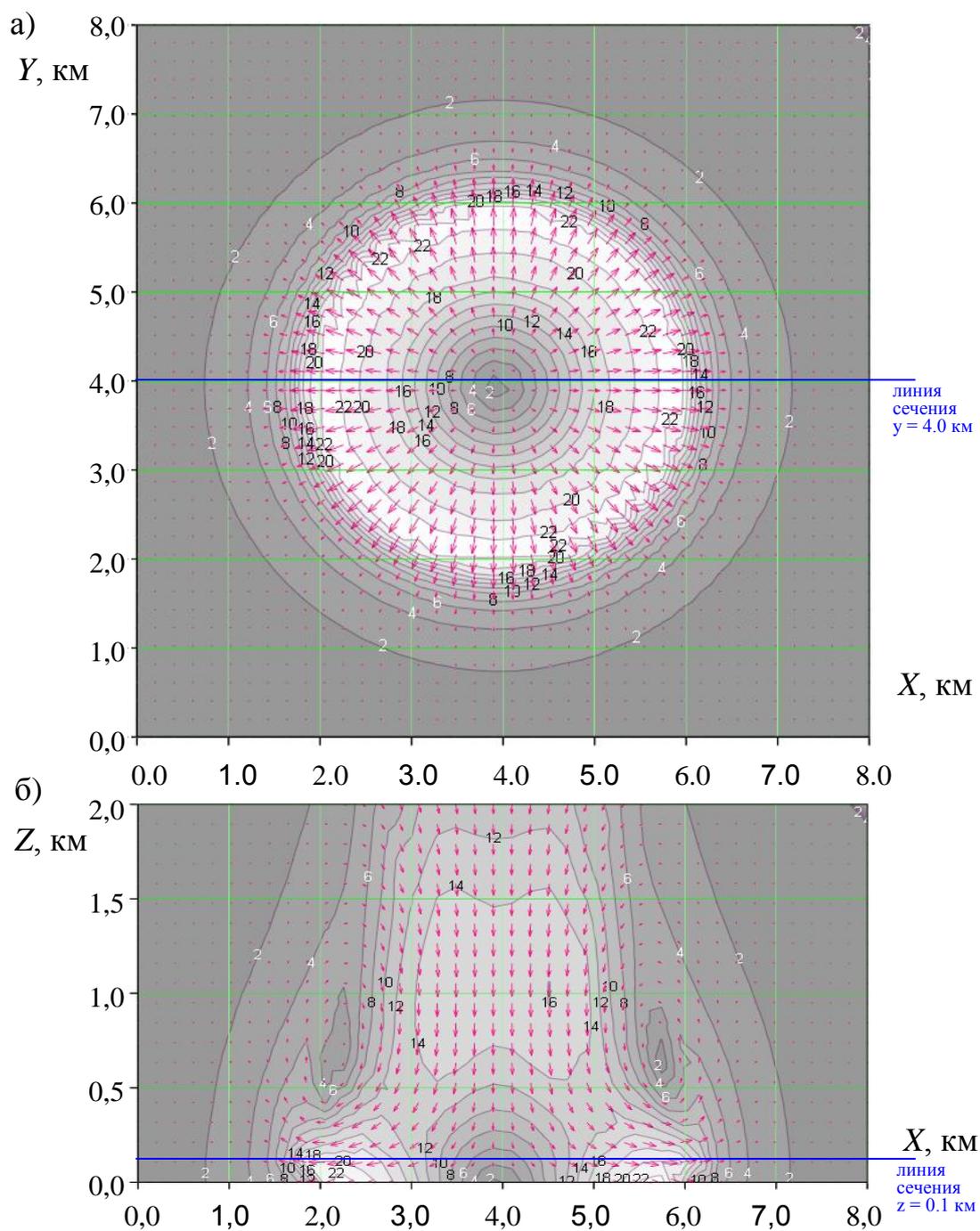


Рис. 4. – Векторно-контурные графики скоростей воздушных масс в горизонтальном (а) и вертикальном (б) сечениях симметричного сдвига ветра.

На рис. 5 представлены результаты оценки радиальной составляющей скорости цели.

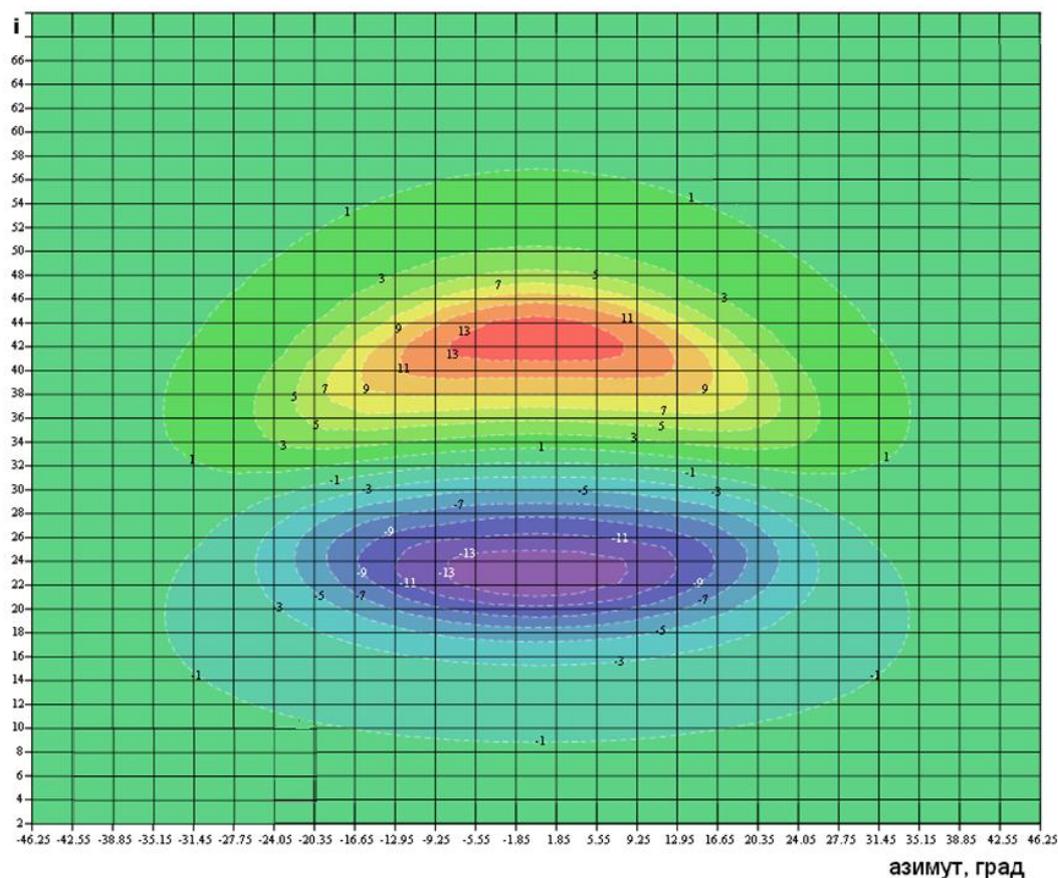


Рис. 5 – Контурный график с результатами оценки радиальной составляющей скорости цели (в м/с) в координатах номер дискета дальности (i) – азимут.

### Заключение

Предложен математический аппарат для проверки режима обнаружения сдвига ветра в импульсно-доплеровских бортовых РЛС, базирующийся на создании сигнатур в полунатурных имитаторах радиолокационных сигналов. Данное явление достаточно кратковременное и редкое, поэтому его практически невозможно включить в программу летных испытаний бортовых РЛС и сертифицировать. Однако оно является и достаточно опасным для маловысотных полетов беспилотных авиационных платформ и его обнаружение является неотъемлемой частью бортовой метеонавигации. В международной практике для этого используется обработка баз данных и имитаторы радиолокационных сигналов.

Разработанный подход к моделированию радиолокационного обнаружения сдвига ветра основан на подготовке сигнатур, требующих задания и обработки трехмерных баз данных. Описан подход к формированию как базы данных, так и моделей сдвига ветра. Приведены результаты исследования и разработанные алгоритмы, относящиеся к процессу интерполяции данных о скорости потоков воздушных масс, а также для оценки радиальных составляющих скорости ветра, получаемых в каждом элементе разрешения. Представлены результаты моделирования, которые позволяют оценивать корректность работы предложенного аппарата.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-29-00044.*

### **Литература**

1. Eischeid I, Soininen EM, Assmann JJ, Ims RA, Madsen J, Pedersen A.O, Pirotti F, Yoccoz NG, Ravolainen VT. Disturbance Mapping in Arctic Tundra Improved by a Planning Workflow for Drone Studies: Advancing Tools for Future Ecosystem Monitoring// Remote Sensing, no.13, vol.21, 2021, pp. 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs13214466>.
2. Manual on Low-level Wind Shear // International Civil Aviation Organization, 2005 URL: [skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf](https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf)
3. Fred H.P., Hinton D.A., Bowles R.L. A windshear hazard index // Conference: «9th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology». Orlando: American Meteorology Society, 2000. P. 482-487.
4. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability // ARINC, 1999 URL: [standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A](https://standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A).

5. RTCA DO-220, Minimum Operational Performance Standards for Weather Radar Systems // Radio Technical Commission for Aeronautics, 1993 URL: [standards.globalspec.com/std/13105569/RTCA%20DO-220](https://standards.globalspec.com/std/13105569/RTCA%20DO-220).

6. Орешкина М. В., Степанов М. А., Киселев А. В.. Имитация сигналов РЛС обзора воздушного пространства, отраженных от поверхности земли и метеорологических образований. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2023. 258 с.

7. Oseguera, Rosa M. and Roland L. Bowles. A simple, analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow. NASA Technical Memorandum 100632, 1988, 17 p. [ntrs.nasa.gov/api/citations/19880018674/downloads/19880018674.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19880018674/downloads/19880018674.pdf)

8. Y. Ying-jie, L. Yong and L. Jing-hua, Simulation and study of windshear signal in airborne pulse Doppler weather radar, Proceedings of 2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology, Dalian, China, 2013, pp. 1152-1156, doi: 10.1109/ICCSNT.2013.6967306

9. Антипов В.Н., Викентьев А.Ю, Колтышев Е.Е, Кондратенков Г.С. Авиационные системы радиовидения. М.: Радиотехника, 2015, 648 с.

10. Бестугин А. Р., Рыжиков М. Б., Новикова Ю. А., Киршина И. А. Оценка опасности микропорывов в бортовой метеонавигационной РЛС для летательных аппаратов малой авиации // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – Т. 74, № 11. – С. 23-29. – DOI 10.18127/j20700784-202011-05. – EDN TLMUMT.

11. Ryzhikov M.B. Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of Re-Reflections from the Earth's Surface // Conference: «2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems». Saint-Petersburg: WECONF, 2023, pp. 1-5.

---

12. Рыжиков М. Б., Новикова Ю. А., Терещенко Г. В. Разработка численного метода оценки энергетических требований к бортовым РЛС для метеонавигации в заполярных // Инженерный вестник Дона, 2024, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8921.

### References

1. Eischeid I, Soininen E.M., Assmann J.J., Ims R.A., Madsen J., Pedersen A.O., Pirotti F., Yoccoz N.G., Ravolainen V.T. Disturbance Mapping in Arctic Tundra Improved by a Planning Workflow for Drone Studies: Advancing Tools for Future Ecosystem Monitoring. Remote Sensing, no.13, Vol. 21. 2021. pp. 1-25.
2. Manual on Low-level Wind Shear. URL: skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf
3. Fred H.P., Hinton D.A., Bowles R.L. Conference: 9th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. Orlando: American Meteorology Society, 2000. pp. 482-487.
4. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability URL: standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A
5. RTCA DO-220, Minimum Operational Performance Standards for Weather Radar Systems URL: standards.globalspec.com/std/13105569/RTCA%20DO-220
6. Oreshkina M.V., Stepanov M.A., Kiselev A.V. Imitaciya signalov RLS obzora vozdušnogo prostranstva, otrazhennyh ot poverhnosti zemli i meteorologicheskikh obrazovanij [Simulation of airspace surveillance radar signals reflected from the Earth's surface and meteorological formations]. Novosibirsk: NSTU, 2023. 258 p.
7. Oseguera, Rosa M. and Roland L. Bowles. A simple, analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow. NASA



Technical Memorandum 100632, 1988, 17 p.  
[ntrs.nasa.gov/api/citations/19880018674/downloads/19880018674.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19880018674/downloads/19880018674.pdf)

8. Y. Ying-jie, L. Yong and L. Jing-hua, Simulation and study of windshear signal in airborne pulse Doppler weather radar, Proceedings of 2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology, Dalian, China, 2013, pp. 1152-1156, doi: 10.1109/ICCSNT.2013.6967306

9. Antipov V.N., Vikent'ev A.Yu., Koltyshev E.E., Kondratenkov G.S. Aviacionnye sistemy radiovideniya [Aviation radio vision systems]. Moscow: Radiotekhnika, 2015, 648 p.

10. Bestugin A.R., Ryzhikov M.B., Novikova Yu.A., Kirshina I.A. Uspekhi sovremennoj radioelektroniki. 2020. Vol. 74. № 11. pp. 23-29.

11. Ryzhikov M.B. Conference: 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. Saint-Petersburg: WECONF, 2023, pp. 1-5.

12. Ryzhikov M. B., Novikova Yu. A., Tereshchenko G. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №1. URL:[ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8921](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8921)

**Дата поступления: 23.10.2024**

**Дата публикации: 5.12.2024**