

Имитационное моделирование для верификации оценивания радиолокационных параметров движения воздушных масс

Ю. А. Новикова

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Аннотация: Проверка и отладка алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, реализующего поиск таких опасных для полетов воздушных судов явлений как порывы ветра, области турбулентности могут быть реализованы в имитаторах радиолокационных сигналов, в том числе с использованием концепции обращения к базам данных, хранящих тестовые поля ветров по координатным составляющим. После реализации интерполяции данных баз можно получить непрерывные поля в том числе прогнозируемых радиолокационных параметров, обработка которых в зависимости от меняющихся параметров лоатора: ширина луча, длительность импульса зондирования приводит к разным оценкам в том числе измеряемых параметров движения воздушных масс. В настоящей статье описан подход к имитационному моделированию, позволяющий путем формирования радиосигналов, первоисточником которых являются непрерывные интерполированные функции параметров движения воздушных масс, получать или усредненные значения радиальной скорости в элементах разрешения, или ее среднеквадратическое отклонение. Это в итоге позволяет тестировать алгоритмы обработки сигналов для режимов обнаружения сдвигов ветра или турбулентностей в метеонавигационных радарх.

Ключевые слова: бортовая РЛС, метеонавигация, имитация, алгоритмы, оценивание параметров.

Введение

Алгоритмы обработки сигналов для обнаружения опасных для полетов метеоявлений таких как турбулентные области или «микровзрывы», реализующие поиск и визуализацию пространственных областей, содержащих существенные «сдвиги» значений скорости горизонтальных ветровых потоков [1] по оценкам F-фактора опасности, усредненного на дистанции в 1 км [2,3], для бортовых метеонавигационных радаров могут быть верифицированы с использованием описанного в работе [4] подхода к интерполяции эталонных баз данных, содержащих значения координатных составляющих радиолокационной отражаемости и составляющих векторов скорости воздушных потоков в декартовой системе координат с получением

в том числе непрерывного скалярного поля радиальных скоростей ветра $U_r(x, y, z, \theta_v, \varphi_v)$ по алгоритму, представленному в [4]. Принятие же решений о наличии опасных для полета протяженных областей с динамично меняющейся скоростью ветра можно проводится при этом посредством анализа данных о значениях радиальной составляющей скорости, полученных в каждом элементе разрешения (ЭР) [2,5]. Чтобы довести имитационное моделирование до значения радиальной составляющей скорости или ее среднеквадратического отклонения (СКО) в элементе разрешения радара, требуется разработать методику обработки непрерывного поля $U_r(x, y, z, \theta_v, \varphi_v)$ по области элемента разрешения.

1. Математическое описание алгоритмов имитации оценивания радиолокационных параметров измерения радиальной составляющей или СКО ветровых потоков в элементе разрешения

Для реализации имитационного моделирования на вычислительных машинах операцию интегрирования для получения требуемой оценки параметров будем проводить конечным образом (т.е. посредством замены интеграла конечной суммой). Задача сводится к нахождению совокупности точек в области ЭР, значения U_r в этих точках войдут в слагаемые суммы конечного интегрирования. При формировании созвездия точек интегрирования следует стремиться к тому, чтобы характер распределения точек в области ЭР был близок к равномерному (в этом случае выражение для вычисления интеграла получается более простым) [6]. ЭР аппроксимируем усеченным конусом и введем понятие центральной линии визирования (ЦЛВ) – последняя будет проходить через ось вращения фигуры ЭР. Зададим на отрезке ΔR , который советует протяженности ЦЛВ в ЭР, L_r точек с индексами i – номер элемента разрешения по дальности, n – номер

точки по дальности в пределах ΔR . Получим ряд координат точек по дальности

$$r_{i,n} = R_{H_i} + \left(n + \frac{1}{2}\right) \left(\frac{\Delta R}{\Lambda r}\right); \quad (1)$$

через которые построим плоскости, перпендикулярные ЦЛВ. Разместим созвездие точек интегрирования на данных плоскостях (внутри сечения).

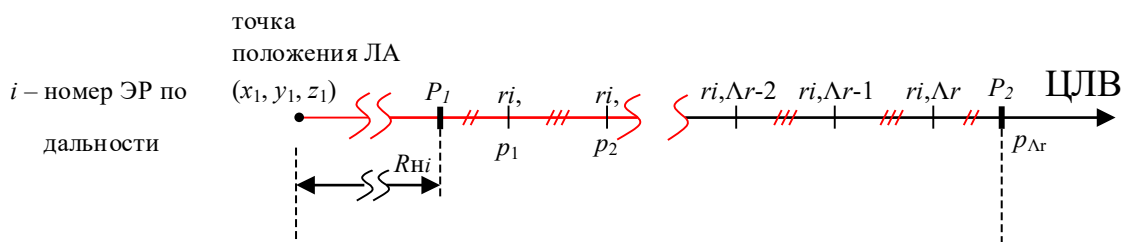


Рис. 1. Разбиение элемента разрешения по дальности на точки, в которых находятся созвездия точек для формирования имитационных оценок

Требование равномерности точек в радиальном направлении удовлетворяется выбором (1). Далее необходимо решить задачу размещения точек интегрирования в каждом из Λr сечений. Пусть задано число точек интегрирования в сечении – L . Условие равномерности будет выполняться в случае размещения точек интегрирования в узлах прямоугольной сетки, наложенной на сечение. В связи с наличием теоретических трудностей, связанных с определением размера шага сетки, смещения центра сетки относительно центра сечения и т.п. при заданном значении L , было принято решение создать вспомогательный итерационный алгоритм определения так называемого интеграционного веера лучей (ИВЛ).

В первой части алгоритма ИВЛ определяется радиус (R_k) некоторого круга «ТСО» (ТСО – текущее сечение оценивания), являющегося прототипом сечений фигуры ЭР, при заданных некоторых значениях Δ (шага прямоугольной сетки); $(\delta_1; \delta_2)$ – смещения центра круга «ТСО» от центра

прямоугольной сетки, определяемое в системе координат круга «ТСО» $X_K Y_K$ и некотором начальном значении $R_K = R_{K.нач}$ (см. рис. 2).

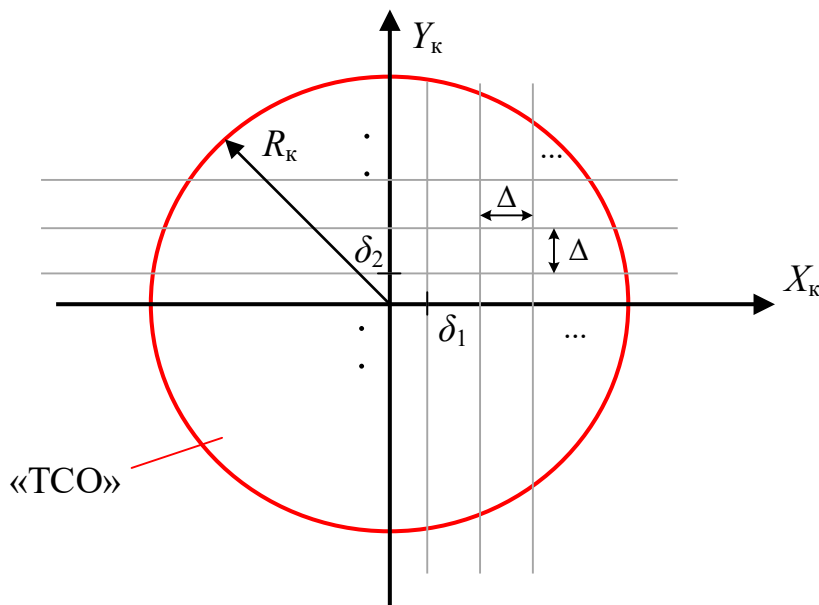


Рис. 2. Нахождение созвездия точек для формирования имитационных оценок в отдельных сечениях ЭР

Поиск R_K ведется итерационным образом: последовательно наращивается значение R_K (на величину Δ) и определяется число узлов сетки, попавших в круг «ТСО»; по достижении числа внутренних точек значения L поиск прекращается и формируется искомое значение R_K . Возможна ситуация, когда приращение числа внутренних точек в круге при приращении R_K на Δ превысит единицу, т.е. произойдет перескок через L . В результате чего подпрограмма меняет начальные условия $(\delta_1, \delta_2, \Delta)$, пока не достигает требуемого результата. Для полученного значения R_K формируется матрица

$$\mathbf{VeerXY} = \begin{pmatrix} x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kL} \\ y_{k1} & y_{k2} & \dots & y_{kL} \end{pmatrix},$$

определяющая координаты точек внутри круга «ТСО». Следующий этап – получение сферических координат лучей θ и φ по декартовым координатам матрицы **VeerXY**

$$\theta_{i,j,n,k} = \alpha_j + \operatorname{arctg} \left[\frac{x_{k(i,k,n)}}{R_{k(i,j,n)} \operatorname{ctg} \left[\frac{\Delta\alpha}{2} \right]} \right],$$

где i – абсциссы внутренних узлов круга «ТСО», α_j – азимут ЦЛВ (j – номер шага в зоне обзора по азимуту), $\Delta\alpha$ – ширина основного луча функции направленности антенны. Другая угловая координата точек интегрирования оценивается по соотношению

$$\varphi_{i,j,n,k} = \begin{cases} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\left(x_{k(i,k,n)} \right)^2 + \left(R_{k(i,j,n)} \operatorname{ctg} \left[\frac{\Delta\alpha}{2} \right] \right)^2} / |y_{k(i,k,n)}| \right), & \text{если } y_k \geq 0; \\ \pi - \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\left(x_{k(i,k,n)} \right)^2 + \left(R_{k(i,j,n)} \operatorname{ctg} \left[\frac{\Delta\alpha}{2} \right] \right)^2} / |y_{k(i,k,n)}| \right), & \text{если } y < 0. \end{cases}$$

Исходя из способа построения ТСО, лучи веера пронизывают круг во внутренних узлах прямоугольной сетки; однако, а круговые сечения, вписывающиеся в угловое разрешение радара (конечно же перпендикулярные ЦВЛ) будут также пронизываться ИВЛ в узлах прямоугольной сетки (правда, другого шага Δ). Тогда выбрав точки интегрирования, как точки пересечения сечений $r_{i,n}$ некоего ЭР с веером лучей этого же ЭР, можно добиться почти равномерного распределения интеграционных точек по фигуре ЭР. В результате удастся определить координаты для созвездий точек оценивания, которые в дальнейшем будут использоваться для получения матрицы радиальных скоростей или формирования распределения скоростей в пределах ЭР. Так, например,

матрицу радиальных скоростей можно сформировать как ту, у которой элементы Us_{ij} равны:

$$Us_{i,j} = \frac{1}{\Lambda r L} \sum_{n=1}^{\Lambda r} \sum_{k=1}^L Ur(r_{i,n}; \theta_{j,i,n,k}; \varphi_{j,i,n,k}).$$

Связать значения в сферической системе координат с координатами в декартовой с центром в точке носителя бортовой РЛС с учетом его эволюций по крену, тангажу, рысканью, а потом перевести их в глобальную систему координат, где содержится точки, соответствующие заданное имитируемое ветровое поле и оценки в них радиальных скоростей можно по соотношениям [4,7]. Если не усреднять точки внутри ЭР, а взвешивать их диаграммой направленности антенны, то можно получить распределение скоростей, которое позволяет оценивать ширину доплеровского спектра и, как следствие, имитировать случаи оценивания турбулентных ветровых потоков. Модели для формирования турбулентных ветровых потоков заданных пространственных масштабом с нормальным законом распределения составляющих скоростей представлены в [8,9]. Если задать их с распределением скоростей с пространственным масштабом меньшим минимальной протяженности элемента разрешения, то можно промоделировать случай корректного оценивания наличия опасной турбулентности в пределах ЭР. Различные алгоритмы оценивания опасной турбулентности для бортовых РЛС представлены в [10,11].

Результаты такой верификации алгоритма обнаружения турбулентности можно проиллюстрировать рис.3 и рис.4.

На рис.3 приведен результат визуализации в горизонтальном сечении, проходящем через высоту полета носителя, имитации двух пространственных областей с наличием турбулентности с заданным СКО скорости ветровых потоков, которые представлены соответствующими цифрами.

На рис.4 представлено отображение на модели индикатора РЛС выделенных областей опасной турбулентности, определенных путем моделирования обработки имитированных радиолокационных сигналов с получением среднеквадратического отклонения радиальных составляющих скоростей в элементах разрешения зоны обзора бортовой РЛС.

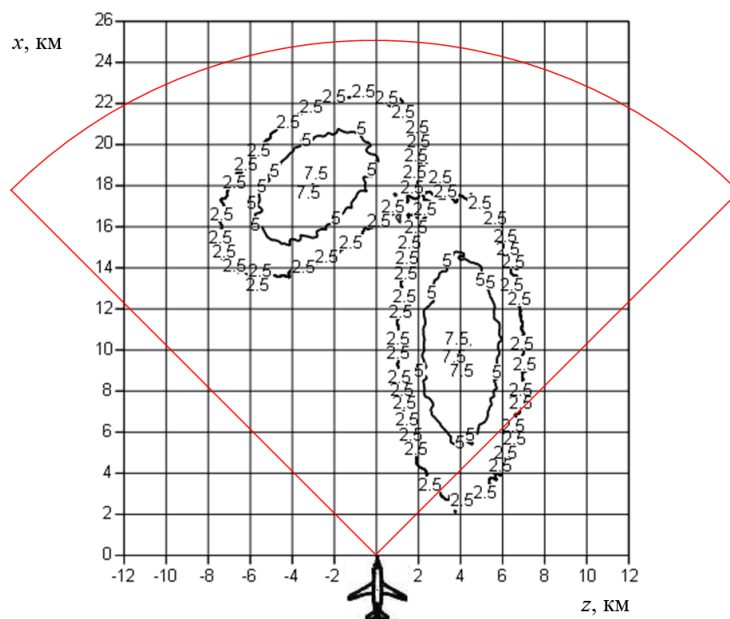


Рис. 3. Заданное имитируемое поле областей турбулентности со значениями срежнеквадратических отклонений в элементах разрешения

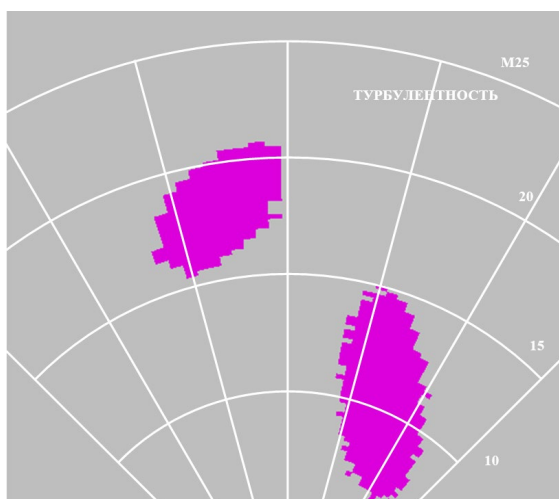


Рис. 4. Результаты верификации процедуры обработки имитируемого радиосигнала для выявления опасных для полета областей турбулентности в виде отображения на модели индикатора

Приведенная визуализация показывает корректность работы алгоритма вторичной обработки: уровень турбулентности, положение, ориентация, ширина локальных областей турбулентностей адекватно отображаются на компьютерной модели индикатора.

Заключение

Разработана часть математического аппарата для верификации алгоритмов обработки радиосигналов для обнаружения опасных для полета ветровых явлений, которые могут применяться в полунатурных имитаторах радиолокационных сигналов. Он затрагивает часть подготовки параметров для имитации, реализующейся через обработку интерполированного по трехмерным базам данных исходного ветрового поля или заданного какой-либо функцией по верифицированным ранее моделям, описывающим турбулентность или сдвиг ветра. Представлены результаты моделирования, которые позволяют оценивать корректность работы предложенного аппарата.

Литература

1. Manual on Low-level Wind Shear. International Civil Aviation Organization. 2005. URL: skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf
2. 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. Pp. 482-487.
3. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability. ARINC, 1999 URL: standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A.
4. Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А., Терещенко Г.В. Численное моделирование для проверки режима обнаружения сдвига ветра в

имитаторах радиолокационных сигналов для бортовых РЛС // Инженерный вестник Дона. 2024. №11 URL: ivdon.ru/magazine/archive/ n12y2024/9677.

5. Ying-jie Y., Yong L., Jing-hua L. 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.

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. Белов С. В., Гордиенко А. В., Проскурин В. Д. Аэродинамика и динамика полета. Оренбург: Оренбургский государственный университет. 2014. 110 с.

8. Madden M. Verifying Implementation of the Dryden Turbulence Model and MIL-F-8785 Gust Gradient. Modeling and Simulation Technologies Conference. 2018. 18 p.

9. Chang H. P., Frost W. Development of a microburst turbulence model for the joint airport weather studies windshear data. Engineering. 1987. 67 p.

10. Doviak R., Zrnich D. Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press. 2014. 939 p.

11. Novikova Yu. A., Ryzhikov M. B. 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg. Russia. 2020. Pp. 1-7. URL: ieeexplore.ieee.org/document/9131533.

References

1. Manual on Low-level Wind Shear. URL: skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf.

2. 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.
3. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability URL: standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A.
4. Ryzhikov M.B., Novikova Yu.A., Tereshchenko G.V. Inzhenernyy vestnik Dona. 2009. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9677.
5. Ying-jie Y., Yong L., Jing-hua L. Proceedings of 2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology. Dalian. China. 2013. Pp. 1152-1156.
6. Oreshkina M.V., Stepanov M.A., Kiselev A.V. Imitaciya signalov RLS obzora vozdushnogo 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. Belov S. V., Gordiyenko A. V., Proskurin V. D. Aerodinamika i dinamika poleta [Aerodynamics and flight dynamics]. Orenburg: OGU. 2014. 110 p.
8. Madden. M. Verifying Implementation of the Dryden Turbulence Model and MIL-F-8785 Gust Gradient. Modeling and Simulation Technologies Conference. 2018, 18 p.
9. Chang H. P., Frost W. Development of a microburst turbulence model for the joint airport weather studies windshear data. Engineering. 1987. 67p.
10. Doviak R., Zrnich D. Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press. 2014. 939 p.
11. Novikova Yu. A., Ryzhikov M. B. 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg. Russia. 2020. Pp. 1-7. URL: ieeexplore.ieee.org/document/9131533.

Дата поступления: 5.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025
