

УДК 621.396.96

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОН ВЕРОЯТНОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. А. Питерцев, д. т. н. Ф. И. Яновский

Национальный авиационный университет
Украина, г. Киев
pitertsev@bigmir.net; yanovsky@nau.edu.ua

Необходимая пилоту информация о наличии зоны вероятного обледенения по курсу движения летательного аппарата может быть получена с помощью бортового поляриметрического радиолокатора. В работе на основании моделирования и анализа экспериментальных данных синтезирован параметрический алгоритм обнаружения зон вероятного обледенения и выполнена оценка его эффективности.

Ключевые слова: радиолокация, поляриметрия, обледенения, летательные аппараты, параметрический алгоритм.

Обледенение является одним из наиболее опасных метеорологических явлений в гражданской авиации. Лучший способ бороться с обледенением — предотвратить его появление. Физическая природа обледенения летательных аппаратов (ЛА) заключается в образовании ледяной корки, чаще всего на крыльях или корпусе ЛА, при контакте холодного материала обшивки с атмосферной влагой. В результате отложения льда искажается форма профиля крыла и оперения, что приводит к ухудшению аэродинамических качеств самолета, к потере его устойчивости [2]. В арсенале современных ЛА имеется ряд средств и инженерных решений, направленных на борьбу с таким опасным метеорологическим явлением, как обледенение. В то же время следует признать, что эффективность существующих решений недостаточна. Так, некоторые системы защиты ото льда должны применяться только в упреждающем режиме. Самым эффективным методом предотвращения обледенения ЛА следует признать избегание зон вероятного обледенения (ЗВО) в процессе полета. Алгоритм обнаружения зон вероятного обледенения должен выделять области пространства (облака или их части), содержащие переохлажденные капли воды на фоне других облаков, которые не представляют опасности для полета летательных аппаратов. Опасными с точки зрения возможности обледенения является относительно небольшой процент облаков. В [1, 3, 4] рассматривались пути радиолокационного обнаружения ЗВО с борта самолета и предложены некоторые, в частности эвристические, алгоритмы обработки сигнала и принятия решения. Однако оценка эффективности обнаружения ЗВО не была выполнена. Статистический параметрический алгоритм, представленный в данной статье, позволяет путем анализа радиолокационных сигналов, отраженных от облаков, установить зависимость между поляриметрическими составляющими отраженного сигнала и физическими параметрами микрочастиц, входящих в состав облака. Это, в свою очередь, дает информацию о наличии в облаке жидкой составляющей и позволяет принять решение о наличии угрозы в данной области пространства для полета ЛА.

Математическая модель поляриметрических параметров отраженного сигнала

Параметры отраженного от облака радиолокационного сигнала определяются физической структурой частиц, составляющих это облако. Для простоты задачи представим, что облако может содержать 2 типа частиц: капли воды, имеющие круглую, слегка приплюснутую форму, и ледяные кристаллы, имеющие форму вытянутого шестигранного столбика или шестигранной пластины (рис. 1).

Капли воды являются опасными для полета объектами, поскольку при отрицательной температуре воздуха приводят к образованию на поверхности ЛА ледяного покрова. Ледяные кристаллы не являются опасными частицами в составе облака, поскольку при соприкосновении с поверхностью ЛА просто отскакивают в сторону. Тогда задача определения опасных с точки зрения возможности об-

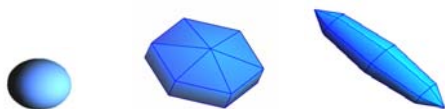


Рис. 1. Модели капли воды (слева) и кристаллов льда (в центре и справа)

леденения ЛА областей пространства может быть сведена к задаче бинарной классификации объектов по данным радиолокационного сканирования целей. Под целями понимаются метеорологические образования — облака — находящиеся по курсу следования ЛА. А объектами классификации являются гидрометеоры — мельчайшие частицы, составляющие облако. Процесс обнаружения ЗВО и отнесения

их к определенным пространственным координатам в заданное время на основании результатов дистанционного зондирования будем называть локализацией ЗВО [2]. Определение температуры облачных частиц может быть сделано, например, с помощью пассивного радиометра [5].

Рассмотрим более подробно физическую суть отражения гидрометеора электромагнитной волны, излучаемой антенной радиолокатора. Если диаметр D облучаемой частицы значительно меньше, чем длина волны λ радиолокатора, то эта частица является релеевским рассеивателем, и ее эффективная площадь обратного рассеяния (ЭПР) σ может быть оценена с помощью выражения

$$\sigma \approx (\pi^5 / \lambda^4) |K|^2 D^6 \quad (1)$$

где K — комплексный коэффициент преломления вещества частицы [2]; λ — длина волны сканирующего сигнала; D — диаметр частицы.

Величина $|K|^2$ для воды равна приблизительно 0,93, а для льда — 0,19 [2]. Поскольку в отражающем объеме присутствует множество релеевских частиц различного размера, то удельная ЭПР на единицу объема σ_0 на дальности R определяется как [2]

$$\sigma_0 = (\pi^5 / \lambda^4) |K|^2 Z, \quad (2)$$

где Z — радиолокационная отражаемость (РО).

Для отражающего объема, находящегося на дальности R , РО определяется выражением [2]

$$Z(R) = \int_0^{\infty} N(D, R) D^6 dD. \quad (3)$$

Объединив все технические характеристики РЛС, входящие в уравнение радиолокации [2], единым параметром C , который имеет смысл энергетического потенциала данного радиолокатора, среднюю принимаемую мощность при отражении от метеорообъекта с РО Z можно записать в виде:

$$\bar{P}_{np} \approx \frac{C \cdot Z}{R^2} |K|^2. \quad (4)$$

В отличие от удельной ЭПР σ_0 , величина РО является характеристикой только самого метеорологического объекта. Из выражения (4) следует, что, измеряя мощность сигнала на входе приемника \bar{P}_{np} , можно оценивать РО метеорологического объекта.

Рассмотрим подробнее такие поляризметрические параметры, как дифференциальная отражаемость Z_{DR} и линейное деполаризационное отношение L_{DR} :

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{P_{hh}}{P_{vv}}, \quad (5)$$

$$L_{DR} = 10 \log \frac{P_{hv}}{P_{vh}}, \quad (6)$$

где P — значения мощности отраженного сигнала, а индекс внизу отражает поляризацию исходящей и принятой волны. Так, например, индекс hh означает, что исходящая из передатчика волна имела горизонтальную поляризацию, а принимаемая — вертикальную. Поскольку мощности в формулах (5), (6) входят в состав дроби, они могут быть заменены соотношением ЭПР рассеивателей на соответствующих поляризациях. Эти два параметра могут быть взяты за основу параметрического алгоритма определения ЗВО. Их расчет удобен тем, что погрешности измерения параметров, стоящих в числителе и знаменателе дроби, могут взаимно компенсироваться и не оказывать существенного влияния на результат.

Бинарная задача локализация ЗВО

Определим пространство решений, в котором существуют два состояния:

— есть опасность обледенения ЛА, что подразумевает выполнение события наличия в исследуемой области пространства

дуемом объеме метеорологического объекта (облака) переохлажденных капель воды;

— нет опасности обледенения ЛА, что подразумевает выполнение события отсутствия в исследуемом объеме метеорологического объекта (облака) переохлажденных капель воды, а исследуемый метеорологический объект содержит, к примеру, лишь ледяные кристаллы.

Предположим, что указанные события описываются известными законами распределения вероятностей. Обозначим вероятность правильного обнаружения как D , а вероятность ложной тревоги как F . Необходимо учесть, что значения Z_{DR} могут быть как положительными, так и отрицательными, а значения L_{DR} всегда отрицательны. При этом большие значения Z_{DR} соответствуют большей вероятности обледенения, и меньшие значения L_{DR} соответствуют меньшей вероятности обледенения. Тогда вероятность правильного обнаружения зоны вероятного обледенения по одному параметру L_{DR} можно записать как

$$D_{L_{DR}} = \int_{-\infty}^{F_0} p_{drops}(L_{DR}) dL_{DR}, \quad (7)$$

где L_{DR} — значения линейного деполаризационного отношения, F_0 — порог принятия решения; p_{drops} — плотность вероятности распределения параметра L_{DR} для капель. Вероятность ложной тревоги при обнаружении ЗВО по одному L_{DR} равна:

$$F_{L_{DR}} = \int_{-\infty}^{F_0} p_{crystals}(L_{DR}) dL_{DR}, \quad (8)$$

где $p_{crystals}$ — плотность вероятности распределения параметра L_{DR} для кристаллов при отсутствии капель.

Аналогично запишем показатели качества обнаружения ЗВО по параметру Z_{DR} :

$$D_{Z_{DR}} = \int_{F_0}^{\infty} p_{drops}(Z_{DR}) dZ_{DR}, \quad (9)$$

$$F_{Z_{DR}} = \int_{F_0}^{\infty} p_{crystals}(Z_{DR}) dZ_{DR}. \quad (10)$$

Опираясь на результаты математического моделирования с использованием данных измерений [3, 4] в предположении нормального распределения информативных параметров при соответствующей параметризации распределений согласно экспериментальным данным, зададим область значений параметра L_{DR} в пределах 3σ для капель в диапазоне (от -30 до -50 дБ), а для кристаллов — в диапазоне (от -15 до -25 дБ). Аналогично для параметра Z_{DR} : отражение от капель принимаем в пределах (от $-1,5$ до 2 дБ), отражение от кристаллов в пределах ($-2,5$ до 1 дБ) (рис. 2).

Согласно критерию идеального наблюдателя, при условии, что одномерные плотности распределения вероятностей обнаружения ледяных кристаллов и переохлажденных капель воды описываются

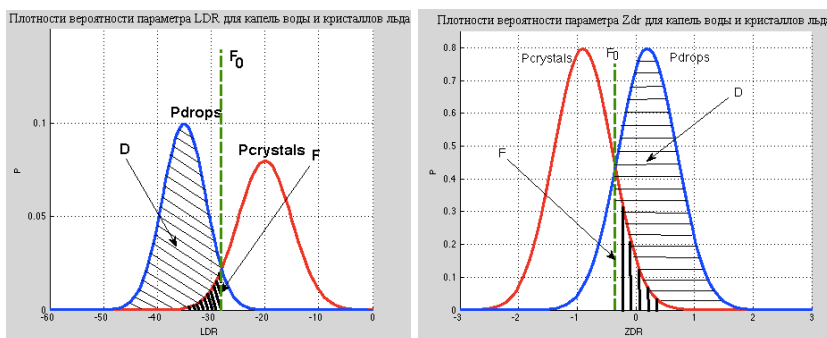


Рис. 2. Плотности вероятности параметров L_{DR} (слева) и Z_{DR} (справа) для капель воды и кристаллов льда.

нормальным законом распределения, оптимальным значением параметра L_{DR} для порога принятия решения F_0 будет значения $F_0 = -27$ дБ, как изображено на рис. 2, слева. При таком значении порога вероятность правильного решения, согласно формуле (7), составит $D=0,977$, а вероятность ложной тревоги, согласно (8), соответственно будет $F=0,014$. Графически эти величины представлены на рис. 2 как

площади областей слева от линии F_0 , выделенные штриховкой. Всего же площадь, ограниченная графиком плотности вероятности, как для кристаллов, так и для капель воды, равна 1.

Параметр Z_{DR} менее точен для определения ЗВО. Так, согласно приведенным выше данным, если принять значение оптимального порога принятия решения для этого параметра $F_0 = -0,4$ дБ, то ве-

роятность правильного обнаружения и ложной тревоги, согласно (9), (10), будут для параметра Z_{DR} соответственно равны $D = 0,885$, $F = 0,159$.

Более надежно можно решить задачу определения ЗВО, используя оба параметра одновременно. В этом случае необходимо в качестве априорной информации воспользоваться двумерным распределением этих параметров для одной и другой ситуаций. Гауссова двумерная модель распределения информативных параметров представлена на рис. 3 для обоих случаев. Применяя классический подход с вычислением дискриминантной функции в виде отношения правдоподобия и сравнения ее с пороговым уровнем, можно получить оценки верных и ошибочных решений для двумерного случая. Учитывая, что в силу физических причин параметры L_{DR} и Z_{DR} между собой слабо связаны, результаты должны быть существенно лучше. Предварительные оценки показывают, что в этом случае вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги будут следующими: $D = 0,902$, $F = 1,6 \cdot 10^{-7}$.

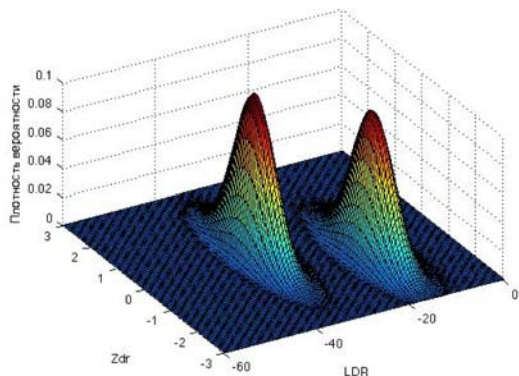


Рис. 3 Двумерные плотности распределения вероятностей обнаружения кристаллов льда и капель воды по параметрам L_{DR} и Z_{DR} .

Выводы

Таким образом, из приведенных результатов расчета вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги при использовании параметрического алгоритма обнаружения зон вероятного обледенения летательных аппаратов следует, что имеется теоретическая возможность выявлять опасные для полета ЛА зоны на основании одного или нескольких

параметров отраженного от облака радиолокационного сигнала. Лучшие результаты показывает алгоритм, который основывается более чем на одном параметре отраженного сигнала. Многопараметрический подход является более предпочтительным для практического применения в алгоритме обнаружения ЗВО летательных аппаратов. Полученные количественные результаты оценки эффективности параметрического алгоритма следует рассматривать как теоретический предел, к которому можно стремиться при разработке реальных алгоритмов обнаружения зон вероятного обледенения с помощью поляриметрических радиолокаторов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yanovsky F. J., Doppler-Polarimetric Approach for Supercooled Water Detection in Clouds and Precipitation by Airborne Weather Radar // Proc. International Radar Symposium IRS-2004, Warsaw, Poland.— 2004.—P. 93—100.
2. Яновський Ф. Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден.— Київ: Видавництво НАУ, 2003 с.
3. Pitertsev A., Sidorenko T., Yanovsky F. Aircraft Icing Prevention Radar System: Models and Software for Calculation of Information Parameters // Proc. International Radar Symposium IRS-2005.— Berlin, Germany.— 2005.— P. 489—492.
4. Pitertsev A., Yanovsky F. Polarimetric Approach to Detection of Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms // Proc. 4th European Radar Conference.— Munich.— 2007.— P. 271—274.
5. Kadyrov E. N., Pick D. R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparison with in situ observation // Oxford Press, Meteorological Applications.— 1998.— Vol. 5. Jss. 4.— P. 393—404.

A. A. Pitertsev, F. J. Yanovsky

Evaluating the effectiveness of the parametric algorithm for radar detection of probable aircraft icing zones.

The pilot needs information about zones of probable icing on the route of the aircraft flight. This information can be obtained with the help of airborne polarimetric radar. This paper deals with modeling and analysis of experimental data, synthesis of parametric algorithm for detection of the probable aircraft icing areas, and estimation of its effectiveness.

Keywords: *radar, polarimetry, aircraft icing, parametric algorithm.*