

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКОГО КЛАССИФИКАТОРА ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОВ ДЛЯ АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ ЗОН ВЕРОЯТНОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В МЕТЕОЛОКАТОРАХ X-ДИАПАЗОНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-10-4-12

Болелов Эдуард Анатольевич,
МГТУ ГА, Москва, Россия, e.bolelov@mstuca.aero

Васильев Олег Валерьевич,
МГТУ ГА, Москва, Россия, vas_ov@mail.ru

Зябкин Сергей Алексеевич,
АО "Концерн "Международные аэронавигационные системы", Москва, Россия, sergezyab@gmail.com

Чиров Денис Сергеевич,
МТУСИ, Москва, Россия, d.s.chirov@mtuci.ru

Manuscript received 10 August 2023;
Accepted 15 September 2023

Ключевые слова: метеолокатор, ближняя аэродромная зона, классификация гидрометеоров, обледенение воздушных судов, нечеткая логика, поляриметрия, радиолокационная метеорология

Обледенение внешних конструкций воздушного судна является опасным метеорологическим явлением. В реальных условиях экипаж воздушного судна не всегда способен оперативно распознать постепенное ухудшение управляемости, происходящего, как правило, в течение продолжительного промежутка времени, обусловленного обледенением. Данный факт приводит к возникновению аварийных ситуаций. Для предотвращения таких ситуаций необходимо наличие своевременной и достоверной информации о существующих переохлажденных гидрометеорах на трассе полета воздушного судна, что позволит экипажу своевременно принять профилактические меры. Зоны вероятного обледенения характеризуются наличием большого объема переохлажденной воды в жидком состоянии. В радиолокационном диапазоне объем жидкости характеризуется отражаемостью метеоявления, а фазовое состояние воды - отражаемостью и дополнительными характеристиками, доступными только для радиолокационных систем с поляризационной обработкой отраженных сигналов. В настоящий момент в метеорологических РЛС ближней аэродромной зоны отсутствует функционал обнаружения переохлажденной жидкости. Решение о наличии обледенения может производиться лишь на основе косвенных признаков и прогностических моделей, которые не обладают необходимой степенью достоверности. В данной статье предлагается использовать РЛС обеспечивающей получение полной поляризационной матрицы рассеяния гидрометеоров, что позволяет связать характеристики отраженных сигналов с такими параметрами гидрометеоров, как их размеры, форма, пространственная ориентация и диэлектрическое состояние, откуда можно перейти к практически важным метеорологическим характеристикам, в том числе таким, которые невозможно получить без учета поляризации. Отсюда задачу обнаружения переохлажденной жидкой воды можно свести к задаче классификации гидрометеоров. Для решения данной задачи в статье предложен нечетко-логический алгоритм классификации гидрометеоров, специфичный явлению обледенения воздушных судов и произведено его первичное обучение по данным имитационного моделирования. Произведен анализ эффективности предложенного алгоритма классификации. Показано, что разработанный алгоритм обеспечивает оправданность классификации при наблюдении гидрометеоров в случае опасного обледенения воздушного судна порядка 98%.

Информация об авторах:

Болелов Эдуард Анатольевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой Технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, Москва, Россия

Васильев Олег Валерьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры Технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, Москва, Россия

Зябкин Сергей Алексеевич, ведущий инженер-программист, АО "Концерн "Международные аэронавигационные системы", Москва, Россия

Чиров Денис Сергеевич, заведующий кафедрой "Радиотехнические системы" МТУСИ, Москва, Россия

Для цитирования:

Болелов Э.А., Васильев О.В., Зябкин С.А., Чиров Д.С. Разработка нечетко-логического классификатора фазового состояния гидрометеоров для алгоритма классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в метеолокаторах X-диапазона // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №10. С. 4-12.

For citation:

Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Zyabkin S.A., Chirov D.S. Development of a fuzzy-logical classifier of the phase state of hydrometeors for an algorithm for classifying areas of probable icing of aircraft in X-band weather radars. *T-Comm*, vol. 17, no.10, pp. 4-12. (in Russian)

1. Введение

Обледенение воздушного судна (ВС) является опасным метеорологическим явлением и представляет собой процесс отложение льда на обтекаемых частях фюзеляжа, силовых установках и других элементах конструкции ВС. Для появления эффекта обледенения необходимо чтобы в гидрометеоре содержался достаточно большой объем переохлажденной воды в жидком состоянии, что, с точки зрения радиолокации характеризуется отражаемостью метеоявления, а фазовое состояние воды – отражаемостью и дополнительными характеристиками, доступными только для радиолокационных систем с поляризационной обработкой отраженных сигналов [1, 2].

Настоящая статья посвящена вопросам разработки нечетко-логического классификатора фазового состояния гидрометеоров для применения в алгоритме классификации зон вероятного обледенения ВС в метеорологических РЛС с полным поляризационным приемом.

2. Синоптические условия, приводящие к обледенению воздушного судна

Различают три различных типа обледенения ВС. При «сублимационном обледенении» происходит превращение в лед водяных паров на поверхности обшивки ВС, минуя жидкую фазу. Второй тип обледенения называется «сухим обледенением» и представляет собой оседание на ВС уже сформировавшегося льда, снега или града при пролете сквозь метеоявления, содержащие замерзшие кристаллы льда. Чаще всего встречается третий тип, непосредственно называемый «обледенение», который и представляет наибольшую опасность для авиации. В основе данного явления лежит эффект замерзания на поверхности ВС капель воды при пролете через метеоявления, содержащие капли переохлажденной жидкой воды [3]. При этом явлении капли жидкой воды находятся в равновесном состоянии при температурах ниже 0°C в отсутствие центров кристаллизации. Принято рассматривать диапазон температур от -15 до 0°C.

Для оценки опасности обледенения для ВС вводится понятие интенсивности обледенения I , определяемое соотношением [4]:

$$I = 1,67 \cdot 10^{-2} \cdot \omega \cdot V_{вс} \cdot E(r) \cdot \beta / \rho_{л} \quad (1)$$

где ω – водность, г/м³; $V_{вс}$ – воздушная скорость ВС, км/ч; $E(r)$ – безразмерный интегральный коэффициент захвата капель, равный отношению массы фактически осевшей на профиле крыла жидкости к массе, которая присутствовала в пространстве; β – безразмерный коэффициент намерзания, равный отношению массы кристаллизованного на поверхности льда к массе осевшей жидкости; $\rho_{л}$ – плотность льда, г/см³.

Существует следующая классификация интенсивности обледенения ВС в зависимости от скорости отложения льда I на передней кромке крыла [3]:

- слабое, при $I < 0,5$ мм/мин;
- умеренное, при $0,5 < I < 1$ мм/мин;
- сильное, при $I > 1$ мм/мин.

Из выражения (1) видно, что чем меньше объем переохлажденной воды по размеру, тем меньше опасность обледенения.

Таким образом, наибольший интерес для решения рассматриваемой задачи представляет обнаружение гидрометеоров переохлажденной жидкости в слоистообразных и кучевых облаках. Однако, хорошо развитая конвективная облачность сама по себе обладает значительной опасностью для авиации, и разработка дополнительных алгоритмов обнаружения опасности в данном направлении не является достаточно актуальной. Слоистообразная облачность, с другой стороны, обладает существенно меньшей водностью и слабой турбулентностью, поэтому в большинстве случаев не представляет опасности для безопасности полетом. Именно поэтому критичным является локализация опасных метеорологических явлений.

3. Методы обнаружения зон, содержащих переохлажденную жидкость в радиолокационных комплексах

Традиционно аэродромные доплеровские метеорологические радиолокационные комплексы обрабатывают сигнал лишь на горизонтальной поляризации. Это позволяет рассчитать радиолокационную отражаемость метеоявления и с достаточной степенью достоверности произвести классификацию опасности многие метеоявления, приняв решение о присутствии града, грозы или ливневого дождя [5]. В настоящий момент в метеорологических РЛС ближней аэродромной зоны (МРЛС БАЗ) отсутствует функционал обнаружения переохлажденной жидкости. Решение о наличии обледенения может производиться лишь на основе косвенных признаков и прогностических моделях ГАМЦ Росгидромета, которые даже могут быть недоступны для некоторых аэродромов, т.е. в значительной степени основывается на опыте диспетчерского персонала. Адекватно оценить фазовое состояние гидрометеоров лишь по значениям радиолокационной отражаемости невозможно.

Применение излучения и приема радиосигнала на двух ортогональных поляризациях (L и H) позволяет соотнести характеристики отраженных сигналов с такими параметрами гидрометеоров, как их форма, размеры, диэлектрическое состояние и пространственная ориентация, откуда можно перейти к практически важным метеорологическим характеристикам, которые невозможно получить без учета поляризации. Тогда задачу обнаружения переохлажденной жидкой воды можно свести к задаче классификации гидрометеоров. Известно несколько методов [1, 6-10] решения такой задачи.

Классификация гидрометеоров осуществляется пороговой обработкой значений дифференциальной отражаемости Z_{dr} и линейного деполаризационного отношения LDR в соответствии со следующей формулой [9]:

$$\text{если } \begin{cases} Z_{dr} > -0,4\text{дБЗ} \\ LDR > -27\text{дБ} \end{cases} \text{ то опасное обледенение} \quad (2)$$

Результаты моделирования, приведенные в работе [9], показывают, что для данного алгоритма различения между жидкой водой и кристаллами льда вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги будут равны $D = 0,902$, $F = 1,6 \cdot 10^{-7}$, соответственно. В [10] приведено описание результатов развития метода [9] на основе Байесовского под-

хода, в котором помимо параметрических описаний требуется знания априорной информации, что на практике выполнить весьма сложно.

К сожалению, практический опыт показывает, что параметрические модели в метеорологической радиолокации в большинстве своем не адекватны реальности, что проявляется в низкой достоверности полученных на их основе результатах. Поэтому многие исследователи используют для повышения достоверности классификации гидрометеоров различные методы машинного обучения. В частности, в [11] предлагается классификатор, построенный на машинах опорных векторов, который обеспечивает достоверность классификации шести классов гидрометеоров до 90% при определенных условиях. Статья [12] посвящена применению сверточных нейронных сетей для распознавания четырех классов гидрометеоров. Предложенный метод обеспечивает вероятность правильного распознавания после обучения до 93%. Там же отмечено, что предложенный метод очень критичен к объему и качеству обучающей выборки. В [13] описан адаптивный алгоритм классификации гидрометеоров на основе модели логистической регрессии. Предложенный алгоритм проверен на данных радара с двойной поляризацией С-диапазона и показал достаточно достойный результат, однако он требует дополнительных данных по уровню осадков. Другим способом повышения достоверности классификации гидрометеоров по радиолокационным измерениям является применение нечеткой логики.

4. Разработка алгоритма классификатора гидрометеоров переохлажденной жидкой воды на основе нечеткой логики

Особенностью математического аппарата нечеткой логики является переход от точных входных измерений к нечеткому набору значений, относящимся к соответствующим оценкам принадлежности к тому или иному классу [1]. Структурная схема типового алгоритма классификации гидрометеоров на основе нечеткой логики представлена на рисунке 1.

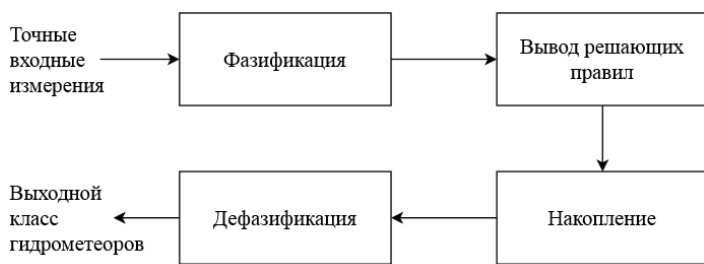


Рис. 1. Структурная схема алгоритма классификатора гидрометеоров на основе нечеткой логики

Как видно из рисунка 1 нечеткий классификатор гидрометеоров состоит из четырех основных блоков: 1) фазификация; 2) вывод решающих правил; 3) накопление; 4) дефазификация. С функциями каждого блока и с логикой построения можно подробно ознакомиться во множестве работ, например [14, 15]. Рассмотрим вариант построения классификатора на основе методов нечеткой логики для распознавания различных классов гидрометеоров по радиолокационным измерениям.

Входными параметрами классификатора являются поляриметрические измерения: радиолокационной отражаемости Z_h , дифференциальной отражаемости Z_{dr} , удельной дифференциальной фазы K_{dp} и линейного деполаризационного отношения LDR . В связи с требованием поиска переохлажденной жидкости, целесообразно ограничить потенциальные значения температуры узким диапазоном от -15 до 0°C .

На выходе классификатора формируется значение, соответствующее определенному классу гидрометеора. Для описания этих классов введем новый алфавит из восьми типов гидрометеоров: морось (М), слабый дождь (СД), умеренный дождь (УД), ливневый дождь (ЛД), дождь «крупных капель» (КК), сухой снег (СС), сухие кристаллы льда различной ориентации (ОКЛ) и мокрый и тающий снег (МС).

Значение агрегации A_i класса i по 4 выбранным входным параметрам (Z_h, Z_{dr}, K_{dp}, LDR) вычисляется следующим образом:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^4 W_{ij} \cdot P^{(i)}(V_j)}{\sum_{j=1}^4 W_{ij}} \quad (3)$$

Где W_{ij} – вес поляриметрической величины j в классификации класса i , V_j – измерение поляриметрической величины j . Итоговая структурная схема классификатора, на основе выбранного правила агрегации (3) представлена на рисунке 2:

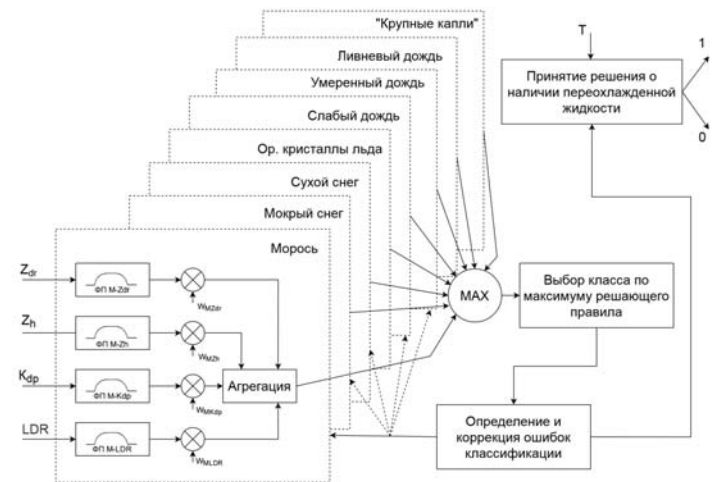


Рис. 2. Структурная схема классификации опасных гидрометеоров на основе нечеткой логики

Предлагаемый процесс классификации опасных гидрометеоров состоит из следующих последовательных этапов:

1. Измерения V_j входных параметров Z_h, Z_{dr}, K_{dp} и LDR фазифицируются при применении функций принадлежности $P^{(i)}$.
2. Расчет решающих правил на основе базы правил для системы классификации.
3. Выбор максимального значения агрегации и соответствующий этому значению класс гидрометеоров.
4. Корректировка результата в блоке коррекции результатов при помощи пороговой обработки, блокирующей неправдоподобные, аномальные результаты. При возникнове-

нии данной ситуации, выбирается следующий класс с наибольшим значением агрегации.

5. Принятие решения о наличии переохлажденной жидкости при помощи добавления измерений температуры T . К классам, потенциально содержащим переохлажденную жидкость, относятся классы М, СД, УД, ЛД, КК, МС. Для классов СС и ОКЛ или при температуре до -15°C , либо более 0°C фиксируется отсутствие классов переохлажденной жидкости.

Таким образом, остается лишь определить базу правил, т.е. выбрать функции принадлежности $P^{(i)}$ и весовые коэффициенты $W_{i,j}$, произведя обучение классификатора.

5. Обучение нечетко-логического классификатора гидрометеоров переохлажденной жидкой воды

К сожалению, достоверные экспериментальные измерения поляриметрических продуктов МРЛК БАЗ в X-диапазоне в условиях обледенения воздушных судов на текущий момент отсутствуют, поэтому для обучения классификатора приходится использовать результаты имитационного моделирования. Итоговая схема имитации поляриметрических продуктов и обучения нечеткого классификатора гидрометеоров представлена на рисунке 3.

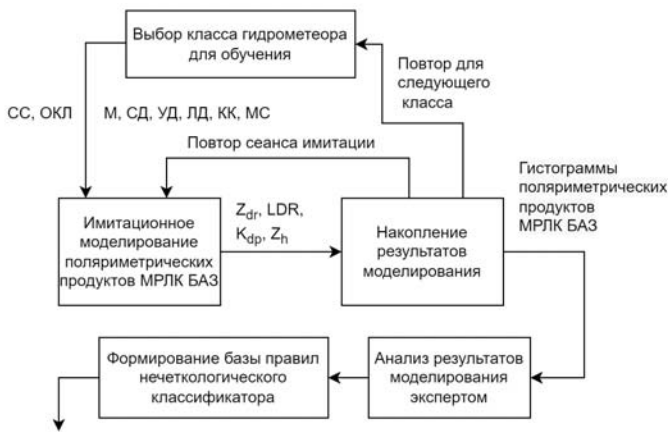


Рис. 3. Схема обучения нечетко-логического классификатора гидрометеоров для классификации зон вероятного обледенения ВС

Для имитации будем использовать алгоритм на основе методов Монте-Карло, подробно описанный в работе [16]. Суть алгоритма заключается в следующем. Известно, что жидкие капельные и твердые снежные гидрометеоры с высокой долей адекватности могут быть представлены в виде сфероидов. В таком случае единичный гидрометеор определяется эквивалентным диаметром частицы, соотношением сторон сфероида, ориентацией частицы и диэлектрической проницаемостью. Ансамбль сферических гидрометеоров одного класса тогда определяется распределением частиц по размерам, моделью ориентаций частиц в ансамбле и моделью соотношения сторон сфероида. Реализация текущего набора свойств ансамбля производится при помощи генераторов случайных чисел из возможных диапазонов, зависящих от выбранного для генерируемого класса. Подробно возможные диапазоны свойств ансамбля гидрометеоров различных классов повторяют классы из работ [16, 17] с незначительными изменениями. А именно, класс дождя разбит на несколько характеристических подклассов – слабый, уме-

ренный, сильный и «крупных капель» в зависимости от интенсивности из-за очевидной зависимости дифференциальной отражаемости от радиолокационной отражаемости, а также вместо горизонтально ориентированных кристаллов льда в настоящей работе применяются кристаллы льда полностью произвольной ориентации. Также очевидно, что моделирование происходит для X-диапазона частот, что приводит к значительным отличиям в сформированных данных для обучения.

После того, как полная реализация свойств ансамбля выбрана случайным образом из возможных значений, для каждого гидрометеора в ансамбле происходит расчет матрицы обратного рассеяния $\|S\|$ методом прямого численного расчета при помощи Т-матриц [18]. После расчета для каждого гидрометеора в ансамбле элементы матрицы рассеяния усредняются для получения усредненных по ансамблю значений, которые используются для расчета поляриметрических продуктов по формулам, описанным в [1]. Результаты моделирования в виде вектора поляриметрических продуктов $(Z_h, Z_{dr}, K_{dp}, LDR)$ для каждого из классов гидрометеоров сохраняются в блоке накопления результатов моделирования до получения достаточной статистики.

На рисунке 4 представлены сформированные при помощи имитационного комплекса поляриметрических продуктов данные в виде зависимостей Z_{dr} , K_{dp} и LDR от Z_h для классов М, СД, УД, ЛД, КК, МС, СС и ОКЛ.

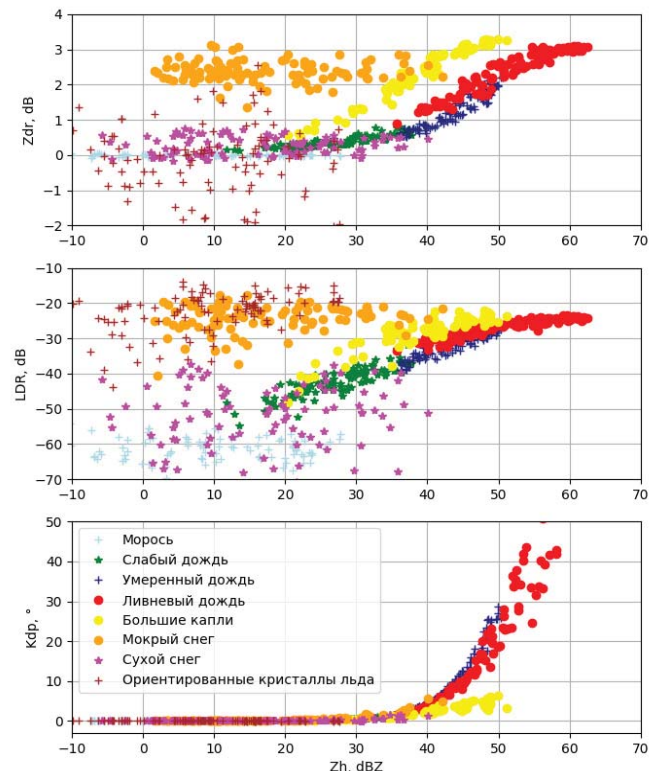


Рис. 4. Данные для обучения классификатора в виде зависимостей, Z_{dr} , LDR и $\rho_{hv} K_{dp}$ от Z_h . Изображено по 100 наборов для каждого из классов

Накопленные данные анализируются экспертом в виде гистограмм для формирования базы правил нечетко-

логического классификатора, включающего 36 функций принадлежности $P^{(i)}(V_j)$, для каждого из 8 классифицируемых классов (М, СД, УД, ЛД, КК, МС, СС и ОКЛ) и 4 используемых входных признаков (Z_h, Z_{dr}, K_{dp}, LDR). Единичная гистограмма, сформированная по данным рисунка 4, а также выбранная экспертом при обучении функция принадлежности показаны на рисунке 5.



Рис. 5. Гистограмма смоделированных значений Z_{dr} для класса УД на фоне выбранной по результатам обучения функций принадлежности

Таблица 1

Параметры функций принадлежности алгоритма нечетко-логической классификации гидрометеоров для 8 классов

	М	СД	УД	ЛД	КК	СС	МС	ОКЛ
$P^{(i)}[Z_h(\Delta BZ)]$								
x1	–	5	34	36	25	-8	0	-50
x2	–	22	40	46	30	-1	12	-40
x3	20	30	46	–	47	20	30	15
x4	30	40	51	–	52	42	48	32
W	1	1	1	0,9	0,9	1	0,9	1
$P^{(i)}[Z_{dr}(\Delta B)]$								
x1	-0,1	0	0,4	0,8	0,4	-0,2	1,5	-3,5
x2	-0,05	0,2	0,8	2	1,4	0	1,9	-3
x3	0,05	0,75	2	–	–	0,6	2,5	0,8
x4	1	0,85	2,3	–	–	0,8	3,1	3
W	0,9	1	1	1	1	0,8	0,9	1,1
$P^{(i)}[LDR(\Delta B)]$								
x1	–	-57	-41	-36	-38	-75	-30	-34
x2	–	-45	-36	-26	-28	-60	-23	-18
x3	-60	-36	-28	-24	-25	-38	-20	-5
x4	-51	-28	-24	-23	-21	-33	-17	0
W	0,95	0,8	0,8	0,8	0,8	1	0,9	0,9
$P^{(i)}[K_{dp}(\Delta B)]$								
x1	-0,08	-0,1	1,4	1,4	-0,2	-0,2	-0,1	–
x2	-0,04	0,1	2,1	2,1	0,6	0	0	–
x3	0,02	1,8	25	44	4,8	0,2	0,05	0,1
x4	0,05	3,1	31	45,1	8,2	0,6	1,2	0,3
W	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,9

В виде формы функции принадлежности в метеорологических приложениях традиционно используются трапециевидные функции принадлежности. Подобная форма используется также и в настоящей работе и определяется в следующей форме:

$$P^{(i)}(V_j) = \begin{cases} 0, & V_j \leq x_1^{ij}, V_j \geq x_4^{ij} \\ \frac{V_j - x_1^{ij}}{x_2^{ij} - x_1^{ij}}, & x_1^{ij} \leq V_j \leq x_2^{ij} \\ 1, & x_2^{ij} \leq V_j \leq x_3^{ij} \\ \frac{x_4^{ij} - V_j}{x_4^{ij} - x_3^{ij}}, & x_3^{ij} \leq V_j \leq x_4^{ij} \end{cases} \quad (4)$$

Коэффициенты функций принадлежности, полученные в результате обучения, сведены в таблицу 1 и объединены с весовыми коэффициентами для удобства анализа. Весовые коэффициенты выбраны на основе анализа результатов работы разработанного алгоритма, также выводов, представленных в работах [8, 14].

6. Анализ эффективности алгоритма классификации зон вероятного обледенения ВС

Перейдем к анализу работы предлагаемого классификатора. Качество классификации будем оценивать в виде метеорологических параметров – оправдываемости P_{OPP} и достоверности $P_{ДОСТ}$. Как показано на рисунке 4, необходимо произвести корректную классификацию классов переохлажденной жидкости (М, СД, УД, ЛД, МС). Тогда параметр $P_{ДОСТ}$ характеризует число корректных классификаций переохлажденной жидкости при обработке данных, полученных только от гидрометеоров переохлажденной жидкости, т.е. аналог вероятности правильного обнаружения. С другой стороны, P_{OPP} показывает, какое число наборов данных, классифицированных как переохлажденная жидкость, действительно были получены от жидкостных гидрометеоров, позволяет сделать выводы о вероятности ложной тревоги.

Для расчета будем использовать следующие формулы из [19], адаптированные под настоящую задачу:

$$P_{OPP} = \left(\frac{N_{\text{алг}}}{N_{\text{я}}} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

$$P_{ДОСТ} = \left(\frac{N_{\text{алг}}}{N_{\text{алг}}} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

где $N_{\text{я}}$ – количество истинных явлений опасного обледенения, также корректно классифицированных алгоритмом. $N_{\text{я}}$ – общее количество истинных явлений опасного обледенения в выборке данных. $N_{\text{алг}}$ – количество корректно классифицированных алгоритмом явлений опасного обледенения. $N_{\text{алг}}$ – общее количество явлений опасного обледенения, зафиксированных алгоритмом.

Схема эксперимента представлена на рисунке 6.

Выбор класса гидрометеоров происходит случайным образом из двух наборов массивов доступных классов – М, СД, УД, ЛД, КК или МС при моделировании переохлажденной жидкости и СС или ОКЛ при моделировании сухих снежных гидрометеоров. Диапазон рабочих температур при имитации: от -15 до 0°C.

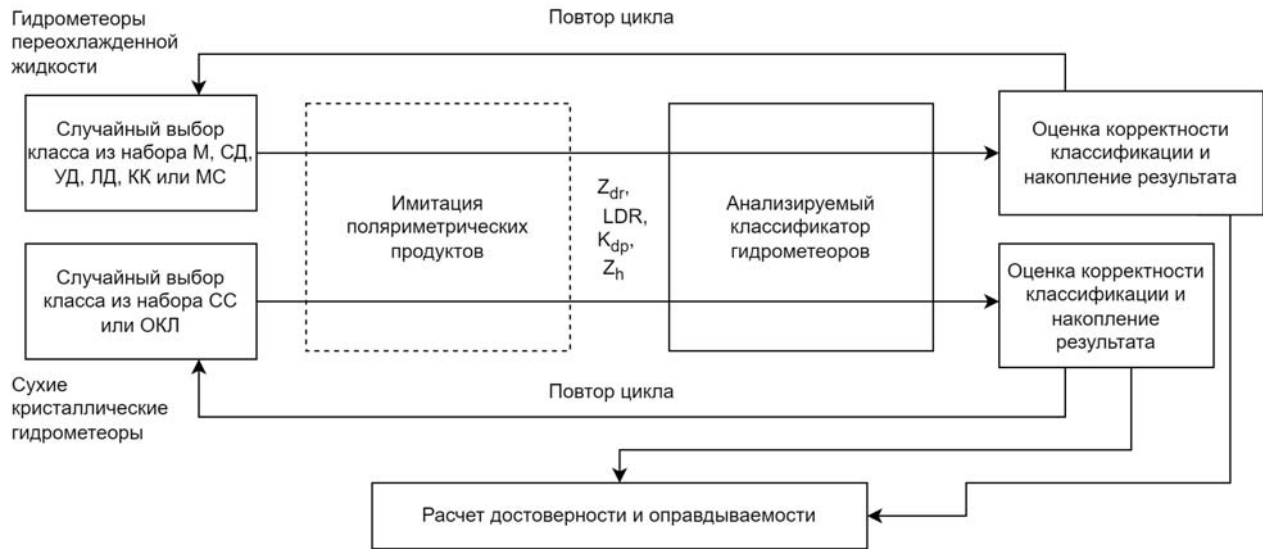


Рис. 6. Схема расчетов для анализа эффективности работы классификатора гидрометеоров для классификации зон вероятного обледенения ВС

Для каждого цикла производится независимая имитация вектора поляриметрических продуктов МРЛС БАЗ Z_h , Z_{dr} , K_{dr} и LDR методом Монте-Карло, описанным в разделе 5. При этом формируются наборы значений имитированных поляриметрических продуктов на трех различных интервалах: от 5 до 15 дБZ, от 15 до 25 дБZ и более 25 дБZ, соответствующим слабому, умеренному и сильному вероятному обледенению ВС, как описано в [2].

Далее полученные случайные векторы данных классифицируются с использованием разработанного нечетко-логического алгоритма.

Полученный результат сравнивается с ожидаемым и принимается решение о корректности классификации. Результаты сравнения накапливаются за весь цикл имитации и используются для оценки вероятностей правильной и ошибочной классификации.

Результаты классификации 500 поляриметрических измерений для каждого интервала представлены в виде зависимостей Z_{dr} от Z_h на рисунке 7 (для твердых сухих гидрометеоров, вызывающих ложную тревогу при некорректной классификации – сверху; для жидких гидрометеоров, вызывающих вероятное обледенение ВС – снизу).

Важно отметить, что ошибка в классификации класса гидрометеоров в нечетко-логическом классификаторе не обязательно приведет к ошибке классификации опасности обледенения. Признаком обнаружения переохлажденной жидкости являются обнаружения классов М, СД, УД, ЛД, КК и МС. Поэтому такую классификацию будем считать «корректной» и обозначать зеленым цветом. В случае, если при моделировании класса переохлажденной жидкости результатом классификации являются классы СС и ОКЛ, такую классификацию будем считать ошибочной и обозначать красным цветом.

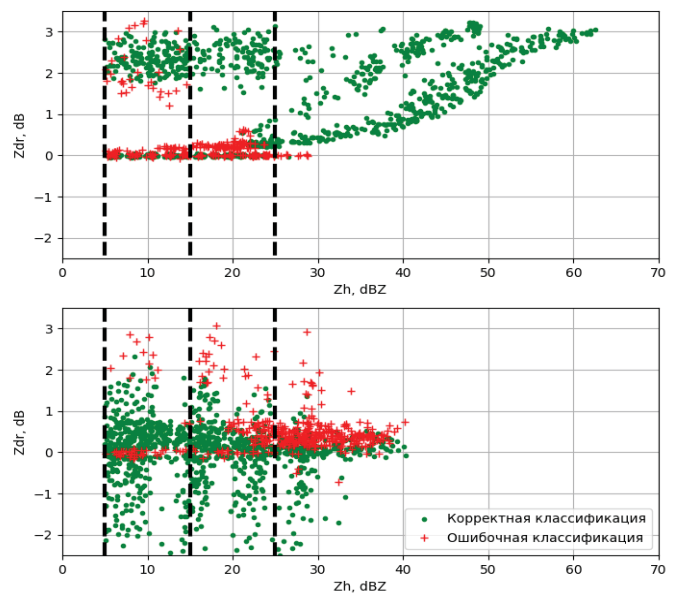


Рис. 7. Результат работы классификатора по гидрометеорам переохлажденной жидкости (сверху) и по гидрометеорам сухого снега и кристаллов льда (снизу)

Результат анализа работы разработанного нечетко-логического классификатора для шести наборов данных сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Анализ результатов работы разработанного классификатора по явлениям опасного обледенения разной степени опасности

Параметр	Слабое	Умеренное	Сильное
Z_h	5-15 дБZ	15-25 дБZ	25 + дБZ
Оправдываемость	75,2	86,4	98,0
Достоверность	87,24	73,1	68,24

Как видно из результатов, приведенных в таблице 2, алгоритм классификации построен таким образом, чтобы максимально повысить вероятность корректного обнаружения явления сильного обледенения, т.е. оправдываемости. При этом, соответственно, снижается достоверность за счет значительного повышения вероятности ложной тревоги.

7. Выводы

В настоящей статье представлены результаты по разработке классификатора оценки фазового состояния гидрометеоров для оценки вероятности обледенения ВС. В качестве методики классификации гидрометеоров был избран математический аппарат нечеткой логики с дополнительной связью для проведения обучения классификатора. В качестве входных параметров классификатор фазового состояния использует четыре поляриметрических радиолокационных продуктов: радиолокационную отражаемость, дифференциальную отражаемость, удельную дифференциальную фазу и линейное деполаризационное отношение.

В качестве алфавита выходных классов сформирован набор из восьми гидрометеоров. Обучение разработанного классификатора фазового состояния гидрометеоров реализовано при помощи анализа результатов математического моделирования поляриметрических продуктов методом Монте-Карло. При этом гидрометеоры представлялись в виде сферических частиц различного размера и ориентации, а расчет матрицы обратного рассеяния производился при помощи метода Т-матриц. Качество классификации было проанализировано при помощи данных имитационного моделирования методом Монте-Карло.

Продемонстрировано, что оправдываемость классификации при наблюдении гидрометеоров в случае опасного обледенения ВС (порог 25 дБЗ по радиолокационной отражаемости) равна 98%.

Исследования проводятся за счет гранта Российского научного фонда в рамках проекта № 23-29-00450.

Литература

1. *Guifu Zhang*. Weather Radar Polarimetry, CRC Press, 2017. 396 p.
2. *Болелов Э.А., Васильев О.В., Зябкин С.А.* Структура алгоритма обнаружения зон вероятного обледенения в аэродромных метеорологических радиолокационных станциях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 34. С. 146-157.
3. *Богаткин О.Г.* Основы авиационной метеорологии. СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
4. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под реда. К.Г. Абрамовича и А.А. Васильева. М.: Госкомгидромет, 1985. 308 с.
5. *Vasiliev O.V., Bolelov E.A., Galaeva K.I., Peshko A.S., Sinityn I.A. et al.* The Design and Operation Features of the Near-airfield Zone Weather Radar Complex "Monocle" // Proceedings of the 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (29-30 October 2021). Moscow, Russia, 2021, pp. 64-72.
6. *Pejčić V., Mühlbauer K., Trömel S.* A new Dual-Frequency-based Hydrometeor Classification Approach for the Global Precipitation Measurements Core-Satellite // 2022 23rd International Radar Symposium (IRS), Gdansk, Poland, 2022, pp. 426-430, doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905054.
7. *Pejčić V., Simmer C., Trömel S.* Polarimetric radar-based methods for evaluation of hydrometeor mixtures in numerical weather prediction models // 2021 21st International Radar Symposium (IRS), Berlin, Germany, 2021, pp. 1-10, doi: 10.23919/IRS51887.2021.9466201.
8. *Straka J., Zrníc D., Ryzhkov A.* Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. // Journal of Applied Meteorology, 39, 2000, pp. 1341-1372.
9. *Птицев А., Яновский Ф.* Оценка эффективности параметрического алгоритма радиолокационного обнаружения зон вероятного обледенения летательных аппаратов // Материалы международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», Одесса, Украина, 2013. С. 238-241.
10. *Marzano F., Scaranari S., Montopoli M., Vulpiani G.* Supervised classification and estimation of hydrometeors from C-band dual-polarized radars: A Bayesian approach // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 46, 2008, pp. 85-98.
11. *Roberto N. et al.* Hydrometeor classification for X-band dual polarization radar on-board civil aircrafts // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2015, pp. 2319-2322, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326272.
12. *Lu Y., Kumar J.* Convolutional Neural Networks for Hydrometeor Classification using Dual Polarization Doppler Radars // 2019 International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW), Beijing, China, 2019, pp. 288-295, doi: 10.1109/ICDMW.2019.00050.
13. *Kou L., Tang J., Wang Z., Jiang Y., Chu Z.* An Adaptive Rainfall Estimation Algorithm for Dual-Polarization Radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 1004805, doi: 10.1109/LGRS.2022.3143118.
14. *Park H., Ryzhkov A., Zrníc D., Kim K.* The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR- 88D: Description and application to an MCS // Weather Forecasting, 24, pp. 730-748, 2009.
15. *Масленников А.Г.* Экспериментальное исследование метода обработки трафика в очереди Linux-маршрутизатора на основе нечеткой логики // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №1. С. 19-24.
16. *Васильев О.В., Зябкин С.А., Никоненко А.В., Чиров Д.С.* Функционально-ориентированная модель формирования метеорологического продукта в X-диапазоне от гидрометеоров переохлажденной жидкости при полном поляризационном приеме // Цифровая Обработка Сигналов, №1, 2023. С.57-64.
17. *Chirov D.S., Bolelov E.A., Zybkin S.A., Vasiliev O.V.* Fuzzy-logical Classifier of the Phase State of Hydrometeors in X-band Weather Radars // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148003.
18. *Mishchenko M.I.* Calculation of the amplitude matrix for a non-spherical particle in a fixed orientation // Appl. Opt., 39, 2000, pp. 1026-1031.
19. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Вторая редакция. РосГидроМет. М., 2017. 121 с.

DEVELOPMENT OF A FUZZY-LOGICAL CLASSIFIER OF THE PHASE STATE OF HYDROMETEORS FOR AN ALGORITHM FOR CLASSIFYING AREAS OF PROBABLE ICING OF AIRCRAFT IN X-BAND WEATHER RADARS

Eduard A. Bolelov, MSTU GA, Moscow, Russia, e.bolelov@mstuca.aero

Oleg V. Vasiliev, MSTU GA, Moscow, Russia, vas_ov@mail.ru

Sergey A. Zyabkin, JSC Concern International Air Navigation Systems, Moscow, Russia, sergezyab@gmail.com

Denis S. Chirov, MTUCI, Moscow, Russia, d.s.chirov@mtuci.ru

Abstract

Icing is a dangerous meteorological phenomenon for aircraft and is a process of ice deposition on the external elements of the aircraft structure. In real conditions, the aircraft crew is not always able to quickly recognize the gradual deterioration of controllability, which usually occurs over a long period of time due to icing. This fact leads to emergencies. To prevent such situations, it is necessary to have timely and reliable information about the existing supercooled hydrometeors on the aircraft flight path, which will allow the crew to take preventive measures in a timely manner. The zones of probable icing are characterized by the presence of a large volume of supercooled water in the liquid state. In the radar range, the liquid volume is characterized by the reflectivity of the meteorological phenomenon, and the phase state of water is characterized by the reflectivity and additional characteristics available only for radar systems with polarization processing of reflected signals. At the moment, there is no functionality for detecting supercooled liquid in the meteorological radars of the near airfield zone. The decision on the presence of icing can be made only on the basis of indirect signs and predictive models that do not have the necessary degree of reliability. This article proposes to use a radar that provides a full polarization scattering matrix of hydrometeors, which makes it possible to relate the characteristics of reflected signals to such parameters of hydrometeors as their size, shape, spatial orientation and dielectric state, from which one can proceed to practically important meteorological characteristics, including such , which cannot be obtained without taking polarization into account. Hence, the problem of detecting supercooled liquid water can be reduced to the problem of classifying hydrometeors. To solve this problem, the article proposes a fuzzy-logical algorithm for the classification of hydrometeors specific to the phenomenon of aircraft icing and performed its initial training using simulation data. The effectiveness of the proposed classification algorithm has been analyzed. It is shown that the developed algorithm ensures the justification of the classification when observing hydrometeors in the case of dangerous icing of the aircraft of the order of 98%.

Keywords: weather radar, near airfield area, classification of hydrometeors, aircraft icing, fuzzy logic, polarimetry, radar meteorology.

References

1. Guifu Zhang, *Weather Radar Polarimetry*, CRC Press, 2017, 396 p.
2. E.A. Bolelov, O.V. Vasiliev, S.A. Zyabkin, "The structure of the algorithm for detecting zones of probable icing in airfield meteorological radar stations," *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*. 2021. No. 34, pp. 146-157.
3. O.G. Bogatkin, "Fundamentals of aviation meteorology," St. Petersburg: Ed. RSHU, 2009. 339 p.
4. Guidance on forecasting meteorological conditions for aviation. Edited by K.G. Abramovich and A.A. Vasilyeva. Moscow: Goskomgidromet, 1985, 308 p.
5. Vasiliev O.V., Bolelov E.A., Galaeva K.I., Peshko A.S., Sinitsyn I.A. et al., "The Design and Operation Features of the Near-airfield Zone Weather Radar Complex "Monocle"," *Proceedings of the 18th Technical Scientific Conference On Aviation Dedicated To The Memory of N.E. Zhukovsky*. 29-30 October 2021. Moscow, Russia, 2021, pp. 64-72.
6. V. Pejdic, K. Muhlbauer and S. Tromel, "A new Dual-Frequency-based Hydrometeor Classification Approach for the Global Precipitation Measurements Core-Satellite," *2022 23rd International Radar Symposium (IRS)*, Gdansk, Poland, 2022, pp. 426-430, doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905054.
7. V. Pejdic, C. Simmer and S. Tromel, "Polarimetric radar-based methods for evaluation of hydrometeor mixtures in numerical weather prediction models," *2021 21st International Radar Symposium (IRS)*, Berlin, Germany, 2021, pp. 1-10, doi: 10.23919/IRS51887.2021.9466201.
8. J. Straka, D. Zrnica, and A. Ryzhkov, "Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations," *Journal of Applied Meteorology*, no. 39, 2000, pp. 1341-1372.
9. A. Ptitsev, F. Yanovsky, "Evaluation of the effectiveness of the parametric algorithm for radar detection of areas of probable icing of aircraft," *Proceedings of the international scientific and practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Odessa, Ukraine, 2013, pp. 238-241.
10. F. Marzano, S. Scaranari, M. Montopoli and G. Vulpiani, "Supervised classification and estimation of hydrometeors from C-band dual-polarized radars: A Bayesian approach," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, no. 46, 2008, pp. 85-98.
11. N. Roberto et al., "Hydrometeor classification for X-band dual polarization radar on-board civil aircrafts," *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Milan, Italy, 2015, pp. 2319-2322, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326272.
12. Y. Lu and J. Kumar, "Convolutional Neural Networks for Hydrometeor Classification using Dual Polarization Doppler Radars," *2019 International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Beijing, China, 2019, pp. 288-295, doi: 10.1109/ICDMW.2019.00050.
13. L. Kou, J. Tang, Z. Wang, Y. Jiang and Z. Chu, "An Adaptive Rainfall Estimation Algorithm for Dual-Polarization Radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 1004805, doi: 10.1109/LGRS.2022.3143118.

14. H. Park, A. Ryzhkov, D. Zrnic and K. Kim, "The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR- 88D: Description and application to an MCS," *Weather Forecasting*, 24, pp. 730-748, 2009.
15. A.G. Maslennikov, "Experimental research of traffic control application in linux-router queue discipline based on fuzzy logic," *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No.1, pp. 19-24. (in Russian)
16. O.V. Vasiliev, S.A. Zybkin, A.V. Nikonenko, D.S. Chirov, "A Functionally-Oriented Model of the Formation of a Meteorological Product in the X-range from Hydrometeors of a Supercooled Liquid with Full Polarization Reception," *Digital Signal Processing*. No. 1, 2023, pp. 54-61.
17. D. S. Chirov, E. A. Bolelov, S. A. Zybkin and O. V. Vasiliev, "Fuzzy-logical Classifier of the Phase State of Hydrometeors in X-band Weather Radars," *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148003.
18. M. I. Mishchenko, "Calculation of the amplitude matrix for a nonspherical particle in a fixed orientation," *Appl. Opt.*, 39, 2000, pp. 1026-1031.
19. Temporary guidelines on the use of information from the Doppler meteorological radar DMRL-S in synoptic practice. Second edition. RosHydroMet. Moscow, 2017. 121 p.

Information about authors:

Eduard A. Bolelov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technical Operation of Air Transport Radio-Electronic Equipment, MSTU GA, Moscow, Russia

Oleg V. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Operation of Air Transport Radio-Electronic Equipment, MSTU GA, Moscow, Russia

Sergey A. Zybkin, Leading Software Engineer, JSC Concern International Air Navigation Systems, Moscow, Russia

Denis S. Chirov, Head of the Department of Radio Engineering Systems, MTUCI, Moscow, Russia