

УДК 621.391

И.К. ВАСИЛЬЕВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Представлены результаты исследования информативности поляризационных признаков гидрометеорологических образований по критерию минимально достаточного количества информации. Рассмотрены информативные возможности статистических моделей поляризационных признаков, как инвариантных к структурным параметрам гидрометеорообразований, так и зависящих от микрофизических и интегральных характеристик исследуемых объектов. Обоснован переход от метеорологической классификации гидрометеорообразований к радиолокационной, учитывающей степень различимости классов по данным дистанционного зондирования. Сформированы информативные векторные поляризационные признаки для классов: «снегопад», «капельная негрозовая облачность», «кучево-дождевая облачность».

гидрометеорологические образования, поляризационные параметры, статистическая модель, информативность, дивергенция, классификация, распознавание

Введение

Выбор признакового пространства для распознавания гидрометеорологических образований (ГМО), представляющих угрозу безопасности полетов, является актуальной задачей проектирования бортовых метеонавигационных систем. Методика выбора наиболее информативных параметров особенно необходима при синтезе систем распознавания по поляризационным признакам (ПП), существенно различающимся как по информативности, так и по обобщенной стоимости измерения. В качестве критерия информативности удобно использовать дивергенцию [1]. Локальная дивергенция [2] определяется как мера различимости класса a_k на фоне остальных классов из множества $A = \{a_k\}$, $k = 1, \dots, N$:

$$J(k) = \int_R (\rho(\bar{x}|a_k) - \rho(\bar{x}|\tilde{a}_k)) \ln \frac{\rho(\bar{x}|a_k)}{\rho(\bar{x}|\tilde{a}_k)} d\bar{x}, \quad (1)$$

где R – выборочное пространство; $\rho(\bar{x}|a_k)$ – плотность вероятности реализации случайного вектора ПП \bar{x} для класса a_k ; $\rho(\bar{x}|\tilde{a}_k)$ – смесь плотностей вероятностей для всех классов, за исключением a_k :

$$\rho(\bar{x}|\tilde{a}_k) = \frac{1}{1 - P(a_k)} \sum_{i \neq k=1}^N \rho(a_i, \bar{x}).$$

Информативность ПП для распознавания класса a_k определяется сравнением $J(k)$ с величиной минимально достаточной дивергенции $\hat{\Theta}_k$ (МДД):

$$\hat{\Theta}_k = \left[\frac{[1 - P(a_k)]^2}{P(a_k)^2} - 1 \right] \ln \frac{[1 - P(a_k)]^2}{P(a_k)^2}. \quad (2)$$

При $J(k) \geq \hat{\Theta}_k$ возможно распознать класс a_k на фоне других классов по данному ПП.

Среднее значение $J(k)$ представляет собой меру различимости множества классов $\{A\}$ на совокупности ПП $\{\xi\}$ (обобщенную дивергенцию [2]):

$$J\left(\frac{\xi}{N}\right) = \sum_{k=1}^N P(a_k) J(k) \quad (3)$$

и используется для сравнения информативности различных подмножеств совокупности ПП сигнала.

Таким образом, целью работы являлось формирование информативного признакового пространства для надежного распознавания классов ГМО. При этом учитывалось, что, в силу аддитивности дивергенции, превысить порог МДД можно как за счет расширения признакового пространства, что усложняет аппаратуру обработки сигналов, так и за счет обработки последовательности независимых отсчетов, что затягивает процесс принятия решения.

1. Поляризационные параметры ГМО

Исследование степени информативности по критерию минимально-достаточного количества информации проводилось для ПП, полученных путем моделирования 20000 отсчетов элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) единицы объема ГМО [3]. Гистограммы ПП разрядностью 64 интервала аппроксимировались Sb-распределением Джонсона [4]. Таким образом, для всех ПП была принята единая статистическая модель вида

$$f(x) = \frac{\eta\lambda}{\sqrt{2\pi}(x-\varepsilon)(\varepsilon+\lambda-x)} e^{-\frac{1}{2}\left(\gamma+\eta\ln\frac{x-\varepsilon}{\varepsilon+\lambda-x}\right)^2}. \quad (4)$$

Тогда N -мерный вектор ПП \vec{x} для каждого класса объектов a_k можно описать выражением

$$\begin{aligned} \rho(\vec{x}(t_j)|a) &= (2\pi)^{-MN/2} \|R\|^{-1/2} \times \\ &\times \prod_{j=1}^M \prod_{i=1}^N \frac{\eta_i \lambda_i}{(x_i(t_j) - \varepsilon_i)(\varepsilon_i + \lambda_i - x_i(t_j))} \times \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^M \sum_{i,l=1}^N R_{ijkl}^{-1} \left(\gamma_i + \eta_i \ln \frac{x_i(t_j) - \varepsilon_i}{\varepsilon_i + \lambda_i - x_i(t_j)} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\gamma_l + \eta_l \ln \frac{x_l(t_k) - \varepsilon_l}{\varepsilon_l + \lambda_l - x_l(t_k)} \right) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где M – количество отсчетов $\vec{x}(t)$; ε , λ , η , γ – параметры закона распределения вероятности; R – корреляционная матрица, элементы которой определяются как

$$\hat{R}_{il} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M z_i(t_j) z_l(t_j), \quad (6)$$

где $z = \gamma + \eta \ln[(x - \varepsilon)/(\varepsilon + \lambda - x)]$ – нелинейное преобразование случайной величины x с Sb-распределением Джонсона в случайную величину z , распределенную по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией.

Моделирование выполнялось для десяти классов облаков: St – слоистых; Sc – слоисто-кучевых; Cu – кучевых; Ns-As-d, Ns-As-n, Ns-As-p – слоисто-дождевых и высоко-слоистых (содержащих капли, игольчатые и пластинчатые кристаллы, соответственно); Cb – кучево-дождевых; Cb-s – грозových;

Ci-n и Ci-p – перистых и шести классов осадков: дождя, ливня, грозы, ледяной крупы, града и снега. Анализ информативности ПП состоял из несколько этапов. Первоначально для классов облаков рассчитывались величины локальных дивергенций и обобщенной дивергенции по ПП, среди которых условно можно выделить абсолютные (например, модули элементов ПМР $|\dot{S}_{ij}|$ и ковариационной матрицы рассеяния $|\dot{R}_{lk}|$ [5], показатели радиолокационной отражаемости Z_h , Z_{dp} , H_{dr} [5, 6]); относительные (коэффициент истинной анизотропии TAN [7], параметр асимметричности частиц AN , модуль параметра γ по Хьюену HGM [8], дифференциальная отражаемость Z_{dr} [6], параметры, учитывающие особенности распределения частиц по размерам, формам и по углу наклона I_1 , $|I_2|$ [5]); параметры поляризационного эллипса, или угловые (в т.ч. углы эллиптичности ELH , ELV и ориентации ORH , ORV для H и V-поляризованных сигналов, соответственно [7]) и фазовые (дифференциальный фазовый сдвиг DPS [5, 6] и др.). Ниже приведены расчетные формулы ряда ПП, встречающихся в тексте:

$$TAN = (\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2) / (\Lambda_1^2 + \Lambda_2^2), \quad (7)$$

где Λ_1 , Λ_2 – собственные числа ПМР \dot{S} [9];

$$AN = 10 \lg \left[\frac{(|\dot{S}_{hh}| - |\dot{S}_{vv}| + 2|\dot{S}_{hv}|) |\dot{S}_{hh}|}{(|\dot{S}_{hh}| + |\dot{S}_{vv}|) |\dot{S}_{vv}|} \right]; \quad (8)$$

$$HGM = \arctg \left[\left| \dot{\Lambda}_2 / \dot{\Lambda}_1 \right|^{1/2} \right]; \quad (9)$$

$$Z_h = \frac{4\lambda^4}{\pi^4} \left| \frac{\dot{\varepsilon} + 2}{\dot{\varepsilon} - 1} \right|^2 |\dot{S}_{hh}|^2; \quad (10)$$

$$Z_{dp} = 10 \lg |Z_h - Z_v|; \quad (11)$$

$$Z_{dr} = 10 \lg (Z_h / Z_v); \quad (12)$$

$$H_{dr} = Z_h - f(Z_{dr}), \quad (13)$$

$$\text{где } f(Z_{dr}) = \begin{cases} 60 & \text{при } Z_{dr} > 1,74 \text{ дБ;} \\ 19Z_{dr} + 27 & \text{при } 0 < Z_{dr} < 1,74 \text{ дБ;} \\ 27 & \text{при } Z_{dr} \leq 0 \text{ дБ;} \end{cases}$$

$$LDR_h = 10 \lg \left(\frac{|\dot{S}_{vh}|^2}{|\dot{S}_{hh}|^2} \right); \quad (14)$$

$$DPS = \arg \left[\frac{\dot{S}_{vv} \dot{S}_{hh}^*}{\left(\sqrt{|\dot{S}_{vv}|^2} \sqrt{|\dot{S}_{hh}|^2} \right)} \right]; \quad (15)$$

$$Y_1 = \frac{1}{4} (R_{11} + R_{33} + \dot{R}_{13} + \dot{R}_{31}); \quad (16)$$

$$Y_2 = \frac{1}{4} (R_{11} + R_{33} - \dot{R}_{13} - \dot{R}_{31}) + R_{22}; \quad (17)$$

$$\operatorname{Re} \dot{Y}_3 = (R_{33} - R_{11}) / \left(4 \cos 2\langle \beta \rangle e^{-2\langle D_\beta \rangle} \right); \quad (18)$$

$$\operatorname{Im} \dot{Y}_3 = \operatorname{Im} \dot{R}_{31} / \left(2 \cos 2\langle \beta \rangle e^{-2\langle D_\beta \rangle} \right), \quad (19)$$

где оценки среднего значения $\langle \beta \rangle$ и дисперсии $\langle D_\beta \rangle$ угла наклона частиц находятся как:

$$\langle \beta \rangle = 0,5 \arctg \left[2 \operatorname{Re} (\dot{R}_{21} + \dot{R}_{32}) / (R_{33} - R_{11}) \right];$$

$$\langle D_\beta \rangle = -\frac{1}{8} \ln \frac{R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31} - 4R_{22}}{(R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31} + 4R_{22}) \cos 4\langle \beta \rangle};$$

$$I_1 = Y_2 / Y_1; \quad (20)$$

$$|I_2| = |\dot{Y}_3| / Y_1. \quad (21)$$

2. Анализ информативности ПП

Результаты анализа информативности ПП для различения классов облаков показали, что наибольшие значения обобщенной дивергенции соответствуют TAN , Z_{dr} , ELV , ORV и DPS ; несколько ниже показатели различимости по ORH , ELH , $|\dot{Y}_3|$, Y_2 , I_1 , LDR_h , AN . При этом, к ПП, наиболее информативным для различения гроздовых облаков на фоне остальных классов, относятся все абсолютные параметры (Y_1 , Y_2 , $|\dot{Y}_3|$, Z_{dp} , H_{dr}), а также LDR_h , I_1 и $|I_2|$. Дополнительное исследование информативности ПП капельных негрозовых облаков показало, что различимость классов St , Sc , Ns -As-d, Cu незначительна. Так, наибольшие значения обобщенной дивергенции из абсолютных ПП получены для Z_h (1,93), из относительных – для TAN (1,08), из угловых – для ORV (1,04). При этом величина минимально достаточной дивергенции для четырех клас-

сов составляет 17,58. Наименьшие значения локальных дивергенций по совокупности рассматриваемых ПП характерны для Sc и Ns -As-d. Полученные результаты дают основание для объединения всех форм капельной негрозовой облачности в один класс. Близкие значения локальных дивергенций по большинству ПП (за исключением абсолютных параметров) для классов Ci -n и Ns -As-n, а также Ci -p и Ns -As-p, соответственно, свидетельствуют о возможности рассмотрения только двух классов кристаллических облаков: ледяные иглы и пластинки. Принимая во внимание, что особое значение имеет распознавание, в первую очередь, гроздовых и мощных кучево-дождевых облаков, то обоснованное уменьшение классов объектов целесообразно, поскольку это приводит к снижению минимально достаточной дивергенции. Таким образом, дальнейший анализ информативности проводился для пяти укрупненных классов облаков: капельных негрозовых (CD), кучево-дождевых (Cb), гроздовых (Cb-s) и кристаллических: ледяных игл (CN) и пластинок (CP). По результатам анализа, к группе ПП, дающих относительно высокие значения обобщенной дивергенции для пяти классов облаков, кроме указанных выше, можно отнести также Y_1 , Z_h , H_{dr} и HGM .

Исследование информативности для различения шести классов осадков проводилось для таких ПП, по которым на предыдущем этапе анализа были получены лучшие показатели: или наибольшие значения обобщенной дивергенции для классов облаков, или наибольшие значения локальной дивергенции для класса Cb-s. При этом из рассмотрения был исключен ряд абсолютных ПП (Y_1 , Y_2 , $|\dot{Y}_3|$), поскольку абсолютные параметры зависят от интенсивности, и, таким образом, больше подходят для количественных оценок, чем для определения класса осадков. Поскольку ряд ПП зависит от структурных параметров ГМО, исследовались зависимости ПП от среднего угла наклона и степени упорядоченности частиц, доли воды в объеме ледяных частиц,

интенсивности осадков (водности облаков), что позволило выделить подмножество ПП, инвариантных к структурным характеристикам ГМО. Для ряда высокоинформативных ПП, зависящих от структурных факторов, использовались статистические модели, полученные посредством интегрирования по диапазону возможных значений влияющего фактора. Так, на рис. 1 показана трансформация плотности распределения H_{dr} при изменении интенсивности града, а на рис. 2 – суммарный закон распределения H_{dr} (1) при равной вероятности двадцати дискретных значений интенсивности в диапазоне 0,5 ... 50 мм/ч, и его аппроксимация (2).

Анализ информативности, проведенный для шести классов осадков, показал, что максимальные значения обобщенной дивергенции соответствуют относительным ПП: TAN , Z_{dr} , HGM , а также H_{dr} . Наибольшие величины локальных дивергенций для грозы дают TAN , H_{dr} и Z_{dr} , для града – H_{dr} и HGM . Низкая различимость дождя и ливня (значения дивергенции по исследуемому множеству ПП находятся в пределах $7,5 \cdot 10^{-4} \dots 0,81$; при этом максимальное значение соответствует параметру HGM , реагирующему на изменение формы капель от почти сферической в обложных дождях с низкой интенсивностью до сфероидальной в ливневых осадках) позволила объединить их в один класс.

Установлено, что использование статистических моделей ПП с усреднением приводит к возрастанию информативности большинства ПП (в 1,1 ... 1,9 раза при усреднении ПП по четырем отсчетам) за счет уменьшения областей перекрытия законов распределения. Однако увеличение объемов усреднения до десяти отсчетов снижает различимость классов ГМО, что связано с нормализацией негауссовских законов распределения ПП. На рис. 3 показаны виды статистических моделей H_{dr} для класса «гроза», построенные без усреднения ПП (1), с усреднением по четырем (2) и десяти (3) отсчетам.

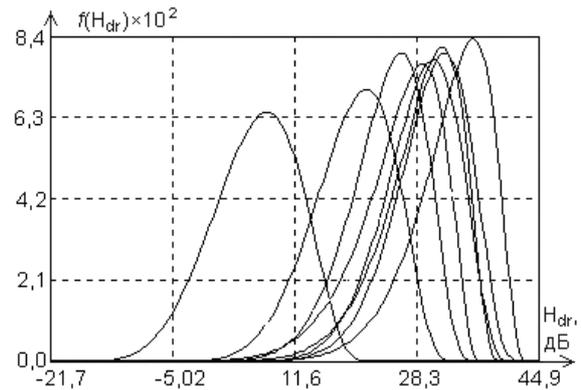


Рис. 1. Трансформация плотности распределения ПП, вызванная изменением интенсивности ГМО

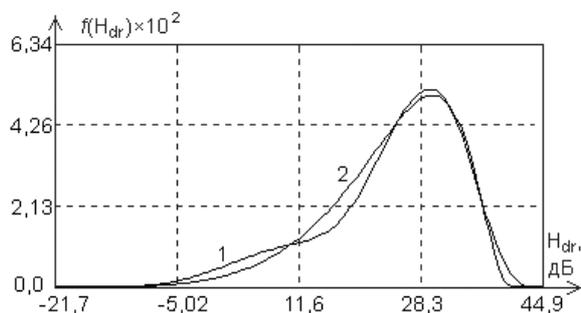


Рис. 2. Результирующая плотность распределения (1) и ее аппроксимация (2)

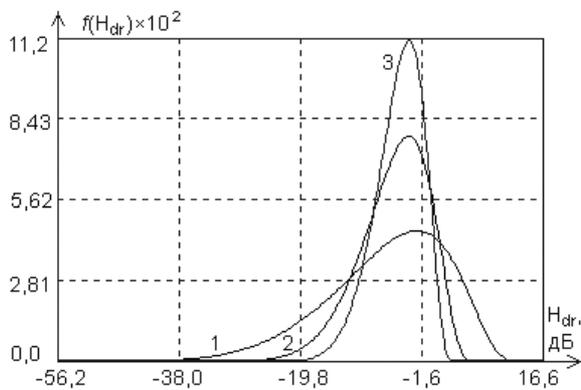


Рис. 3. Виды статистических моделей ПП: 1 – без усреднения; 2 – с усреднением по четырем отсчетам; 3 – с усреднением по десяти отсчетам

Результаты совместного анализа информативности ПП для десяти классов ГМО (облаков и осадков) даны в табл. 1. Различимость Сb-s и грозы на фоне остальных классов лучше по параметрам I_1 и $|I_2|$, а града – по H_{dr} , TAN и DPS .

При переходе к двумерным пространствам ПП, дивергенция возрастает, но при этом в силу коррелированности ПП $J(\{\xi\}) < \sum_i J(\xi_i)$.

Таблица 1

Значения обобщенной $J(\{\xi\})$ и локальных дивергенций $J(k)$ для десяти классов ГМО

$J(\{\xi\})$	ПП	CD	Cb	Cbs	CN	CP	Дождь	Гроза	Крупа	Град	Снег
21,8	TAN	50,9	50,9	3,56	9,06	2,22	7,18	1,70	5,63	15,2	71,6
19,2	Z_{dr}	59,4	41,1	3,12	5,13	1,96	4,54	1,63	4,01	7,72	63,1
16,1	ELV	27,7	44,9	2,15	2,74	1,99	3,29	1,22	1,83	5,62	69,7
14,3	DPS	40,3	11,3	3,27	5,57	1,97	4,87	1,54	3,87	12,2	58,4
11,1	ELH	21,3	7,67	1,58	1,64	1,77	1,97	0,901	1,02	2,68	70,7
10,8	ORH	25,9	11,7	1,63	1,23	1,54	1,23	0,848	1,15	1,70	61,4
10,5	ORV	20,2	9,55	1,69	2,42	1,48	1,92	0,802	1,11	1,97	63,8
9,70	H_{dr}	12,5	6,82	4,45	18,4	9,26	4,32	4,14	7,53	25,7	3,97
8,79	HGM	20,1	11,3	2,86	2,91	3,37	4,84	3,05	6,07	7,90	25,5
7,70	I_1	22,8	11,5	9,41	5,79	8,14	4,33	6,41	4,52	1,58	2,50
5,50	$ I_2 $	9,90	5,39	9,05	5,23	8,39	3,90	6,47	3,88	1,26	1,48
4,97	AN	13,3	10,5	3,97	4,75	6,59	2,57	3,99	1,23	0,833	1,94

Превышение порогового значения МДД после трех независимых отсчетов происходит для классов: «снегопад» по вектору (Z_{dr}, TAN) , «капельная негрозовая облачность» – по (Z_{dr}, TAN, DPS) , «кучево-дождевая облачность» – по (Z_{dr}, TAN, ELV) .

Заклучение

Анализ информативности ПП ГМО по критерию минимально-достаточного количества информации позволил снизить размерность множества классов и перейти от 16 традиционных к 10 радиолокационным классам ГМО. Полученные результаты показали, что в алгоритмах распознавания целесообразно применять как инвариантные к структурным параметрам ГМО ПП, так и т.н. интегральные абсолютные ПП. Расширение признакового пространства повышает различимость классов объектов, однако усложняет аппаратуру обработки сигналов. Сформированы информативные векторы ПП для классов: «снегопад», «капельная негрозовая облачность», «кучево-дождевая облачность». Для распознавания других классов ГМО следует применять алгоритмы с изменяемой стратегией (отбрасыванием классов) и последовательным накоплением информации.

Литература

1. Кульбак С. Теория информации и статистика. – М.: Наука, 1968. – 302 с.

2. Попов А.В. Критерий информативности параметров сигналов для радиолокационного распознавания объектов // Авиационно-космическая техника и технология. – 1999. – Вып. 12. – С. 44 – 46.

3. Попов А.В., Васильева И.К. Моделирование поляризационных признаков гидрометеорологических образований // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2004. – № 1 (5). – С. 17 – 26.

4. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 369 с.

5. Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. – № 4. – 1993. – С. 18 – 28.

6. Straka J.M., Zrnic D.S., Ryzhkov A.V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations // J. Appl. Meteor. – 2000. – Vol. 39. – P. 1341 – 1372.

7. Popov A.V., Pogrebnnyak O. Informativity of polarimetric radar invariants // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5151. – P. 74 – 84.

8. Huynen J.R. Phenomenological theory of radar targets // Electromagnetic scattering. – 1978. – P. 653 – 712.

9. Канарейкин А.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. Морская поляриметрия. – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.

Поступила в редакцию 7.12.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, ГНПЦ «Природа», Харьков.