

*В.М. БЕЗРУК, д-р техн. наук, Е.Н. БЕЛОВ, канд. техн. наук,
О.А. ВОЙТОВИЧ, канд. техн. наук, К.А. НЕТРЕБЕНКО, канд. техн. наук,
В.А. ТИХОНОВ, д-р физ.-мат. наук, Г.А. РУДНЕВ, Г.И. ХЛОПОВ, д-р техн. наук,
С.И. ХОМЕНКО, канд. техн. наук*

РАСПОЗНАВАНИЕ МЕТЕООБЪЕКТОВ ПО ФЛУКТУАЦИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАДИОЛОКАТОРА

Введение

Для эффективного штормового оповещения с целью обеспечения безопасности полетов авиации, предупреждения градобитий и в многих других практических приложениях определяющее значение имеет оперативность принятия решения о характеристиках наблюдаемой облачности. Несмотря на широкое применение метеорологических ИСЗ, радиолокационные методы измерения параметров облачности часто являются единственным источником метеорологической информации, поскольку верхняя кромка облачности маскирует сложные процессы в нижних слоях [1]. Поэтому актуальным является автоматическое распознавание метеообъектов с использованием информации, поступающей от радиолокаторов [2]. При этом технические характеристики существующих метеорологических РЛС позволяют обеспечить надежное измерение характеристик облачности, что дает возможность использовать их для распознавания метеообъектов [3].

При зондировании метеообъектов импульсным радиолокатором последовательность отраженных сигналов имеет междупериодные флуктуации, а их статистические характеристики несут информацию о физических процессах, которые происходят в метеообъектах [2]. В частности, средняя интенсивность отраженных сигналов, пропорциональная отражаемости метеообъекта, несет информацию о типах метеообъектов и традиционно применяется для их классификации [2]. Существенная информация о типах метеообъектов содержится также в флуктуациях интенсивности отраженных сигналов. В общем случае флуктуации интенсивности эхо-сигналов зависят от размеров частиц, их диэлектрической проницаемости и удельного количества, а также их пространственной ориентации и др. Изменение этих параметров приводит к сравнительно медленным флуктуациям, в то время как быстрые флуктуации интенсивности отраженных сигналов определяются относительным перемещением отражателей и изменением их ориентации. Если среднее значение интенсивности отраженных сигналов обусловлено, прежде всего, размерами и концентрацией элементарных отражателей в единице объема, то флуктуации интенсивности определяются взаимными перемещениями частиц. Как показывают экспериментальные исследования [2, 3], корреляционные функции флуктуаций интенсивности отраженных сигналов и связанные с ними энергетические спектры отличаются для разных метеообъектов. Это позволяет получить дополнительную информацию о метеообъектах и повысить достоверность их распознавания.

Таким образом, в качестве исходного описания метеообъектов при их распознавании рационально использовать вторые моменты распределений флуктуаций интенсивности отраженных сигналов – их корреляционные функции или энергетические спектры. В работе [4] предложен метод распознавания метеообъектов по оценкам энергетических спектров флуктуаций интенсивности отраженных сигналов некогерентного импульсного радиолокатора, а в работе [5] рассмотрены особенности методов извлечения информации о гидрометеорах на основе анализа корреляционных матриц междупериодных флуктуаций отраженных сигналов когерентного импульсного радиолокатора.

Настоящая работа посвящена вопросам радиолокационного распознавания метеообъектов по флуктуациям интенсивности отраженных сигналов импульсного некогерентного радиолокатора. В отличие от работы [4] здесь рассматривается ряд алгоритмов распознавания метеообъектов, основанных на описании флуктуаций интенсивности отраженных сигналов

с помощью авторегрессионной (АР) модели. Приводятся результаты экспериментальных исследований эффективности алгоритмов распознавания метеообъектов с использованием реальных сигналов радиолокационного измерительного комплекса на базе метеорадара типа МРЛ-1.

1. Алгоритмы распознавания метеообъектов

Постановка задачи распознавания метеообъектов. Пусть распознаванию подлежат M метеообъектов, заданных на конечном интервале времени наблюдения $(0, T)$ последовательностью L отсчетов отраженных сигналов $x_l, l = \overline{1, L}$. Эти отсчеты отражают между периодные флуктуации интенсивности отраженных от метеообъектов сигналов при зондировании импульсным радиолокатором. Флуктуации интенсивности отраженных сигналов имеют случайный характер и их статистические характеристики несут информацию о структуре метеообъектов. Полагается, что разным метеообъектам соответствуют разные корреляционные функции флуктуаций интенсивности отраженных сигналов. Эти корреляционные функции априори неизвестны, однако могут быть найдены их оценки по накопленным ранее классифицированным обучающим выборкам последовательностей из L отсчетов объемом n' для M заданных метеообъектов $\{x'_{lr}, l = \overline{1, L}; r = \overline{1, n'}; i = \overline{1, M}\}$.

Рассмотрим алгоритмы распознавания метеообъектов при описании флуктуаций интенсивности отраженных сигналов с помощью АР модели, параметры которой определяются через отсчеты корреляционных функций флуктуаций интенсивности отраженных сигналов.

Особенности АР модели сигналов. Вероятностное описание последовательности отсчетов случайного сигнала с помощью АР модели определяется рекуррентным соотношением [6, 7]

$$x_j^i = \sum_{l=1}^p \phi_l^i x_{j-l}^i + \sigma_a^i a_j, \quad j = \overline{1, L}, \quad (1)$$

где $\phi_l^i, l = \overline{1, p}$ – коэффициенты авторегрессии i -го сигнала, a_j – независимые случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; p – порядок АР модели i -го сигнала; $(\sigma_a^i)^2$ – дисперсия ошибки предсказания.

Видно, что математическая модель (1) описывает случайный сигнал с дискретным временем, формируемым на выходе линейного авторегрессионного фильтра (АРФ) при подаче на его вход порождающего процесса в виде отсчетов дискретного белого шума a_j . Текущие отсчеты этого сигнала вычисляются путем взвешенного суммирования p предыдущих отсчетов сигнала с добавлением отсчетов белого шума. Взвешивающие коэффициенты АРФ равны коэффициентам авторегрессии, а число звеньев фильтра – порядку АР модели p .

Построение АРФ для i -го сигнала сводится к нахождению параметров АР модели, в частности значений $p, \phi_l^i, l = \overline{1, p}, (\sigma_a^i)^2$. Коэффициенты авторегрессии $\phi_l^i, l = \overline{1, p}$ могут быть найдены из уравнения Юла-Уокера [6]

$$\phi = \mathbf{R}^{-1} \rho, \quad (2)$$

где ϕ, ρ – соответственно векторы коэффициентов АР и коэффициентов корреляции сигнала (размерности p); \mathbf{R}^{-1} – обратная корреляционная матрица последовательности сигналов (размерности $p \times p$).

Алгоритмы распознавания сигналов. Представление последовательности отсчетов флуктуаций интенсивности отраженных сигналов с помощью АР модели дает возможность синтезировать ряд алгоритмов распознавания сигналов, которые приведены в работах [8, 9].

В частности, предложен алгоритм распознавания, квазиоптимальный по критерию средней вероятности ошибочного распознавания сигналов. При этом решение о типе распозна-

ваемого объекта принимается по минимуму дисперсии ошибки предсказания на выходе одного из авторегрессионных фильтров (АРФ); на вход которых подается последовательность отсчетов отраженных сигналов x_l , $l = \overline{1, L}$

$$i = \arg \min_{k=1, M} \{ D_{a_k} \}, \quad (3)$$

где D_{a_k} – дисперсия ошибки предсказания на выходе АРФ k -го сигнала, которая определяется соотношением

$$(\sigma'_a)^2 = \frac{1}{L-p} \sum_{j=p+1}^L \left[x'_j - \sum_{l=1}^p \phi'_l x'_{j-l} \right]^2. \quad (3a)$$

Дисперсия ошибки предсказания будет минимальна на выходе того АРФ, параметры которого согласованы со статистическими характеристиками соответствующего сигнала.

Алгоритм распознавания (3) использовался в работе [10] при исследовании эффективности радиолокационного распознавания типов метеообъектов и дал положительные результаты.

Случайные последовательности отсчетов флуктуаций интенсивности сигналов, отраженных от метеообъектов, также могут быть представлены математической моделью, связанной с АР модели (1) и приводящей к построению решетчатых фильтров (РФ). Эта модель определяется соотношением [7]

$$x'_l = - \sum_{l=1}^p K'_l d'^{l-1} + \sigma'_l a_j, \quad (4)$$

где d'^{l-1} – ошибка обратного предсказания в l -м звене РФ; K'_l – коэффициенты отражения РФ.

Отличительная особенность модели в виде (4) состоит в том, что эта модель использует регрессию на предыдущие ошибки обратного предсказания d'^{l-1} , а коэффициентами регрессии являются коэффициенты отражения РФ.

Параметрами РФ являются коэффициенты отражения, которые однозначно связаны с коэффициентами авторегрессии, а число звеньев РФ p равно порядку АР модели.

При описании флуктуаций интенсивности отраженных сигналов с помощью модели (4) получен эффективный алгоритм радиолокационного распознавания типов метеообъектов на основе РФ [8, 9]. В этом алгоритме распознавания решение о типе метеообъекта принимается по минимуму ошибки предсказания на выходе одного из РФ

$$i = \arg \min_{k=1, M} \{ D_{a_k} \}, \quad (5)$$

где D_{a_k} – ошибка предсказания на выходе РФ фильтра k -го сигнала, определяемая выражением

$$D_{a_k} = \frac{1}{L-p} \sum_{j=p+1}^L \left[x'_j - \sum_{l=1}^p K'_l d'^{l-1} \right]^2. \quad (5a)$$

Структура соответствующего устройства распознавания сигналов приведена на рис. 1.

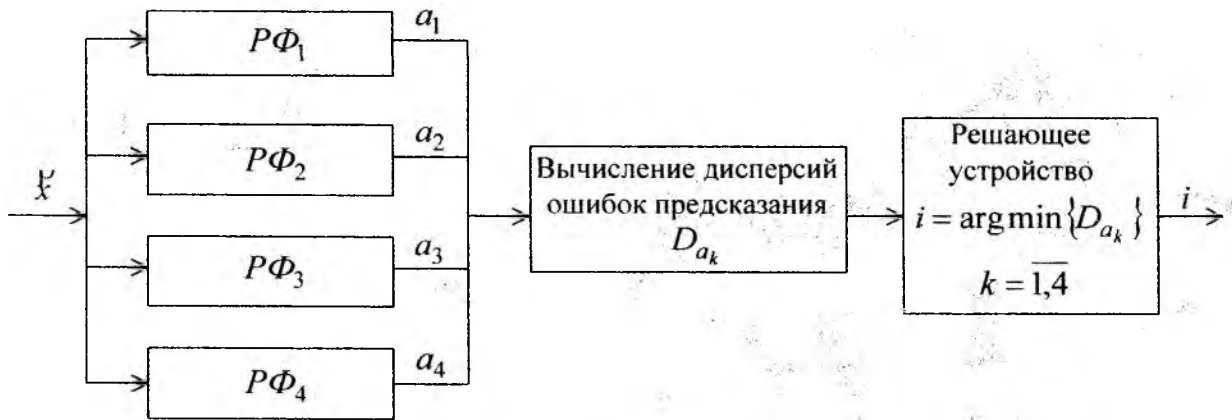


Рис. 1. Структура устройства распознавания метеобъектов по минимуму ошибки предсказания решетчатого фильтра

Полагается, что неизвестные оценки коэффициентов авторегрессии в выражении (1) и коэффициентов отражения в выражении (4) можно получить предварительно на этапе обучения по классифицированным обучающим выборкам отраженных сигналов $\{x'_{lr}, l = \overline{1, L}; r = \overline{1, n_r}; i = \overline{1, M}\}$, которые накоплены для заданных метеобъектов.

В частности, коэффициенты авторегрессии для построения соответствующих АР фильтров находятся из уравнения Юла – Уокера (2), а коэффициенты отражения решетчатых фильтров находятся из рекуррентной процедуры Левинсона – Дарбина [7].

Несмотря на то, что в основе АР фильтров и РФ лежит одна и та же математическая модель, между соответствующими им алгоритмами распознавания есть ряд отличий, существенных с практической точки зрения. В частности, РФ менее чувствительны к шуму округления и погрешностям квантования при реализации РФ средствами цифровой вычислительной техники.

В заключение следует заметить, что рассмотренные авторегрессионные фильтры и решетчатые фильтры, а также соответствующие алгоритмы распознавания для заданных случайных сигналов являются некоторым обобщением известных согласованных фильтров и соответствующих алгоритмов распознавания для детерминированных сигналов.

Параметры АРФ и РФ находятся по оценкам статистических характеристик флуктуаций интенсивности сигналов, отраженных от заданных метеобъектов, и являются согласованными с этими сигналами. Поэтому при подаче последовательности отраженных сигналов на входы этих фильтров в режиме распознавания ошибка предсказания будет минимальна на выходе того фильтра, который согласован с предъявляемой последовательностью отраженных сигналов.

2. Радиолокационный измерительный комплекс

Для экспериментального исследования описанных алгоритмов распознавания метеобъектов использовался модернизированный радиолокационный измерительный комплекс (рис. 2) на основе импульсного некогерентного метеорадара типа МРЛ-1 [11]. Комплекс включает в себя блок калибровки чувствительности РЛС типа МРЛ-1, оптико-телевизионный визир для визуального наблюдения исследуемых объектов, блок интерфейса для сопряжения РЛС с персональным компьютером (ПК) (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид радиолокационного комплекса

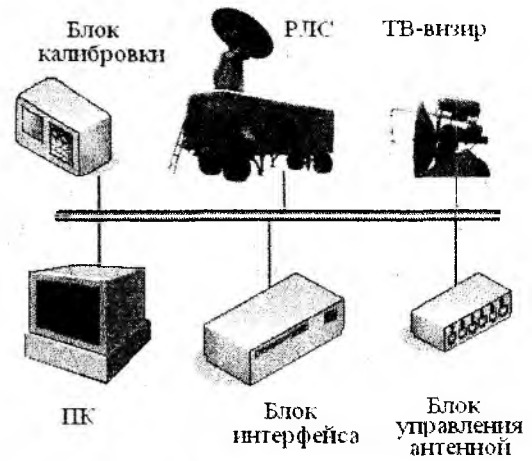


Рис. 3. Структура измерительного комплекса

Использование ПК позволяет осуществить программируемое сканирование антенной радара с заданной скоростью в заданном секторе в верхней полусфере, а применение блока калибровки чувствительности приемного устройства, встроенного измерителя мощности передатчика и специально разработанного программного обеспечения для ПК позволяет измерять абсолютные значения мощности отраженных сигналов. При этом обеспечивается компенсация нелинейности амплитудной характеристики приемного устройства в диапазоне не менее 45 дБ, что обеспечивает измерение радиолокационной отражаемости исследуемых объектов с точностью не ниже $\pm 1,0$ дБ с учетом калибровки усиления антенны и потерь в антенно-фидерном тракте.

Предварительная обработка и передача оцифрованных данных осуществляется синхронно с импульсами запуска РЛС с периодом 3,33 мс (частота дискретизации 300 Гц). Временной интервал, в течение которого осуществляется прием отраженных сигналов, составляет 250 мкс (максимальная дальность 37,5 км), интервал предварительной обработки отраженных сигналов равен 230 мкс, а передача данных в ПК осуществляется за оставшееся время 2853 мкс. Основные технические характеристики радиолокационного комплекса приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры радиолокационного измерительного комплекса

№	Параметр	Значение
1	Длина волны, см	3,2
2	Импульсная мощность, кВт	250
3	Длительность импульса, мкс	1,0
4	Частота повторения зондирующих импульсов, Гц	600
5	Предельная чувствительность, дБ/Вт	-132
6	Полоса пропускания, МГц	1,5
7	Линейный динамический диапазон, дБ	46
8	Коэффициент усиления антенны, дБ	46
9	Диаметр антенны, м	3,0
10	Уровень боковых лепестков, дБ	-21
11	Ширина луча антенны по уровню -3 дБ, град	0,7
12	Энергетический потенциал РЛС, дБ	215
13	Частота дискретизации отраженных сигналов, МГц	2,5
14	Количество отсчетов на ячейку дальности	2
15	Интерфейс связи с ПК	USB

Чтобы реализовать приведенный алгоритм ввода данных, разработанный блок сопряжения формирует импульсы запуска приемо-передатчика РЛС, управляет положением антенны по азимуту и углу места, а также обеспечивает преобразование принятых сигналов в цифровую форму с последующей передачей в ПК.

Блок интерфейса осуществляет связь радара с ПК и управляет работой усилителя мощности, который питает шаговые двигатели привода антенны. Кроме того, блок интерфейса управляет аналого-цифровым преобразователем (АЦП) для преобразования отраженных сигналов в цифровую форму и содержит устройство формирования запускающих импульсов для временной синхронизации всех подсистем измерительного комплекса, включая приемопередатчик (штатное устройство запуска передатчика радара отключается), блок управления и индикации, а также систему обработки отраженных сигналов. Оцифрованные отраженные сигналы с выхода двух АЦП накапливаются в модуле предварительной обработки сигналов, предварительно обрабатываются и по шине *USB* передаются в ПК, где осуществляется обработка отраженных сигналов.

Время обзора сектора углов $0^{\circ} \div 90^{\circ}$ составляет $\approx 77c$ (шаг сканирования антенны $\approx 1,0^{\circ}$, количество ячеек по дальности – 250).

3. Результаты экспериментальных исследований

Исследования эффективности алгоритмов радиолокационного распознавания метеообъектов проводились с использованием накопленных выборок последовательностей отраженных сигналов для различных метеообъектов, полученных с помощью радиолокационного измерительного комплекса.

В частности, при исследовании алгоритма распознавания (5) были выбраны четыре типа метеообъектов, которые наиболее характерны для Харьковского региона в весенне-летний период: перьевые, сплошные серые, высококучевые и кучевые мощные облака [12].

На рис. 4 приведены типичные радиолокационные изображения указанных метеообъектов при сканировании антенны по углу места с шагом $1,0^{\circ}$ в секторе $0^{\circ} \div 80^{\circ}$ при заданном азимуте. Изображения облачности построены в системе координат “Дальность – Высота”, причем интенсивность изображения пропорциональна радиолокационной отражаемости метеообъекта, что позволяет сделать качественные выводы о структуре метеообъекта.

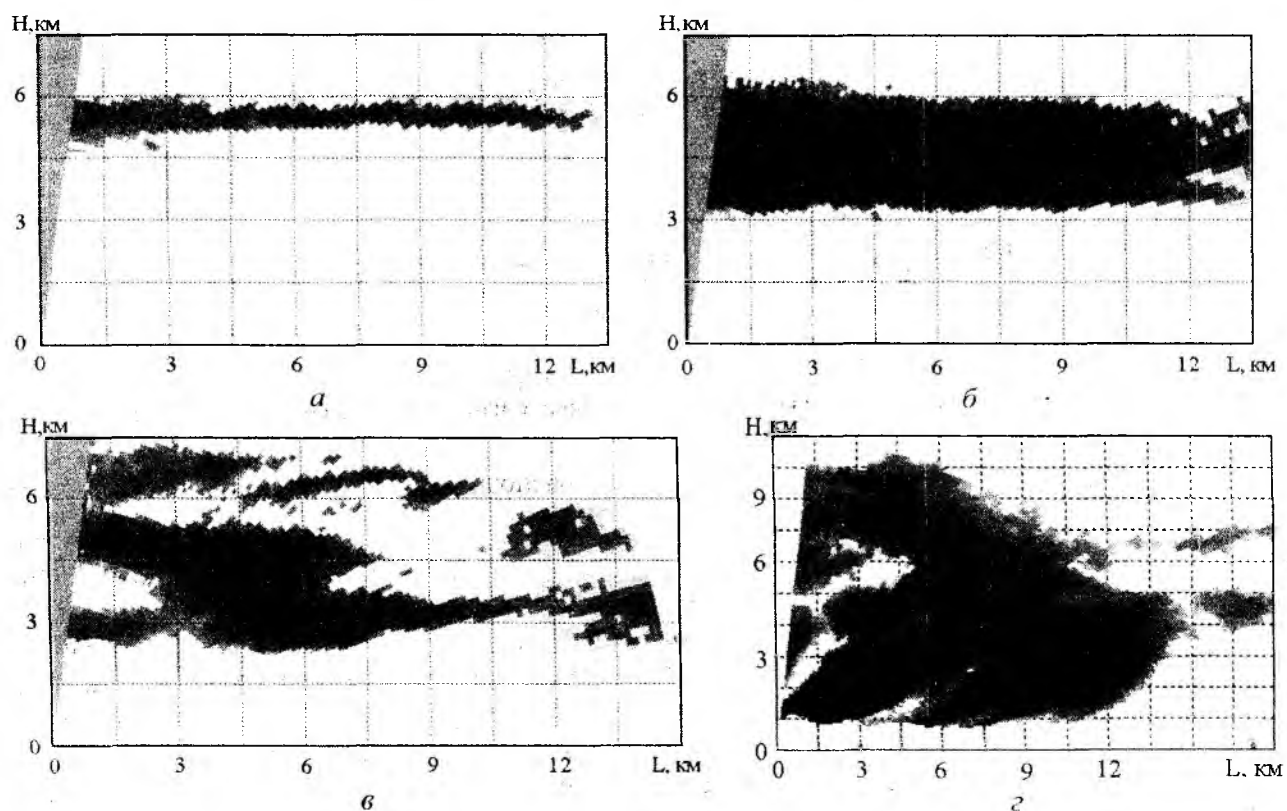


Рис. 4. Радиолокационное изображение метеообъектов в координатах “дальность-высота”:
а – перьевые, *б* – сплошные серые, *в* – высококучевые, *г* – кучевые мощные облака

На первом этапе были накоплены классифицированные обучающие последовательности отраженных сигналов для рассматриваемых метеообъектов, тип которых определялся визуальным наблюдением исследуемых объектов в соответствии с атласом облачности [12]. Для получения устойчивых оценок параметров отраженных сигналов в каждой ячейке дальности производилось накопление $L=256$ отраженных импульсов в течение $0,85c$. В результате радиолокационных измерений сформированы обучающие и контрольные выборки отраженных сигналов по $N = 100$ реализаций для разных участков каждого метеообъекта.

Обучающие выборки отраженных сигналов использовались для оценивания параметров РФ – коэффициентов отражений РФ, соответствующих заданному метеообъекту. На рис. 5 приведены значения полученных оценок в зависимости от номера коэффициентов РФ. Хорошо видны отличия значений коэффициентов РФ для различных метеообъектов, что дает основание для их эффективного распознавания с помощью алгоритма (5).

Контрольные выборки отраженных сигналов для тех же метеообъектов накапливались в другие периоды времени и использовались для оценивания показателей качества распознавания метеообъектов методом статистических испытаний. В режиме распознавания находились оценки вероятностей правильного распознавания метеообъектов в виде $P_{пр}^i = \frac{n_{пр}^i}{N}$, где $n_{пр}^i$ – число правильно распознанных реализаций контрольной выборки i -го сигнала объемом N реализаций.

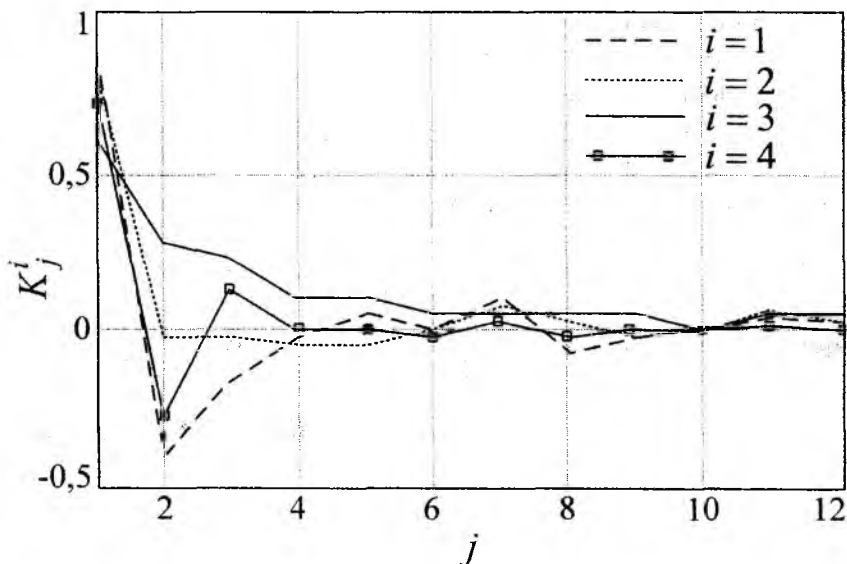


Рис. 5. Усредненные оценки коэффициентов РФ, полученные по обучающим выборкам отраженных сигналов для различных облаков

Полученные оценки вероятностей правильного распознавания метеообъектов $P_{пр}^i$ при разных порядках РФ свидетельствуют о достаточно высокой информативности выбранного описания отраженных сигналов с помощью модели (4), что обеспечило эффективное распознавание выбранных метеообъектов с помощью соответствующего алгоритма распознавания (5а).

Для иллюстрации возможностей радиолокационного распознавания других заданных метеообъектов с использованием другого описанного алгоритма распознавания на основе авторегрессионных фильтров (3) в табл. 2 приведены результаты распознавания, которые были получены в работе [10]. При этом соответствующие радиолокационные изображения заданных метеообъектов (высоко-кучевые непросвечивающиеся облака, кучево-дождевые облака, “ангел-эхо”) приведены на рис. 6.

Таблица 2. Результаты распознавания метеообъектов на основе АР фильтров

Порядок АР фильтра p	Вероятность правильного распознавания $P_{пр}^i$		
	Высоко-кучевые непросвечивающиеся	Кучево-дождевые облака	“Ангел-эхо”
2	0,96	0,79	0,42
4	0,97	0,8	0,44
8	0,96	0,81	0,44
16	0,97	0,86	0,56

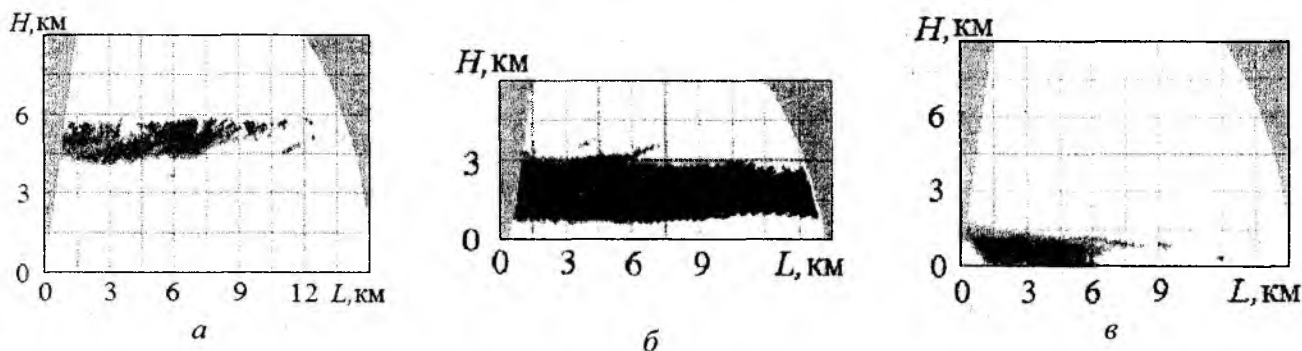


Рис. 6. Радиолокационное изображение метеообъектов в координатах “дальность-высота”:
 а – высококучевые непросвечивающиеся, б – кучево-дождевые, в – “ангел-эхо”

Полученные результаты исследований свидетельствуют о принципиальной возможности автоматического распознавания заданных метеообъектов по флуктуациям интенсивности отраженных радиолокационных сигналов.

Выводы

1. Предложены алгоритмы радиолокационного распознавания метеообъектов, основанные на вычислении ошибок предсказания на выходе авторегрессионных и решетчатых фильтров. Полагается, что параметры фильтров оцениваются на этапе обучения по классифицированным выборкам отраженных сигналов, накопленным для заданных метеообъектов. В рабочем режиме производится автоматическое распознавание метеообъектов по наблюдаемой последовательности отраженных сигналов.

2. Проведены экспериментальные исследования эффективности радиолокационного распознавания метеообъектов по реальным сигналам, отраженным от разных типов метеообъектов. Обучающие и контрольные выборки реальных сигналов получены с помощью импульсного некогерентного радиолокатора. Полученные результаты радиолокационного распознавания для разных метеообъектов позволяют сделать вывод об эффективности использования предложенных алгоритмов для автоматического распознавания метеообъектов по флуктуациям интенсивности отраженных сигналов.

3. Положительные результаты распознавания для разных метеообъектов и разных алгоритмов распознавания дают основание перейти к исследованию практических особенностей решения конкретных прикладных задач радиолокационного распознавания метеообъектов, в частности безопасности полетов авиации, предотвращения градобитий, шквалов в “ясном небе” и др.

Список литературы: 1. *Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети.* – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2002. – 311с. 2. *Степаненко, В.Д.* Радиолокационная метеорология. – Л. : Гидрометеоиздат, 1973. – 324с. 3. *Golden J, N.* Weather Radar Networking. Brussels, 1989. – 358 p. 4. *Омельченко, В.А., Безрук, В.М., Корытцев, И.В., Пилипенко, Ю.Л., Прошкин, Е.Г.* Распознавание метеорологических объектов по энергетическому спектру флуктуаций интенсивности эхо-сигналов // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков, 1981. – Вып. 57. – С.69-78. 5. *Леховицкий,*

Д.И., Жуга, Г.А., Вовшин, Б.М., Лаврукевич, В.В. Извлечение метеоинформации на основе спектрального и корреляционного анализа отражений в импульсных доплеровских метеорологических РЛС // Прикладная радиоэлектроника. – 2007. – Т. 6, № 4. – С. 496-510. 6. Дженкинс, Г., Ваттс, Д. Спектральный анализ и его приложения. – М. : Мир, 1972. – 287 с. 7. Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М. : Мир, 1990. – 432 с. 8. Кравченко, Н.И., Безрук, В.М., Тихонов, В.А. Структуры устройств распознавания гауссовских сигналов при их описании авторегрессионной моделью // Радиоэлектроника и информатика. – 2000. – №3. – С. 49-54. 9. Безрук, В.М., Тихонов, В.А., Тихонов, Д.В. Распознавание случайных сигналов по параметрам их авторегрессионной модели // АСУ и приборы автоматики. – 2001. – Вып. 114. – С.28-32. 10. Безрук, В.М., Белов, Е.Н., Войтович, О.А., Нетребенко, К.А., Тихонов, В.А., Руднев, Г.А., Хлопов, Г.И., Хоменко, С.И. Радиолокационное распознавание метеообъектов на основе авторегрессионной модели отраженных сигналов // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т. 9, № 2. – С. 209-215. 11. Белов, Е.Н., Войтович, О.А., Макулина, Т.А., Руднев, Г.А., Хлопов, Г.И., Хоменко, С.И. Аппаратурно-программный комплекс для исследования радиолокационных отражений от метеообразований // Радиофизика и электроника. – 2009. – Т. 14, №1. – С. 63-67. 12. Атлас облаков / Под ред. А.Х. Хригиана. – Л. : Гидрометеиздат, 1957. – 68 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
Институт радиофизики
и электроники НАН Украины*

Поступила в редколлегию 12.10.2011