

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ МЕТЕООБЪЕКТОВ ПО ФЛУКТУАЦИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

⁽¹⁾В.М. Безрук, ⁽²⁾Е.Н. Белов, ⁽²⁾О.А. Войтович, ⁽¹⁾К.А. Нетребенко, ⁽¹⁾В.А. Тихонов,
⁽²⁾Г.А. Руднев, ⁽²⁾Г.И. Хлопов, ⁽²⁾С.И. Хоменко

⁽¹⁾Харьковский национальный университет радиоэлектроники,

⁽²⁾Институт радиопизики и электроники НАН Украины

61166, Харьков, пр. Ленина, 14 кафедра «Сети связи», тел. (057) 702-14-29

e-mail: bezruk@kture.kharkov.ua факс (057) 702-11-13

Описаны алгоритмы распознавания, основанные на авторегрессионной модели флуктуаций интенсивности отраженных сигналов. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности радиолокационного распознавания.

Введение. При зондировании метеообъектов импульсным некогерентным радиолокатором последовательность отраженных сигналов имеет междупериодные флуктуации, статистические которых характеристики несут информацию о физических процессах в метеообъектах. Это может быть использовано для решения задачи радиолокационного распознавания метеообъектов по флуктуациям интенсивности отраженных сигналов.

В работе предложены алгоритмы распознавания метеообъектов, основанные на описании флуктуаций интенсивности отраженных сигналов с помощью авторегрессионной (АР) модели. Получены 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.* Полагается, что распознаванию подлежат M метеообъектов, заданных на конечном интервале времени наблюдения $(0, T)$ последовательностью L отсчетов сигналов $x_l, l = \overline{1, L}$. Эти отсчеты отражают междупериодные 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 могут быть найдены их оценки по накопленным ранее классифицированным обучающим выборкам последовательностей $\{x_{lr}^i, l = \overline{1, L}; r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$ для заданных метеообъектов.

Особенности АР модели сигналов. Вероятностное описание последовательности отсчетов случайного сигнала с помощью АР модели определяется рекуррентным соотношением

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

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.

Алгоритмы распознавания сигналов. Представление последовательности отсчетов флуктуаций интенсивности отраженных сигналов с помощью АР модели дает возможность синтезировать ряд алгоритмов распознавания сигналов [1]. В частности, предложен алгоритм распознавания, в котором решение о типе распознаваемого метеообъекта принимается по минимуму дисперсии ошибки предсказания на выходе одного из авторегрессионных фильтров (АРФ), на вход которых подается последовательность отсчетов отраженных сигналов $x_l, l = \overline{1, L}$.

$$i = \arg \min_{k=1, \overline{M}} \{ D_{a_k} \}, \quad (2)$$

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

$$(\sigma_a^i)^2 = \frac{1}{L-p} \sum_{j=p+1}^L \left(X_j^i - \sum_{l=1}^p \phi_l^i X_{j-l}^i \right)^2. \quad (2a)$$

Последовательности отсчетов флуктуаций интенсивности сигналов, отраженных от метеобъектов, также могут быть представлены моделью, аналогичной АР модели (1), в виде соотношения

$$x_l^i = - \sum_{l=1}^p K_l^i d_{j-1}^{l-1} + \sigma_j^i a_j, \quad (3)$$

где d_{j-1}^{l-1} – ошибка обратного предсказания в l -м звене РФ; K_l^i – коэффициенты отражения решетчатого фильтра (РФ).

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

При описании флуктуаций интенсивности отраженных сигналов с помощью модели (3) получен алгоритм радиолокационного распознавания типов метеобъектов на основе решетчатых фильтров (РФ). В этом алгоритме распознавания решение о типе метеобъекта принимается по минимуму ошибки предсказания на выходе одного из РФ

$$i = \arg \min_{k=1, \overline{M}} \{ D_{a_k} \}, \quad (4)$$

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

$$D_{a_i} = \frac{1}{L-p} \sum_{j=p+1}^L \left(x_j^i - \sum_{l=1}^p K_l^i d_{j-1}^{l-1} \right)^2. \quad (4a)$$

Полагается, что неизвестные оценки коэффициентов авторегрессии в выражении (1) и коэффициентов отражения РФ в выражении (3) можно получить предварительно на этапе обучения по классифицированным обучающим выборкам отраженных сигналов $\{x_{lr}^i, l = \overline{1, L}; i = \overline{1, M}\}$, накопленным для заданных метеобъектов. В частности, коэффициенты авторегрессии для построения соответствующих АРФ находятся из уравнения Юла-Уокера, а коэффициенты отражения РФ находятся из рекуррентной процедуры Левинсона-Дарбина.

Рассмотренные АРФ и РФ, а также соответствующие алгоритмы распознавания для заданных случайных сигналов являются некоторым обобщением известных согласованных фильтров и алгоритмов распознавания, известных для детерминированных сигналов.

2. Результаты экспериментальных исследований. Исследования эффективности алгоритмов радиолокационного распознавания метеобъектов проводились с использованием накопленных выборок последовательностей отраженных сигналов для различных метеобъектов, полученных с помощью радиолокационного измерительного комплекса на основе импульсного некогерентного метеорадара типа МРЛ-1 [2]. 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).

В частности, при исследовании алгоритмов распознавания (2), (4) были выбраны восемь типов метеобъектов, которые наиболее характерны для Харьковского региона в

весенне–летний период: перьевые, сплошные серые, высококучевые и кучевые мощные облака, высоко-кучевые непросвечивающиеся облака, кучево-дождевые облака, “ангел-эхо” [12].

На первом этапе были накоплены классифицированные обучающие последовательности отраженных сигналов для рассматриваемых метеообъектов. В каждой ячейке дальности производилось накопление $L=256$ отраженных импульсов в течении 0,85с. 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 АРФ и РФ, соответствующих заданным метеообъектам. 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 $P_{np}^i = \frac{n_{np}^i}{N}$, где n_{np}^i - число правильно распознанных реализаций контрольной выборки i -го сигнала объемом N реализаций.

В табл. 2. и табл. 3 приведены результаты исследований эффективности радиолокационного распознавания заданных метеообъектов при использовании соответственно алгоритмов распознавания (2) и (4). Полученные результаты распознавания метеообъектов P_{np}^i свидетельствуют о достаточно высокой информативности выбранного описания флуктуаций интенсивности отраженных сигналов и эффективности предложенных алгоритмов распознавания метеообъектов.

Табл. 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, Гц	300
14	Количество отсчетов на ячейку дальности	2
15	Интерфейс связи с ПК	USB

Табл. 2. Результаты распознавания метеообъектов с использованием РФ

Тип облачности	P_{np}^i		
	$p=2$	$p=4$	$p=8$
Перьевые	0,79	0,89	0,89
Сплошные серые	0,64	0,67	0,67
Высококучевые	0,74	0,89	0,91
Кучевые мощные	0,63	0,68	0,68

Табл.3. Результаты распознавания метеообъектов с использованием АРФ

Тип облачности	P_{np}^i		
	$p=2$	$p=4$	$p=8$
Высоко-кучевые непросвечивающиеся	0,96	0,97	0,97
Кучево-дождевые	0,79	0,8	0,81
“Ангел-эхо”	0,42	0,44	0,56

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. Проведено экспериментальное исследование эффективности радиолокационного распознавания метеообъектов по реальным сигналам, отраженным от разных типов метеообъектов. Выборки отраженных сигналов получены с помощью импульсного некогерентного радиолокатора. Положительные результаты радиолокационного распознавания для разных метеообъектов позволяют сделать вывод об эффективности предложенных алгоритмов для распознавания метеообъектов по флуктуациям интенсивности отраженных сигналов.

3. Полученные положительные результаты распознавания для разных метеообъектов и разных алгоритмов распознавания дают основание перейти к исследованию практических особенностей решения прикладных задач по радиолокационному распознаванию метеообъектов для различных областей народного хозяйства, в частности, безопасность полетов авиации, предотвращение градобитий, шквалов в “ясном небе” и др.

Литература.

- [1] 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. – Том 9, № 2. - С. 209–215.
- [2] 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.