УДК 551.501.85

ДОПЛЕРОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА СЕРИЙНОМ МЕТЕОРАДИОЛОКАТОРЕ

Н. С. Дорожкин, В. Ю. Жуков, В. М. Мельников

Представлены характеристики аппаратуры, позволяющей проводить доплеровские наблюдения в облаках и осадках на серийном метеорологическом радиолокаторе МРЛ-5 в канале излучения с длиной волны 10 см. Приведены также аппаратно реализованные алгоритмы обработки сигналов и результаты натурных наблюдений. Когерентный режим работы расширяет возможности получения информации при радиофизическом зондировании облаков и осадков усовершенствованным серийным метеорадиолокатором.

Наиболее полный объем информации радиофизического зондирования облаков и осадков активными станциями получается с помощью когерентных радиолокаторов [1], которые позволяют получить параметры ветра в метеообразованиях — их важнейшие динамические характеристики. Такие станции из инструмента научных исследований переходят в разряд оперативных наблюдательных средств. Доплеровские РЛС внедряются в настоящее время в метеорологические сети США [2], Канады [3], ряда европейских стран [4].

В нашей стране нет доплеровского метеорологического радиолокатора (МРЛ). Серийной станцией является некогерентный МРЛ-5. Доплеровские измерения в облаках и осадках у нас проводились неметеорологическими импульсно-когерентными станциями 1РЛ39, имеющих короткую длину волны излучения 3,2 см [5–7]. Для измерения параметров ветра в атмосфере использовались также радиолокаторы с ЛЧМ, однако, их применение ограничено дальностями в несколько километров [8]. Для зондирования метеообразований до дальностей в несколько десятков километров в ГГО создана аппаратура обеспечения когерентности для радиолокатора МРЛ-5 в канале излучения с длиной волны 10 см. В настоящем сообщении приведены характеристики аппаратуры, алгоритмы обработки сигналов и результаты натурных наблюдений.

1. Выбор длины волны излучения λ имеет для доплеровского МРЛ принципиальное значение, т. к. этот параметр вместе с частотой посылок зондирующих импульсов F определяет максимальную измеряемую скорость $V_m = \lambda F/4$. Величина V_m и максимальная дальность наблюдений R_m связаны известным соотношением [1] $R_m V_m = c\lambda/8$ (c — скорость света). Т. е. возможности одновременного увеличения дальности наблюдения и интервала измеряемых скоростей ограничены длиной волны излучения. С этой точки зрения предпочтительнее использовать длину волны

10 см по сравнению с волной 3,2 см, которые выделены для радиометеорологии.

Когерентный канал на волне излучения 10 см для двухволнового радиолокатора МРЛ-5 был создан по схеме с когерентным гетеродином и использует штатный магнетрон станции. Аппаратура работает параллельно со штатными устройствами радиолокатора, так что доплеровские наблюдения можно проводить одновременно с обычными. Ниже приведены основные технические характеристики доплеровского канала.

Длина волны излучения, см	10
Длительность зондирующих импульсов, мкс	1
Частота посылок импульсов, Гц	500; 1000
Импульсная мощность, кВт	1000; 500
Максимальная измеряемая скорость, м/с	12,5; 25
Динамический диапазон линейного канала, дБ	40
Протяженность дискрета дальности, км	0,25
Дальность доплеровских измерений, км	100

2. Параметры доплеровского спектра определяются по оценкам корреляционных функций квадратурных составляющих S и C радиоэха

$$S(t) = D \sum_n \sigma_n^{1/2} G_n \sin 2kR_n(t),$$
$$C(t) = D \sum_n \sigma_n^{1/2} G_n \cos 2kR_n(t), \tag{1}$$

где σ_n — сечение рассеяния n-й частицы, G_n^2 — множитель диаграммы направленности антенны по мощности для данной частицы, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, R_n — расстояние до рассеивателя, суммирование ведется по частицам, заполняющим импульсный объем. Множитель D в (1) зависит от параметров радиолокатора и расстояния до импульсного объема, он не определяет форму доплеровского спектра, но только мощность радиоэха, поэтому для доплеровских измерений является параметром.

Специализированный процессор, на вход которого подаются сигналы (1), образует оценки автокорреляционной B_1 и взаимокорреляционной B_2 функций по 64 последовательным импульсам из отдельного дискрета дальности одновременно в 400 таких дискретах:

$$B_1 = \Big\langle S(t+T)S(t) + C(t+T)C(t) \Big\rangle,$$
$$B_2 = \Big\langle S(t+T)C(t) - C(t+T)S(t) \Big\rangle, \tag{2}$$

где T — интервал времени между посылками зондирующих импульсов, а угловые скобки обозначают осреднение по времени. Средняя доплеровская

скорость находится согласно выражению:

$$V = \frac{\lambda}{4\pi T} \operatorname{arctg}(B_2/B_1). \tag{3}$$

Подставляя в (3) выражения (2) и (1) для небольших интервалов времени, характерных для радиолокационных измерений, когда радиальную скорость v_n частицы можно считать постоянной, находим зависимость измеряемой средней доплеровской скорости от радиальных скоростей частиц в импульсном объеме:

$$V = P^{-1} \sum_n \sigma_n G_n^2 v_n, \quad P = \sum_n \sigma_n G_n^2,$$

где P — средняя мощность радиоэха в дискрете дальности. Т.е. измеряемая средняя доплеровская скорость складывается из радиальных скоростей рассеивателей с учетом их сечений рассеяния и функции диаграммы антенны.

Из-за ограниченного динамического диапазона когерентного канала оценки отражаемости и ширины спектра скоростей определяются в некогерентном канале, выходным сигналом которого является величина $m(t) = 10\lg\left[C^2(t) + S^2(t)\right]$, где C и S — квадратурные составляющие (1). Оценка отражаемости Z находится осреднением сигнала $n(t)$

$$Z = \left\langle m(t) \right\rangle + 2,5 + 20\lg R, \tag{4}$$

где R — расстояние до дискрета дальности, $[R]$ = км, $[Z]$ = дБ. Второе слагаемое в правой части (4) записывается на основе гауссовой статистики сигналов (1) и логарифмического усиления приемника. Третье слагаемое отвечает увеличению рассеивающего объема пропорционально квадрату расстояния до него.

Ширина доплеровского спектра σ_f оценивалась одним из следующих алгоритмов. А. Регистрировалась частота f пересечения сигналом $m(t)$ своего среднего уровня и находилась σ_f по формуле [9, 10] $\sigma_f T = 0,660 fT - 0,368\,(fT)^2 + 5,466\,(fT)^3$. Б. Измерялось среднее значение U модуля разности последовательных во времени импульсов из данного дискрета дальности и использовалась формула [11]

$$\sigma_f = (2\pi T)^{-1} \left\{ -bU - \ln\left[2 - \exp(bU)\right] \right\}^{1/2},$$

где $b = 0,05 \ln 10$. Оценка ширины спектра в некогерентном канале позволяет снизить требования к динамическому диапазону линейного канала до 30–40 дБ и не делать аппаратуру автоматической регулировки усиления. При этом возможное "насыщение" когерентного канала при больших сигналах радиоэха очень слабо сказывается на оценке средней доплеровской

скорости по (3) [1]. Из оценки ширины доплеровского спектра находится оценка ширины спектра скоростей из выражения $\sigma_v = \sigma_f \lambda/2$, следующему из формулы Доплера.

3. Программный комплекс позволяет получать радиолокационные разрезы в режимах азимутального сканирования и вертикального сечения с выводом карт полей отражаемости, доплеровской скорости и ширины спектра на цветной монитор. Образцы сечений представлены на рисунках, где границы радиоэха показаны пунктиром, а значения изолиний скоростей приведены в м/с. Рис. 1 (11.08.92 23 ч. 53 мин) представляет типичную картину поля доплеровских скоростей обложных осадков. Поле скорости гладкое и легко интерпретируемое. Зависимость скорость–азимут для фиксированных дальностей позволяет восстановить годограф скорости ветра в осадках до границы радиолокационных отражений. На рис. 2 (14.08.92 17 ч. 41 мин) приведен образец вертикального сечения полей доплеровской скорости и отражаемости в режиме вертикального сечения (изолинии отражаемости даны в дБ).

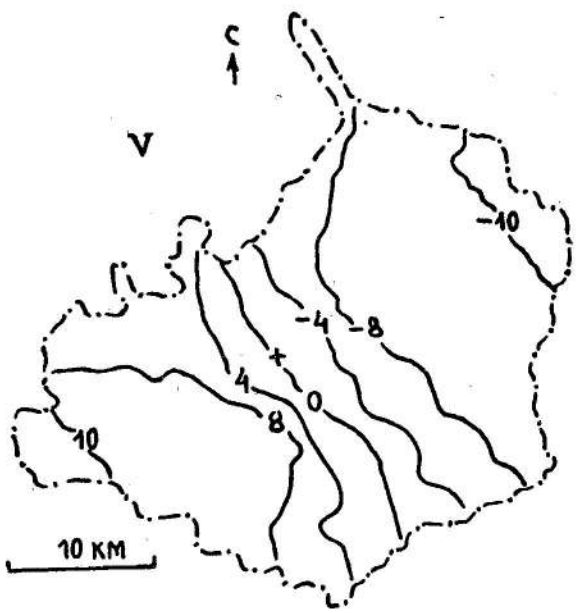

Рис. 1

Выводы. Аппаратура серийного радиолокатора МРЛ-5 обладает достаточной стабильностью для перевода станции в когерентный режим. Аппаратно реализованные алгоритмы позволяют проводить оперативные доплеровские наблюдения при скорости вращения антенны 2 об/мин. Единственным изменением штатного режима работы МРЛ-5 является увеличение частоты посылок зондирующих импульсов до 1000 Гц, что

позволяет измерять доплеровские скорости до 25 м/с. Когерентный режим работы расширяет возможности получения информации при радиофизическом зондировании облаков и осадков усовершенствованным серийным радиолокатором МРЛ-5.

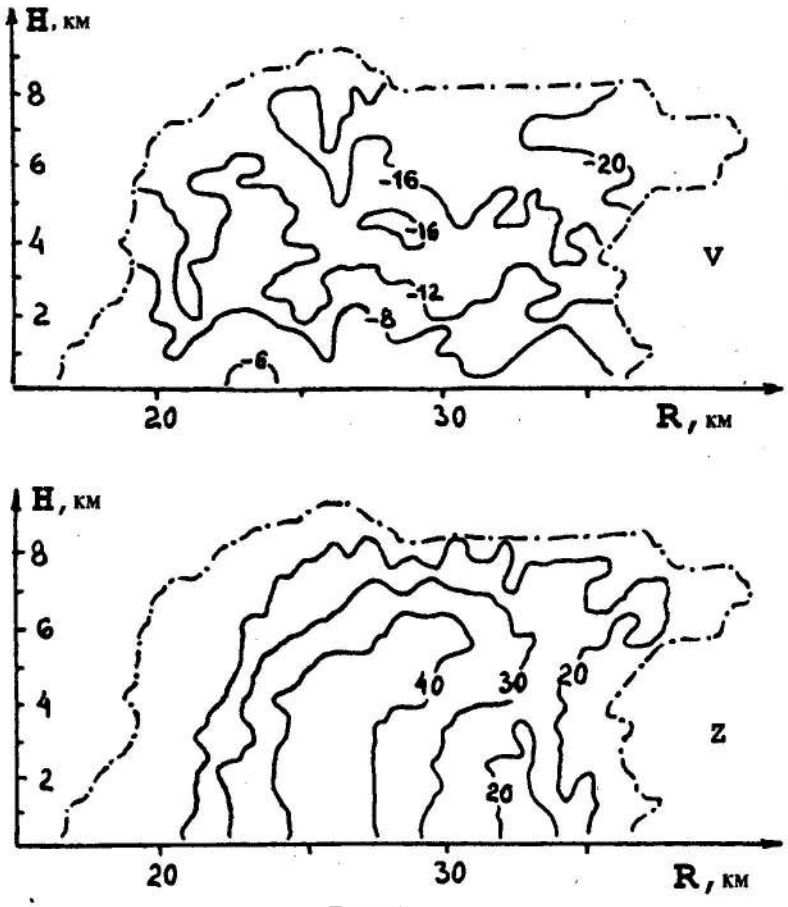

Рис. 2

ЛИТЕРАТУРА

1. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 512 с.
2. Alberty R., Crum C. T., Toepher F. Proc. 25h Internat. Conf. Radar Meteorology. — Paris, 1991. P. 1.
3. Crozier C. L., e. a. Proc. 24h Conf. Radar Meteorology. — Boston, 1989. P. 175.
4. Weather Radar Networking. — Brussels, 1989. 327 p.

5. Иванов А.А., Мельничук Ю.В., Моргоев А.К. Радиометеорология. Труды 7-го Всесоюз. Совещания. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С.177.
6. Волынец Л.М. и др. Радиометеорология. Труды 7-го Всесоюз. Совещания. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С.164.
7. Ефремов В.Н., Коваленко В.И. Труды 6-го Всесоюз. Совещ. по радиометеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. С.158.
8. Жежерин В.Р., Князев Л.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1985. Т.21. N3. С.277.
9. Мельников В.М. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990. Т.33. N2. С.33.
10. Мельников В.М. // Радиотехника, 1984. N9. С.42.
11. Линев А.Г., Маланичев С.А., Мельников В.М. // Радиотехника и электроника, 1989. Т.34. N11. С.2454.

Главная геофизическая обсерватория

Поступила в редакцию 20 января 1993 г.

DOPPLER OBSERVATIONS WITH SERIAL METEOROLOGICAL RADAR

N. S. Dorozhkin, V. Ju. Zhoukov, V. M. Melnikov

Technical characteristics of Doppler kit fir serial meteorological radar MRL-5 are presented. The algorithms of signal processing and results of natural observations are also presented. The Doppler kit opens new areas of serial Russian meteorological radar utilization.