

УДК 551.501.8:551.577.23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НОВОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ

В.Ю. Жуков, М.С. Рыков, Г.Г. Щукин

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, ggshchukin@mail.ru

Исследуется возможность применения в отечественном метеорологическом радиолокаторе ДМРЛ-С нового метода определения интенсивности осадков, основанного на использовании поляризационных характеристик принимаемых отражений. Приводятся краткое описание метода, методика проведения эксперимента и его результаты. Рассматриваются проблемы, возникающие при практической реализации нового метода. Делается вывод о возможности его использования в радиолокаторе ДМРЛ-С.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, интенсивность осадков, поляризационные характеристики сигнала, обработка сигналов, обнаружение опасных явлений погоды.

THE EXPERIMENTAL CHECK OF NEW RADIOLOCATION METHOD FOR DETERMINING RAINFALL INTENSITY

V.Y. Zhukov, M.S. Rykov, G.G. Shchukin

Military Space Academy of A.F. Mozhayskiy

The possibility of using a new method for determining rainfall intensity in the Russian meteorological radar DSML-S based on the use of polarization characteristics of received reflections is investigated. A brief description of the method, the methodology of the experiment and its results are given. The problems arising at practical realization of a new method are considered. The conclusion is made about the possibility of using it in the DMRL-S radar.

Keywords: meteorological radar-location, rainfall intensity, polarization signal characteristics, processing of signals, detection of the dangerous phenomena of weather.

Введение

В России уже в течение восьми лет идет создание радиолокационной сети штормооповещения. Основа ее — отечественный метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Арсенал средств исследования окружающего пространства, которым снабжен данный радар, на настоящий момент максимален [5]. Он включает в себя процедуры определения спектральных характеристик принимаемого сигнала и оценивания его поляризационных параметров. Таким образом, данный радиолокатор соответствует уровню современных, известных во всем мире образцов подобной техники.

По крайней мере в одном аспекте он их даже превосходит. Речь идет о нелинейной частотной модуляции (НЧМ) излучаемого сигнала, обеспечивающей требуемые характеристики на выходе сжимающего фильтра без потери мощности, как это имеет место в зарубежных аналогах.

Однако возможности, заложенные в радиолокатор, фактически не используются в системе вторичной обработки принимаемых отражений [6], призванной интерпретировать получаемую радиолокатором информацию и реализовывать главную задачу метеорологического радара — своевременную идентификацию опасных явлений погоды. В полной мере сказанное относится к такому явлению, как ливни большой интенсивности. Насколько они могут быть опасны, продемонстрировало катастрофическое наводнение в Крымске в 2014 г., и актуальность работ в направлении совершенствования методов своевременного обнаружения таких ливней не подлежит сомнению. Обнаруживают их путем оценивания интенсивности наблюдаемых осадков и сравнения ее с некоторым пороговым значением. В связи с этим любой появляющийся новый метод получения данных оценок представляет интерес с точки зрения улучшения характеристик радиолокатора.

Цель работы состоит в исследовании возможности применения в системе вторичной обработки информации ДМРЛ-С нового метода оценивания интенсивности осадков, основанного на использовании поляризационных параметров принимаемого сигнала.

Состояние вопроса

На настоящий момент в радиолокаторе ДМРЛ-С реализован метод определения интенсивности осадков, основанный на предположении о том, что распределение капель по размеру подчиняется закону Маршалла — Пальмера [2]:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}, \quad (1)$$

где $N(D)$ — число капель диаметром D ; $N_0 = 0,08 \text{ см}^{-4}$; $\Lambda = 41 I^{0,21}$; I — интенсивность осадков. При этом соотношение между радиолокационной отражаемостью Z и интенсивностью осадков принимает вид

$$Z = KI^b, \quad (2)$$

где K и b — коэффициенты, значение которых зависит от вида осадков (жидкие, твердые или смешанные) и от условий, сложившихся в месте установки радиолокатора. Иначе говоря, данные коэффициенты не определены и подлежат подбору в каждом конкретном случае. Точность получаемых по этому методу результатов оценивается в 300 % [1].

Очевидно, что погрешность получаемых оценок слишком велика, и это инициировало поиск новых методов определения интенсивности сигнала. Особенно перспективным оказалось использование поляризационных характеристик принимаемого сигнала, и в частности дифференциальной фазы, определяемой в соответствии с формулой [3]

$$\Phi_{\text{DP}} = \arg \left(\frac{\langle H^* V \rangle}{(P_h P_V)^{1/2}} \right), \quad (3)$$

где H и V — отраженные сигналы, принятые по каналам горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно; $P_h = \langle |H|^2 \rangle$, $P_v = \langle |V|^2 \rangle$; угловые скобки означают осреднение по выборке.

Идея применения данного параметра состоит в том, что жидкие капли в процессе падения приобретают форму сплющенного эллипса. При этом отношение его осей тем больше, чем больше диаметр капли. В результате условия распространения волн с горизонтальной и вертикальной поляризацией оказываются разными, что приводит к различному набеганию фазы этих волн. Разность этих фаз оказывается связанной с размерами и концентрацией капель, т.е. с искомой интенсивностью осадков. Однако такое непосредственное применение дифференциальной фазы оказалось возможным только для очень сильных ливней.

Для менее интенсивных осадков пришлось искать более чувствительные методы. В результате был разработан метод, основанный на зависимости затухания электромагнитной волны (A) от интенсивности осадков (I) на пути ее распространения [7]. Данная зависимость имеет вид

$$I = c_1(t)c_2(\lambda)A^{1,03}, \quad (4)$$

где $c_1(t)$ и $c_2(\lambda)$ — коэффициенты, зависящие от температуры частиц t и длины волны несущего колебания локатора λ . Величину ослабления на дальности r находят из профиля радиолокационной отражаемости $Z(r)$ в соответствии с выражением

$$A(r) = \frac{[Z(r)]^b C(b, PIA)}{J(r_1, r_2) + C(b, PIA)J(r, r_2)}, \quad (5)$$

где

$$J(r_1, r_2) = 0,46b \int_{r_1}^{r_2} [Z(x)]^b dx, \quad (6)$$

$$J(r, r_2) = 0,46b \int_r^{r_2} [Z(x)]^b dx, \quad (7)$$

$$C(b, PIA) = \exp(0,23bPIA) - 1, \quad (8)$$

r_1 и r_2 — начальная и конечная дальности участка с наблюдаемыми осадками; b — постоянный коэффициент, значение которого лежит в пределах 0,6—0,9 и зависит от длины волны радиолокатора; PIA — интегральное ослабление на участке, занятом осадками.

Величина PIA нам заранее не известна, и для ее оценивания используется зависимость от дифференциальной фазы

$$PIA(r_1, r_2) = \alpha [\Phi_{DP}(r_1) - \Phi_{DP}(r_2)], \quad (9)$$

где постоянная α определяется частотой несущего колебания и может корректироваться в процессе измерений по получаемым оценкам дифференциальной

отражаемости Z_{DR} на участке от r_1 до r_2 . Дифференциальная отражаемость — еще один поляризационный параметр принимаемого сигнала, определяемый по формуле [3]

$$Z_{DR} = \frac{P_h}{P_v}. \quad (10)$$

Точность данного метода в два раза выше по сравнению с ранее применявшимся методом, что признается самым значительным прорывом в измерении интенсивности дождя за все время использования радаров в метеорологии [7]. Кроме того, он обладает еще одним важным преимуществом — независимостью от частичного блокирования луча антенны местным предметом. При использовании традиционной процедуры оценивания такое блокирование ведет к смещению оценки в сторону ее уменьшения. В случае применения нового метода в силу использования неэнергетического параметра оно никак не влияет на результат. Только полное закрытие луча способно помешать получению оценки.

Из вышеизложенного следует, что большой интерес представляет задача исследования возможности применения нового метода в радиолокаторе с НЧМ модулированным зондирующим импульсом, каким является ДМРЛ-С.

Методика эксперимента

Идеальным было бы сравнение оценок интенсивности осадков, полученных традиционным и новым методами, с эталонными значениями (такое сравнение уже проводилось авторами в отношении оценок сдвига ветра [4]). В таком случае за эталон логично было бы принять данные наземных метеорологических станций. Это позволило бы выявить преимущества одного метода перед другим.

Однако какого-нибудь архива данных об интенсивности осадков, получаемых наземными метеостанциями, авторами найдено не было. В связи с этим пришлось ограничиться чисто качественным сравнением двух радиолокационных методов. Это не дает права делать выводы о том, какой из методов лучше, но может послужить основанием для проведения более глубокого исследования. Кроме того, данная работа представляет интерес с точки зрения получения практических навыков в реализации новой процедуры обработки данных, что значительно облегчит продвижение вперед в данном вопросе.

Обрабатывались данные, полученные с помощью радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай Новгородской области, в теплый период 2012 г. Максимальная дальность была определена равной 50 км. Для каждого из методов строилась карта распределения интенсивности осадков. При этом были поставлены и решены следующие практические задачи.

1. Большое влияние на принимаемый сигнал на выбранных дальностях имеют отражения от местных предметов. В ряде случаев они способны полностью замаскировать эхо от гидрометеоров. Для борьбы с данным вида помехами пришлось разработать отдельный блок обработки, использующий еще один

измеряемый радиолокатором поляризационный параметр — модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих [3]:

$$P_{hv} = \text{mod} \left(\frac{\langle H^*V \rangle}{(P_h P_v)^{1/2}} \right). \quad (11)$$

Главное его свойство — служить идентификатором того, что наблюдаемая цель метеорологическая. В этом случае его значение превышает 0,8. Для иных целей, в том числе местных предметов, он значительно меньше. Разработанный блок удалял из рассмотрения те элементы разрешения, в которых модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих составлял менее 0,8. Пример карт интенсивности осадков до и после фильтрации помех от местных предметов приведен на рис. 1.

2. Непосредственное применение формулы (9) предполагает использование значений дифференциальной фазы сигнала в начальной и конечной точках наблюдаемого интервала. На практике измеряемый параметр является случайной величиной, а его распределение по длине радиолокационного луча — случайным пространственным процессом. Если в указанной формуле использовать мгновенные значения дифференциальной фазы, искомая разница фаз может оказаться отрицательной и, следовательно, неприменимой для подстановки в другие формулы. В связи с этим выбирались не мгновенные значения дифференциальной фазы в указанных точках, а значения тренда данного случайного пространственного процесса на всем исследуемом интервале дальности. Находился он аппроксимацией полученного пространственного распределения оценок линейной функцией, параметры которой определялись методом наименьших квадратов.

3. В одном луче радиолокатора может одновременно находиться несколько зон с осадками. Применять ко всем одни и те же параметры расчета неправильно.

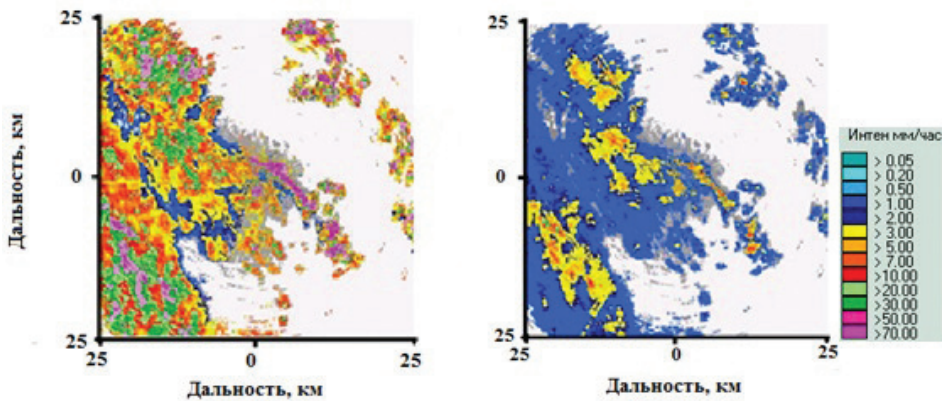


Рис. 1. Карты интенсивности осадков, рассчитанные новым методом без фильтрации отражений от местных предметов (слева) и с фильтрацией (справа).

Поэтому требуется сегментация луча по дальности, т.е. разделение всей дальности на участки, внутри которых эти параметры можно считать постоянными. Подобную процедуру следует применять и в случае наблюдения за большой зоной осадков, в которой может наблюдаться изменчивость указанных параметров. Очевидно, что для определения оптимальной величины сегмента потребуется провести дополнительные исследования. Рисунок 2 иллюстрирует результаты введения сегментации.

После применения указанных выше процедур строились карты распределения интенсивности осадков, рассчитанные по методу, основанному на распределении Маршалла — Пальмера, и новым методом, которые сравнивались между собой на предмет отсутствия грубых расхождений оценок. Пример такой пары карт приведен на рис. 3.

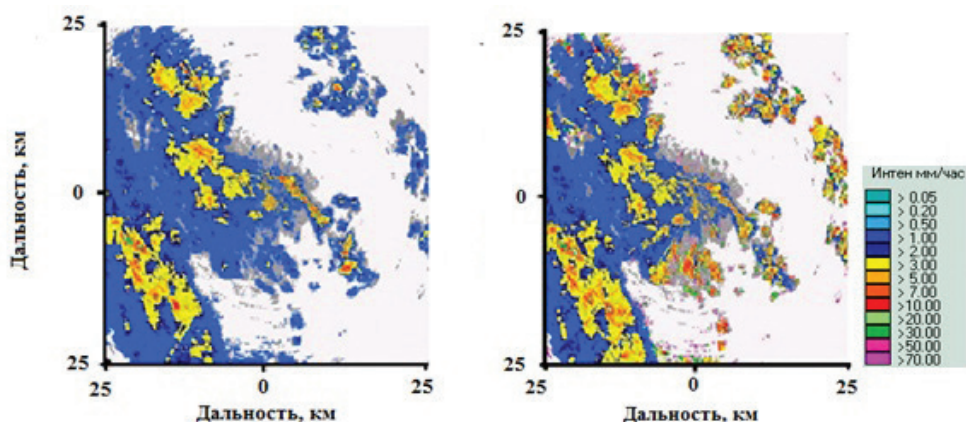


Рис. 2. Карты интенсивности осадков, рассчитанные новым методом без применения сегментации луча (слева) и с применением сегментации (справа).

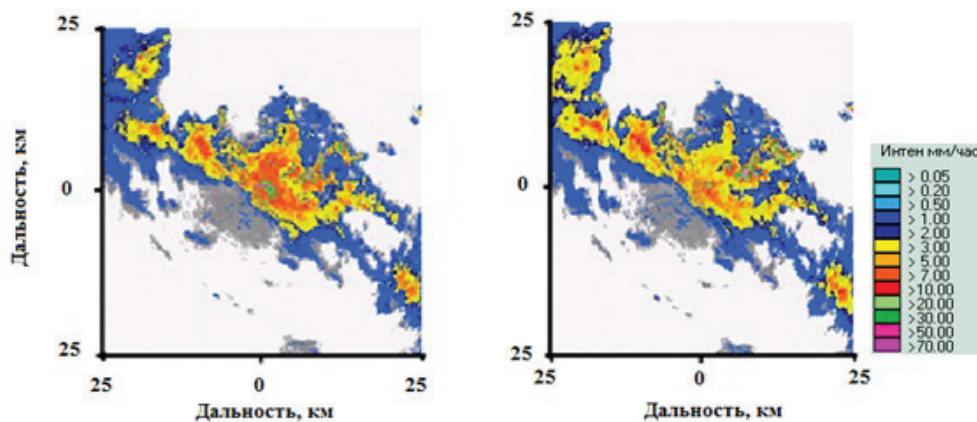


Рис. 3. Карты интенсивности осадков, рассчитанные по методу, основанному на распределении Маршалла — Пальмера (слева), и новым методом (справа).

Расхождение оценок считалось грубым, если превышало указанную выше точность метода, основанного на предположении о распределении размеров капель по закону Маршалла — Пальмера, т.е. более чем на 300 %.

Выводы

Всего было получено 32 пары карт по описанной выше методике. Ни на одной из них не обнаружено грубых расхождений в значениях оцениваемого параметра. Однако расхождения не более чем в три раза наблюдались как в меньшую, так и в большую сторону. Подтверждена независимость нового метода от частичного блокирования луча.

На основании проделанной работы можно заключить, что новый метод инвариантен к НЧМ сигналу и может применяться в системе вторичной обработки сигналов радиолокатора ДМРЛ-С.

Список литературы

1. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 140 с.
2. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 232 с.
3. Готюр И.А., Девяткин А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 32. С. 66—83.
4. Денисенков Д.А., Жданова М.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Экспериментальная проверка метода определения сдвига ветра по ширине спектра радиолокационного сигнала // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 113—118.
5. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Руководство по эксплуатации. ЦИВР.462414.002 РЭ. М., изд. ЛЭМЗ, 2011.
6. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 92—100.
7. Ryzhkov, A., M. Diederich, P. Zhang, and C. Simmer. Utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking // J. Atm. & Oceanic Techn. 2014. No. 31. P. 599—619.