

Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации.

Вовшин Б.М.¹, Вылегжанин И.С.¹, Жуков В.Ю.², Пушков А.А.¹, Щукин Г.Г.²

1. Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод».

2. Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского»

Делается обзор развития теоретических и экспериментальных исследований по внедрению поляризационных измерений в метеорологической радиолокации. Описываются параметры отраженного сигнала, подлежащие оцениванию, и практические возможности, открывающиеся при их измерении. На примере данных, полученных в процессе опытной эксплуатации радиолокатора ДМРЛ-С, иллюстрируются результаты применения поляризационных методов распознавания опасных явлений погоды, подавления мешающих отражений и решения других подобных задач.

The review of development in theoretical and experimental researches in implementation of polarization measurements in meteorological radiolocation is done. The parameters of reflected signal, which have to be assessed, and practical possibilities of their measurement are described. The data of DMRL-S radar experimental exploitation are done and the results of use of polarization methods for danger weather phenomena recognition, for neutralization interfering reflections and for another similar tasks are described.

Идея использования поляризационных измерений в метеорологической радиолокации зародилась в 80-е годы прошлого столетия и состояла в оценивании величины дифференциальной отражаемости для решения задач фазового состояния осадков и их интенсивности. Основывалась она на том, что жидкая капля в атмосфере имеет не круглую, а приплюснутую форму. При этом ось формируемого эллипсоида вращения направлена вдоль движения капли, т.е. близка к вертикальному положению. Это приводит к тому, что отражающая способность капли в горизонтальной плоскости становится больше, чем в вертикальной. Причем разница между ними тем больше, чем больше размер капли. Твердые же осадки либо сохраняют круглую форму при любом направлении движения (град), либо хаотически ориентированы в пространстве (например, ледяные иглы). Оба случая ведут к тому, что среднее значение дифференциальной отражаемости близко к нулю.

Анализируя совместно получаемые оценки обычной и дифференциальной отражаемостей, можно с большой степенью надежности идентифицировать следующие цели:

1. сухой град, снег, которым соответствуют малое значение отражаемости Z и близкое к нулю значение дифференциальной отражаемости Z_{DR} ;
2. мокрый град – большое значение Z и нулевое Z_{DR} ;
3. слабый или средний дождь – средние значения обоих параметров;
4. сильный дождь, ливень – большие значения обоих параметров;
5. скопления насекомых – очень большие значения Z_{DR} ;
6. местники – отрицательные значения Z_{DR} .

Очевидно, что использование поляризационных измерений сулило большие выгоды, ради которых стоило тратить силы и время.

Первые эксперименты ставились в ГГО А.В. Рыжковым и в ЦАО А.Б. Шупяцким. Они сводились к встраиванию в волноводный тракт радиолокатора МРЛ-2 ферритового переключателя для поочередного излучения пачек импульсов с вертикально и

горизонтально поляризованными волнами [1,2]. Первые же опыты показали хорошие результаты.

В дальнейшем центр исследований в области применения поляриметрии к рассматриваемым проблемам перемещается в США в лабораторию сильных штормов (г. Норманн), и ведутся они теперь, к сожалению, американскими учеными А.В. Рыжковым и В.М. Мельниковым под руководством известного авторитета в этой области знаний Душана Зрнича. Их усилиями уже к началу 2000-х оформилось понимание того, какие из всевозможных поляризационных параметров наиболее информативны и одновременно наименее сложны с точки зрения их технической реализации.

К таковым были отнесены [3,4]:

1. дифференциальная отражаемость

$$Z_{DR}(dB) = Z_h(dB) - Z_v(dB),$$

применяемая для:

- оценки среднего размера капель в осадках;
- различия снега и дождя;
- различия сухого и мокрого снега;
- различия сухого и тающего града за счет того, что сухой град в силу своей неустойчивости в пространстве имеет более низкую Z_{DR} , чем тающий, имеющий более упорядоченную ориентацию;

2. дифференциальная фаза Φ_{DR} или удельная дифференциальная фаза K_{DR} , где

$$K_{DR} = \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{DR}}{dr}.$$

Оценивается как аргумент коэффициента взаимной корреляции, определяемого в свою очередь по формуле

$$\rho_{hv} = \frac{\langle H^* V \rangle}{(P_h P_v)^{1/2}}, \text{ где } P_h = \langle |H|^2 \rangle, P_v = \langle |V|^2 \rangle,$$

H и V - сигналы, принимаемые по горизонтальному и вертикальному каналам соответственно, треугольные скобки означают осреднение по времени.

Применяется для:

- измерения интенсивности дождя, в чем гораздо эффективнее обычной отражаемости ввиду независимости от распределения частиц по размерам. В результате на нее практически не влияет ослабление в осадках, наличие большого града и частичное блокирование луча;
- распознавания агрегатного состояния частиц в осадках ввиду того, что аналогично дифференциальной отражаемости зависит от размера и ориентации гидрометеоров и, в результате, имеет меньшую величину в снеге, нежели в дожде;
- для калибровки радиолокатора при измерении обычной отражаемости, т.к. не является энергетическим параметром и, следовательно, не зависит от настроек приемного тракта;

3. модуль коэффициента корреляции ρ_{hv} , являющийся исключительно информативным классификационным параметром, т.к. близок к единице для подавляющего большинства гидрометеоров и значительно меньше ее для неметеорологических целей таких, как местники, насекомые, птицы, поднятая ветром пыль, искусственные отражатели.

Кроме того, применим для различия мокрого снега и тающего града от тех же частиц в сухом состоянии, поскольку для первых имеет значение меньшее, чем для вторых.

На основании анализа точности проводимых измерений были сформулированы требования к аппаратуре радиолокатора и, прежде всего, к антенне [5]. Последняя должна,

прежде всего, обеспечивать хорошую развязку поляризационных каналов и малую величину кросс-поляризационной составляющей в излучаемом сигнале.

Режим излучения ортогонально поляризованных волн допускается как одновременный так и череспериодный. И тот и другой обладают своими достоинствами и недостатками, хотя последние статьи В.М. Мельникова доказывают преимущества одновременного излучения в точности измерений при ограниченном числе импульсов [6].

С середины 2000-х годов намечается тенденция к переходу от чисто исследовательских работ к внедрению в практику достигнутых результатов. На рынке появляются первые поляриметрические радары. Немецкая фирма "Gematronik" выпускает радиолокаторы "Meteor – 50 DX" и "Meteor – 500 C", финская "Vaisala" – WRM-200. На этом этапе Россия пытается вернуть утраченные позиции – в 2008 принимается решение о разработке нового многопараметрического метеорологического радиолокатора и в 2010 он успешно проходит приемо-сдаточные испытания. От своих зарубежных аналогов он выгодно отличается, прежде всего, более высоким метеорологическим потенциалом, что достигается применением широкополосного зондирующего импульса с коэффициентом сжатия при приеме 60. При мощности излучаемого сигнала 15 кВт эквивалентная мощность достигает 900 кВт. Для этого был разработан специальный импульс с оригинальной нелинейной частотной модуляцией. В результате уровень боковых лепестков на выходе фильтра сжатия был уменьшен до величины менее -50 дБ, что устранило главное препятствие на пути применения сложных сигналов в метеорологической радиолокации.

С 2011 года вновь созданный радар ДМРЛ-С начинает поступать на сеть Росгидромета. В этом же году Германия заменяет свои сетевые радары поляриметрическими, а США начинает реконструкцию уже стоящих на сети WSR-88 с целью введения в них двух поляризационных каналов. Таким образом, мы в плане реконструкции метеорадиолокационной сети становимся в один ряд с ведущими странами. Особенность России при этом состоит в том, что наша сеть развертывается без той скрупулезной методической подготовки, которая имела место в США. Сеть разворачивается с программным обеспечением, ориентированным на методику, разработанную для некогерентных и неполяриметрических локаторов типа МРЛ-5. Таким образом, поляризационные измерения ведутся, но их результаты только выводятся в виде отдельных карт распределения оцениваемых параметров по пространству без их участия в алгоритмах распознавания опасных явлений погоды. Так грозоопасность по-прежнему определяется с помощью известного Y -параметра.

Весь опыт поляризационных наблюдений в России сводится к году опытной эксплуатации образца ДМРЛ-С на позиции в г. Валдай. Однако и этот небольшой промежуток времени дал нам в руки неоценимую информацию, позволяющую сделать некоторые выводы. Полученные данные представляют тем более интереса, что являются первыми в радиометеорологии результатами поляризационных измерений с использованием сложного зондирующего импульса.

Прежде всего, определим, какую практическую ценность ожидаем мы получить от измерения перечисленных параметров. К ним относятся:

1. улучшение качества радарных измерений за счет:
 - автоматической самокалибровки радара;
 - надежной коррекции сигнала на ослабление в осадках;
 - устойчивости к частичному блокированию луча препятствиями, что достигается использованием свойств дифференциальной фазы;
 - очень эффективного распознавания и фильтрации сигналов от неметеорологических рассеивателей (местники, птицы, насекомые и т.п.) при помощи модуля коэффициента взаимной корреляции;
2. возможность автоматического распознавания типа гидрометеоров, что включает
 - детектирование града с высокой точностью

- различие дождя и снега
- выявление зон обледенения, за счет одновременного учета нескольких поляризационных характеристик;

2. качественное изменение в понимании микрофизических процессов в облаках и осадках.

Сразу следует оговориться, что вопросы измерения интенсивности осадков и исследования их микроструктуры требуют более длительного исследования чем то, что мы имеем на настоящий момент. Те фрагменты, которые были получены (рис.1), показывают лишь принципиальную возможность таких измерений, но не позволяют получить каких-либо количественных оценок.

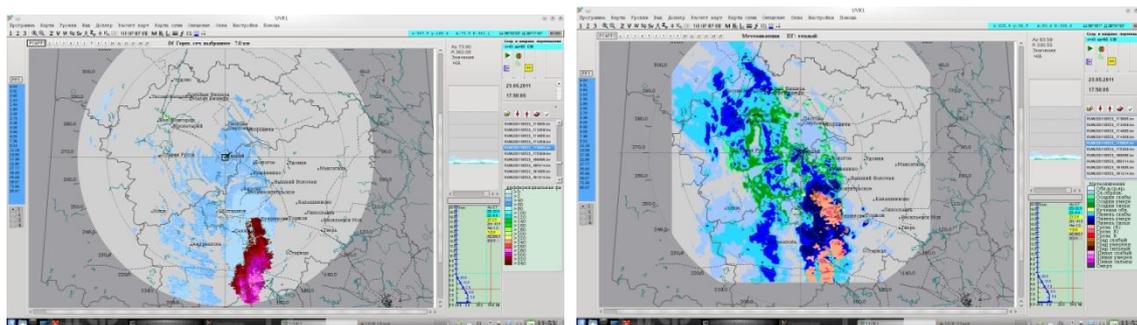


Рис.1. Одновременно полученные карты дифференциальной фазы и метеоявлений.

Соответственно и вопрос самокалибровки откладывается до получения более репрезентативной выборки.

Нечувствительность дифференциальной фазы к частичному блокированию луча устойчиво наблюдалось на соответствующих картах (рис.2).

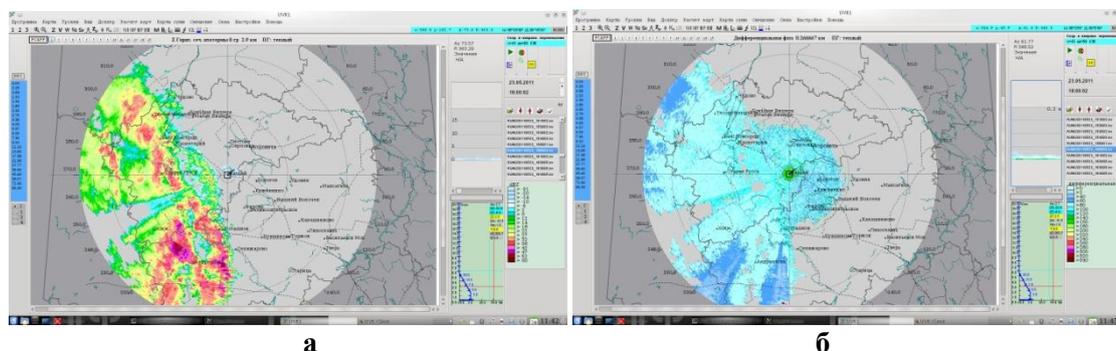


Рис.2. Одновременно полученные карты отражаемости (а) и дифференциальной фазы (б).

На юго-западе отчетливо видна помеха, ведущая к понижению оценки отражаемости в то время как значение дифференциальной фазы в этом секторе остается неизменной.

Различение неметеорологических целей в наибольшей степени проявилось в картах дифференциальной отражаемости. На рис.3 в радиусе около 50 км отчетливо просматриваются отражения от скопления насекомых, теснимых наступающим фронтом.

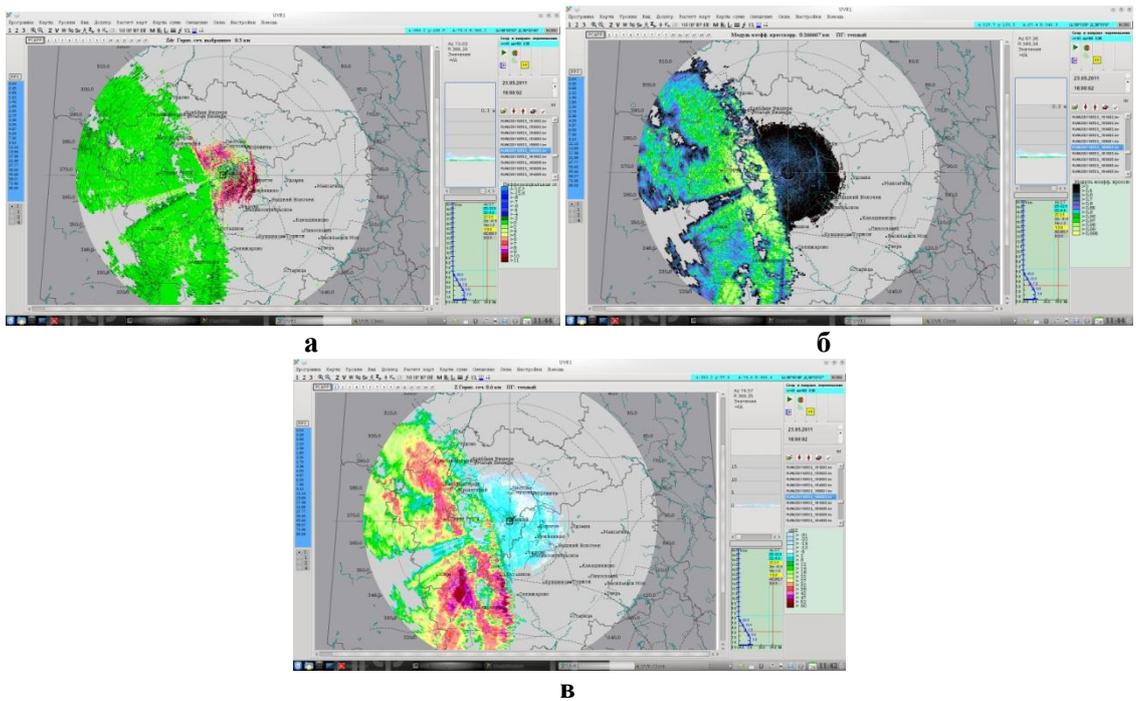


Рис.3. Карта дифференциальной отражаемости с явно просматриваемыми отражениями от насекомых (а) и соответствующие ей карты модуля коэффициента корреляции (б) и отражаемости (в).

Еще более отчетливо проявилось способность дифференциальной отражаемости участвовать в подавлении эхо от местных предметов. На рис.4 приведены карты отражаемости без фильтрации и после фильтрации режекторным фильтром со средней частотой настройки 0 Гц.

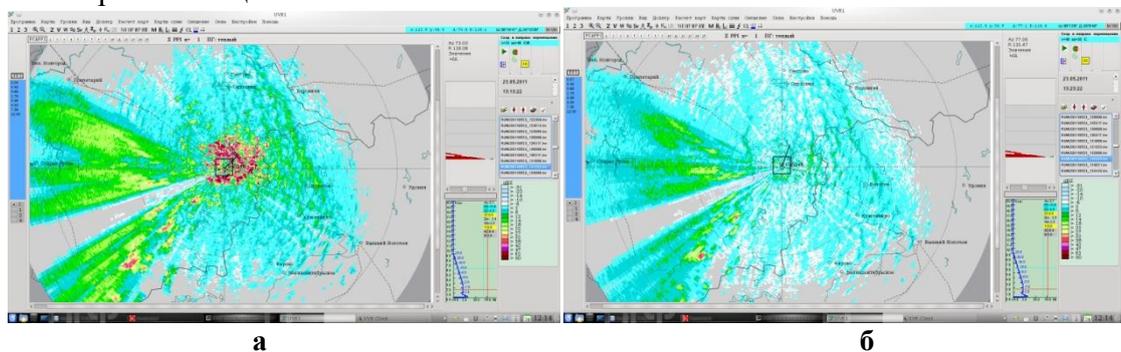


Рис.4. Карты отражаемости без (а) и с (б) частотной фильтрацией.

На рис.5 представлены карты, иллюстрирующие совместную частотную и поляризационную (по отрицательному значению дмференциальной отражаемости) фильтрацию.

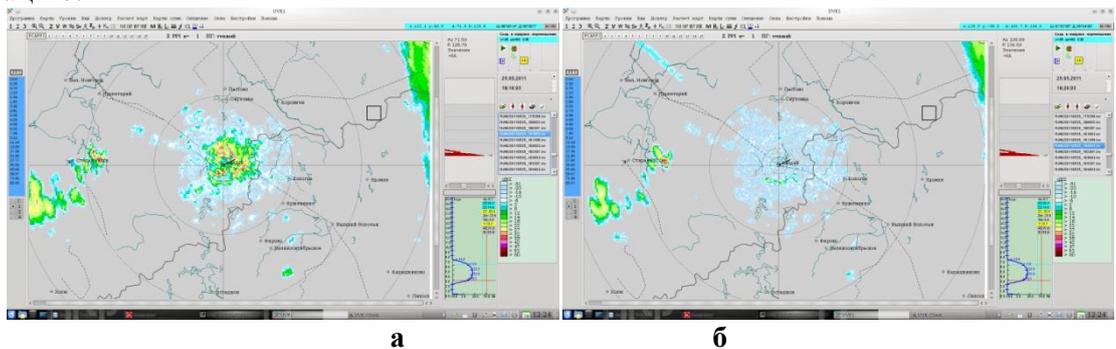


Рис.5. Карты отражаемости без (а) и с (б) совместной частотной и поляризационной (по отрицательной дифф. отражаемости) фильтрации.

В первом случае чисто частотной фильтрации отражения от местников уничтожаются, но при этом значительно искажаются сигналы от метео. Во втором – при хорошем подавлении помехи метео остается практически неискаженным. При этом ожидаемой эффективности применения модуля коэффициента корреляции получить не удалось. Вообще устойчивая идентификация метеоцели по этому параметру представляет большую трудность, что видно на фрагментах б и в рисунка 3.

Возможность разделения фазовых состояний гидрометеоров иллюстрируется рис.6, на котором зоны таяния гидрометеоров просматриваются на картах дифференциальной отражаемости и модуля коэффициента корреляции.

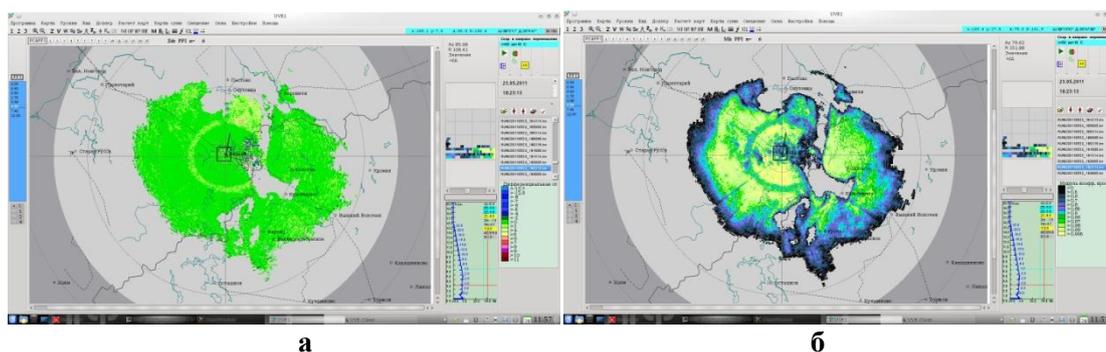


Рис.6. Карты конических разрезов дифференциальной отражаемости (а) и модуля коэффициента корреляции с явно выделяемыми зонами таяния гидрометеоров.

В целом можно констатировать, что данные ДМРЛ-С отвечают ожиданиям, порожденным теоретическими исследованиями. Однако остается еще много нерешенных вопросов, связанных с оцениванием модуля коэффициента корреляции, измерения интенсивности осадков и, может быть, самое главное - с применением поляризационных оценок в алгоритме распознавания опасных явлений.

Литература

1. Шупяцкий А.В., Диневич Л.А., Тычина Р.П. Дистанционная индикация града в облаках по поляризационным характеристикам радиолокационного сигнала. - Тр. ЦАО, вып. 121, 1975, с. 18-27.
2. Рыжков А.В., Журавлев А.Б., Рыбакова Н.А. Комплексные исследования поляризационных характеристик радиолокационных сигналов от облаков и осадков. – Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 1992, 28, № 12, с. 36-42.
3. Рыжков А.В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации. Зарубежная радиоэлектроника, 4, 1993, с. 18 -28.
4. A. Zahrai and D.S. Znic. The 10-cm-Wavelength Polarimetric Weather Radar at NOAA's National Severe Storms Laboratory. Journal of atmospheric and oceanic technology. Vol. 10, NO. 5, October 1993, p. 649-662.
5. Dusan S. Znic and Alexander V. Ryzkov. Polarimetry for Weather Surveillance Radars. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 80, No. 3, March 1999, p. 389 – 406.
6. V.M. Melnikov. Statistics of the polarimetric variables estimated in the AHV and AHV modes. Journal of applied meteorology and climatology, Vol. 50. April, 2011, p. 859 -872.