

**К 85-ЛЕТИЮ
ДМИТРИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛУКИНА**

УДК 551.508.85

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА
В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ**

© 2023 г. Д. А. Денисенков^а, *, В. Ю. Жуков^а, Г. Г. Шукин^б

^а Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Ждановская ул., 13, Санкт-Петербург, 197198 Российская Федерация

^б Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
ул. Орловская, 23, Муром Владимирской обл., 602264 Российская Федерация

*E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

После доработки 01.02.2023 г.

Принята к публикации 25.03.2023 г.

Рассмотрены особенности применения спектральных параметров принимаемого сигнала для распознавания опасных явлений погоды в метеорологической радиолокации. Описаны достоинства и недостатки существующих методов. Предложен новый метод распознавания на основе оценки базы входного случайного процесса.

DOI: 10.31857/S0033849423060013, EDN: XLMARR

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Среди множества областей, в которых применяется радиолокация, метеорология является одной из самых специфических. Это обусловлено большими размерами наблюдаемых объектов, распределенных в пространстве. В результате обработка получаемых оценок параметров существенно отличается от той, что используется в классической радиолокации точечных целей. Это проявляется уже в оценках мощности — для определения грозо- или градоопасности кучевого облака рассчитывают Y -параметр [1]

$$Y = H_{\text{вг}} \lg Z_{-22}, \quad (1)$$

где $H_{\text{вг}}$ — высота верхней границы облачности; Z_{-22} — отражаемость (характеристика цели, рассчитываемая по мощности принятого отражения) на уровне высоты изотермы -22° .

Очевидно, что простого оценивания мощности недостаточно, требуется также определить ее распределение по объему наблюдаемой цели. В данном случае это максимальная высота, на которой еще можно выделить отраженный сигнал.

В еще большей степени данная специфика проявляется при применении спектральных параметров отражений для решения главной задачи метеорологического радиолокатора — своевременного распознавания опасных явлений погоды. Она состоит уже в том, что этих параметров два — средняя частота энергетического спектра и его ширина [2]. В других радиолокаторах ограничиваются, как правило, оцениванием только пер-

вого из них. Это вызвано тем, что никакие другие цели, кроме метеорологических, не создают отражений со спектром такой ширины и нигде он не несет столько полезной информации.

2. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОЦЕНОК СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

Необходимость учета распределения параметров по объему цели сохраняется и для спектральных параметров. Так, оценка средней частоты отражений от одного элемента разрешения практически не несет никакой информации. Зато последовательность таких оценок, получаемых в одном слое атмосферы при азимутальном сканировании, позволяет путем их аппроксимации синусоидальной зависимостью определить скорость и направление ветра в этом слое [3]. Подобная обработка сигналов, получаемых на разных высотах, дает возможность восстановить вертикальный профиль ветра, что, в свою очередь, позволяет распознать сдвиг ветра — явление, опасное для воздушных судов, идущих на взлет или посадку.

Анализ пространственного распределения средней частоты спектра принимаемого сигнала применим для распознавания и других опасных явлений, связанных с ветром: смерча, шквала и микрошквала (кратковременного нисходящего потока воздуха, возникающего в кучевой облачности).

При попадании смерча в зону обзора радиолокатора наблюдается резкий скачок рассматриваемого параметра при сканировании антенны по азимуту. Он возникает в результате того, что в луч антенны сначала попадает одна половина зоны смерча, где скорости частиц имеют одно направление, а потом другая — с противоположенным направлением скоростей [4].

Микрошквал — вертикальный поток воздуха, и поэтому не создает сколько-нибудь значительного доплеровского сдвига частоты при наблюдении его на малых углах места, характерных для работы метеорологического радиолокатора. Поэтому он не подлежит непосредственному обнаружению по оценкам средней частоты спектра. Его распознают косвенным методом, основанным на том, что при ударе о землю данный поток растекается в разные стороны. Именно это растекание и может быть зафиксировано по резкому скачку средней частоты в соседних элементах разрешения. В отличие от случая смерча, скачок наблюдается в элементах, смежных не по азимуту, а по дальности [5].

Все рассмотренные методы имеют один и тот же недостаток, а именно существенную зависимость их эффективности от соотношения размеров явления и разрешаемого объема радиолокатора. Так, сдвиг ветра надо восстанавливать с разрешающей способностью не менее 30 м по высоте, так как единицей его измерения является метр в секунду на фут высоты. При обычной для современных метеорологических радиолокаторов ширине антенного луча 1 град максимальная дальность наблюдения ограничивается примерно двумя километрами. Если учесть, что на этом же расстоянии начинается дальняя зона Френеля, где формируется диаграмма направленности антенны, становится понятно, почему в больших аэропортах дополнительно к метеорологическому радиолокатору устанавливают радиопрофиломеры — малогабаритные радары, предназначенные специально для определения высотного профиля ветра.

Размеры смерча, как правило, не превышают нескольких сот метров. Следовательно, зона его уверенного обнаружения ограничена радиусом около 20 км. Далее условие, состоящее в том, чтобы размер разрешаемого объема не превосходил половины диаметра зоны смерча, не выполняется, и ожидаемый скачок частоты становится плавным и малозаметным.

Применение упомянутого метода распознавания микрошквала также зависит от дальности, ибо в случае, когда размер элемента разрешения превосходит размер потока, образовавшегося при ударе микрошквала о землю, имеет место эффект, аналогичный случаю наблюдения смерча.

Несколько лучше обстоят дела с распознаванием шквала, поскольку он значительно превос-

ходит по размеру остальные рассмотренные явления. Это делает возможным уверенное наблюдение его в виде полосы повышенных относительно общего фона значений средней частоты сигнала. Однако все это происходит только при удачном расположении радара и линии шквала, когда доплеровский сдвиг частоты отражений достаточно велик. Если же они расположены примерно на одной линии, когда скорость ветра тангенциальна к точке наблюдения, распознавание становится невозможным.

Указанные ограничения приводят к тому, что результаты обработки оценок средней частоты спектра принимаемого радиолокатором сигнала оказываются малоинтересными для специалистов. Так, сотрудники метеорологических служб аэропортов ими практически не пользуются, считая неинформативными.

Таким образом, объем информации, получаемой с помощью описанных методов, уменьшается с увеличением размера элемента разрешения относительно размера наблюдаемого объекта, т.е. с увеличением координаты дальности. При этом она не исчезает бесследно, а “переходит” в форму спектра принимаемого сигнала. Однако анализ формы спектра — сложный и плохо формализуемый процесс. Гораздо удобнее было бы найти другой параметр, не зависящий или мало зависящий от расстояния.

Именно таким параметром является ширина энергетического спектра, незаслуженно мало применявшаяся до недавнего времени. Вызвано это было тем, что применять ее пытались “точечно”, т.е. использовали единичные измерения в одной точке. Опыт же применения уже рассмотренных двух параметров показывает резкое увеличение эффективности при анализе их пространственного распределения.

Этот эффект хорошо просматривается на примере метода распознавания сдвига ветра по оценкам ширины спектра отражений [6]. Он основан на представлении данного явления в виде границы между двумя расположенными друг над другом воздушными массами. Каждая из них характеризуется мощностью создаваемых отражений, скоростью и направлением ветра. Поскольку форма спектра сигнала, формируемого метеообразованиями, гауссова, то спектр сигнала, получаемого при попадании в разрешаемый элемент обеих масс, оказывается суммой двух гауссовых спектров с разными параметрами. Ширина такого спектра описывается формулой [7]

$$\sigma_{\omega} = \left(\frac{P_1}{P_1 + P_2} \sigma_{\omega 1}^2 + \frac{P_2}{P_1 + P_2} \sigma_{\omega 2}^2 + \frac{P_1 P_2}{(P_1 + P_2)^2} (\omega_{01} - \omega_{02})^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где P_i — мощность отражений от i -го слоя; σ_{oi} — ширина спектра этих отражений; ω_{oi} — их средняя частота.

Очевидно, что при значительном расхождении средних частот сигнала, формируемого каждым из слоев, ширина спектра суммарного сигнала достигает аномальных, т.е. недостижимых в других условиях, величин. Значения же самих средних частот зависят от угла между направлением ветра в слое и направлением луча радиолокатора. При сканировании антенны этот угол постоянно меняется, приводя к изменениям рассматриваемого параметра в широких пределах. В результате на карте ширины спектра формируются хорошо различимые зоны, по величине параметра в которых и по форме их расположения распознается сдвиг ветра и определяются его характеристики.

Аналогичный метод применим и для обнаружения изменений скорости ветра в зависимости от высоты, которые не столь ярко выражены, как при сдвиге ветра. В этом случае спектров аномальной ширины не наблюдается, но появляются спирали пониженных значений, по поведению которых восстанавливается профиль ветра. Классический случай такого явления — слой Экмана, в котором вектор скорости изменяется по известному закону [8]. Пример его наблюдения приведен на рис. 1. Штриховой линией на рисунке показана область малых значений ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров.

К сожалению, среди явлений, связанных с ветром, только к сдвигу ветра применим учет пространственного распределения параметра, так как он имеет большие размеры одновременно в двух координатах. Остальные радиолокатор воспринимает как одномерные. Именно поэтому смерч и микрошквал остаются наиболее трудно распознаваемыми явлениями природы.

Ввиду этого возникла необходимость найти новый параметр сигнала, способный решить поставленную задачу. По мнению авторов, им может оказаться параметр, названный базой принимаемого сигнала [9]. Название возникло по аналогии с применяемыми в радиотехнике сложными импульсами, показателем сложности которых служит база, понимаемая как произведение длительности импульса на ширину его спектра. Если импульс не имеет каких-либо усложнений внутренней структуры, его база равна единице. Если же эта структура усложнена, например, линейной частотной модуляцией, ее значение увеличивается.

В нашем случае при попадании в луч радиолокатора любого из рассматриваемых опасных явлений, спектр принимаемого сигнала оказывается равным взвешенной по мощности сумме спектров отражений от двух воздушных масс — фона и зоны неоднородности. Происходит усложнение спектра, которое может быть зафиксировано посредством

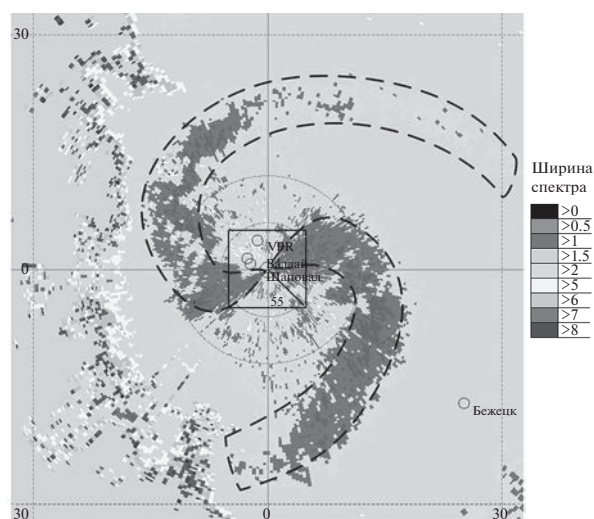


Рис. 1. Пример наблюдения слоя Экмана доплеровским метеорологическим радиолокатором.

оценивания параметра, аналогичного параметру базы импульса. Возникает вопрос, какие величины включать в формулу для расчета такого параметра. Очевидно, что аналогом ширины спектра импульса будет ширина энергетического спектра принимаемого случайного процесса. Аналог же длительности импульса логично искать в виде величины, связанной с шириной энергетического спектра преобразованием Фурье, как связаны между собой параметры, определяющие базу импульса. Очевидно, что это интервал корреляции принимаемых отражений.

Отличительной особенностью нового параметра является то, что, как показывают расчеты, он работает даже в таком сложном для распознавания случае, когда средние значения суммируемых спектров равны и различия состоят только в их ширине. Это имеет место при наблюдении, например, вертикального потока под малым углом места антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В метеорологической радиолокации оцениваются два спектральных параметра принимаемого сигнала — средняя частота и ширина его энергетического спектра. Только с их помощью возможно распознавание опасных явлений погоды, связанных с ветром. При этом наибольшее количество информации несет не величина самой оценки, а особенности ее распределения по объему наблюдаемой цели.

Сейчас в программах вторичной обработки информации современных радиолокаторов предпочтение отдается оценкам средней частоты спектра, как наиболее традиционным и хорошо проявившим себя в других областях радиолокации. Однако, как

показывает практика, использование этих оценок эффективно на небольших расстояниях, на которых размер разрешаемого элемента как минимум в два раза меньше размера самого явления.

Альтернативой является использование оценок ширины спектра. Но их применение ограничено лишь теми явлениями, что имеют большие размеры сразу по двум координатам. Остальные до сих пор остаются трудно распознаваемыми. Поскольку к ним относится такое особо опасное явление как смерч, актуален вопрос поиска новых методов их распознавания. По мнению авторов, в их основу могут быть положены оценки параметра базы принимаемого сигнала, определяемого как произведение ширины энергетического спектра сигнала на его интервал корреляции.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00378).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. // Матер. VI Всерос. науч. конф. “Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды”. СПб., 16–18 сентября 2020. С. 40.
2. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
3. Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Интерпретация данных доплеровских метеорологических радиолокаторов. СПб.: РГГМУ, 2018.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 9. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-58-9-19>
5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 110.
6. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Первушин Р.В., Шукин Г.Г. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 3. С. 68.
7. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. // III Всерос. Арmandовские чтения: матер. IV Всерос. научн. конф. “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”. Муром. 25–27 июня 2013. Муром: Изд-во ВлГУ, 2013. С. 37.
8. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2018. № 662. С. 124.
9. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 113. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-5-113-120>