

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 551.501.81 + 621.396.96

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРА «БАЗА СИГНАЛА» ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

© 2024 г. Д. А. Денисенков¹, В. Ю. Жуков^{1, *}, Г. Г. Щукин²

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

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

²Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,

ул. Орловская, 23, Муром Владимирской обл., 602264 Российская Федерация

*E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 17.07.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Рассмотрены особенности распознавания опасных явлений природы, связанных с ветром, и возникающие при этом проблемы. Описан численный эксперимент, проведенный для подтверждения теоретических исследований эффективности применения для этих целей нового параметра принимаемого сигнала — базы. На основе полученных результатов сделан вывод о перспективности его применения в метеорологической радиолокации.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, распознавание опасных явлений погоды, первичная обработка сигнала, база сигнала, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0033849424060126, **EDN:** HPCBN

ВВЕДЕНИЕ

В метеорологической радиолокации, призванной своевременно распознавать опасные явления погоды, наиболее трудно распознаваемыми являются те из них, что связаны с ветром. Причины этого уже неоднократно рассматривались [1]. Главная состоит в том, что изначально метеорологическим радиолокаторам ставилась задача предупреждать о явлениях, связанных с облачностью, что и определяло значения их параметров. Задача же распознавать неоднородности ветрового поля появилась только после внедрения в эту область техники когерентных режимов работы, т.е. в конце прошлого века. Требования к техническим параметрам, требуемым для ее решения, вошли в противоречие с уже существующими. В результате пришлось разрабатывать новые виды техники — например, профайлеры. Однако поиск путей, которые позволили бы радиолокатору распознавать явления обоих указанных видов, остается важной и актуальной задачей по сей день.

Один шаг в этом направлении был авторами сделан. Имеется в виду разработка метода распознавания и определения параметров сдвига ветра с помощью оценок ширины спектра принимаемого радиолокационного сигнала [2]. Использовалась особенность данного явления, состоящая в его

больших размерах сразу по двум координатам в горизонтальной плоскости. При его наблюдении на получаемой карте оценок ширины спектра наблюдаются зоны повышенных и пониженных значений параметра с характерным расположением, что и позволяет решить поставленную задачу.

Однако кроме сдвига ветра имеются еще и другие связанные с ветром явления, протяженные только по одной координате, и не менее, если не более опасные. К ним относятся смерч, шквал, микрошквал, восходящие конвективные потоки. Для их распознавания надо искать новые методы. В качестве такового авторами был предложен метод, основанный на оценках нового параметра сигнала — базы [3, 4]. Последняя понимается как произведение ширины энергетического спектра принимаемых отражений на интервал корреляции этого случайного процесса. При невозмущенной атмосфере спектр и корреляционная функция эхо-сигнала имеют гауссову форму [5] и их вторые центральные моменты связаны обратной пропорциональной зависимостью, т.е. при перемножении дают единицу. Если же в элемент разрешения радиолокатора попадают две воздушные массы с разными характеристиками (что имеет место при наблюдении неоднородности ветрового поля), спектр сигнала оказывается состоящим из двух гауссиан. Указанное соотношение нарушается и база

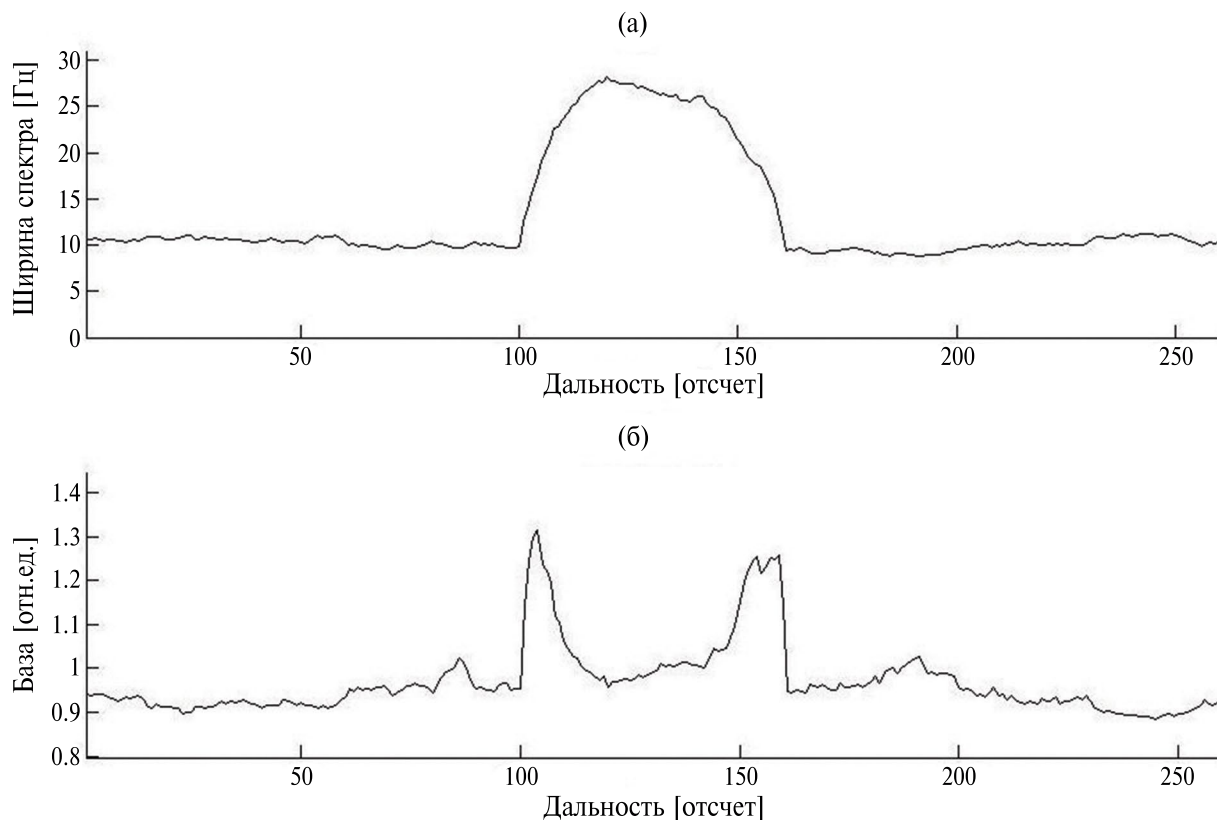


Рис. 1. Зависимости оценок ширины спектра сигнала (а) и его базы (б) при размере области потока, равной 20 отсчетам дальности.

приобретает значение, отличное от единицы. В отличие от ширины спектра, значение которой может определяться различными изменениями распределения ветра в наблюдаемом пространстве (в том числе и неопасными), база является индикатором попадания в луч радара резкой неоднородности, представляющей, как правило, опасность для воздушных судов.

До сих пор исследовалась информативность нового параметра при различных соотношениях значений ширины спектра и мощности сигналов отражений от двух одновременно наблюдаемых воздушных масс [6]. Теоретические расчеты показали обнадеживающие результаты. Целью данной статьи является моделирование указанных сигналов и их обработка.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделировался процесс наблюдения радиолокатором неоднородности поля ветра. Для этого весь диапазон наблюдаемых за один период повторения дальностей разделяли на три зоны: ближнюю, дальнюю и среднюю. Первые две — фон — формировали отражения с одинаковыми параметрами (мощность, средняя частота и ширина энергетического

спектра) и играли роль невозмущенной атмосферы. Внутри нее находилась область, сигнал от которой имел другие значения перечисленных параметров. Роль такой области (области потока) выполняла средняя зона.

Весь интервал дальностей разбивался на элементарные участки, для каждого из которых моделировался отраженный сигнал. Для этого рассчитывали амплитудный спектр, отличавшийся от энергетического тем, что он имел в два раза большую дисперсию, и фазовый спектр в виде ряда случайных равномерно распределенных в интервале от 0 до 2π величин. Затем путем обратного преобразования Фурье рассчитывали значения случайного временного процесса.

Разрешаемый объем радиолокатора имитировался прямоугольным окном длиной в 40 элементарных участков. Таким образом, принимаемый сигнал формировался как сумма 40 случайных процессов, что обеспечивало нормальный закон распределения его отсчетов.

Полученный сигнал подвергали обработке с целью оценивания ширины его энергетического спектра и интервала корреляции. В первом случае применяли наиболее распространенный в метеорологической радиолокации метод парных

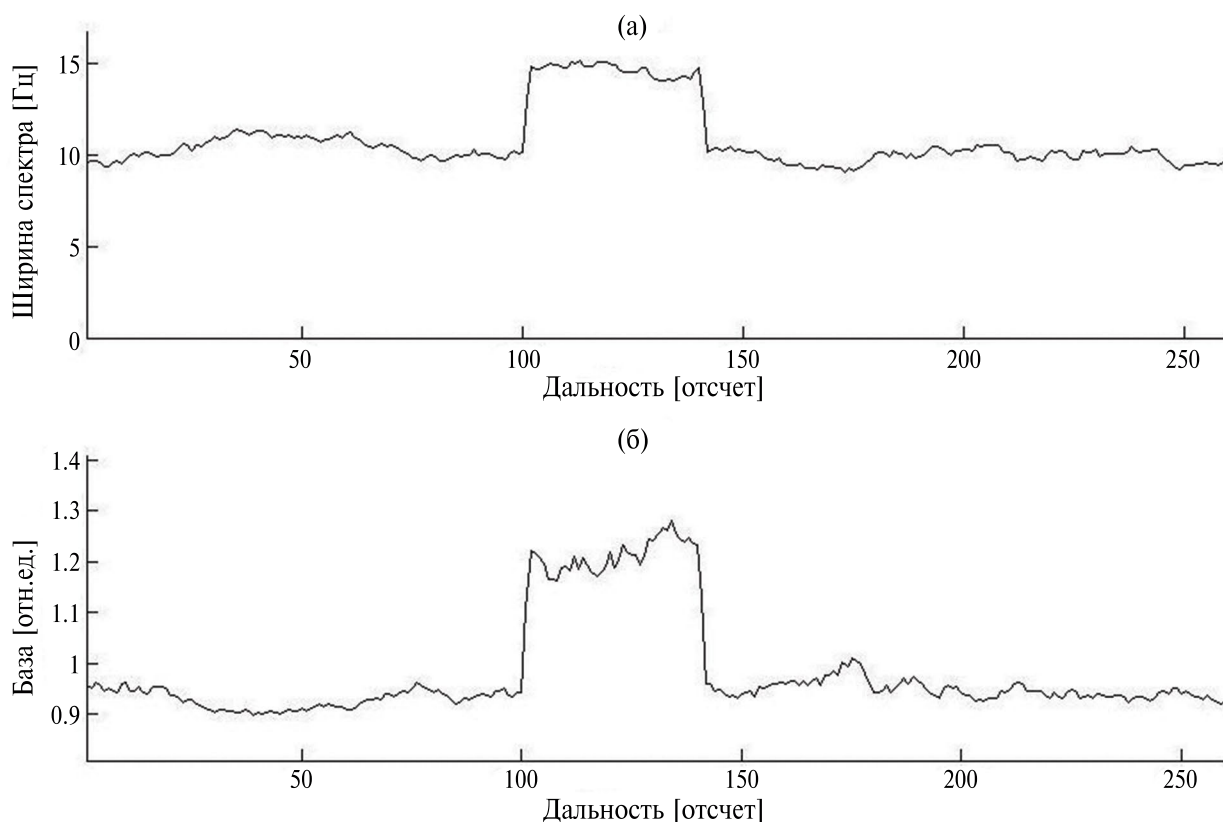


Рис. 2. Зависимости оценок ширины спектра сигнала (а) и его базы (б) при размере области потока, равной одному отсчету дальности.

импульсов, во втором классическом способном рассчитывали коэффициенты автокорреляции для различных временных сдвигов. За интервал корреляции принимали значение временного сдвига, при котором данный коэффициент становился равным 0.5.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Главным результатом проведенного эксперимента стало подтверждение эффективности применения нового параметра сигнала «база». Особенный интерес для практики представляет случай, когда средние частоты отражений от одновременно находящихся в элементе разрешения воздушных масс, равны. Различаются только значения ширины их энергетических спектров и мощности. Именно такая ситуация складывается при наблюдении радиолокатором вертикальных потоков под малыми углами места или зоны порыва под углом 90° к скорости ветра.

Методы, основанные на оценках средней частоты сигналов, здесь бессильны. Применение же нового предлагаемого параметра позволяет распознать участки пространства, опасные для полета

воздушных судов из-за существования в них градиентов поля ветра (см. рис.1 и 2).

На рис.1 изображены изменения оценок ширины спектра и базы при размере области потока, равной 20 элементарным участкам, т.е. половине протяженности элемента разрешения. При этом мощности составляющих сигнала равны. Значения ширины спектра задавались равными 10 Гц у отражений фона и 30 Гц у отражений от зоны потока. На графиках прослеживается реакция обоих параметров на существование неоднородности. Ширина спектра плавно увеличивается при «входе» зоны потока в разрешаемый объем и также плавно спадает при его «выходе». База же четко обозначает опасные места, где имеется резкий переход от одной зоны к другой. Очевидно, что совместное использование обеих оценок позволяет эффективно распознать возникающие в рассматриваемом случае опасные участки. Например, в рассматриваемом случае повышенные значения оценок ширины спектра между обозначенными базой участками неоднородности свидетельствует о наблюдении одного широкого потока воздуха. Если же повышенных значений базы не наблюдается, то уширение спектра вызвано уменьшением отношения сигнал — шум, и опасности не представляет.

Случай наблюдения малоразмерного потока представлен на рис. 2. Размер зоны потока уменьшен до одного элементарного участка. Таким образом имитируется случай, когда вертикальный воздушный поток имеет размеры, значительно меньшие размеров элемента разрешения. Это не делает его менее опасным, но значительно более трудно распознаваемым вследствие маскировки отражениями фона. Из приведенных рисунков видно, что реакция базы в этом случае более энергичная, чем у ширины спектра. При этом она является и более информативной, так как указывает на существование резкой неоднородности поля ветра. Локальное же увеличение ширины спектра может быть вызвано и иными, кроме рассматриваемой, причинами — плавным увеличением ширины спектра скоростей наблюдаемых частиц, уменьшением соотношения сигнал/шум и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный численный эксперимент подтверждает теоретические расчеты, на основании чего можно утверждать, что параметр «база» является эффективным средством решения задачи распознавания опасных явлений погоды, связанных с ветром. Получение его значения, большего единицы, однозначно указывает на существование в зоне обзора радиолокатора неоднородности поля ветра. Совместный анализ оценок базы и ширины спектра позволяет получить информацию о размерах наблюдаемого явления.

Авторы данной статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Кулешов Ю. В., Щукин Г. Г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 110.
2. Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Первушин Р. В., Щукин Г. Г. // Радиотехн. телекоммун. системы. 2016. № 3. С. 68.
3. Zhukov V. Y., Denisenkov D. A., Shchukin G. G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V/1632. Article No. 012016. DOI 10.1088/17426596/1632/1/012016.
4. Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Кулешов Ю. В., Щукин Г. Г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 113. DOI 10.52002/0130-2906-2021-5-113-120.
5. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
6. Жуков В. Ю., Щукин Г. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 8–9. С. 616. DOI 10.52452/00213462-2021-64-08-616

APPLICATION OF THE “BANDWIDTH-DURATION PRODUCT” PARAMETER FOR RADAR RECOGNITION OF HAZARDS

D. A. Denisenkov^a, V. Y. Zhukov^{a,*} G. G. Shchukin^b

^aMozhaisky Military Space Academy,
Zhdanovskaya Str., 13, St.-Petersburg, 197198, Russian Federation

^bMurom Institute (branch) of the Vladimir Civil Servant University
named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov,
Orlovskaya Str., 23 Murom, Vladimir region, 602264 Russian Federation

*E-mail: vka@mil.ru

Received July 17, 2023, revised July 17, 2023, accepted April 25, 2024

The features of recognition of hazardous weather phenomena associated with wind, and the problems arising in this case are considered. It describes a numerical experiment carried out to confirm the theoretical research of the effectiveness of the application for these purposes of a new parameter of the received signal - the bandwidth-duration product. On the basis of the obtained results the conclusion about the perspective of its application in weather radar is made.

Keywords: meteorological radar, weather hazard recognition, primary signal processing, bandwidth-duration product, mathematical modeling