

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

Д.А. Денисенков<sup>1</sup>, В.Ю. Жуков<sup>2</sup>, Г.Г. Щукин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

E-mail: vka@mil.ru

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет,  
192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

E-mail: vuzhukov2002@list.ru

<sup>3</sup>Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт,  
199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается возможность радиолокационного распознавания таких опасных явлений погоды, как локальные зоны вертикального движения воздуха: макрошквалы, смерчи, конвективные потоки. Предлагается применить для этого оценивание базы принимаемого сигнала, определяемой как произведение ширины его спектра на его интервал корреляции. Исследуется влияние шума приемника на смещение получаемых оценок.

**Ключевые слова** метеорологическая радиолокация, распознавание опасных явлений погоды, первичная обработка сигнала, база сигнала.

## RADAR RECOGNITION OF VERTICAL AIR FLOWS

D.A. Denisenkov, V.Y. Zhukov, G.G. Shchukin

**Abstract.** The possibility of radar recognition of such dangerous weather phenomena as local zones of vertical air movement: micro squalls, tornadoes, convective flows is considered. It is proposed to apply for this purpose the estimation of the signal base, defined as the product of its bandwidth by its correlation interval. The influence of receiver noise on the bias of the obtained estimates is investigated.

**Keywords:** meteorological radar, weather hazard recognition, primary signal processing, bandwidth-duration product.

### Введение

Список опасных явлений, распознаваемых современным метеорологическим радиолокатором, включает около десятка наименований [1]. Однако этим не исчерпывается все многообразие погодных условий, способных нанести урон здоровью людей или их имуществу. Поэтому работы, направленные на расширение упомянутого списка всегда важны и актуальны.

В частности, для воздушных судов, совершающих взлет или посадку, весьма нежелательна встреча с различного вида вертикальными потоками воздуха. Это могут быть зоны интенсивной конвекции, микропорывы, представляющие собой кратковременное нисходящее движение воздуха или смерчи [2, 3]. Все они в настоящее время обнаруживаются не по основному признаку, состоящему в появлении в скорости ветра вертикальной составляющей, а по косвенным: конвергенции или дивергенции поля скоростей у поверхности земли в первых двух случаях, и вращению воздуха в последнем. Это ведет к малой эффективности распознавания. Использованию же главного отличия мешают два фактора:

1. Мало отличающийся от 90 градусов угол между осью антенны радиолокатора и вектором вертикальной скорости, что не дает возможности различать сигналы, принятые от опасной зоны, по доплеровскому сдвигу частоты.

2. Малые размеры рассматриваемых явлений, сравнимые с размерами разрешаемого объема, из-за чего отражения от них могут «теряться» в сигнале, создаваемом всем этим объемом.

### Постановка задачи

Перечисленные трудности заставили искать нетрадиционные способы радиолокационного распознавания рассматриваемых явлений, основанные не на различии какого-то параметра отражений от соседних элементов разрешения, а на анализе внутренней структуры принимаемого сигнала. В результате был предложен метод [4], распознающий присутствие во входном импульсе двух составляющих:

- созданной невозмущенной атмосферой (фоном);
- отраженной зоной, в которой имеют место вертикальные потоки.

Отличительной особенностью в этом случае является ширина спектра составляющих. Во втором случае она должна быть больше, т.к. к «обычным» для всего окружающего пространства факторам, влияющим на ее величину, добавляется еще, как минимум, один вертикальная составляющая скорости ветра. По аналогии с применяемыми в радиолокации и радиосвязи сложными сигналами, параметр, отражающий сложность анализируемого случайного процесса, был назван базой. Определяется он как произведение ширины спектра сигнала  $\sigma_\omega$  на ширину его функции корреляции (интервал корреляции)  $\sigma_\tau$

$$B = \sigma_\omega \sigma_\tau. \quad (1)$$

В отсутствии внутри элемента разрешения возмущенной зоны отражение не имеет сложной структуры, что подтверждается значением базы, равной единице. При усложнении сигнала ее величина может меняться как в сторону увеличения, так и уменьшения. Зависимость величины этого изменения от значений различных параметров сигнала уже исследовалась авторами данной статьи [5, 6]. Теперь представляет интерес то, насколько велико влияние шумов приемника на точность получаемых оценок и, прежде всего, на смещение получаемых оценок.

### Теоретические расчеты.

Представляем входной сигнал в виде суммы трех составляющих

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_{\text{ш}}(t), \quad (2)$$

где  $s_1(t)$  – составляющая, созданная фоном;

$s_2(t)$  – составляющая, созданная зоной вертикального потока;

$s_{\text{ш}}(t)$  – шумовая составляющая.

Спектры первых двух согласно общепринятой практике аппроксимируем Гауссовыми функциями с различными значениями ширины  $\sigma_{\omega 1}$  и  $\sigma_{\omega 2}$ . Их средние частоты в рассматриваемом нами случае без потери общности исследования можно считать равными нулю. Шумовой спектр представим в виде равномерного распределения в интервале от  $-2\pi/T_{\text{П}}$  до  $2\pi/T_{\text{П}}$ . Тогда его ширина равна

$$\sigma_{\text{ши}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{3T_{\text{П}}^2}}. \quad (3)$$

В этих условиях ширина спектра суммарного сигнала определяется формулой

$$\sigma_\omega^2 = \frac{P_1 \sigma_{\omega 1}^2 + P_2 \sigma_{\omega 2}^2 + \frac{P_{\text{ш}} \pi^2}{3T_{\text{П}}^2}}{P_1 + P_2 + P_{\text{ш}}}. \quad (4)$$

Корреляционная функция принимаемых отражений равна сумме корреляционных составляющих

$$R(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau) + R_{\text{ш}}(\tau). \quad (5)$$

Ширина этой функции, которую будем называть интервалом корреляции, понимаемая как ее второй центральный момент, определяется формулой

$$\sigma_\tau^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 R(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) d\tau} = \frac{P_1 \sigma_{\tau 1}^3 + P_2 \sigma_{\tau 2}^3}{P_1 \sigma_{\tau 1} + P_2 \sigma_{\tau 2} + P_{\text{ш}} T_{\text{П}}} \quad (6)$$

Отсутствие здесь интервала корреляции шума объясняется тем, что при принятой форме спектра его отсчеты на расстоянии периода повторения зондирующих импульсов оказываются независимыми.

Представляет интерес сравнить то, как шум влияет на оценки двух параметров: используемой в настоящее время ширины спектра и предлагаемой базы. Формула (4) указывает на расширение спектра суммарного сигнала с увеличением мощности шума, что является общеизвестным фактом. Отношение величины базы к ширине спектра оказывается равной  $\sigma_t^2$ , величина которой, согласно формуле (6), с возрастанием шума уменьшается. Отсюда следует вывод – смещение оценки базы в меньшей степени, чем ширина спектра, подвержена влиянию шума.

### Результаты исследования.

Исследовалась зависимость величины базы сигнала от отношения шум/сигнал

$$\xi = \frac{P_{\text{ш}}}{P_1 + P_2} \quad (7)$$

при различных значениях отношения ширины спектра сигнала, отраженного от зоны вертикального потока, к ширине спектра фонового сигнала

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены полученные графики величины базы сигнала (сплошные линии) и отношения ширины спектра суммарного сигнала к ширине спектра отражений от области фона (пунктирные линии) для случая  $P_1 = P_2$  и величин  $\varepsilon = 1$ ,  $\varepsilon = 2$  и  $\varepsilon = 4$ .

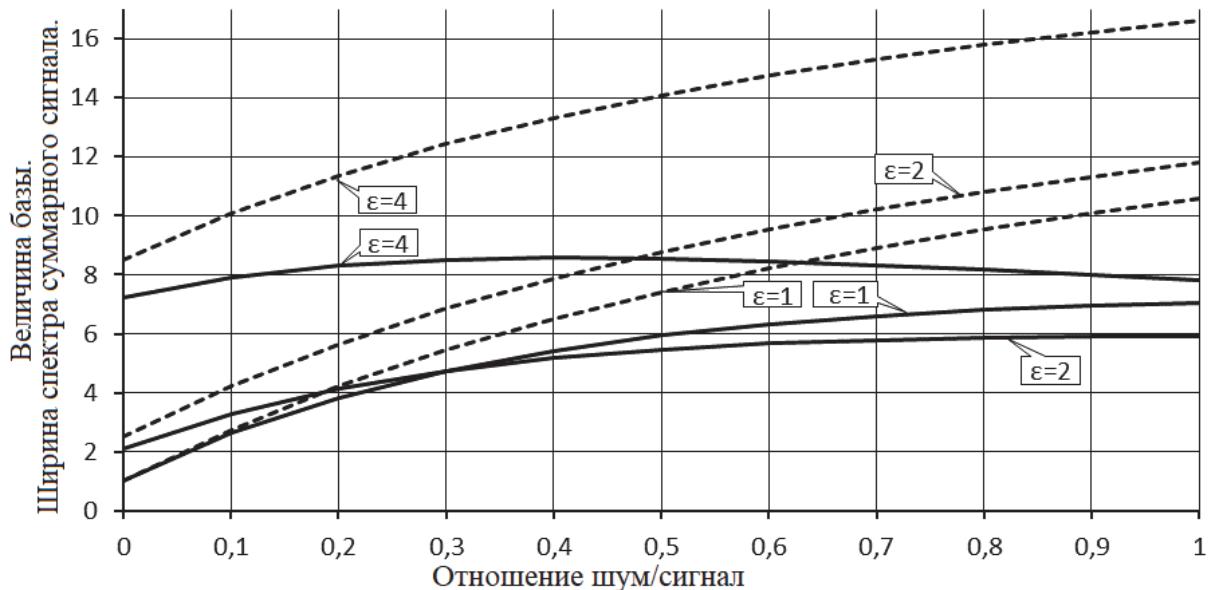


Рис. 1. Зависимость величины базы (сплошная линия) и ширины спектра суммарного сигнала (пунктирная линия) от отношения шум/сигнал

Из него следует, что при отсутствии зоны неоднородности (когда  $\sigma_{\omega 1} = \sigma_{\omega 2}$ ) оба рассматриваемых параметра увеличиваются с ростом уровня шума. При этом скорость увеличения базы примерно в 2 раза меньше, чем ширины спектра принимаемого сигнала. С появлением неоднородности рост базы замедляется и почти стабилизируется при  $\varepsilon = 4$ , тогда как градиент ширины спектра остается неизменным.

### Заключение

Проведенные исследования показывают, что вызванное шумом смещение оценок базы принимаемого сигнала значительно меньше, чем смещение оценок ширины спектра входного случайного процесса. Это дает основание рассматривать базу отражений от метеорологических

объектов как надежный параметр, позволяющий распознавать опасные явления погоды, связанные с вертикальным движением воздуха.

#### Список литературы

1. Зрнич Д., Довиак Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 512 с.
2. Денисенков, Д.А. Обнаружение вертикальных потоков воздуха радиолокационными методами / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – № S674. – С. 160–165. – EDN JPNXEQ.
3. Fujita T.T., McCarthy J. 1990: The application of weather radar to aviation meteorology / Radar in meteorology // D. Atlas (Ed.). – Boston: American Meteorological Society, 1990. – Р. 657–681. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-15-7\\_43](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-15-7_43).
4. Применение оценки ширины спектра радиолокационного сигнала для распознавания вертикальных воздушных потоков / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 12. – С. 110–116. – EDN KUONHVB.
5. Денисенков, Д.А. Спектральные параметры сигнала в метеорологической радиолокации / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 6. – С. 621–624. – <https://doi.org/10.31857/S0033849423060013>. – EDN XLMARR.
6. Денисенков, Д.А. Применение параметра «база сигнала» для радиолокационного распознавания опасных явлений / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – № 6. – С. 589–592. – <https://doi.org/10.31857/S0033849424060126>. – EDN IIPCBN.