

## **Об информативности метода парных импульсов в метеорологической радиолокации**

В.Ю.Жуков,<sup>1</sup> Г.Г.Щукин<sup>1,2</sup>

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

E-mail: vka@mil.ru

<sup>2</sup>Муромский институт (филиал) имени В.К. Зворыкина Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 602264, Владимирская обл., г. Муром, Орловская ул., 23.

E-mail: oid@mivglu.ru

*Рассмотрен вопрос применимости метода парных импульсов для случая наблюдения метеорологическим радиолокатором опасных явлений погоды, связанных с ветром: сдвиг ветра, смерч, вертикальный поток воздуха, шквал. На основе численного эксперимента показывается, что получаемые в этом случае оценки практически совпадают со значением ширины спектра принимаемого сигнала, что делает метод применимым в новом предлагаемом методе распознавания указанных опасных явлений, основанном на вычислении базы входного случайного процесса.*

*Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, распознавание опасных явлений погоды, ширина спектра отражений, метод парных импульсов.*

### **On the informativeness of the method of paired pulses in meteorological radar**

V.Y.Zhukov,<sup>1</sup>G.G.Shchukin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya Str., St.-Petersburg, 197198., Russia

<sup>2</sup>Vladimir State University named after A.G. and N.G. StoletovsMurom Institute, 23 Orlovskaya Str., Murom, 602264, Russia

*The question of applicability of the method of paired pulses for the case of observation by weather radar of dangerous weather phenomena associated with wind: wind shear, tornado, vertical air flow, squall is considered. On the basis of numerical experiment, it is shown that the estimates obtained in this case practically coincide with the value of the spectrum width of the received signal, which makes the method applicable in the new proposed method of recognition of the mentioned hazardous phenomena, based on the calculation of the input random process base.*

*Keywords: meteorological radar, recognition of dangerous weather phenomena, the width of the spectrum of reflections, the method of paired pulses.*

### **Введение**

Современный метеорологический радиолокатор оценивает шесть параметров принимаемого сигнала, что позволяет ему распознавать множество опасных явлений погоды (ОЯП) и тем способствовать минимизации наносимого ими ущерба. Среди упомянутых параметров два относятся к спектральным характеристикам, дающим принципиальную возможность распознавать ОЯП, связанные с ветром – сдвиг ветра, шквал, смерч, вертикальные восходящие и нисходящие потоки воздуха. При этом они обладают в данном случае исключительной «привилегией» - другие параметры здесь никак не задействованы. В лучшем случае они могут оценивать лишь возможность

появления ОЯП, как это имеет место, например, при распознавании шквала и смерча с помощью оценок мощности принимаемых отражений [1].

Несмотря на это, перечисленные выше феномены до сих пор остаются для метеорологических радиолокаторов чуть ли не самыми трудно распознаваемыми. Причины этого уже рассматривались авторами в ряде предыдущих публикаций [2]. Кратко они сводятся к тому, что характеристики данных технических средств «затачиваются» под решение наиболее важной для них задачи – распознавания явлений, связанных с конвективной облачностью (гроза и град). Следствием является то, что в местах, где своевременное предупреждение о связанных с ветром явлениях не менее важно, устанавливают еще один радиолокатор, специально предназначенный для решения рассматриваемой задачи. Прежде всего, это относится к аэропортам, вынужденным иметь в своем арсенале дополнительно к метеорологическому радиолокатору еще и радиопрофилемер – вещь немногим менее дорогую и сложную в эксплуатации.

Таким образом, имеет смысл искать новые пути обработки радиолокационной информации, которые позволили бы сэкономить на профиломерах, а все задачи решать с помощью одного технического средства.

### **Постановка задачи**

По мнению авторов перспективным в этом отношении является использование оценок ширины спектра – параметра, до последнего времени практически игнорируемого. В частности, на их основе был разработан метод распознавания и оценивания параметров вертикального сдвига ветра [3]. Характерной чертой данного явления, используемого в новом методе, является большая протяженность наблюдаемой неоднородности в горизонтальной плоскости. К сожалению, эта особенность присуща только ему одному. Остальные фигуранты приведенного выше списка таковым не обладают. Зато все они имеют одинаковую особенность – при их радиолокационном наблюдении создается ситуация, при которой в элемент разрешения радиолокатора попадают две массы воздуха, создающие отражения с различными характеристиками (отражаемостью, средней частотой и шириной спектра). Промежуточный слой между указанными массами обладает, как правило, гораздо меньшими размерами, что дает право пренебречь создаваемым им сигналом.

В результате принимаемый сигнал имеет сложную структуру, которая в радиотехнике характеризуется величиной базы – произведения длительности сигнала на ширину его спектра. По аналогии с ней было предложено оценивать величину базы отражений, понимаемую как произведение ширины энергетического спектра принимаемого случайного процесса, на его интервал корреляции. Теоретические исследования нового параметра показали его хорошую информативность [4]. Однако тут же возникает новая проблема – как оценивать указанные характеристики? Прямые методы, т.е. расчет в каждом разрешаемом объеме корреляционной функции и энергетического спектра отражений с дальнейшим взятием второго центрального момента каждой из полученных функций, требует задействования слишком большого количества ресурсов. Гораздо выгоднее применять упрощенные процедуры оценивания. Один из них давно известен в метеорологической радиолокации и называется «метод парных импульсов». В его основе лежит предположение о том, что спектр отраженного от метеорологического образования сигнала имеет Гауссову форму. Тогда его ширина рассчитывается по следующей формуле:

$$\tilde{\sigma}_{\omega} = \frac{\sqrt{-\ln(|\tilde{r}(\tau_{\Pi})|)}}{\tau_{\Pi}}, \quad (1)$$

где  $T_{\Pi}$  – период повторения зондирующих импульсов,  $|\tilde{r}|$  – модуль оценки нормированной корреляционной функции принимаемого сигнала.

Очевидно, что в методе используется характерная для Гауссова спектра обратная пропорциональная зависимость между шириной спектра и интервалом корреляции. Это позволяет оценивать значение корреляционной функции, а получать оценку спектральной характеристики.

В рассматриваемом же нами случае нахождения в одном импульсном объеме радиолокатора двух воздушных масс с разными параметрами ветра, спектр отражений оказывается суммой двух составляющих. И хотя каждая из них является Гауссовой, суммарный спектр уже не соответствует требованиям метода парных импульсов. В связи с этим возникает вопрос о том, как ведут себя оценки, получаемые этим методом, в условиях двухмодального спектра, и что мы вообще оцениваем в рассматриваемом случае.

### Результаты эксперимента

Очевидно, что решить поставленную задачу аналитическими методами не представляется возможным. Поэтому было применено численное моделирование. Входной процесс задавался в виде суммы двух составляющих, каждая из которых имела Гауссов спектр со своими значениями амплитуды  $A_i$ , средней частоты  $\omega_{0i}$  и ширины  $\sigma_{\omega i}$

$$S_i(\omega) = A_i \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_{0i})^2}{2\sigma_{\omega i}^2}\right). \quad (2)$$

Суммарный сигнал обрабатывался согласно рассматриваемой процедуре. Одновременно искомый параметр - ширина спектра – рассчитывался по полученной ранее формуле [5].

$$\sigma_{\omega} = \left(\frac{A_1}{A_1 + A_2} \sigma_{\omega 1}^2 + \frac{A_2}{A_1 + A_2} \sigma_{\omega 2}^2 + \frac{A_1 A_2}{(A_1 + A_2)^2} (\omega_{01} - \omega_{02})^2\right)^{0,5}. \quad (3)$$

Параметры сигналов задавались в интервалах, наиболее характерных для случаев наблюдения метеорологических целей отечественным радиолокатором ДМРЛ-С:

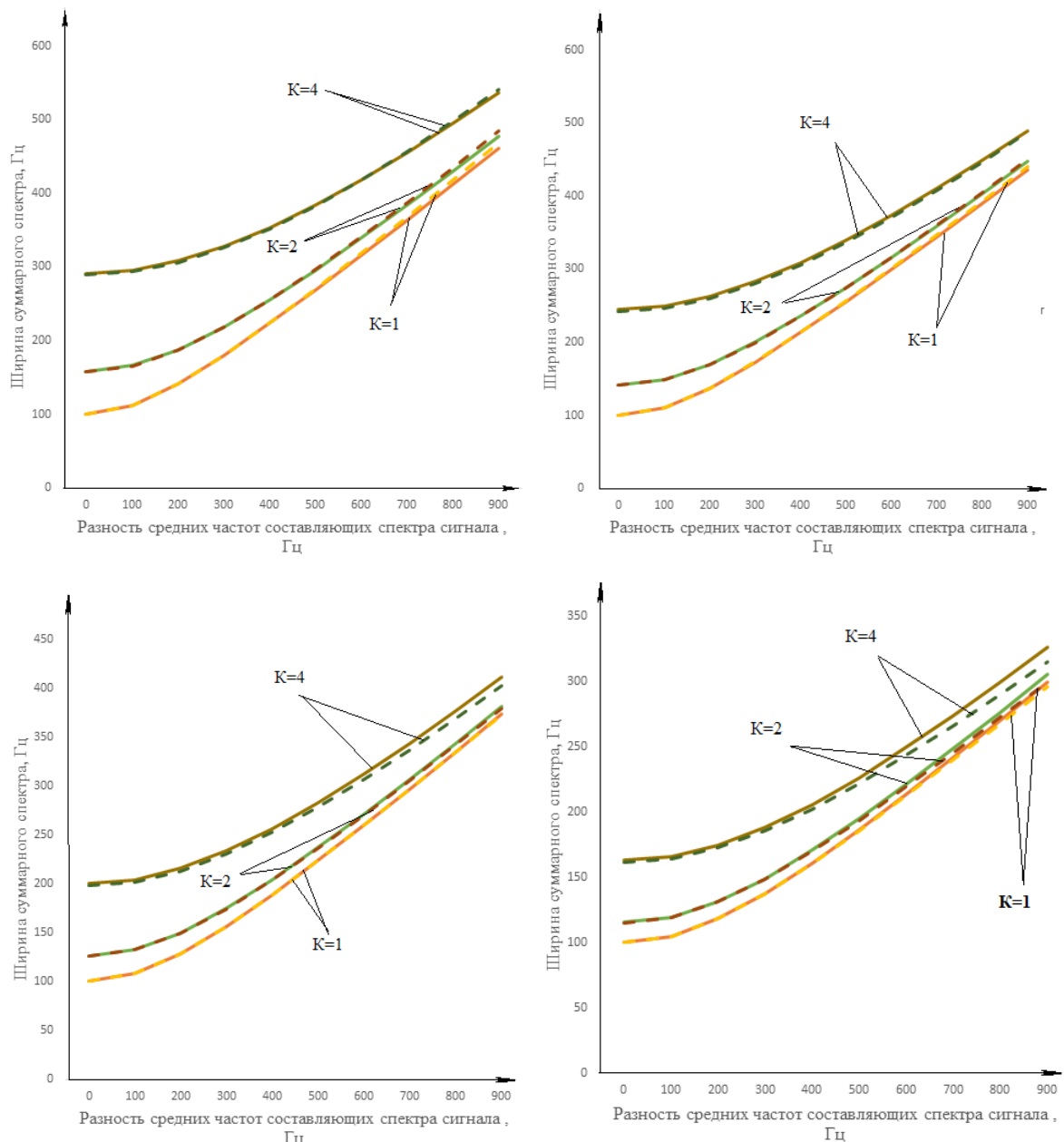
1. ширина спектра – от 80 до 328 Гц, что соответствует ширине спектра радиальных скоростей от 2 до 8 м/с. Первой составляющей сигнала задавалось значение 80 м/с, для второго оно умножалось на коэффициент (1, 2 или 4);

2. средняя частота спектра – от 0 до 1 кГц, что соответствует скоростям 0 – 25 м/с. Задавалась с шагом 100 Гц.

3. Различие в амплитудах выражалось отношением  $A_2/A_1$ , принимавшим значение 1, 2, 4 или 8.

Результаты расчетов приведены на рис.1.

Полученные данные показывают, что в заданных пределах изменения параметров принимаемых радиолокационных сигналов, оценки ширины его спектра, получаемые с помощью метода парных импульсов, практически совпадают с теоретическими расчетами.



**Рис. 1.-** Зависимость оценок ширины спектра сигнала от разности средних частот спектра его составляющих при различных отношениях ширин их спектра  $K$  и их мощностей ( $A_2/A_1 = 1$  (а),  $A_2/A_1 = 2$  (б),  $A_2/A_1 = 4$  (в),  $A_2/A_1 = 8$  (г)). Сплошная линия – результаты численного эксперимента, пунктирная – результаты расчетов по формуле (3).

### Выводы

Проведенное исследование показывает, что, несмотря на то, что в методе парных импульсов непосредственному измерению подлежат значения корреляционной функции случайного процесса, в результате его применения получают оценки ширины спектра этого процесса. Это означает, что в методе обнаружения неоднородностей поля ветра, основанного на вычислении базы принимаемого сигнала, по крайней мере один из требуемых параметров (ширина спектра) может вычисляться по упрощенной процедуре.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-19-00378), <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>*

## **Литература**

1. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993. – 360 С.
2. Девяткин А.М., Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г. Восстановление поля скорости воздушных потоков в метеорологической радиолокации // Метеорология и гидрология, 2018, №1, С.107-115.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Сивак О.А., Щукин Г.Г. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала. // Ученые записки РГГМУ, 2016, №42, с. 109-116.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Радиолокационный метод распознавания неоднородностей векторного поля скорости ветра // Метеорология и гидрология, 2021, № 6, С. 113 – 120.
5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического радиолокатора Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 109-118