

## Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01»

А.А.Бычков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13. e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru).  
Автономная некоммерческая организация «Агентство атмосферных технологий»  
123242, г. Москва, Нововаганьковский пер., д. 8.

*Исследуется случай наблюдения некогерентным метеорологическим радиолокатором двух отражающих слоев с разными спектрами скоростей составляющих их частиц. Моделируется прохождение получаемого при этом отраженного сигнала через линейный амплитудный детектор. Делается вывод о возможности применения ширины энергетического спектра выходного сигнала для обнаружения горизонтального и вертикального сдвигов ветра.*

*Examines the case of observing an incoherent meteorological radar two reflective layers with different spectra of velocity of particles. Simulated passage of the reflected signal through a linear amplitude detector. Conclusion of the width of the energy spectrum of the output signal to detect horizontal and vertical shifts of the wind.*

В 2010 году в ООО «Контур-НИИРС» по заказу АНО «Агентство атмосферных технологий» был разработан и изготовлен малогабаритный метеорологический радиолокатор «Контур МЕТЕО-01» для целей обеспечения и контроля активных воздействий в районах, где отсутствуют стационарные метеорадары. Главными его достоинствами являются малая масса и габариты, позволяющие оперативно доставлять прибор к месту работы. Главный недостаток – отсутствие когерентного режима работы.

За прошедшее с тех пор время была проведена опытная эксплуатация данного изделия, исследованы его возможности в выполнении возлагаемых на него задач [1,2]. Решения по данным работам были положительными. Однако большой интерес представляет исследование того, какими дополнительными возможностями обладает данный радиолокатор, позволяющими повысить эффективность его применения и расширить область возможного использования. В частности, и для обеспечения воздействий, и для обслуживания полетов авиации была бы полезна способность обнаружения таких опасных явлений как сдвиг ветра.

В когерентных радиолокаторах для указанных целей возможно использование как средней частоты энергетического спектра принятого сигнала, так и ширины последнего [3,4]. В отсутствие когерентности первый путь заказан. Зато известная формула для корреляционной функции сигнала после линейного детектирования [5]

$$R(t) \approx \frac{\pi\sigma^2}{2} R_0^2(t), \quad (1)$$

где  $R_0(\tau)$ - корреляционная функция низкочастотной части входного узкополосного случайного процесса,

$\sigma^2$  - дисперсия этого процесса, дает основание надеяться на информативность такого параметра, как ширина спектра процесса на выходе некогерентного радиолокатора.

Формула для определения величины последней имеет вид

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} R_0^2(t) dt}{\int_0^{\infty} t^2 R_0^2(t) dt}}. \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда в разрешаемый элемент радиолокатора попадают две метеоцели с разными значениями вектора скорости составляющих их частиц. Тогда исходная корреляционная функция равна сумме корреляционных функций каждой из составляющих суммарного сигнала. Полагая их гауссовыми, получаем

$$R_0(t) = P_1 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_1^2}\right) \cos(2\pi(F - F_1)t) + P_2 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_2^2}\right) \cos(2\pi(F - F_2)t), \quad (3)$$

где  $P_1, \tau_1, F_1, P_2, \tau_2, F_2$  - мощность, ширина корреляционной функции и доплеровский сдвиг частоты отражений первого и второго слоев соответственно,

$F$  - средняя частота суммарного сигнала, определяемая выражением

$$F = \frac{P_1}{P_1 + P_2} F_1 + \frac{P_2}{P_1 + P_2} F_2. \quad (4)$$

Подставляем (3) в (2) и вводим относительные параметры  $\varepsilon = P_1/P_2$ ,  $\eta = \tau_1/\tau_2$ ,  $\nu = \tau_1(F_1 - F_2)$ . Тогда формула для отношения ширины спектра выходного сигнала линейного детектора к ширине спектра отражения от первого слоя  $\sigma_1$  приобретает вид

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5}, \quad (5)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{1 + \frac{1}{\eta}}{4}, A_2 = \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{(\varepsilon + 1)^2}\right), A_3 = \frac{1}{4\eta} \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{\eta^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right)^2}\right),$$

$$A_4 = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{\eta^2 + 1}} \left[ \exp\left(-\frac{2\pi^2 (\varepsilon - 1)^2 \nu^2}{(\varepsilon + 1)^2 (\eta^2 + 1)}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi^2 \nu^2}{(\eta^2 + 1)}\right) \right],$$

$$B_1 = \frac{1 + \frac{1}{\eta^3}}{8}, B_2 = 0,125 \left[ 1 - \frac{8\pi^2 \nu^2}{(1 + \varepsilon)^2} \right] \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{(\varepsilon + 1)^2}\right),$$

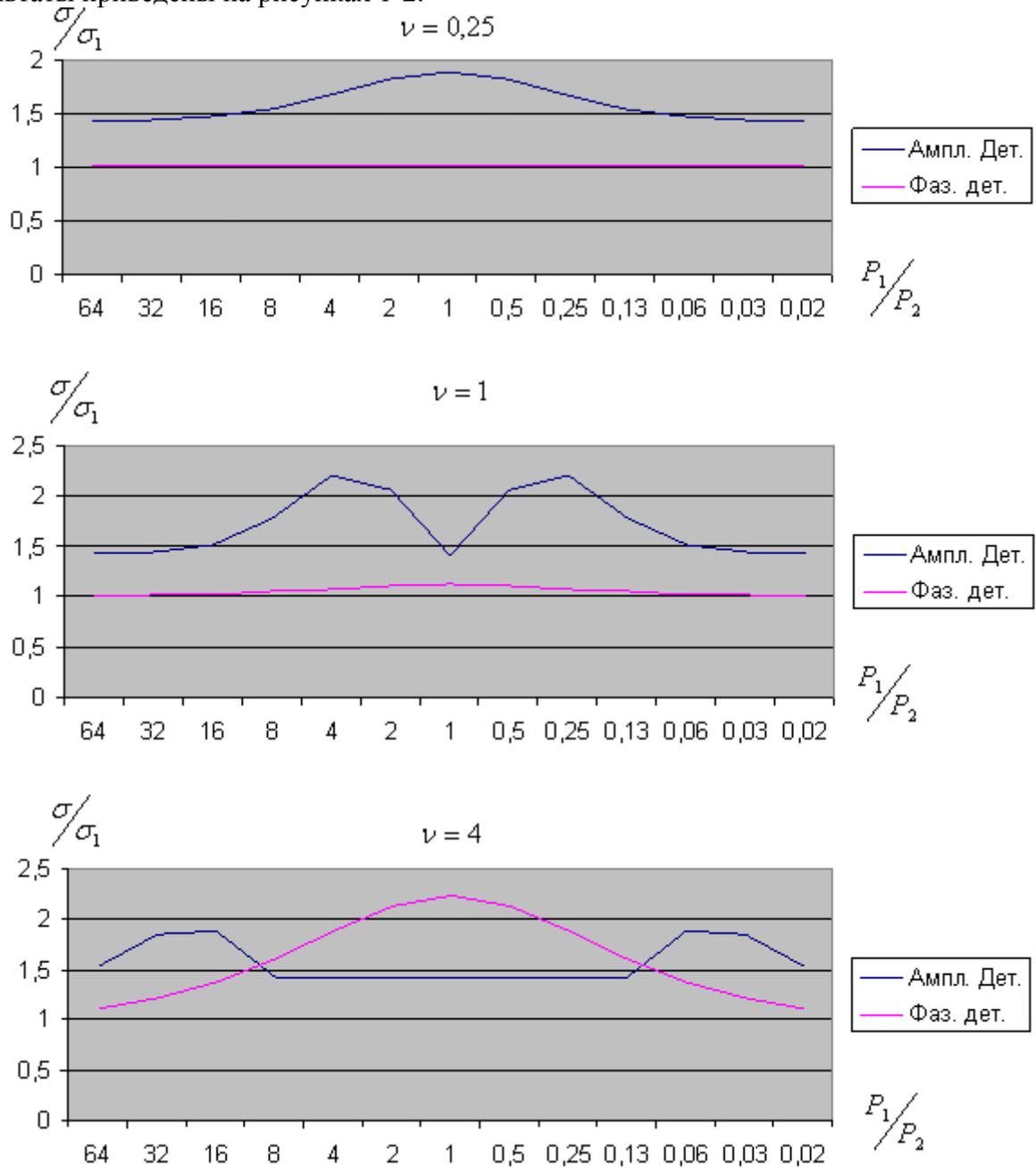
$$B_3 = \frac{1}{8\eta^3} \left[ 1 - \frac{8\pi^2 \nu^2}{\eta^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right)^2} \right] \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{\eta^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right)^2}\right),$$

$$B_4 = 0,25 \left[ \left(\frac{2}{\eta^2 + 1}\right)^{3/2} - \left(\frac{2}{\eta^2 + 1}\right)^{5/2} \frac{2\pi^2 (\varepsilon - 1)^2}{(\varepsilon + 1)^2} \right] \exp\left(-\frac{2\pi^2 (\varepsilon - 1)^2 \nu^2}{(\varepsilon + 1)^2 (\eta^2 + 1)}\right),$$

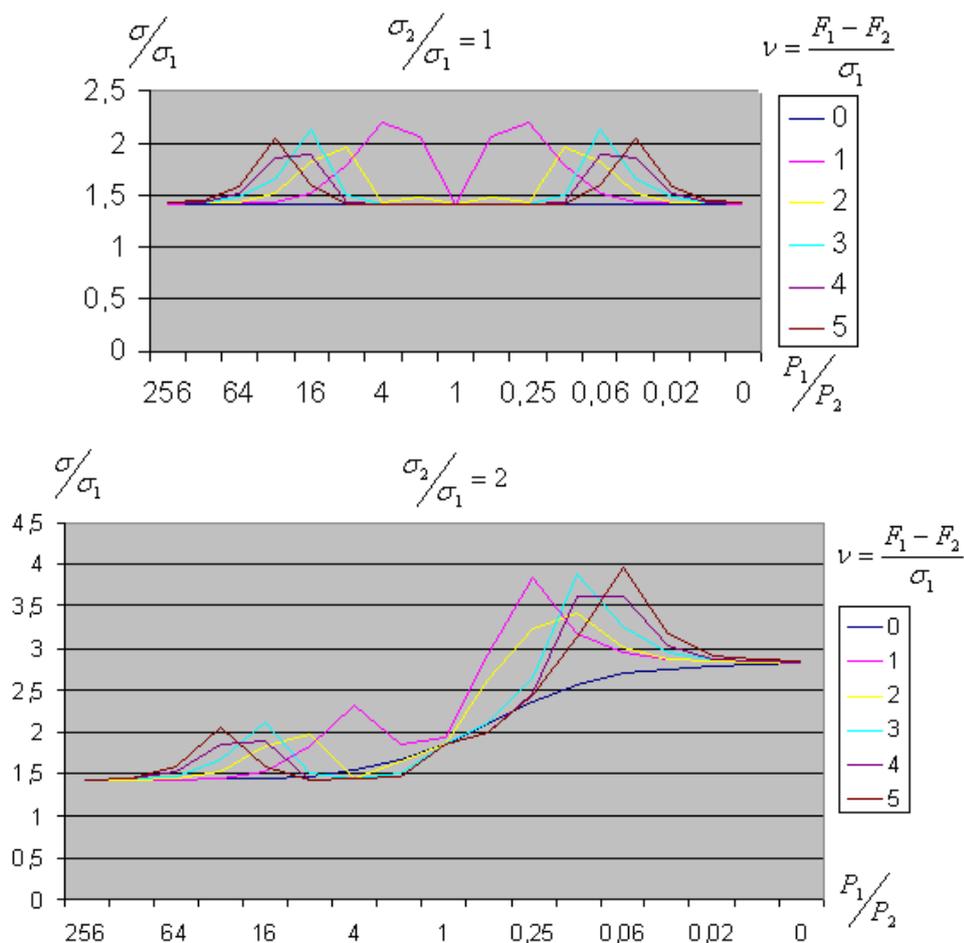
$$B_5 = 0,25 \left[ \left(\frac{2}{\eta^2 + 1}\right)^{3/2} - \left(\frac{2}{\eta^2 + 1}\right)^{5/2} 2\pi^2 \nu^2 \right] \exp\left(-\frac{2\pi^2 \nu^2}{\eta^2 + 1}\right).$$

Была исследована зависимость данного отношения от соотношения мощностей  $P_1/P_2$  при различных значениях параметров  $\eta$  и  $\nu$ . При этом сравнивалась реакции линейного

амплитудного и фазового детекторов на один и тот же входной сигнал. Некоторые результаты приведены на рисунках 1-2.



**Рис.1.** Зависимость ширины спектра сигнала на выходе амплитудного и фазового детекторов от отношения мощностей отражений от различных слоев при  $\sigma_1 = \sigma_2$  и различных значениях разности доплеровских сдвигов частоты этих отражений.



**Рис.2. Зависимость ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора от отношения мощностей отражений от различных слоев при различных значениях разности доплеровских сдвигов частот этих отражений и соотношениях  $\sigma_2/\sigma_1$ .**

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что сигнал на выходе линейного амплитудного детектора очень чутко реагирует на наличие разницы средних частот спектров сигналов от различных отражающих слоев в случае их одновременного попадания в разрешаемый объем радиолокатора. При этом его реакция в виде расширения спектра при малых значениях указанной разницы значительно превосходит ту, что можно наблюдать на выходе фазового детектора. При увеличении разности средних частот сигналов реакция фазового детектора начинает преобладать, а у амплитудного она смещается в область малых соотношений мощностей рассматриваемых сигналов, тем самым как бы «окантовывая» границы области со сдвигом ветра.

Следовательно, метеорологический радиолокатор «Контур МЕТЕО-01» обладает способностью обнаруживать неоднородности пространственного распределения ветра и может служить индикатором данного опасного явления в случае его использования для обслуживания полетов авиации. Подобная информация будет полезна и при обеспечении активных воздействий для обнаружения вертикальных потоков в облаке, что позволит, например, более эффективно применять реагенты.

### Литература

1. Жуков В.Ю., Клейменова А.В. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Результаты опытной эксплуатации малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01». Сборник трудов 2-й Всероссийской конференции «Проблемы военно-

- прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», т.1, Санкт-Петербург, 2012 г., с.387-393.
2. Бычков А.А., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г., Жуков В.Ю. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» в работах по активному воздействию на облака. Известия ВУЗов, Северокавказский регион, Естественные науки, 2014, №4, с. 62-65
  3. В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин. Обоснование метода оценивания доплеровского сдвига частоты эхо-сигнала метеообразований при негауссовой форме их спектра. 3-и Всероссийские Армандовские чтения, 2013 г., Муром.
  4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Исследование возможности применения метеорологических радиолокаторов для обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы. XIV Санкт-петербургская международная конференция «Региональная информатика «РИ-214». Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2014.
  5. Б.Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. М. Сов. радио, 1969 г., 752 стр.