

База принимаемого радиолокационного сигнала как критерий наблюдения неоднородности поля ветра.

В. Ю. Жуков, Д. А. Денисенков, Г. Г. Щукин

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13,
E-mail: dimasden@yandex.ru*

Анализируется применимость когерентного режима метеорологического радиолокатора к задачам распознавания опасных явлений погоды, связанными с неоднородностью поля ветра. Выявляются проблемы, сдерживающие использование результатов обнаружения указанных явлений службами метеообеспечения аэропортов. Рассматриваются особенности применения для указанных целей оценок ширины спектра принимаемых отражений. Описываются перспективы использования оценок базы сигнала для радиолокационного обнаружения микропорывов и смерчей.

The applicability of the coherent mode of the meteorological radar to the tasks of recognizing weather hazards associated with inhomogeneity of the wind field is analyzed. Problems deterring the application of the results of detection of these phenomena by aviation weather services are revealed. Peculiarities of the application of the spectrum width estimates of the received reflections for the specified purposes are considered. The prospects of using the estimates of the bandwidth-duration product for radar detection of microbursts and tornados are described.

Введение

Более 30 лет назад была развернута первая сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов. Практическая ценность этого действительно большого шага в техническом развитии метеослужбы теперь общепризнана. Когерентный режим дает возможность измерять радиальную скорость частиц, восстанавливать вертикальный профиль ветра, обнаруживать зоны шквала, сдвига ветра и смерчи, т.е. существенно расширить список опасных явлений погоды, распознаваемых радиолокационными способами. Казалось бы, эти дополнительные возможности должны существенно облегчить работу тех, кто занимается метеорологическим обслуживанием аэропортов и космодромов. Однако опыт авторов статьи показывает, что эта информация не находит широкого использования среди указанных специалистов. Это заставляет более внимательно рассмотреть сложившуюся ситуацию.

Анализ применимости когерентного режима к задачам распознавания опасных явлений погоды

Рассмотрим проблемы, возникающие при наблюдении каждого из перечисленных явлений в отдельности.

Вертикальный профиль ветра интересен в двух аспектах – сам по себе и как исходный материал для обнаружения сдвига ветра. Сдвиг будет рассмотрен чуть ниже, а сейчас сосредоточимся на профиле как таковом. Распределение скорости и направления воздушных потоков по высоте необходимо при метеообеспечении полетов авиации. Но наибольший интерес при этом представляют скорости воздуха либо на высотах полета воздушных судов, либо у самой взлетной полосы, когда они нужны для обеспечения безопасного взлета и посадки. Поскольку радиолокатору для нормальной работы необходимо наличие в воздухе элементарных отражающих частиц (гидрометеоров, как правило), то для получения интересующей информации на указанной высоте, равной сейчас примерно 10 км, он оказывается бесполезен.

Присутствие здесь отражателей возможно только в случае образования мощных кучево-дождевых облаков, что подразумевает большой разброс скоростей частиц вследствие сильно развитой турбулентности и локальности зоны формирования отражений. И то и другое существенно затрудняет применение известных методов восстановления вектора скорости воздуха на выбранной высоте типа VAD, UVT, VPP [1, 2] и другие [3]. Гораздо эффективнее здесь использование данных аэрологических наблюдений. Очевидно, что не так обстоит дело при решении задач, например, военной авиации для планирования высадки десанта и тому подобных проблем. Но это специфические задачи, требующие, очевидно, специальных режимов работы рассматриваемой техники [4], либо применения специальной аппаратуры.

У земли же в районе взлетно-посадочной полосы в отсутствии сдвигов ветра, параметры ветра хорошо измеряют наземные анемометры. Их информация гораздо точнее и дешевле радиолокационной.

Обнаружение шквала было возможно и в некогерентных радиолокаторах [5]. Использовались косвенные параметры и, в основном, все сводилось к вероятностной оценке того, насколько облако способно сформировать шквал. Когерентность позволяет радиолокатору обнаруживать данное явление непосредственно по оценкам радиальной скорости частиц, но их движение совсем не обязательно направлено на радиолокатор или от него. Это приводит к тому, что реальную скорость измерить невозможно, а в случае, если она направлена по тангенциальной составляющей, невозможно и обнаружить. Таким образом, радикальное решение проблемы или ее значительный прогресс в этом направлении, не достигается.

Сдвиг ветра интересует аэропорты на высотах до 500 м [6] и космодромы на высотах до нескольких десятков километров [7]. В обоих случаях оценивание радиолокатором средней радиальной скорости частиц оказывается бесполезным. На космодроме потому, что для работы на таких высотах нужны волны дециметрового и метрового диапазонов [8], а в аэропортах из-за несоответствия параметров метеорологического радиолокатора требованиям, предъявляемым к измерителю сдвига ветра. Рассмотрим последний тезис подробнее. Величина сдвига измеряется в м/с на 30 м (100 футов) высоты. Следовательно, вертикальный размер антенного луча не должен превышать 30 м, иначе оценки скорости ветра будут сглажены и велика вероятность пропуска опасного явления. При общепринятой ширине луча антенны метеорологических радиолокаторов 1 градус предъявленное требование выполняется до дальности 1,8 км. Но примерно на этой же дальности только начинается дальняя зона Френеля, где диаграмму направленности можно считать сформированной. Определяя границу этой зоны по формуле

$$l_{\text{гр}} = \frac{4D^2}{\lambda} \quad (1)$$

где D – диаметр антенны;

λ – длина несущего колебания,

находим, что, например, для российского ДМРЛ-С $l_{\text{гр}}=1,62$ км. Следовательно, измерения возможны только в одном дискрете дальности, которым надо последовательно сканировать все высоты интересующего интервала (500 м) с шагом 30 м. Ясно, что на эти операции уйдет настолько много времени, что на выполнение основной функции – каждые 10 минут обновлять информацию о сложившейся в зоне обзора метеобстановке – его просто не останется. Недаром и в аэропортах и на космодромах для измерения профиля ветра используют специальные приборы – профайлеры.

Смерч был и остается наиболее неуловимым для радиолокатора явлением. Введение когерентности открывает в этом плане новые возможности – хорошим предиктором для него считается резкое различие средних радиальных скоростей частиц в соседних или рядом расположенных элементах разрешения [9], являющееся следствием кругового вращения воздуха в рассматриваемом пространстве. Однако для получения указанного эффекта требуется, чтобы горизонтальный размер разрешаемого объема радиолокатора был как минимум в два раза меньше диаметра смерча. Поскольку последний может составлять всего несколько сот метров, дальность такого обнаружения оказывается сильно ограниченной.

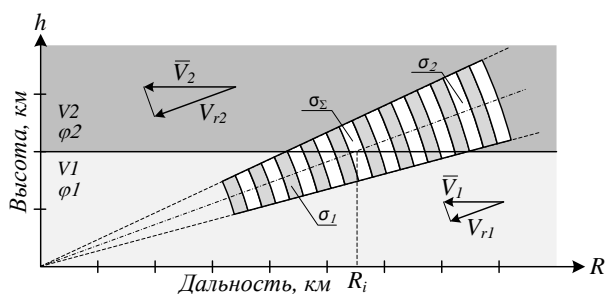
Подведем итог. Введение когерентного режима в метеорологических радиолокаторах позволило получать новую информацию о скоростях частиц в облачных образованиях и осадках. В ряде случаев она может быть очень полезной, но в выполнении радиолокатором практических задач по обслуживанию аэродромов и космодромов вклад ее оказывается минимальным. При этом следует признать, что основной задачей радиолокатора в этой области применения является не определение скорости и направления ветра, а обнаружение различного рода неоднородностей пространственного распределения данных параметров – сдвига, шквала и смерча. С точки зрения радиолокатора это абсолютно однородные явления, отличающиеся только ориентацией и размерами соответствующей им неоднородности.

В результате актуальным становится поиск новых методов обработки получаемой доплеровским радиолокатором информации, способных увеличить эффективность работы данного вида техники. По мнению авторов, его следует вести в направлении использования оценок ширины спектра – спектрального параметра, до сей поры практически не используемого для обнаружения опасных явлений.

Применение оценок ширины спектра для распознавания неоднородностей поля ветра

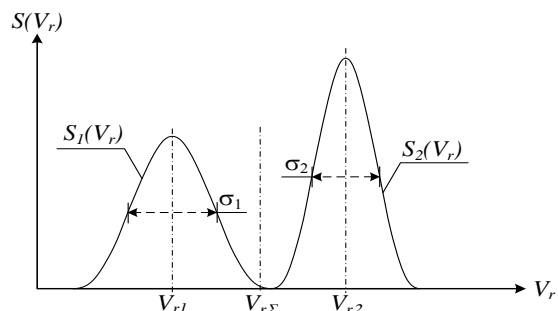
В предыдущих публикациях авторами уже излагался метод распознавания опасного сдвига ветра по оценкам ширины спектра сигнала [10, 11]. В его основе лежит понятие аномально широкого спектра, возникающего при одновременном наблюдении радиолокатором двух масс воздуха, между которыми находится непосредственно неоднородность поля ветра как это имеет место, например, в случае вертикального сдвига ветра, представленного на рис. 1.

Поскольку величина и направление вектора скорости частиц в каждой из данных масс различно, на большей части значений азимута антенны (за исключением двух малых участков, на которых радиальные составляющие этих частиц оказываются равными) энергетический спектр принимаемого сигнала становится двухмодальным (рис. 2).



V_1, V_2 – скорости ветра в первом и во втором слое, φ_1, φ_2 – направления ветра в первом и во втором слое, V_{r1}, V_{r2} – среднее значение радиальной скорости частиц в первом и во втором слое.

Рис. 1. Схема наблюдения радиолокатором вертикального сдвига ветра.



σ_1, σ_2 – ширина спектра отражений от первого и от второго слоев.

Рис. 2. Двухмодальный спектр радиальных скоростей частиц, соответствующий отражению, формируемому на дальности R_i на рис. 1.

Значение ширины такого спектра зависит от разности средних доплеровских частот отражений, сформированных каждой из масс, и от отношения мощностей этих отражений. На том расстоянии, где данные мощности выравниваются, средняя частота спектра оказывается расположенной примерно посередине между максимумами, и его ширина становится аномально большой, т.е. такой величины, какой она не может достигнуть при существующем в разрешаемом объеме перепаде радиальных скоростей, будь они распределены равномерно. В результате на карте конического разреза появляются характерные зоны аномально широких спектров вроде таких, какие представлены на рис. 3.

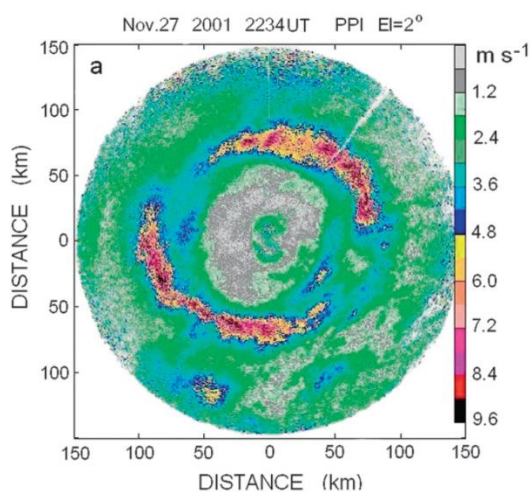


Рис. 3. Пример карты ширины спектра радиальных скоростей частиц, конический разрез.

По значениям ширины спектра в этих зонах и по некоторым особенностям их расположения в пространстве может быть восстановлена величина сдвига ветра, его характер (сдвиг по величине, по направлению или и то и другое) и высота расположения.

Главная особенность метода заключается в том, что он не предъявляет каких-либо жестких требований к ширине луча антенны, т.е. не боится сглаживания данных, которое имеет место при восстановлении профиля ветра. Информация о поведении ветра на различных высотах как бы «перемещается» в спектральную область и становится мало чувствительна к характеристикам радиолокатора.

Аналогичный прием может быть применен и для распознавания вертикального воздушного потока [12]. Но механически применить описанный выше метод к данному случаю невозможно. Главная причина этого – малое различие между средними доплеровскими сдвигами сигналов, отраженных от потока и от окружающего его пространства. Это вызвано тем, что наблюдение данного опасного явления происходит, как правило, под малыми углами места антенны. Для преодоления этого препятствия авторами было предложено анализировать ширину спектра не самого сигнала, а его огибающей, выделяемой, как известно, на выходе амплитудного детектора. В указанной работе определялась не ширина спектра, а обратная ему величина интервала корреляции функции исследуемого случайного процесса.

Показателем того, что в луч антенны попал вертикальный поток предложено считать появление элементов разрешения, в которых происходит уменьшение интервала корреляции (или расширение спектра) сигнала на выходе амплитудного детектора при неизменности или гораздо меньшем изменении ширины спектра исходного сигнала, т.е. сигнала на выходе фазового детектора. Фактически ищется произведение двух величин, первое из которых – ширина спектра, а вторая – длительность корреляционной функции. Это приводит к появлению аналогии с тем, что в радиотехнике называется базой сигнала. Рассмотрим этот тезис более подробно.

Применение понятия базы к отражениям от метеобъекта

В связи с радиолокацией база определяется как произведение длительности импульса на ширину его спектра. Если импульс простой, т.е. его высокочастотное заполнение – обычная синусоида, она близка к единице. Этому требованию отвечают, например, длительность прямоугольного импульса и ширина его спектра в Гц на уровне 0,5. В точности единице равно произведение среднеквадратических отклонений корреляционной функции и спектра (в рад./сек) импульса Гауссовой формы.

Если же в несущее колебание импульса вводятся какие-нибудь изменения частоты или фазы, ширина его спектра увеличивается и соответственно увеличивается значение базы. Импульс в этом случае называют сложным или широкополосным. Наиболее распространенные изменения несущей – линейная частотная модуляция частоты и фазовая кодовая модуляция.

Вернемся к отражениям от метеообразований, точнее тех из них, которые содержат в себе неоднородности векторного поля ветра. Принимаемый при этом сигнал является суммой двух отражений, сформированных каждой из попавших в разрешаемый объем воздушных масс. Отражения эти имеют различные доплеровские сдвиги частоты и различные значения ширины спектра. По сути, формируется сложный сигнал, аналогичный тому, что в радиотехнике называют многочастотным. Существенное отличие первого от второго состоит в том, что у него нет строго определенной длительности, ибо он представляет собой последовательность отсчетов с периодом следования зондирующих импульсов радиолокатора. Поэтому надо найти аналог данному параметру. Длительность пачки импульсов не годится, т.к. она никоим образом не связана с шириной спектра принимаемого отражения. Наиболее подходящим претендентом на эту роль видится уже упоминавшийся интервал корреляции сигнала на выходе амплитудного детектора, который, как было установлено в предыдущих исследованиях авторов [12], реагирует на усложнение сигнала независимо от поведения спектра последнего. Для подтверждения сделанного предположения найдем математические выражения для каждого из участвующих в формировании базы параметров в предположении, что нормированная корреляционная функция сигнала, отраженного «спокойной» воздушной массой, не содержащей неоднородностей ветра, имеет Гауссову форму, т.е.

$$r(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma_\tau^2} + j\omega_0\tau\right) \quad (2)$$

где σ_τ – интервал корреляции;
 ω_0 – среднее доплеровское отклонение частоты.

Ширина энергетического спектра сигнала, включающего две составляющих, при сделанных предположениях определяется формулой [13]

$$\sigma_{\omega\Sigma} = \left[\frac{I}{I+\varepsilon} \left(\frac{I}{\sigma_{\tau 1}} \right)^2 + \frac{I}{I+\varepsilon} \left(\frac{I}{\sigma_{\tau 2}} \right)^2 + \frac{\varepsilon}{(I+\varepsilon)^2} (\omega_{01} - \omega_{02})^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

где $\varepsilon = P_2/P_1$ – отношение мощностей составляющих;
 $\sigma_{\tau 1}$ и $\sigma_{\tau 2}$ – интервал корреляции каждой из составляющих, определяемый как среднеквадратическое отклонение корреляционной функции;
 ω_{01} и ω_{02} – среднее доплеровское отклонение частоты составляющих.

Для нахождения второго сомножителя, требуемого для вычисления базы (интервала корреляции) сигнала на выходе амплитудного детектора воспользуемся определением корреляционной функции процесса, получаемого на выходе амплитудного детектора после прохождения через него нормального случайного процесса с корреляционной функцией $R(\tau)$ [13]. В случае линейного детектора она равна

$$R_{\text{вых}}(\tau) = \frac{\pi}{4(4-\pi)} \left[R_0^2(\tau) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{[(2n-3)!!]^2}{2^{2n-1}(n!)^2} R_0^{2n}(\tau) \right], \quad (4)$$

где

$$R_0(\tau) = \sqrt{[\text{Re}(R_0(\tau))]^2 + [\text{Im}(R_0(\tau))]^2} \quad (5)$$

в случае квадратичного детектирования

$$R_{\text{вых}}(\tau) = R_0^2(\tau), \quad (6)$$

Очевидно, что принципиальной разницы в расчетах в обоих случаях не наблюдается. Для определенности будем далее считать, что детектирование квадратичное.

В интересующем нас случае, когда суммарный сигнал состоит из двух процессов с корреляционными функциями $R_1(\tau)$ и $R_2(\tau)$

$$R_{\text{вых}}(\tau) = \frac{I}{(I+\varepsilon)^2} \left[(\text{Re}(r_1(\tau)) + \text{Re}(r_2(\tau)))^2 + (\text{Im}(r_1(\tau)) + \text{Im}(r_2(\tau)))^2 \right], \quad (7)$$

где $r_i(\tau) = \frac{R_i(\tau)}{P_i}$ – нормированная корреляционная функция i -го случайного процесса.

После подстановки (2) в (7) и несложных преобразований получаем

$$r_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \frac{I}{(I + \varepsilon)^2} \left[\exp\left(-\frac{\tau^2}{\sigma_{\tau 1}^2}\right) + \varepsilon^2 \exp\left(-\frac{\tau^2}{\sigma_{\tau 2}^2}\right) + 2\varepsilon \exp\left(-\frac{\sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\tau 2}^2}{2\sigma_{\tau 1}^2 \sigma_{\tau 2}^2} \tau^2\right) \cos((\omega_{01} - \omega_{02})\tau) \right], \quad (8)$$

Интервал корреляции процесса на выходе амплитудного детектора ищем в соответствии с формулой

$$\sigma_{\text{ТВЫХ}}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 r_{\text{ВЫХ}}(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} r_{\text{ВЫХ}}(\tau) d\tau}, \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9) находим выражение для искомого параметра

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ТВЫХ}}^2 = 0,5 \frac{\sigma_{\tau 1}^3 + \varepsilon^2 \sigma_{\tau 2}^3 + 2\varepsilon \left(I - (\Delta\omega)^2 \sigma_{\tau 1}^2 \sigma_{\tau 2}^2 \right)}{\sigma_{\tau 1} + \varepsilon \sigma_{\tau 2} + 2\sqrt{2\varepsilon} \frac{\sigma_{\tau 1} \sigma_{\tau 2}}{\sqrt{\sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\tau 2}^2}} \exp\left(-\frac{(\Delta\omega)^2 \sigma_{\tau 1}^2 \sigma_{\tau 2}^2}{2(\sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\tau 2}^2)}\right)} \times \\ \times \left(\frac{2\sigma_{\tau 1}^2 \sigma_{\tau 2}^2}{\sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\tau 2}^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{(\Delta\omega)^2 \sigma_{\tau 1}^2 \sigma_{\tau 2}^2}{2(\sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\tau 2}^2)}\right), \quad (10) \end{aligned}$$

где $\Delta\omega = \omega_{01} - \omega_{02}$.

Исследуем поведение базы сигнала для различных соотношений параметров составляющих суммарного сигнала. При этом учтем, что на практике, как правило, непосредственному оцениванию подлежат не сами интервал корреляции и ширина спектра, а их квадраты. Поэтому и исследовать будем не саму базу, а ее вторую степень

$$B^2 = \sigma_{\text{ТВЫХ}}^2 \sigma_{\omega\Sigma}, \quad (11)$$

и относительную величину

$$\mu(\eta, \Delta\omega, \varepsilon) = \frac{B^2(\eta, \Delta\omega, \varepsilon)}{B^2(1,0,1)}, \quad (12)$$

где $\eta = \sigma_{\tau 2} / \sigma_{\tau 1}$.

Прежде всего, находим значение базы в отсутствии неоднородностей поля ветра, когда мощность и ширина спектра составляющих равны, а средние доплеровские сдвиги совпадают, т.е. $B^2(1,0,1)$. Как и следовало ожидать, оно равно 0,5, ибо суммарный сигнал в этом случае есть просто результат возведения в квадрат корреляционной функции исходного процесса. Далее рассматриваем наиболее интересный для решения поставленной задачи случай равенства средних доплеровских сдвигов, но различных значений интервала корреляции. На рис. 4 приведены графики зависимости относительной базы μ от отношения мощностей составляющих сигнала в поставленных условиях.

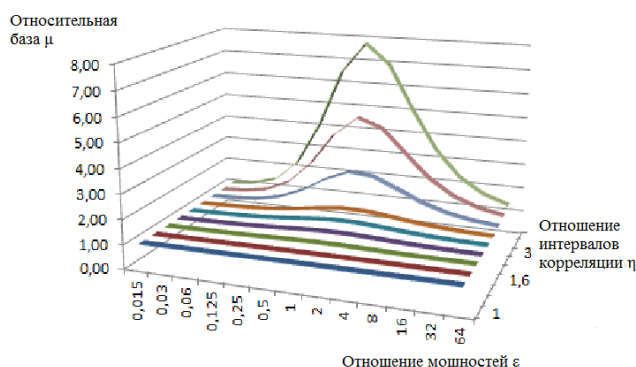


Рис. 4. Зависимость относительной базы принимаемого сигнала от отношения мощностей его составляющих при различных значениях отношения их интервалов корреляции

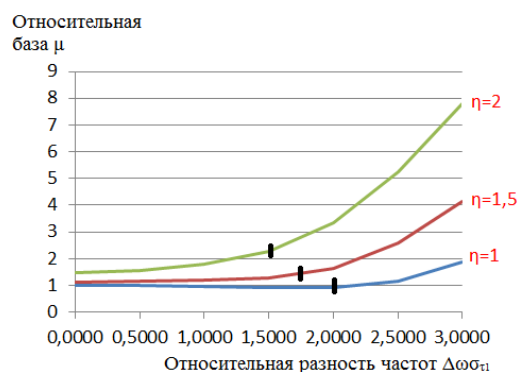


Рис. 5 Зависимость относительной базы сигнала от относительной частоты $\Delta\omega\sigma_{т1}$ при равенстве мощностей составляющих и при значениях $\eta=1$; $\eta=1,5$; $\eta=2$

Из него следует, что база сигнала реагирует на разность интервалов корреляции его составляющих даже при полном совпадении их средних доплеровских сдвигов частоты. При ее значении 60% база достигает величины 1,2, при 100% – 1,5. Это для случая равенства мощностей P_1 и P_2 . При изменении соотношения последних в 4 раза снижение величины базы не превышает 10%, т.е. эффект оказывается достаточно устойчивым к этому параметру.

Если же кроме различия в величине интервалов корреляции существует разность доплеровских сдвигов частоты, реакция базы становится еще более интенсивной. Рис. 5 демонстрирует ее зависимость от относительного значения $\Delta\omega\sigma_{т1}$ при различных значениях отношения интервалов корреляции η .

Вертикальными штрихами на графиках отмечены значения разности частот, соответствующих сумме ширин спектра составляющих, т.е. точки, определяющие момент разрешения двух спектров. Видно, что уже при отношении интервалов корреляции 1,5 реакция базы на сдвиг спектров по частотной оси начинается гораздо раньше достижения момента, когда они могут быть разрешены, и достигает на границы значения 1,5. С увеличением η кривая крутизна функции увеличивается.

Выводы

Из приведенных результатов исследования следует, что возможности такого параметра принимаемых метеорологическим радиолокатором отражений как ширина спектра сигнала (или ширина спектра радиальных скоростей наблюдаемых частиц) далеко не исчерпаны и могут с успехом применяться в задачах обнаружения опасных явлений, связанных с ветром. Особого эффекта в этом плане следует ожидать от применения оценок базы сигнала, понимаемой как произведение ширины его энергетического спектра на интервал корреляции процесса, получаемого после прохождения им амплитудного детектора. Способность данного нового параметра реагировать на появление в луче антенны двух масс воздуха, дающих отражения с одинаковым доплеровским сдвигом частоты и различающихся только шириной спектра, делает очень перспективным его применение для радиолокационного обнаружения микропорывов и смерчей.

Литература

1. Довиак, Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Довиак Р., Зрнич Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 С.

2. Мельник Ю.А., Мельников В.М., Рыжков А.В. Возможности использования одиночного доплеровского радиолокатора в метеорологических целях (обзор) // Труды Ордена Трудового Красного Знамени Главной Геофизической Обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – Вып. 538. – С. 8–18.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – том 59, № 12-2. – С. 16–20.
4. Борисов А.А., Маков А.Б., Чернышев С.В. Способ восстановления поля ветра по данным измерений доплеровского метеорологического радиолокатора // Вестник РосНОУ, 2016. – № 1-2. – С. 41–45.
5. 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.
6. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах. Руководящий документ РД. Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 258 С.
7. Золотухина О.И., Горбатенко В.П., Вареник П.А. Характеристики ветра в свободной атмосфере над территорией космодрома "БАЙКОНУР" // Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2015. – № 578. – С. 174–191.
8. Стерлядкин В.В., Горелик А.Г., Щукин Г.Г. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: III Всероссийские Армандовские чтения: молодежная школа. – Муром: ВлГМУ, 2013. – С. 24–42.
9. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Наблюдение мезоциклона многопараметрическим метеорологическим радиолокатором // Гидрометеорология и экология. Ученые записки РГГМУ. – 2020. – № 58. – С. 9–19. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-9-19
10. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. О возможности измерения сдвига ветра по направлению в доплеровском метеорологическом радиолокаторе // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2018. – № 662. – С. 124–128.
11. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. – 2019. – №11. – С. 109–118.
12. Бычков А.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром: ВлГМУ, 2015. С. 134-139.
13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М., Радио и связь, 1989, 656 с.