

Обоснование метода оценивания доплеровского сдвига частоты эхо-сигнала метеорообразований при негауссовой форме их спектра.

В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин

Военно-космическая Академия им. А.Ф. Можайского. Санкт-Петербург, Ждановская ул.,
13. vuzhukov2002@list.ru.

Рассчитываются ошибки, возникающие при использовании общепринятых в радиолокационной метеорологии методов оценивания спектральных характеристик принимаемых сигналов при двухмодальной форме их спектров. Рассматривается механизм образования таких спектров. Предлагается алгоритм обработки сигналов в рассматриваемом случае.

Errors arising from the use of generally accepted in the radiolocation meteorology methods of estimation of the spectral characteristics of the received signal at dual mode form of their spectra are calculated. The article considers the mechanism of formation of such spectra. It is proposed algorithm of signal processing in the case under consideration.

Самый распространенный метод оценивания спектральных характеристик принимаемого сигнала в метеорологической радиолокации – метод парных импульсов. В его основу положено предположение о гауссовой форме спектра, а, следовательно, и корреляционной функции отражений от метеорообразований, под которыми в данном случае понимаются облака и связанными с ними опасные явления (ливень, гроза, град, смерч, шквал). Однако то, насколько данное предположение соответствует действительности, до сих пор не установлено. Напротив, имеются данные об отличии формы реальных спектров от указанной [1]. Правда метод обладает хорошей устойчивостью и не приводит к значительным ошибкам при других формах спектра, имеющих один максимум. Ситуация меняется при появлении в спектре сигнала двух и более мод. А это, как показывает опыт, достаточно распространенное явление [2]. Так при исследовании влияния сжатия импульса на спектральные характеристики эхо-сигнала метеорообразований, проводимом в Москве осенью 2009 – зимой 2010 года, было обнаружено, что спектры с более чем одним максимумом составляют примерно 50% от общего их количества. По сообщениям радиометеорологов подобные случаи не редкость и для южных широт в осенне-зимний период. Следовательно, разработка метода оценивания характеристик многомодовых спектров является актуальной практически значимой задачей.

Считаем, что двухмодовый спектр – результат сложения двух независимых составляющих, каждая из которых по отдельности имеет спектр гауссовой формы

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t).$$

Применяя к такому сигналу алгоритм оценивания методом парных импульсов, получаем следующие выражения

$$\hat{\omega} = -\frac{1}{T_{\Pi}} \arctg \frac{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_{\Pi}^2 / 2) \sin \omega_1 T_{\Pi} + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_{\Pi}^2 / 2) \sin \omega_2 T_{\Pi}}{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_{\Pi}^2 / 2) \cos \omega_1 T_{\Pi} + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_{\Pi}^2 / 2) \cos \omega_2 T_{\Pi}},$$
$$\hat{\sigma}^2 = -\frac{1}{T_{\Pi}^2} \ln \left(\frac{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_{\Pi}^2) + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_{\Pi}^2) + 2A_1 A_2 \exp(-(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) T_{\Pi}^2 / 2) \cos(\omega_1 T_{\Pi} - \omega_2 T_{\Pi})}{(A_1 + A_2)^2} \right),$$

где $\hat{\omega}, \hat{\sigma}$ - оценки средней частоты и ширины спектра сигнала,

A_1, A_2 - мощности первой и второй составляющих,

$A = A_1 + A_2$,

ω_1, ω_2 - средние частоты,

σ_1, σ_2 - ширины спектра составляющих,

T_{Π} - период повторения зондирующих импульсов.

Очевидно, что в рассматриваемом случае мы на выходе получаем сложную зависимость величины каждой из приведенных оценок от соотношения мощностей составляющих, а также взаимное влияние их друг на друга. В результате погрешность может превышать 40%.

Можно предположить, что второй широко распространенный метод дискретного преобразования Фурье (ДПФ) более применим в данном случае. Для обоснования данного тезиса рассмотрим механизм образования сигнала с двухмодальным спектром. Единственное объяснение его формированию заключается в наличии двухслойной в горизонтальной плоскости структуры метеообразования с достаточно малым расстоянием между слоями, чтобы они не разрешались радиолокатором по углу места. При этом средние скорости частиц в каждом из слоев различны. В данном случае скорость частиц, расположенных посередине между слоями, равна среднему значению последних. Рассмотрим, как ведет себя ее оценка, получаемая методом ДПФ.

При нахождении центра импульсного объема радиолокатора в межслойном пространстве получается все тот же гауссов спектр, который наблюдался бы при равномерном распределении гидрометеоров по высоте, но с «удаленной» из него средней частью (рис. 1).

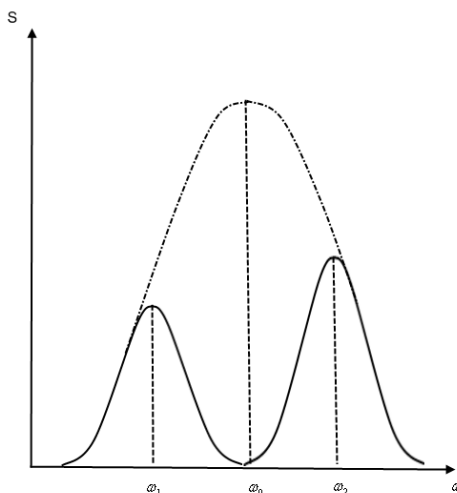


Рис. 1. Пример образования двухмодового спектра.

Если оценить искомые параметры как среднее значение и дисперсию приведенного на рис. 1 распределения, получим

$$\hat{\omega} = \frac{A_1}{A} \omega_1 + \frac{A_2}{A} \omega_2,$$
$$\hat{\sigma}^2 = \frac{A_1}{A} \sigma_1 + \frac{A_2}{A} \sigma_2 + \frac{A_1 A_2}{A} (\omega_1 - \omega_2)^2,$$

т.е. опять имеем смещение оценок и зависимость их значений от соотношения мощностей составляющих сигнала. Особенно это относится к ширине спектра, которая может принимать аномально большие значения. При этом сохраняется ее зависимость от азимута антенны. В качестве примера может быть предложена карта распределения ширины спектра радиальных скоростей метеообразований, полученная с помощью радиолокатора WSR-88D, представленная на рис. 2. Там же приведены карты распределения средних скоростей частиц и отражаемости. Сложные соотношения двух последних параметров, которые представляют предмет дальнейших исследований,

создают уникальный рисунок распределения в пространстве значений ширины спектра скоростей.

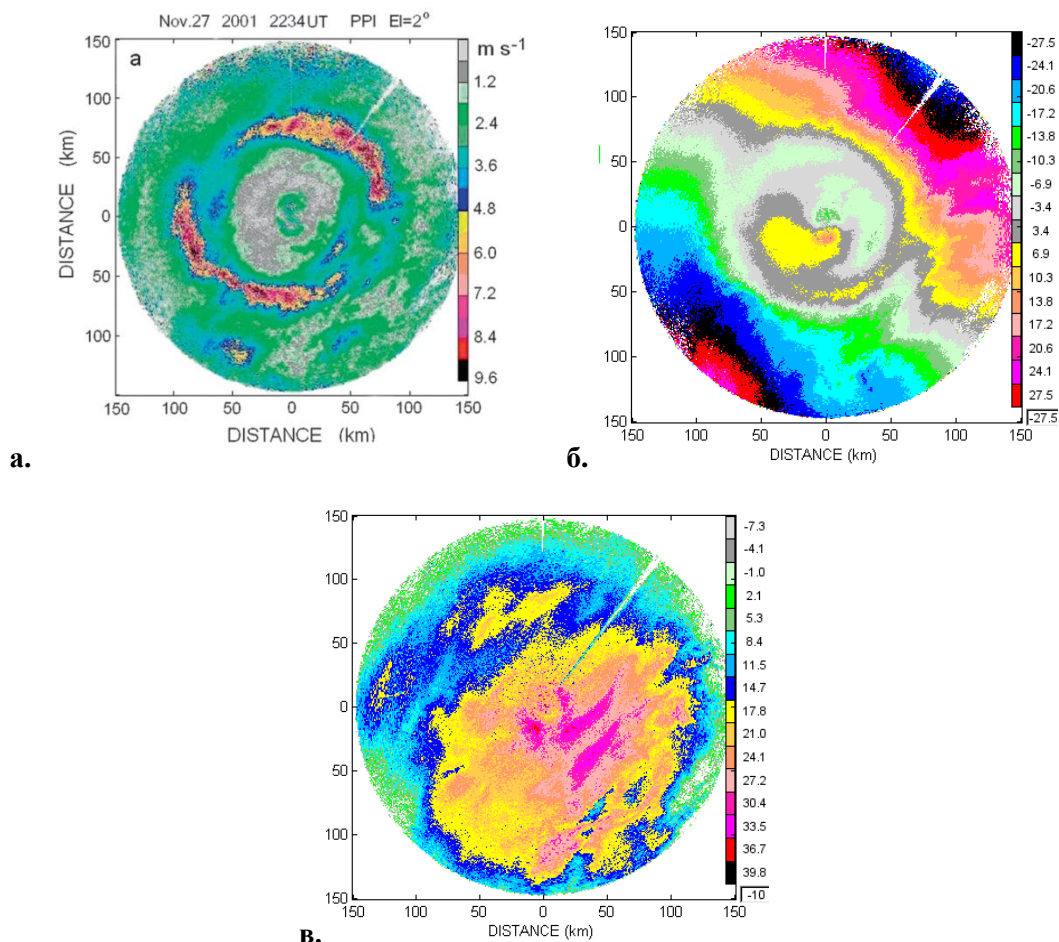


Рис. 2. Распределение по поверхности конического разреза, полученного при угле места 2 град., ширины спектра скоростей частиц метеорообразований (а), их средних радиальных скоростей (б) и отражаемости метеоцели (в).

На основании изложенных фактов, можно предположить, что альтернативой применяемым методам (парных импульсов и ДПФ) будет следующий алгоритм обработки:

1. идентификация в соответствии с установленным критерием спектров с более чем одним максимумом;
2. восстановление по результатам измерений на нескольких углах места антенны высоты расположения слоя, соответствующего каждому из максимумов спектра;
3. оценка параметров отдельно каждой из составляющих спектра;
4. интерполяция значений спектральных параметров в межслойном пространстве.

Литература.

1. Louis H. Janssen, Gerard A. Van Der Spek. The Shape of Doppler Spectra from Precipitation. Physics and Electronics Laboratory TNO, The Netherlands. IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. AES-21, NO. 2 MARCH 1985, p.208-219.
2. Lavrukevich U., Pushkov A., Sedletsky R., Vovshin B., Vylegzhanin I.; «The Theory and Practice of Application Pseudo Random Signals in Doppler Meteoradars». Proceedings on International Radar Symposium (IRS-2011), Leipzig (Germany), 2011, pp.256-261.