

УДК 621.396.96

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ВЕТРА И
СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОРТРЕТОВ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ
ОТ СНЕГОВЫХ ОБЛАКОВ**

С.Р. ГЕЙСТЕР, К.Н. ЧУГАЙ

*Военная академия Республики Беларусь
ВА РБ, Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 29 апреля 2003*

Приводятся результаты экспериментальных исследований статистических характеристик скорости ветра и спектральных портретов мешающих отражений от снеговых облаков. Полученные результаты предполагается использовать при разработке более совершенных устройств компенсации мешающих отражений от объемно распределенных отражателей. В основе создания этих устройств лежит использование спектральных портретов мешающих отражений. Параметры спектральных портретов позволяют оценить доплеровскую частоту, а также динамично изменяющиеся во времени форму и ширину спектра мешающих отражений.

Ключевые слова: мешающие отражения, радиолокационный портрет.

Введение

Основную роль в описании статистических характеристик мешающих отражений (МО) от объемно распределенных отражателей играет скорость переноса отражателей под действием скорости ветра. Данная работа посвящена исследованиям применительно к микрообъемам, соответствующим объему разрешения радиолокационной системы (РЛС) точного измерения координат.

Скорость переноса отражателей в общем случае можно представить нестационарным случайным процессом. К основным факторам, обуславливающим флуктуации и нестационарность скорости ветра в разрешаемом объеме, относятся [1, 2] неравномерность распределения давления вдоль земной поверхности, трение воздуха в пограничном слое о поверхность с изменяющимся профилем и время суток. Объективное существование неоднородности структуры ветра порождает многопоточную структуру воздушных масс. В пределах однородного потока изменения скорости ветра могут быть описаны выражением $v(t, x, y, z) = v_v(t, x, y, z) + v_f(t, x, y, z)$, где первая составляющая $v_v(t, x, y, z)$ характеризует медленные флуктуации скорости ветра, а вторая $v_f(t, x, y, z)$ — быстрые. Результаты фильтрации медленных изменений скорости ветра могут использоваться для адаптивного перемещения зоны режекции МО, а результаты фильтрации некомпенсируемых быстрых изменений скорости ветра — для адаптивного изменения ширины и формы зоны режекции МО. Для измерения параметров скорости ветра, необходимых для функционирования устройств защиты РЛС от МО, можно использовать спектральный радиолокационный портрет (СРЛП) МО.

Результаты экспериментальных исследований спектральных портретов мешающих отражений от снеговых облаков

В составе экспериментального комплекса использовалась переносная РЛС с зондирующим сигналом в виде непрерывной последовательности простых прямоугольных радиоимпульсов длительностью $T_0 = 0,33$ мкс, периодом повторения $T_r = 250$ мкс и длиной волны $\lambda = 0,0175$ м. Ширина диаграммы направленности РЛС в угломестной и азимутальной плоскостях имела значения $\Delta\epsilon = 3,5$ град и $\Delta\beta = 1,6$ град. Мешающие отражения фрагмента облака селектировались стробом. Квадратурные составляющие МО преобразовывались в коды с частотой дискретизации $F = 4$ кГц.

Спектральный портрет МО формировался путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) с прямоугольным весовым окном от N_{FFT} отсчетов принятого сигнала.

Эксперименты проводились для снегопадов с различной интенсивностью. Средняя скорость ветра изменялась в диапазоне от 0,5 до 10 м/с, а высота снеговых облаков — в диапазоне 100–1500 м. На рис. 1 представлен пример спектрального анализа МО от фрагмента в центре снеговой тучи с равномерной по высоте плотностью снега.

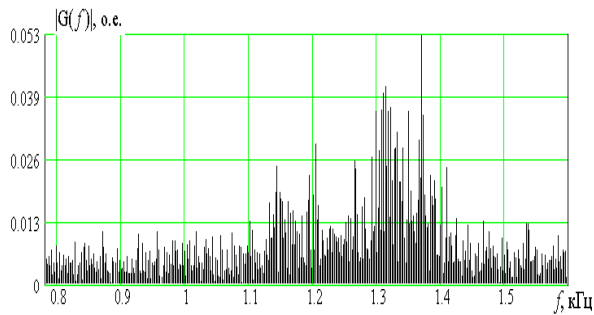


Рис.1. Модуль амплитудно-частотного спектра МО

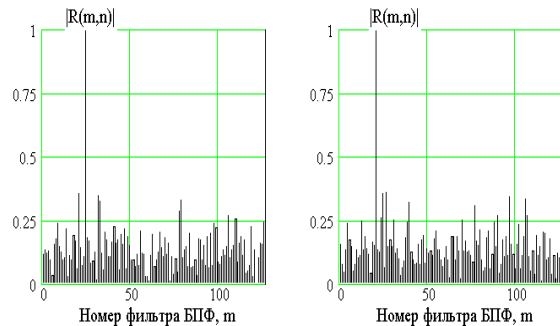


Рис.2. Коэффициент взаимной корреляции комплексных амплитуд СРЛП

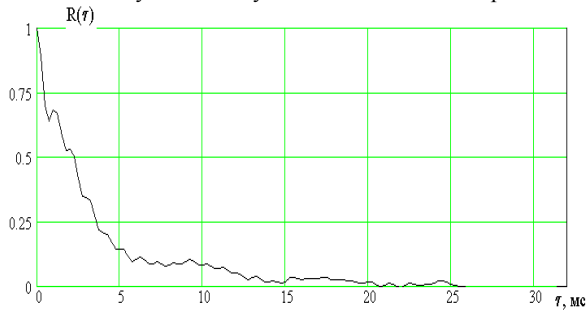


Рис.3. Корреляционная функция МО

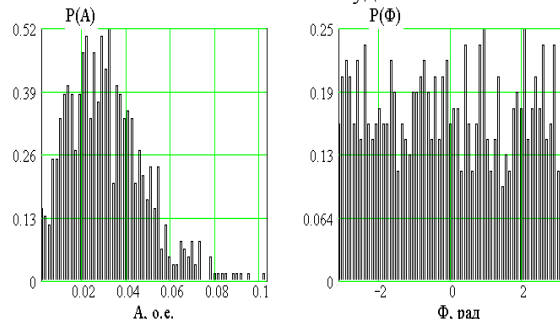


Рис.4. Оценки распределений амплитуды и фазы

Фрагмент наблюдался на дальности 2120 м под углом места 20° , а ракурс вектора скорости ветра был равен нулю. Число точек БПФ составляло 2048. Регистрация проводилась при условиях — снег сухой и крупный с диаметром снежинок 8–10 мм, температура воздуха у поверхности земли -20°C , а скорость ветра — 5–11 м/с. Для этих условий характерна наименьшая ширина спектра МО, что обусловлено однородной структурой облака. Амплитудно-частотный спектр (АЧС) от комплексного отраженного сигнала (рис. 1) характеризуется наличием доминирующей компоненты с шириной не более 75 Гц. На рис. 2 представлены оценки модулей коэффициентов взаимной корреляции $|R(m,n)|$ комплексных амплитуд МО на выходах m -го и n -го фильтров БПФ. Число точек БПФ при этом составляло 128. Из рис. 2 видно, что коэффициент взаимной корреляции в среднем равен 0,3.

На рис. 3 представлен пример оценки нормированной автокорреляционной функции $R(\tau)$ МО с практически полной компенсацией среднего значения доплеровской частоты для фрагмента протяженной снеговой тучи, находившегося на дальности 2600 м под углом

места 20^0 . Длительность выборки при формировании оценок автокорреляционной функции составляла 512 мс, а влияние ограниченности анализируемой последовательности по времени фактически исключалось. Полученные результаты позволяют полагать, что форма автокорреляционной функции находится между экспоненциальной и экспоненциально-параболической аппроксимациями.

На рис. 4 в качестве примера представлены оценки распределения амплитуды $P(A_m)$ и фазы $P(\varphi_m)$ преобладающей по мощности спектральной компоненты МО, полученной в m -м фильтре при числе точек БПФ 128 и разрешающей способности по частоте 31,25 Гц. Анализ по совокупности аналогичных оценок показал, что закон распределения модуля комплексной амплитуды $P(A_m)$ m -го элемента спектрального портрета МО от снеговых туч имеет релеевский вид, а закон распределения фазы $P(\varphi_m)$ является равномерным. Соответственно закон распределения комплексных амплитуд спектрального портрета МО от снегового облака является нормальным.

Результаты экспериментальных исследований спектральных портретов МО от снеговых облаков позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, снеговые тучи имеют неоднородность по скорости, которая проявляется в наличии нескольких скоростных слоев по высоте, присутствующих даже в сравнительно малых ($100 \times 100 \times 100 \text{ м}^3$) разрешаемых объемах. Слоистость проявляется в спектральном портрете в виде нескольких устойчивых спектральных компонент с различными доплеровскими частотами, имеющих сравнительно узкую (40–75 Гц) ширину спектра слоя МО. Слои распределялись в частотном диапазоне до (230–250) Гц. Наиболее ярко слоистость выражена в случаях, когда разрешаемый объем расположен на стыке слоев. Во-вторых, среднее значение радиальной скорости ветра в разрешаемом объеме может характеризоваться как сравнительно медленный нестационарный процесс. В-третьих, исследования статистических характеристик МО от снеговых туч подтвердили нормальность закона распределения комплексных амплитуд элементов спектрального портрета МО. Комплексные амплитуды портрета с учетом нормальности распределения являются независимыми. В-четвертых, форма нормированной корреляционной функции отражений от снеговых туч лежит между экспоненциальной и экспоненциально-параболической аппроксимациями, а время корреляции флуктуаций находится в диапазоне 1,5–3 мс для длины волны $\lambda = 0,0175 \text{ м}$. В-пятых, зависимость параметров спектральных портретов от характера снега выражается в том, что с увеличением интенсивности снегопадов ширина спектра амплитудно-фазовых флуктуаций увеличивается от 50 до 150 Гц, а спектр становится менее изрезанным.

Результаты экспериментальных исследований медленных флуктуаций и корреляционной функции флуктуаций оценок скорости ветра в разрешаемом объеме

На рис. 5 в качестве примера представлены графики изменения во времени оценок составляющей, характеризующей медленные флуктуации скорости ветра $v_y(t, x, y, z)$ для различных по радиальной дальности фрагментов снеговой тучи.

На рис. 6 и 7 представлены примеры корреляционных функций (КФ) $R(\tau)$ медленных (МФ) и быстрых (БФ) флуктуаций скорости ветра. Графики приведены для различных фрагментов облака: 1 — дальний край первой тучи на дальности 2580 м; 2 — ближний край первой тучи на дальности 1440 м; 3 — ближний край второй тучи на дальности 1025 м; 4 — дальний край второй тучи на дальности 1625 м. Условия эксперимента при этом были следующие — сухой и мелкий (диаметр снежинок 2–2,5 мм) снег средней интенсивности при температуре воздуха -6°C и скорости ветра у поверхности 5 м/с.

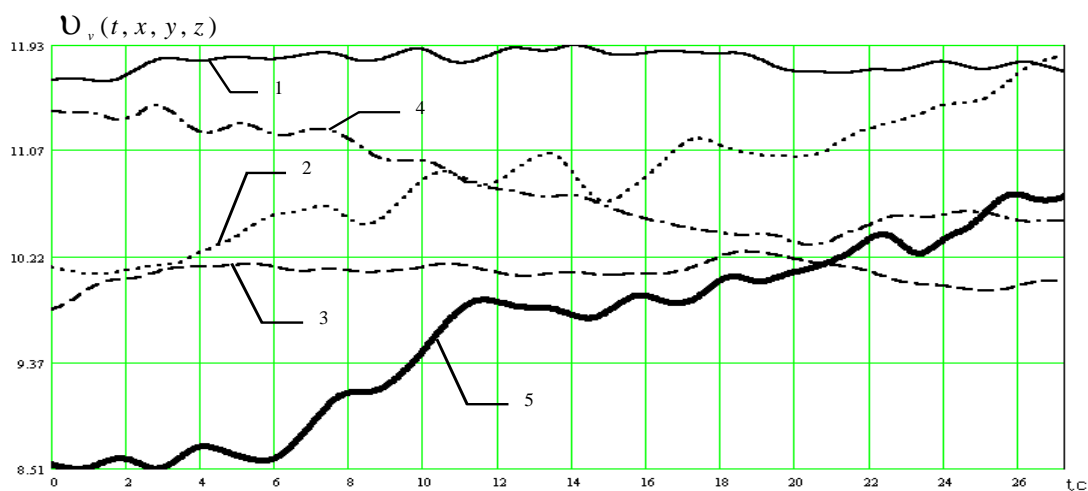


Рис. 5. Изменения оценок скорости ветра во времени

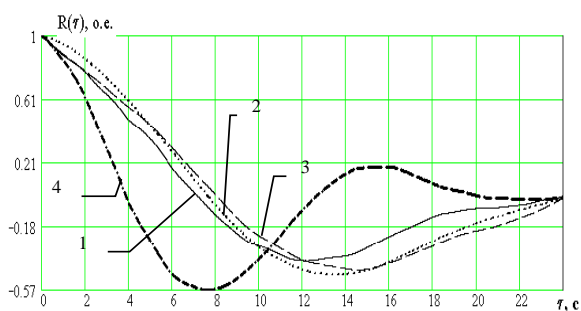


Рис. 6. КФ МФ скорости ветра

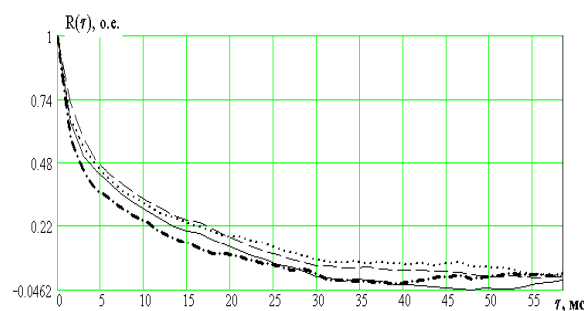


Рис. 7. КФ БФ скорости ветра

Анализ корреляционной функции флуктуаций скорости ветра показывает, что форму корреляционной функции флуктуаций можно аппроксимировать функциями $\exp(\alpha)\cos(\beta)$ и $\exp(\alpha)$.

Результаты исследований скорости ветра позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, характер изменения составляющей, характеризующей медленные флуктуации скорости ветра $U_v(t, x, y, z)$, зависит от характера ветра (равномерный, порывистый), а также от его скорости и высоты. В среднем с увеличением высоты скорость ветра увеличивается, но при небольших отличиях высот анализируемых фрагментов (сотни метров) оценки среднего значения \bar{U} изменяются по случайному закону. Текущие изменения $\bar{U}(t)$ могут достигать 30 % от усредненного в интервале времени 30 с значения скорости ветра. В интервале усреднения, равном 1 с, эти изменения $\bar{U}(t)$ сравнительно малы и достигают 5 %. Во-вторых, оценки среднего значения скорости ветра и среднеквадратического значения флуктуаций относительно среднего могут (и должны) фильтроваться и экстраполироваться в цепях адаптации автокомпенсатора МО. Причем в цепях адаптации желательно иметь фильтры с астатизмом 2-го порядка. В-третьих, время корреляции флуктуаций скорости ветра относительно составляющей медленных флуктуаций составляло единицы миллисекунд, что соответствовало времени корреляции флуктуаций сигнала МО. Время корреляции принимало наименьшее значение 3–4 мс в случаях, когда интенсивность снегопадов была невелика при радиальной скорости ветра более 8 м/с. В этих случаях форму корреляционной функции флуктуаций скорости ветра можно аппроксимировать экспоненциально-косинусной функцией. Для снегопадов сильной интенсивности при радиальной скорости ветра в диапазоне 4–6 м/с характерно наибольшее значение 5–6 мс времени корреляции флуктуаций. При этом форма корреляционной функции медленных флуктуаций хорошо аппроксимируется экспоненциально-косинусной функцией, быстрых — экспонентой.

THE STATISTICAL CHARACTERISTICS OF WIND SPEED AND SPECTRAL PORTRAITS OF REFLECTIONS FROM SNOW CLOUDS

S.R. GEYSTER, K.N. CHUGAY

Abstract

The results of experimental researches of the statistical characteristics of wind speed and spectral portraits of reflections from snow clouds are resulted. The received results are supposed to be used by development of compensation devices, more perfect in comparison with existing devices, of reflections from volume — distributed reflectors. In the basis of creation of these devices lays the use of spectral portraits of reflections. The parameters of spectral portraits allow estimating Doppler frequency, and also dynamically varied in time the form and width of a spectrum of reflections.

Литература

1. Довиак Р., Зринич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л., 1988.
2. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л., 1973.