

Радиолокационные методы исследования атмосферных турбулентных потоков в лагранжевой и эйлеровой системах координат

А.Г. Горелик, С. Ф. Коломиец

Московский физико-технический институт (государственный университет), Московская область, г. Долгопрудный, пер. Институтский, д. 9, radiometeo@mail.ru

В докладе обсуждается возможность развития ранее обоснованных и апробированных методов измерения параметров атмосферной турбулентности в лагранжевой и эйлеровой нотации.

Further development of atmospheric turbulent flows measurements techniques is discussed in the report in lagrangian and eulerian approaches.

Введение

Ранее были рассмотрены различные возможности применения импульсного доплеровского радиолокатора для решения одной из сложнейших проблем, связанной с исследованием динамических процессов протекающих в приземном и пограничном слоях атмосферы [1 – 4]. Было доказано, что радиолокационные методы обеспечивают возможность исследования турбулентного потока как в фиксированном объеме пространства (определяется эйлеров масштаб турбулентности), так и параметров «деформации» этого же потока во времени в процессе его движения (лагранжев масштаб).

С целью изучения возможностей доплеровской радиолокации для исследования структуры турбулентности в нижних слоях атмосферы была создана радиолокационная аппаратура и разработаны методики проведения эксперимента. Измерения проводились при помощи высокопотенциального 3-х см доплеровского радиолокатора с антенной 1.2 м, пространственная протяженность зондирующего импульса около 50 м, угол места 12 угловых градусов, высота зондируемого объема над уровнем земли 200 м. Таким образом, удаление от радиолокатора до рассеивающего объема составляло около 800 м.

Современная техника позволяет создать и адаптировать для подобного рода измерений 8 мм доплеровский радиолокатор. При этом удаётся уменьшить размеры антенны до 0.4 – 0.5 м, а также время проведения одиночного измерения. С использованием подобных радиолокационных систем и возможностей оцифровки сигнала радиоэхо по всей дистанции открывается возможность существенной модернизации и усовершенствования, предложенных ранее зеркального метода и метода разнесенных датчиков [1, 2].

Рассмотрим практическую реализацию метода разнесенных датчиков, которая была предложена в цитируемых выше работах. Как будет показано в этом докладе, она предполагает широкие возможности дальнейшего совершенствования и развития.

Принятый с разных дальностей по всей дистанции сигнал, после посылки очередного зондирующего импульса, оцифровывается. Затем составляется матрица, строки которой составляют непрерывные отсчеты сигнала на выходе приемника после каждого излученного импульса. Иными словами, по строкам матрицы записывается $v(\tau_i)$, где τ_i – временная задержка принятого сигнала по сравнению с излученным (по интервалам дискретизации аналого-цифрового преобразователя), а по столбцам – та же величина для той же дальности, но полученная через временной интервал – период повторения зондирующих импульсов передатчика, то есть $v(n*\tau_p+\tau_i)$, где n – порядковый номер импульса.

Обработка полученной информации может осуществляться по различным схемам: Фурье анализ, счет числа пересечений с сигналом нулевого уровня на выходе детектора (R-метр), могут применяться и иные формы обработки сигнала для определения скорости движения рассеивателей в облучаемом объеме пространства.

Зеркальный метод основан на том, что на некоторой высоте выделяется объем пространства в набегающем на радиолокатор воздушном потоке и в пределах рассеивающего объема регистрируются крупномасштабные пульсации скорости ветра. Пока этот поток проходит путь $2h/\cos\beta$, где β - угол места, h – высота на которой находится рассеивающий объем, производится измерение скорости переноса рассеивателей в выделенном объеме пространства, затем антенна разворачивается на 180 градусов и вновь производится запись того же потока, но уже удаляющегося от радиолокатора. Обработка полученных записей ведется на базе определения взаимной корреляции полученных записей. Максимальный коэффициент корреляции соответствует интервалу времени, в течение которого неоднородности проходят путь $2h/\cos\beta$.

Основная сложность при практической реализации данного метода состоит в том, что с его использованием наиболее точные измерения могут проводиться лишь в узком интервале пульсации скорости ветра, порядка 0.7-1.0 м/с. При этом скорость ветра на высоте, на которой производится измерение, обычно составляет 12-15 м/с. Дело в том, что для сопоставления сигналов полученных от набегающего и удаляющегося потоков требуется точное определение направления ветра. Теоретически, точность зависит от размера неоднородностей поля ветра и расстояния между антенной и зондируемым объемом пространства. Экспериментальные оценки, полученные в [1] показывают, что погрешность определения направления ветра в рассеивающем объеме, находящемся от локатора на расстоянии порядка 1 км, не должна превышать 1.5-2 градуса. В условиях очень интенсивной турбулентности, сопровождающейся пульсациями скорости ветра больше 1.5 м/с, это представляет непростую задачу. В другом крайнем случае, то есть при малых значениях пульсаций ветра (порядка 0.1-0.2 м/с), возникают еще большие сложности определения направления ветра, с точностью достаточной для взаимной привязки данных, полученных от набегающего и удаляющегося воздушных потоков.

Для того чтобы по возможности исключить влияние гравитационной составляющей движения рассеивателей на точность измерений, последние должны проводиться при малых углах места. Сами рассеиватели должны иметь возможно меньшую скорость гравитационного падения. Опыт учит, что на уровне возможностей радиолокационной аппаратуры и систем обработки данных, которые использовались в шестидесятые годы прошлого века, практически невозможно осуществить реализацию зеркального метода при незначительных пульсациях, или тогда, когда пространственный масштаб неоднородности в азимутальной плоскости лишь незначительно превышает расстояние от антенны до рассеивающего объема или тогда, когда пространственный масштаб пульсаций слишком велик. Следует отметить также, что в пограничном слое атмосферы практически всегда отмечается относительно регулярное изменение направления ветра с высотой (сдвиг ветра).

Следует отметить, что при помощи рассмотренных выше методов можно получить лишь приблизительные оценки заморозенности турбулентности, относящиеся к «крупным» вихрям [6, 7]. Причем все возможные ошибки измерений, приводят к занижению оценок времени жизни неоднородностей. Совершенствование рассмотренных методов и уточнение времени жизни турбулентных неоднородностей возможно лишь в том случае, если существенно модернизируется сама система радиолокационного зондирования.

Сформулируем основные требования, которые предъявляются к такой системе зондирования, обеспечивающей одновременное определение параметров турбулентности в лагранжевой и эйлеровой системе координат:

- исключена или уменьшена необходимость на каждой высоте точного определения направления ветра с последующей – достаточно длительной, априори – установкой антенн.

- исключена необходимость проведения измерения воздушного потока только при высоких скоростях ветра и интенсивной турбулентности;

- используется высокая разрешающая способность локатора по дальности, т.е. уменьшены размеры рассеиваемого объема;

Реализация этих требований откроет возможности одновременного и непрерывного измерения параметров воздушного потока в более широком диапазоне высот и пространственно-временных масштабов. Такой режим исследования динамики атмосферы – насколько известно авторам – до сих пор нигде не реализован, несмотря на то, что он имеет уникальные информационные возможности.

Выше было отмечено, что реализация зеркального метода и метода разнесенных датчиков необходимо, чтобы через рассеивающий объем проходили одни и те же неоднородности, которые через некоторый временной интервал попадали опять в зону облучения. Для того, чтобы выполнить это требование необходимо чтобы антенная система радиолокатора осуществляла быстрое секторное сканирование в некотором диапазоне углов в азимутальной плоскости. Это должно проходить при малом угле наклона антенны в угломестной плоскости. Диапазон углов сканирования должен определяться исходя из атмосферных условий. Необходимо, чтобы неоднородности которые попадают в зону облучения, например те которые зафиксированы при направлении на встречу ветра, вновь попадали в зону облучения, несмотря на то, что ветер изменил свое направление в азимутальной плоскости. Для реализации вышеизложенных требований имеются ограничения, связанные, как со структурой турбулентного потока, так и параметрами радиолокатора. Это в первую очередь касается ширины диаграммы направленности, длительности зондирующего импульса и длины волны на которой происходит зондирование.

Предлагается перевести работу антенной системы радиолокатора в режим секторного обзора пространства. Также как и в предыдущей системе зондирования осуществляется сканирование при углах места меньше 12 угловых градусов [1, 2]. Антенная система при реализации зеркального метода, может состоять из двух РЛС соединенных вместе, антенны которых повернуты друг относительно друга на 180 градусов. Каждый радиолокатор работает в импульсном режиме. Определение знака скорости в одном и другом локаторе не требуется: одна антенна устанавливается по направлению ветра, другая против ветра.

Обе антенные системы, сканируют в диапазоне углов примерно 25-30 град. Далее проводится обработка сигнала, в ходе которой определяется значение и вид функции взаимной корреляции на всех высотах одновременно в набегающем и удаляющемся потоке. При этом для каждой высоты находятся углы, для которых взаимная корреляция измеряемых величин максимальна. По степени максимальной корреляции оценивается масштаб неоднородностей в Эйлеровой системе координат. При азимутальном сканировании антенной системы, получаем серию матриц относящихся к различным объемам пространства и различным дальностям, а для каждой дальности определяется направление ветра и размеры неоднородностей.

После цикла секторного сканирования осуществляется повторное сканирование того же объема пространства, при этом антенна перемещается в том же диапазоне углов, но в обратном порядке. Такой процесс осуществляется в течение длительного

промежутка времени. Обработка и корреляционный анализ данных, полученных в разное время, позволяют получить подробную информацию об изменении скорости направления ветра в пограничном слое атмосферы, его вариациях в широком диапазоне пространственно-временных масштабов и уточнить модели, описывающие структуру турбулентности в области относительно больших масштабов, так и в более меньших, - меньше размеров рассеивающего объема.

Совместный анализ изменения формы спектра во времени и пространстве позволяет детально исследовать перемежаемость атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов. Если измерения осуществляются при малых углах места, то открывается возможность исследовать взаимную корреляцию структуры доплеровских спектров, полученных в различных объемах пространства вдоль направления зондирования. Возможно, что корректировка этих данных на изменения ветра с высотой, позволит получить более точные данные о времени жизни неоднородностей ветра и их связи с мелкомасштабной турбулентностью.

Ценную информацию о временных и пространственных неоднородностях ветрового поля и трансформации турбулентного потока в области масштабов соизмеримых с размерами рассеивающего объема можно получить, изучая пространственные и временные флуктуации интенсивности радиоэхо. В рамках этого подхода тоже можно получить данные о перемежаемости турбулентности в пограничном слое атмосферы, что подразумевает возможность взаимопроверки оценок, полученных различными способами.

Обратим внимание на то, что при сканирующей по азимуту антенной системе, открывается возможность для понимания такого сложного процесса, протекающего в реальной атмосфере, как изменение во времени внутренней структуры неоднородностей различного масштаба. Параметр, характеризующий этот процесс, получил название дисперсионного параметра [5]. Он при замороженном переносе неоднородностей всех масштабов равен нулю [6]. Изучение «времени жизни» турбулентных неоднородностей различного масштаба, является одной из задач которые нужно решить при попытках применить лагранжев подход и вихревую динамику к изучению реальных атмосферных процессов.

Обратим внимание на то, что время жизни турбулентных неоднородностей различного масштаба зависит от масштаба. Есть основания полагать, что время жизни крупных неоднородностей будет больше времени жизни мелких. Точные данные о соотношении времени жизни неоднородностей поля ветра, а также зависимости его абсолютного значения от масштаба, средней скорости и высоты (то есть детальный анализ перестройки потока) могут дать очень важную информацию о том, каким именно образом происходит передача турбулентной энергии от крупномасштабных к мелкомасштабным вихрям в свободной атмосфере и у поверхности земли.

Литература

1. Горелик А. Г. Статистические характеристики радиоэхо от метеообразований и их связь с физическими процессами в атмосфере/ Дисс. на соискание степени д.ф.м.н., Л.: ГГО, 1969.
2. Мельничук Ю. В. Измерение турбулентности в осадках с помощью доплеровских радиолокационных станций. Изв. АН СССР, серия физика атмосферы и океана, Т.2, №9, 1967.
3. С. Ф. Коломиец. Вертикальное зондирование атмосферы с осадками доплеровскими методами в широком диапазоне пространственно-временных масштабов и длин волн зондирования./ Дисс. на соискание степени к.ф.м.н., М.: МФТИ, 2009.

4. Rogers R. R., 1991. The early years of Doppler radars in meteorology. Radars in meteorology: Battan Memorial and 40-th Anniversary Radar Meteorology Conference (Ed. by D. Atlas), AMS, Boston.
5. Г. С. Горелик, Колебания и волны, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
6. А. М. Обухов, Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988.
7. E. E. Gossard et. al., Measurement of Clear-Air Gradients and Turbulence Properties with Radar Wind Profilers J. of Atm. Ocean. Tech., 1998, 15, 321 - 336