

Применение многоволновых доплеровских РЛС для ветрового зондирования атмосферы на разных высотах

А. Г. Горелик¹, С. Ф. Коломиец¹, Г. Г. Щукин²

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Московская область, г. Долгопрудный, пер. Институтский, д. 9, radiometeo@mail.ru*

²*Федеральное военное государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»*

В докладе обобщен опыт и намечены перспективы использования в оперативной метеорологической практике ветровых профайлеров для определения параметров ветра в диапазоне высот от поверхности земли до 20-25 километров. Представлен анализ источников радиоэха при различных состояниях атмосферы и на различных высотах.

The experience of using of wind profilers for the wind measurement within the range of altitudes from the Earth surface and up to 25 km high is summarized in the report. Different models of radio echo formation for different altitudes and dynamical condition of the atmosphere are analyzed and the ways of further development are outlined. The study was made as a part of federal program of the national science and education support for 2010-2013 years.

Введение

С конца 50-х годов берет начало разработка доплеровских радиолокационных систем предназначенных для определения скорости и направления ветра в атмосфере. Первые радиолокационные ветровые системы были построены на базе модернизированных импульсно-когерентных станций военного назначения, работавших в хорошо освоенных военными диапазонах длин волн [3, 6, 7, 8]. Таким образом, возможность использования «сантиметровой» доплеровской радиолокации для ветрового зондирования была установлена достаточно давно, и это, во многом, определило состав «классических» методик проведения измерений и математических моделей формирования радиоэха, используемых для их интерпретации.

С развитием электроники и вычислительной техники появилась возможность существенно расширить арсенал радиолокационных станций ориентированных на решение задач геофизического (и в том числе – ветрового) зондирования атмосферы: появление надежных компонентов позволило использовать РЛС миллиметрового диапазона, а специальные методы обработки сигналов, применимых в дециметровом и метровом диапазоне привели к разработке длиноволновых ветровых профайлеров. И если последние в настоящее время уже выделены в отдельную отрасль радиолокационной метеорологии, то история широкого применения РЛС миллиметрового диапазона в метеорологии только начинается.

Расширение средств метеорологической радиолокации поставило вопрос о соответствующем усовершенствовании методик проведения измерений (а также исследовании возможных путей их автоматизации в реальном масштабе времени) и ярко подчеркнуло необходимость усовершенствования фундаментальных представлений о формировании радиоэха от различных метеообразований, которые лежат в основе алгоритмов интерпретации радиолокационных данных. Однако, несмотря на большую работу, проведенную в рамках «одноволнового подхода» к метеорологическим измерениям, имеющиеся успехи в развитии этих направлений достаточно скромные. Среди основных причин такого положения дел, следует отметить, как минимум, сложность получения многоволновых данных, а главное – отсутствие ощутимой потребности в развитии указанных направлений.

По меткому выражению Д. Атласа [11] в XX веке радиолокационная метеорология развивалась в направлении создания «золотого арсенала» методов и средств, который – в отсутствие «серебряной пули» – позволил бы решать стоящие перед ней задачи. Идеальной казалась картина, где каждый мог выбрать средства дистанционного измерения любого из метеорологических параметров взамен использования контактных инструментов.

Обзор современных публикаций, указывает на то, что задачи радиолокационной метеорологии – в постановке Д. Атласа – в целом можно считать решенными. В ближайшее время развитие «золотого арсенала» должно уступить место повышению «пробы» основных образцов его содержимого. Сегодня на повестку дня должны быть поставлены вопросы повышения достоверности и точности используемых методов дистанционных измерений, обеспечение всепогодности их применения, а также оптимизации параметров аппаратуры измерительных комплексов. Достижение этой цели представляет собой сложную задачу в условиях, когда один и тот же метеорологический или геофизический параметр может определяться с использованием различных дистанционных (а в общем случае и контактных) методов измерения. Но обилие экспериментального материала – это не только сложности с его обработкой, это, в том числе, и новые возможности...

Сопоставления и взаимопроверки данных, полученных с использованием различных дистанционных и контактных средств, открывают новую для радиометеорологии перспективу перехода к классическим для физики методам интерпретации экспериментальных данных «по отклонениям от модели» [12, 13]. Но развитие в этом направлении – несмотря на его полезность в целях повышения точности, достоверности и всепогодности дистанционных измерений – сдерживается рядом фундаментальных вопросов, нерешенных в прошлом. В частности, дистанционное измерение ветра требует переосмысления комплекса сложнейших проблем, связанных с распространением и рассеянием электромагнитного излучения в реальной атмосфере.

Есть основания полагать, что многие из приоритетных задач современной радиолокационной метеорологии могут быть эффективно решены с использованием мультипараметрических или многоволновых технологий. Однако, как показывает практика, развитие в этом многообещающем направлении также – и даже в большей степени – требует развития математических моделей, которые были бы применимы при интерпретации радиолокационных данных.

Настоящий доклад посвящён рассмотрению отдельных вопросов, касающихся перспективами использования многоволновой доплеровской радиолокации для ветрового зондирования атмосферы на различных высотах.

Основное уравнение доплеровской и метеорологической радиолокации

Основное соотношение, связывающее величину доплеровского сдвига частоты, направление зондирования и длину волны на которой работает радиолокатор с параметрами, характеризующими воздушный поток в некотором малом объеме пространства, находящегося на высоте H имеет следующий вид:

$$\overline{F_d} = \frac{2}{\lambda} [V_{\Gamma}(x, y, H, t) \cos(\alpha_3 - \alpha_0[x, y, H, t]) \cos \beta \pm V_B(x, y, H, t) \sin \beta] \quad (1)$$

где V_{Γ} – горизонтальная составляющая ветра; V_B – величина вертикальной скорости движения рассеивателя, x, y – координаты рассеивающего объема на высоте H ; α_3, β – углы зондирования в азимутальной и угломестной плоскости, α_0 – направление ветра на высоте H .

Уравнение (1) справедливо для импульсного радиолокатора, имеющего игольчатую диаграмму направленности, «точечный» рассеивающий объем и длительность зондирующего импульса τ близкую к нулю. В общем случае, если диаграмма направленности имеет конечную ширину $\Delta\theta$, пространственную протяженность зондирующего импульса $h=c\tau/2$. Под V_{Γ} и $V_{\text{В}}$ следует понимать значения скорости вертикальных потоков и гравитационного падения рассеивателей, усредненные по рассеивающему объему.

Отметим, что проблемы выбора оптимальных углов направления зондирования детально исследованы в [3, 7] и положены в основу метода доплеровской томографии [4]. Этот метод, обеспечивающий «восстановление» ветрового поля по данным доплеровских измерений, выполненных при различных углах визирования α_z и β . В упрощенном виде он используется практически во всех ветровых профайлерах, работающих в различных диапазонах длин волн [3, 5].

Подавляющее большинство метеообразований: облака, осадки и т.д. представляют собой объемную множественную цель. Поэтому, для того чтобы охарактеризовать отражающие свойства метеообъекта пользуются не величиной эффективного поперечника рассеяния (ЭПР) σ , а величиной удельного поперечника рассеяния η (радиолокационной отражаемостью единицы объема V). Используются и другие величины, которые являются эквивалентными характеристиками «множественной» цели: радиолокационная отражаемость Z [$\text{мм}^6/\text{м}^3$] для гидрометеоров, а для «чистой» турбулизированной атмосферы – величина C_n^2 [$\text{м}^{-2/3}$].

Если обозначить все технические параметры радиолокационной системы, влияющие на величину регистрируемого сигнала, как A^* , то основное уравнение метеорологической радиолокации, связывающее уровень принятого сигнала $\bar{P}_{\text{omp}}(R)$ с η с R – дистанцией зондирования, то есть дистанцией между радиолокатором и рассеивающим объёмом примет вид:

$$\bar{P}_{\text{omp}}(R) = A^* \frac{P_0}{R^2} \eta \exp\left(-\int_0^R \alpha(R) dR\right), \quad (2)$$

где: P_0 – мощность излученного сигнала, α - ослабление на трассе, η – удельная радиолокационная отражаемость (которая может быть выражена через C_n^2 , как $\eta = 0.38 C_n^2$)

Обратим внимание на то, что уравнение (2) и выражение, связывающее C_n^2 с удельной радиолокационной отражаемостью – η , справедливо только в том случае, когда весь облучаемый объем полностью заполнен рассеивающими неоднородностями, пространственный спектр которых непрерывен, изотропен и не изменяется с высотой. Однако такая модель кажется излишне упрощенной. Рассеивающий объем может быть лишь частично заполнен отражателями, спектр их геометрических размеров может изменяться с высотой и быть анизотропным. В таких случаях зависимость от R будет иная. Показатель степени при R будет увеличиваться по мере уменьшения заполнения рассеивающего объема и в предельном случае (одна неоднородность) может достигать значения четыре.

В плане энергетического расчета неопределенность с моделью формирования отраженного сигнала в реальной атмосфере сводит «почти на нет» возможность ясного научного обоснования необходимой энергетики ветрового радиолокатора в зависимости от желаемой высоты измерений.

Структура рассеивающего объёма на различных высотах

Сложность практического использования соотношения (2) состоит еще и в том, что за время обработки сигнала радиозоха от выделенного объема метеообразования сама структура отдельных неоднородностей изменяется. Это приводит к неопределенности результатов использования доплеровских методов приема сигналов и их интерпретации. Учет этого эффекта особенно важен при зондировании на длинных (метровых и дециметровых) волнах, характеризующихся брэговским механизмом формирования радиозоха.

С другой стороны, изучая зависимость мощности от расстояния можно получить качественную оценку применимости самой модели формирования рассеянного поля. С этой точки зрения интересно рассмотреть имеющиеся экспериментальные данные об отражающих свойствах атмосферы на различных высотах (см. Рис. 1.).

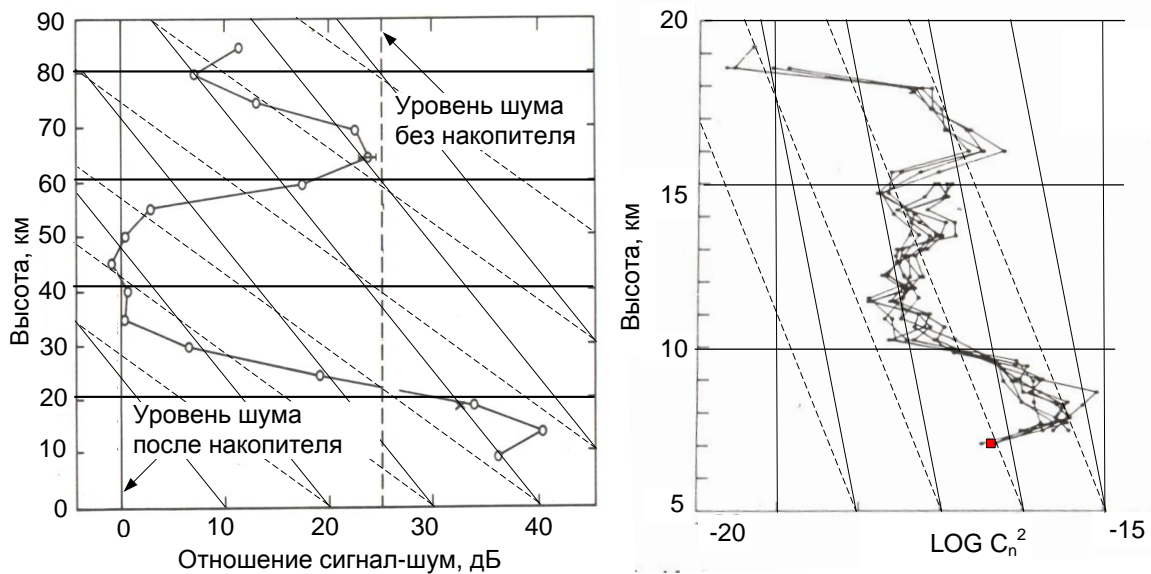


Рис. 1. Зависимость от высоты усреднённых данных об отражаемости атмосферы, полученная с использованием ветровых профайлеров, работающих в метровом диапазоне [3].

Наклонные линии представляют зависимость мощности от высоты для распределенной множественной (сплошные) и одиночной точечной (штриховые) цели. Эти диаграммы показывают, что в атмосфере практически нет областей (за исключением турбулизированной границы тропосферы, располагающейся на уровне 10-15 км.) где зависимость мощности отраженного сигнала от высоты хотя бы приблизительно совпадала бы с той, что соответствует модели распределенной множественной или одиночной точечной цели.

Если бы структура рассеивающего объема в реальной атмосфере соответствовала требованиям модели распределенной множественной цели (а именно, если бы удельная радиолокационная отражаемость - η оставалась неизменной), то убывание мощности с высотой должно было быть близко к наклону сплошной линии на Рис. 1, которая указывает на квадратичную зависимость мощности от дистанции зондирования. Как видно из приведенных на Рис. 1 диаграмм, это не так. Причем в атмосфере практически нет областей (за исключением турбулизированной границы тропосферы, располагающейся на уровне 10-15 км.) где ход зависимости мощности отраженного сигнала от высоты хотя бы приблизительно совпадал с тем, который соответствует модели распределенной множественной цели.

Тем не менее, радиолокационные данные широко и часто интерпретируются как отражения от однородной изотропной турбулентности с целью оценки её

интенсивности в терминах параметра C_n^2 . Такие оценки, полученные различными авторами [3, 5], представлены на Рис. 2. Анализ данных приведенных в различных источниках указывает на то, что C_n^2 зависит от погодных условий, сезона года и высоты. Для слабой турбулентности значения C_n^2 меняются от 10^{-17} до $10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$, для средней турбулентности – $C_n^2 = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, а для интенсивной турбулентности C_n^2 изменяется от 10^{-14} до $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$.

Обратим внимание на то, что минимальный масштаб неоднородностей растет с высотой. Так на малых высотах при интенсивной турбулентности минимальный масштаб составляет 10^2 м , в то время, как на больших высотах он достигает порядка метра и более. Проблемы применения доплеровских радиолокаторов, возникающие при создании и эксплуатации всепогодных систем ветрового зондирования, связаны с тем, что величина отраженного сигнала незначительна в зимний сезон даже на малых высотах, не говоря уже о больших. Повышение высоты зондирования требует увеличения энергетического потенциала радиолокатора, его рабочей длины волны. Однако, при увеличении длины волны усложняется приём сигналов. Это происходит вследствие того, что «ложные» сигналы, поступающие в приемный тракт радиолокатора (в том числе по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны), создают помехи. Измерения на «малых» высотах характеризуются помехами, борьба с которыми очень сложна, а в большинстве случаев, при измерениях на «длинных» волнах, вообще невозможна. Все авторы отмечают, что при применении длинноволновых радиолокаторов для определения параметров отражённого сигнала в нижних слоях атмосферы возникают специфические сложности, связанные с тем, что в пограничном слое происходят значительные вариации η и C_n^2 . Это негативно влияет на результаты интерпретации данных.

Измерения в микроволновом диапазоне во многом лишены негативного влияния вариаций η и C_n^2 . Причем – как показывают экспериментальные данные – мощность, отражаемая от большинства типов местных предметов, растет обратно пропорционально длине волны, а мощность, отражаемая от цели в среднем – обратно пропорциональна кубу длины волны. Следовательно, уменьшение длины волны приводит к снижению негативного эффекта боковых лепестков и местных предметов.

Поэтому с целью повышения достоверности ветровых измерений радиолокационные комплексы, работающие на высотах от поверхности Земли до 20-30 км, должны включать, по крайней мере, два типа радиолокаторов, работающих в различных диапазонах длин волн. При этом каждый из этих радиолокаторов будет перекрывать свой интервал высот. Радиолокаторы, предназначенные для измерения

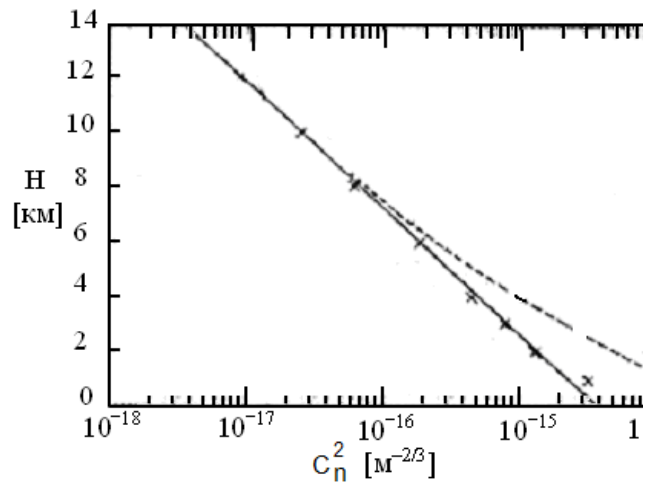


Рис. 2. Изменения с высотой средних значений структурного параметра C_n^2 .

В атмосфере практически нет областей, рассеивающие структуры которых совпадали бы с моделью распределенной множественной или одиночной точечной цели (см. Рис. 1). Однако, радиолокационные данные интерпретируются как отражения от однородной изотропной турбулентности с целью оценки её интенсивности в терминах параметра C_n^2 .

параметров радиоэхо в пограничном слое атмосферы, могут работать в 8 мм или коротковолновой части сантиметрового диапазона [4, 8, 9]; для измерения ветра до высоты 8-10 км - в дециметровом диапазоне, а до высоты 20-25 км - в длинноволновой области дециметрового или метровом диапазоне [3, 5, 7].

Анализ материалов, полученных в странах Западной Европы для различных длин волн и условий безоблачной атмосферы в дециметровом и метровом диапазонах, однозначно указывает на то, что процессы формирования радиоэха значительно трансформируются с ростом высоты. На это указывает характер изменения мощности радиоэха при изменении угла визирования в угломестной плоскости (см. Рис. 2).

Обсуждение экспериментальных данных об угломестной зависимости мощности отраженного сигнала на разных высотах можно найти в [3, 5]. Кроме того, в этих работах представлены результаты сопоставления экспериментальных данных с расчетными в зависимости от угла визирования и высоты для различных моделей формирования отраженного сигнала. Показано, что отклонение угла визирования всего на $8-10^\circ$ может приводить к падению мощности на 20 дБ (см. Рис. 2). Это также указывает на существенное отличие модели отражающего объекта от модели однородной изотропной турбулентности, которая характеризуется параметром C_n^2 и для которой справедливо уравнение (2).

Заключение

Существенное изменение структуры радиоэха на различных высотах с целью повышения достоверности оценок требует применения сложных алгоритмов выбраковки данных. Разработка таких алгоритмов упрощается в случае использования многоволновых измерений. При этом – помимо новых возможностей оценки структуры рассеивающего объема, которые еще ждут своего глубокого изучения – появляется возможность «сшивать» данные, получаемые одновременно на различных длинах волн и на различных высотах. Такой способ определения профиля ветра позволяет существенно повысить достоверность данных, получаемых с использованием сети радиолокационного мониторинга, которые далее должны поступать в единый центр для окончательной обработки и сопоставления с данными радиозондирования и данными, получаемыми со спутников.

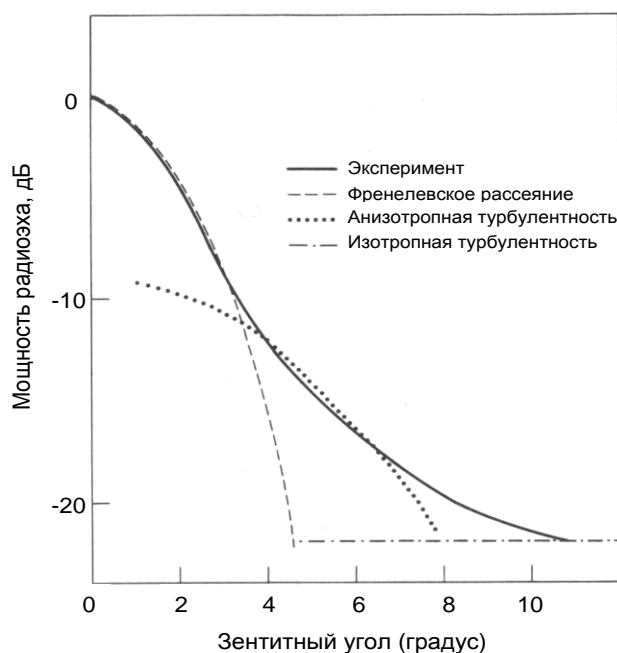


Рис. 3. Сравнение моделей формирования угломестной зависимости мощности радиоэха.

Сигнал, формируемый однородной изотропной турбулентностью, находится на уровне - 20дБ от максимума, возникновение которого можно, по-видимому, объяснить отражениями от слоистых неоднородностей. Таким образом, уменьшение длины волны зондирования должно привести к уменьшению роли «слоистой составляющей» в сигнале и увеличению «турбулентной составляющей». Увеличение предельной высоты зондирования по «турбулентной составляющей» требует увеличения энергетического потенциала используемых ветровых профайлеров и применения специальных методов обработки

Литература

1. A.W.Friend, 1949: «Theory and practice of troposphere sounding by radar». Proc. IEEE 37, 166-138.
2. Горелик А.Г., Мельничук Ю.В., Черников А.А. «Связь статических характеристик радиолокационного сигнала с динамическими процессами и микроструктурой метеорообъектов». Труды ЦАО. 1963. вып. 48, с.29-36
3. D.Atlas «Radar in Meteorology». Battan memorial and 40-th Anniversary Radar Meteorology conference Met. Soc. Boston 1990.
4. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. «Доплеровская томография в метеорологии». Изв. АН СССР. ФАО. 1990, №1, с.47-54.
5. «Wind Profiler Assessment Report and Recommendations for future use». NOAA. 1994.
6. Горелик А.Г. Доплеровская радиолокация в метеорологии. - М.: МГАПИ, 1996.
7. E.E.Gossard, R.G.Strauch. «Radar Observation Clear Air and Clouds». Elsevier Amsterdam-Oxford-New York, 1983.
8. Горелик А.Г., Черников А.А. «Некоторые результаты радиолокационного исследования структуры поля ветра на высотах 50-700 м.» Тр.ЦАО, вып.57, 1964.
9. Горелик А.Г., Пацаева В.А. «Измерение ветра в пограничном слое по радиолокационным отражениям от «ясного неба»». Метеорология и Гидрология, №3, 1967.
10. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Щукин Г. Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы. Учёные записки РГГМУ, №18, 2011. с. 70-89
11. Atlas, D., D. Rosenfeld, and A.R. Jameson, 1997: Evolution of Radar Rainfall Measurement: Steps and Mis-steps. Weather Radar Technology for Water Resources Management (eds. B. Braga and O. Massambani) UNESCO Press, Montevideo, Chapter 1, pp.1-60. <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/radar/art01.html>
12. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф. Радиолокационные измерения в метеорологии. Мир измерений, 7, 2009 - с. 7-14
13. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф. Рассеяние радиоволн разреженной средой и статистическая радиометеорология. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 137, 2006.