

УДК 621.396.96

DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-28-40

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЯСНОГО НЕБА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

**В.В. Стерлядкин¹,
К.В. Куликовский^{1,@},
В.М. Калмыков²,
Д.В. Ермилов²**

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²АО "Центральное конструкторское бюро аппаратостроения", г. Тула 300034, Россия

@Автор для переписки, e-mail: constantinkk@mail.ru

Рассмотрена тонкая структура и условия возникновения радиолокационных отражений от безоблачной атмосферы в различных метеорологических условиях и в разные времена года. Немногочисленные результаты исследований в миллиметровом диапазоне длин волн определяют важность и актуальность задач в этом направлении. Приведены результаты натурных измерений, выполненных с помощью радиолокатора 8 мм диапазона, в зависимости от условий эксперимента. Рассмотрены возможности предлагаемого программного обеспечения для обработки и анализа полученных данных, которые могут быть использованы при проектировании всепогодных малогабаритных метеорологических радиолокаторов различного назначения. Представлены параметры импульсно-когерентных доплеровских радиолокаторов 8 мм диапазона длин волн для измерения профилей ветра в широком диапазоне метеоусловий. Указаны режимы зондирования, методы обработки и накопления данных с помощью программного обеспечения, а также форма представления полученных результатов. Приведена методика восстановления профиля ветра по направлениям зондирования. Получены данные по радиолокационной отражаемости в ясном небе в различных метеорологических ситуациях. Отдельно обсуждаются особенности структуры доплеровских спектров в миллиметровом диапазоне длин волн при отражении от ясного неба.

Ключевые слова: дистанционное зондирование атмосферы, миллиметровый ветровой профайлер, отражения от ясного неба, радиолокационная отражаемость, K_a -диапазон длин волн.

FEATURES OF RADAR REFLECTIONS FROM THE CLEAR SKY IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

**V.V. Sterlyadkin¹,
K.V. Kulikovsky^{1,@},
V.M. Kalmykov²,
D.V. Ermilov²**

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula 300034, Russia

@Corresponding author e-mail: constantinkk@mail.ru

The fine structure and conditions for the occurrence of radar reflections from a cloudless atmosphere in various meteorological conditions and at different times of the year are considered. The few research results in the millimeter wavelength range determine the importance and relevance of the tasks in this area. The results of field measurements carried out using a radar of 8 mm wavelength range at different times of the year under various weather conditions are presented. The possibilities of the developed software for processing and analyzing the data are considered. The obtained data can be used in the design of all-weather small-sized weather radars for various purposes. The parameters of pulse Doppler radars of 8 mm wavelength range for measuring wind profiles in a wide range of weather conditions are presented. Sensing modes, methods for processing and accumulating data using software, as well as the form for presenting the results are indicated. The technique of wind profile recovery in the directions of sounding is considered. The data on radar reflectivity in a clear sky in various meteorological situations are given. Separately, the features of the structure of the Doppler spectra in the millimeter wavelength range when reflected from the clear sky are considered.

Keywords: Remote sensing of the atmosphere, millimeter wind profiler, reflections from clear sky, radar, K_a wave band.

В последние годы в мире наметилась тенденция уменьшения массы и габаритов метеорологических радиолокаторов за счет перехода к более коротким длинам волн и использования твердотельных комплектующих большой мощности [1–3]. В России перспективность перехода в миллиметровый диапазон длин волн обоснована уже в 2004 г., когда по заказу Министерства обороны был разработан ветровой профайлер 8 мм диапазона длин волн [4, 5].

В сложившейся мировой практике миллиметровый диапазон длин волн считался неперспективным и фактически не использовался [6, 7]. Предполагалось, что в ясную погоду, когда отсутствуют осадки и облака, в миллиметровом диапазоне будут слишком слабые отражения, поскольку сигнал в этих условиях формируется от флуктуаций показателя преломления. Нижний масштаб турбулентности на высотах выше 3 км превышает 10 см, поэтому береговые условия формирования отражений для миллиметровых волн становятся невозможными, и сигналы обратного рассеяния на этих высотах почти всегда отсутствуют [6]. Однако ситуация изменяется, если назначение профайлера – мониторинг пограничного слоя атмосферы (0–3000 м), где ветер наиболее изменчив, и нужен практически всем потребителям. В пограничном слое нижний масштаб неоднородностей составляет несколько миллиметров, поэтому формирование отражений в безоблачную погоду от турбулентных неоднородностей на длине волны 8 мм является вполне реальным. Кроме того, в соответствии с законом Рэлея в миллиметровом диапазоне (по сравнению с дециметровым) на несколько порядков возрастает отражаемость аэрозолей. Это обеспечивает преимущество миллиметрового профайлера при наличии любых аэрозолей [8–10]. Указанное свойство позволяет проводить ветровые измерения в миллиметровом диапазоне в любых сложных метеорологических условиях: в тумане, при наличии облаков и осадков, прохождении фронтов, при сильных ветрах [10–15].

Отметим также, что использование коротких длин волн в импульсно-когерентных РЛС приводит к нарастанию проблем, связанных с неоднозначностью измерения скорости и дальности, хотя эта задача может быть эффективно решена за счет специальной корреляционной обработки сигналов [13].

В 2010-е гг. был создан когерентный доплеровский радиолокатор 8 мм диапазона длин волн для измерения профилей ветра в широком диапазоне метеоусловий [4, 9]. Оказалось, что в средней полосе России радиолокационные отражения в нижнем 300–500-метровом слое атмосферы формируются в 70–80% случаев даже в отсутствие осадков или облаков [14]. Данный факт оказался неожиданным для специалистов.

Цель настоящей работы – представить и обсудить результаты эксплуатации РЛС в различных натурных условиях, причем особое внимание уделить уровням отражений от ясного неба (ОЯН), структуре сигналов и их спектров.

Технические характеристики профайлера, режимы зондирования и методы обработки сигналов

Линейка доплеровских ветровых профайлеров миллиметрового диапазона длин волн была разработана и создана в Центральном конструкторском бюро аппаратостроения (АО ЦКБА), г. Тула [9]. Типичные характеристики базового образца приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики ветрового профайлера

№ п/п	Диапазон высот, м	100–4200 (8400)
1	Диапазон измерения скорости ветра, м/с	0.3–50
2	Среднеквадратичная погрешность определения скорости ветра: а) при скорости ветра до 10 м/с, м/с б) при скорости ветра (V) более 10 м/с, м/с	< 0.7 <0.07V
3	Среднеквадратичная погрешность измерения направления ветра, град.	< 6
4	Частота излучения, ГГц	37
5	Длительность импульсов, мкс	0.4; 0.8
6	Разрешение по высоте, м	40
7	Потребляемая мощность, Вт	800
8	Масса аппаратуры радиолокатора, кг	125

Один цикл измерений профиля ветра заключается в проведении азимутального конического разреза под постоянным углом места $\beta = 45^\circ$ по 12 дискретным углам азимута через каждые 30° . Фиксированный угол места несколько снижает качество интерпретации метеорологических данных, однако упрощает процедуру измерения профиля ветра в автоматическом режиме. В каждом направлении происходит усреднение сигнала в течение 6 с. При длительности импульса 0.4 мкс разрешение по высоте составляет около 41 м. Диапазон высот, в котором производится зондирование, может изменяться от 4 до 8 км, а частота повторения изменяется от 25 до 12.5 кГц, соответственно. Обработку данных проводили с учетом уровня полученного сигнала с присвоением коэффициента достоверности каждому измерению. Это позволило повысить точность измерения параметров ветра в условиях слабых сигналов и различных уровней мощности, принимаемой с различных направлений зондирования.

В результате первичной обработки доплеровских сигналов в каждом направлении зондирования на выходе формируется матрица, представляющая собой набор доплеровских спектров для каждого дискретного значения высоты и для заданного направления

зондирования [16]. В каждом направлении зондирования получаем матрицу, состоящую из 200 уровней высоты и 512 значений доплеровского спектра для каждого уровня. На рис.1 представлен набор доплеровских спектров, полученных 15.06.2016 г. в 17:07 на полигоне ЦКБА г. Тула¹, для выбранной высоты $h = 984$ м для 4 направлений и фиксированном угле зондирования $\beta = 45^\circ$. Метеоусловия: ясное небо, температура у поверхности 29°C , влажность 41%.

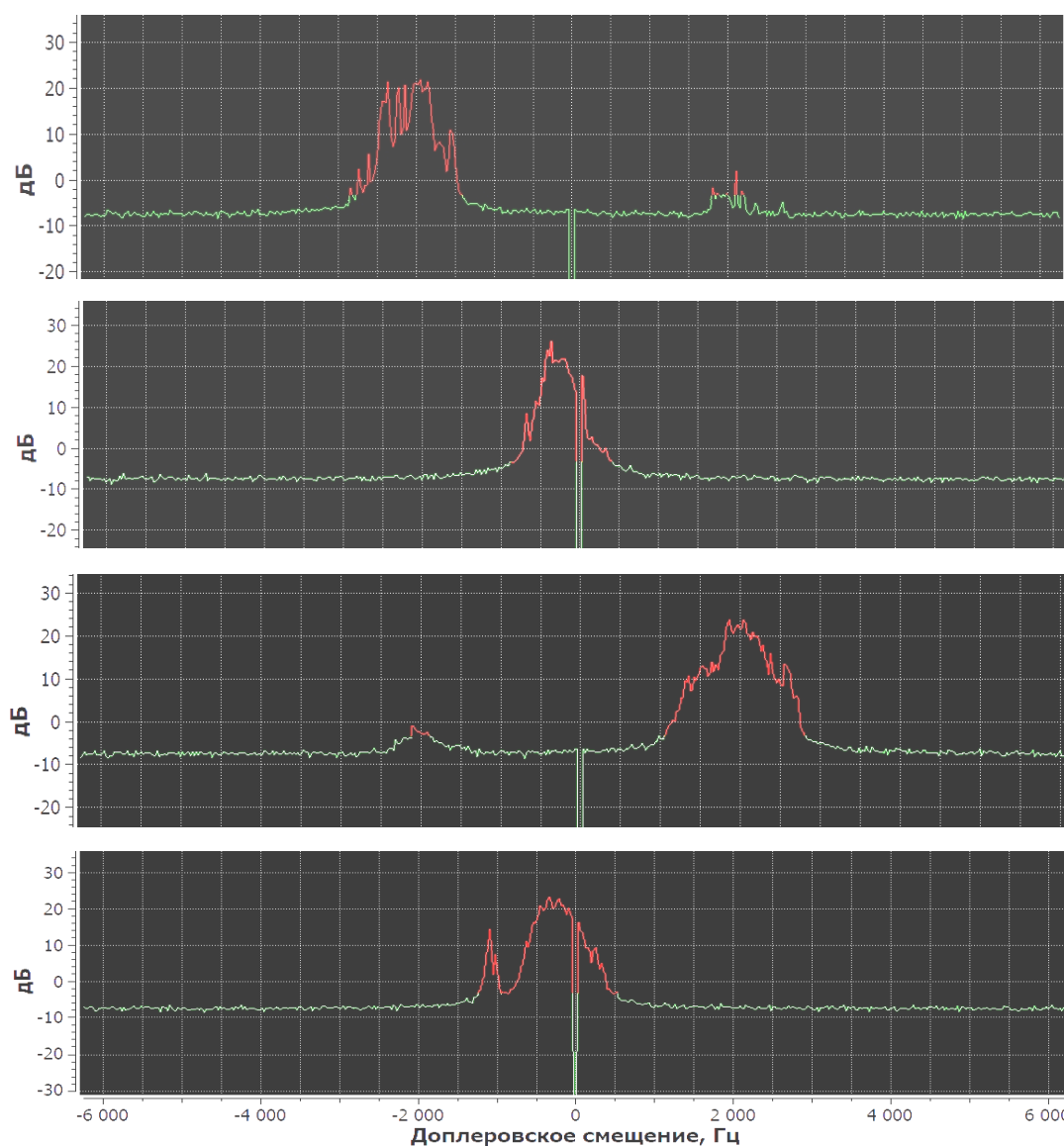


Рис. 1. Набор доплеровских спектров для 4 направлений на выбранной высоте $h = 984$ м, полученных 15.06.2016 г. в 17:07 на полигоне ЦКБА г. Тула.

Изображение исследуемого участка неба представлено на рис. 2. Фотографирование участка неба проводили с помощью видеокамеры, ось которой совпадала с направлением зондирования. На этих фотографиях видимый радиолокатором участок неба обозначен малым черным кружком в центре перекрестья. В поле зрения камеры намеренно установлен предмет для лучшей калибровки поля зрения.

¹Точное указание даты, времени и места эксперимента здесь и далее целесообразно с точки зрения согласования полученных данных с реальными метеоусловиями.

Следует отметить, что отражения от ясного неба формировались до высоты около 2500 м, при этом мощность сигнала была настолько велика, что превышала уровни сигналов от облаков, которые иногда попадали в луч радиолокатора.

Для интерпретации сигналов весьма полезными являются спектрограммы, представленные на рис. 3.

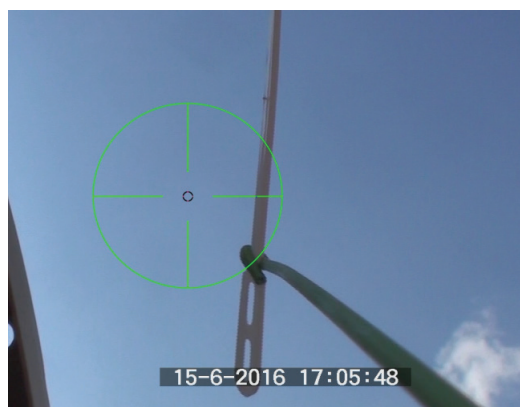


Рис. 2. Видеоизображение ясного неба, полученное 15.06.2016 г. в 17:07 на полигоне ЦКБА г. Тула.

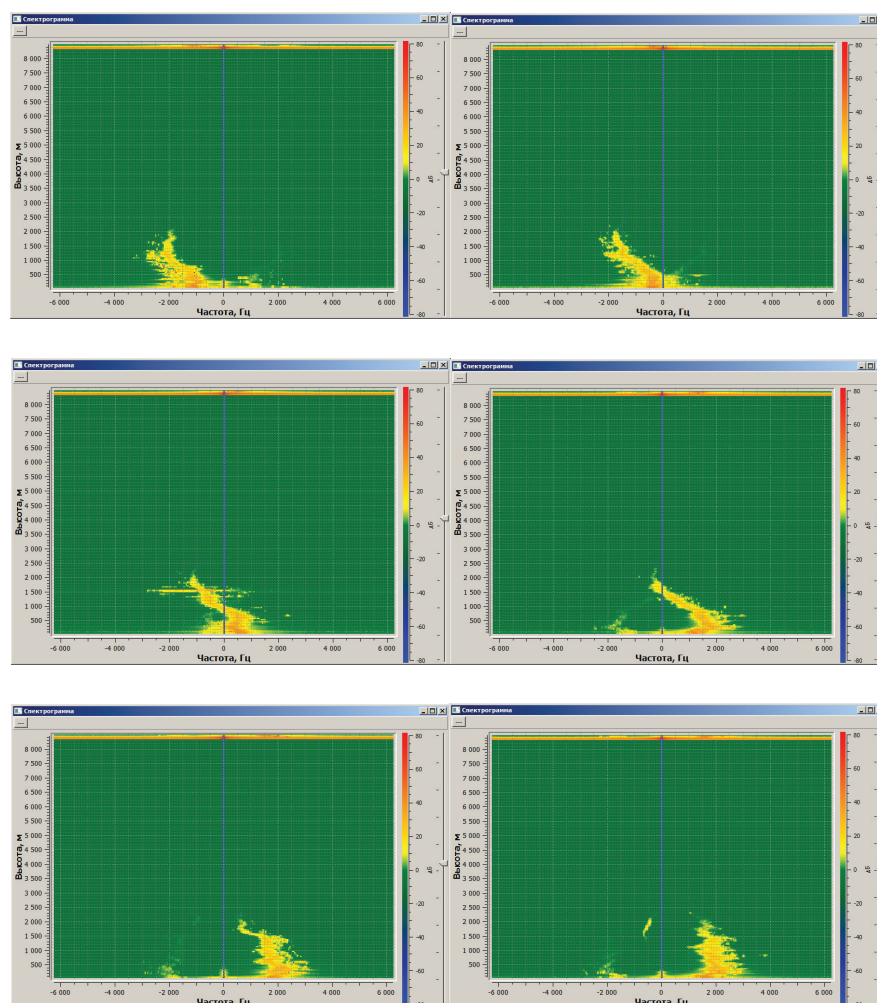


Рис. 3. Спектрограммы сигналов, полученные в различных направлениях зондирования.

Каждая из спектрограмм представляет собой матрицу доплеровских спектров, в которой горизонтальный уровень соответствует высоте, а спектральная плотность отмечена цветом для всего набора высот. Видно изменение положения спектра с изменением направления зондирования. Кроме того, спектрограммы позволяют наглядно показать ширину спектра, ее изменчивость по высоте и по направлению зондирования. Уровень сигнала на каждой из спектрограмм можно регулировать, что позволяет наблюдать как за слабыми, так и за очень мощными сигналами, которые формируются у поверхности Земли.

В результате программной обработки спектров для каждого из направлений зондирования формируется зависимость мощности принимаемого сигнала от высоты зондирования. На рис. 4 приведена типичная зависимость $P(H)$ для направления 3 (угол поворота по азимуту составляет 90° от начального направления зондирования). При этом полезным считается сигнал, который превышает уровень шумов на 4-5 дБ (ср. шум $+3\sigma_{\text{ш}}$). Данная зависимость может быть представлена в двух формах: первая – соответствует зависимости мощности сигнала, выраженной в дБ, от дальности (рис. 4); вторую – можно представить как зависимость радиолокационной отражаемости принимаемого сигнала от высоты. При этом радиолокационная отражаемость рассчитывается как произведение мощности на квадрат дальности [16].

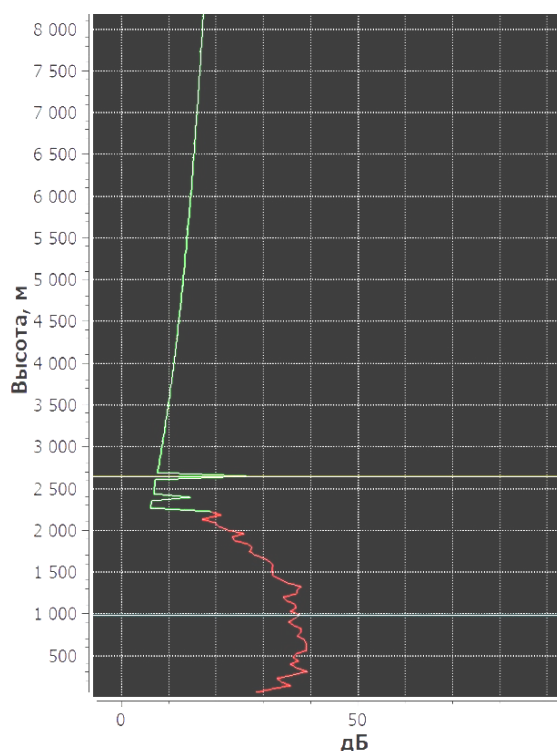


Рис. 4. Зависимость мощности сигнала от высоты зондирования.

Из рис. 4 видно, что превышение над шумами (минимальным уровнем сигнала) на высоте 1000 м составляет около 35 дБ. Ранее показано [4], что потенциал РЛС позволяет на дальности 1000 м регистрировать $Z_{\min}(H = 1 \text{ км}) = 3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^6/\text{м}^3$ ($Z_{\min} = -55 \text{ dBZ}$). С учетом последнего замечания уровень сигнала от ясного неба на высоте 1 км в рассмотренном случае составил $Z = -20 \text{ dBZ}$, т.е. $Z = 10^{-2} \text{ мм}^6/\text{м}^3$ (напомним, что температура у поверхности Земли составляла 29°C).

Получение метеоданных о ветровом профиле

Восстановление ветрового профиля проводили по методике [16]. Для каждого направления зондирования и каждого значения высоты из соответствующего доплеровского спектра регистрируется положение максимума доплеровского спектра, которое соответствует средней по объему зондирования проекции скорости рассеивателей. Данное значение можно отобразить на угловой диаграмме, которая представляет собой зависимость проекции скорости от направления зондирования. На рис. 5 в полярных координатах представлены значения проекций скорости рассеивателей для различных азимутальных направлений зондирования: слева – отображены модуль скорости, справа – значения проекций скорости с учетом знака. стрелка соответствует восстановленному вектору скорости на данной высоте.

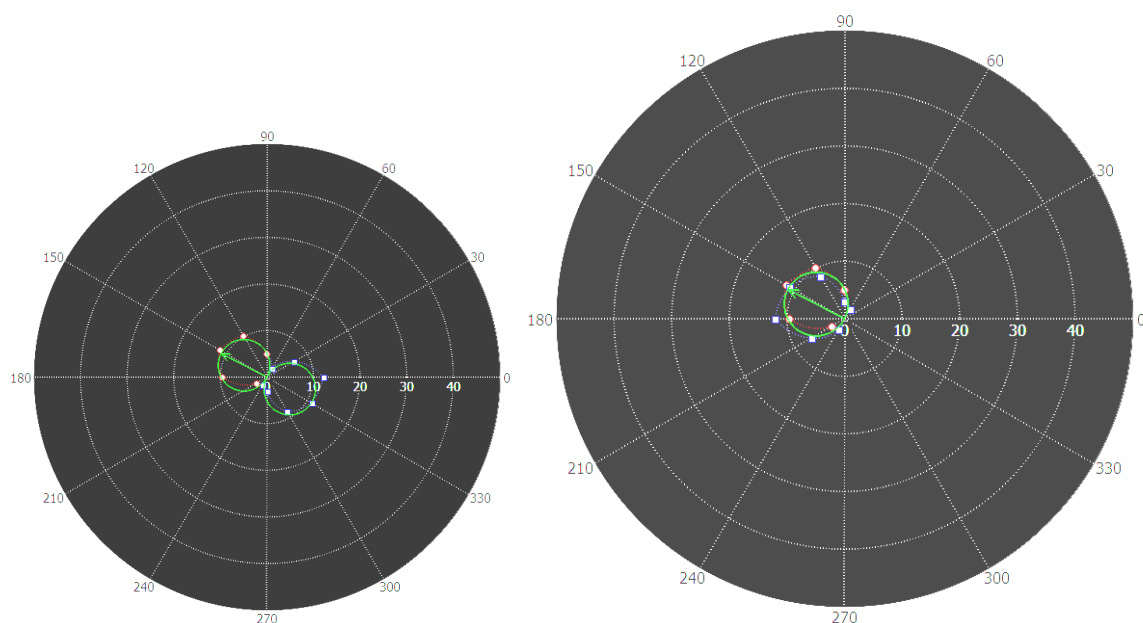


Рис. 5. Диаграмма проекций скорости для высоты 984 м при разных направлениях зондирования: слева – модуль проекций, справа – проекции с учетом знака; стрелка соответствует восстановленному вектору скорости на данной высоте.

В предположении горизонтальной однородности ветрового поля проекция скорости ветра на направление зондирования описывается соотношением (1):

$$V_{теор,i} = V_B \cos(\alpha_B - \alpha_i) \cos \beta_3 - V_z \sin \beta_3 \quad (1)$$

где V_B – модуль скорости ветра;

α_B – направление ветра;

α_i – направление зондирования;

β_3 – угол места;

V_z – скорость гравитационного падения рассеивателей.

Измеренные значения проекций отличаются от теоретических. Теоретическая кривая – это окружность в полярных координатах, которая опирается на диаметр, соответствующий скорости ветра. Направление этого диаметра отвечает азимуту ветра, а от-

клонение теоретической кривой от идеальной теоретической зависимости описывается с помощью невязки (2):

$$H(V_B, \alpha_B) = \sum_{i=1}^N [V_i - V_B \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_B) \cdot \cos(\beta) + V_r \cdot \sin(\beta)]^2 \cdot Dv_i \quad (2)$$

где N – число направлений зондирования (при полном обороте $N = 12$);

V_B, α_B – искомые параметры ветра, соответствующие минимуму невязки;

V_r – средняя скорость гравитационного падения частиц;

α_i, V_i – азимут зондирования и измеренные при этом значения проекции скорости ветра.

Минимизируя невязку по параметрам V_B, α_B, V_r , можно для каждой высоты определить скорость ветра, направление ветра и скорость гравитационного падения рассеивателей. На рис. 5 результат минимизации невязки представлен в виде окружности, которая опирается на вектор скорости ветра.

Интересен тот факт, что по отклонению измеренных проекций от идеальной окружности судят об интенсивности турбулентного движения и пульсациях скорости ветра на каждом высотном уровне.

В результате обработки и получения проекции скорости ветра на каждой высоте удастся получить профиль скорости ветра на различных высотах, а также направление ветра для соответствующих значений высот. На рис. 6 представлены профили ветра, полученные 15.06.2016 г.

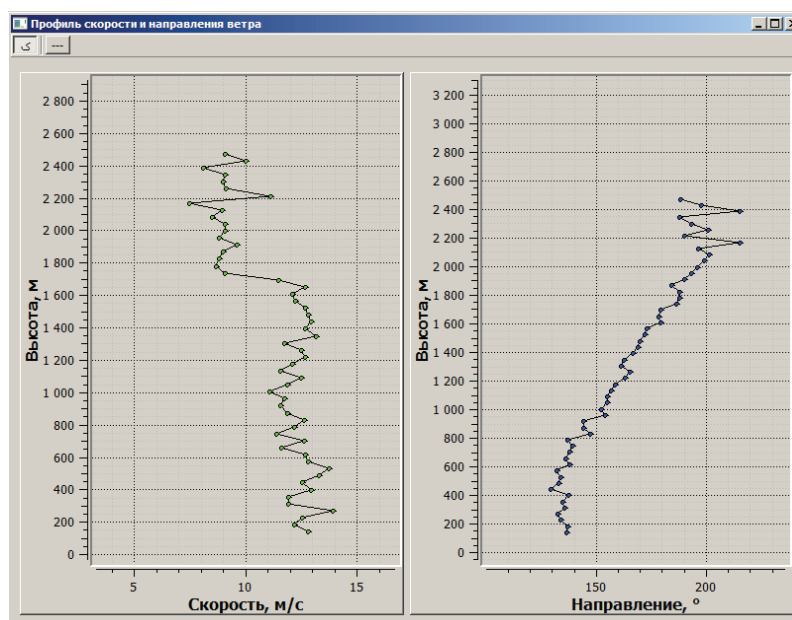


Рис. 6. Восстановленные профили скорости и направления ветра
15.06.2006 г., 17:07 мск.

Особенность структуры доплеровских спектров в миллиметровом диапазоне длин волн при отражении от ясного неба

Интерес представляют особенности формы доплеровских спектров в миллиметровом диапазоне, которые формируются отражениями от ясного неба. Формы доплеровских

спектров в логарифмическом масштабе по оси спектральной плотности, полученные в г. Тула в июне 2016 г. ($T_{\text{возд}} = 29^\circ\text{C}$), представлены на рис. 1, а на рис. 7 изображены два аналогичных спектра, полученные в ясном небе на космодроме Байконур 20 июня 2018 г. на высоте 1 км при температуре воздуха 25°C . Форма и мощность получаемых сигналов близки к сигналам на рис. 1. В летних условиях при температуре воздуха у Земли более 25°C сигналы от ясного неба формируются до высот свыше 2500 м.

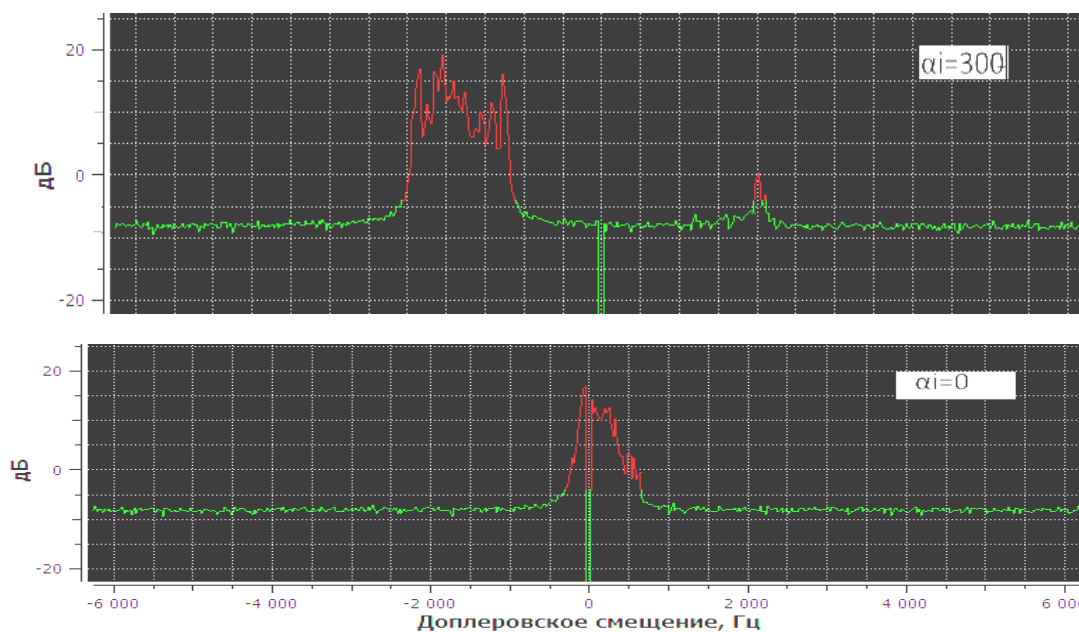


Рис. 7. Спектры, полученные на Байконуре 20.06.2018 г. на высоте 1 км, при направлениях зондирования вслед ветру при $\alpha_i = 3000$ и в поперечном направлении – при $\alpha_i = 00$.

При этом радиолокационная отражаемость Z на высоте 100–1500 м может превышать -20 dBZ . С увеличением высоты отражаемость снижается и на высотах свыше 2500 м становится меньше -48 dBZ и уже не регистрируется радиолокатором. Из формы спектров видно, что они имеют высокую изрезанность и много локальных экстремумов при большой ширине. Это в принципе обуславливается различными факторами: 1) значительной неоднородностью отражателей в пределах объема зондирования; 2) сильными восходящими и нисходящими потоками в пределах объема разрешения. При этом отражатели находятся в различных частях рассеивающего объема, и их скорости за счет вертикальных движений, из-за турбулентности и градиента ветра имеют различные значения проекции на направления зондирования, вследствие чего при сильной неоднородности спектр имеет многопиковую форму. Такая структура спектра усложняет интерпретацию и автоматическое определение проекции скорости на данной высоте и при данном направлении зондирования. Однако процедура восстановления профиля ветра опирается не на один спектр, а на набор из 12 спектров, полученных для данной высоты, и многопиковость спектра и погрешности, связанные с их обработкой, нивелируются при усреднении значения ветра в различных направлениях.

Дополнительно следует обратить внимание на ширину спектров вдоль и поперек направления ветра. Как на рис. 1, так и на рис. 7 ширина спектров вдоль направления ветра

(при больших значениях доплеровского сдвига) явно больше, чем ширина спектра при зондировании поперек ветра (при малых значениях доплеровского сдвига). Это соответствует известным свойствам параметров турбулентных пульсаций. Из разницы в ширине спектров теоретически можно извлечь информацию об интенсивности турбулентности.

В осенних условиях, при низкой температуре воздуха (и низкой абсолютной влажности) интенсивность отражений от ясного неба резко снижается. На рис. 8 представлены доплеровские спектры, полученные вблизи Обнинска 29 октября 2016 г. в отсутствие облаков и осадков ($T_{\text{возд}} = 2-8^\circ\text{C}$). Отражения наблюдали на высотах до 200–500 м в разное время суток. Радиолокационная отражаемость не была одинаковой на различных направлениях зондирования и не превышала -50 dBZ .

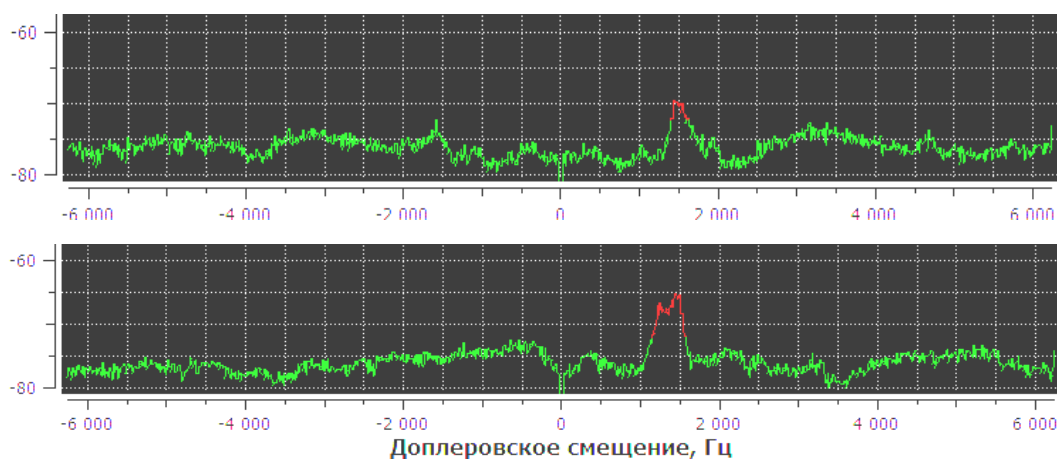


Рис. 8. Доплеровские спектры, полученные в условиях ясного неба в Обнинске 29.10.2016 г., 12:10 мск.

С уменьшением температуры и абсолютной влажности форма доплеровских спектров от ясного неба уже не изрезанная, что, по-видимому, связано с низкой интенсивностью вертикальных потоков и слабой турбулентностью. Отметим, что при температуре воздуха ниже 0°C отражения от неоднородностей плотности воздуха являются слабыми и практически не регистрируются. Однако при сильном ветре и/или наличии облачности, и/или осадков возникают радиолокационные отражения, и тогда ветровые измерения становятся возможными.

В заключение подчеркнем, что в летних условиях отражения от безоблачной атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн с помощью созданной РЛС можно зарегистрировать до высот свыше 2500 м. В некоторых случаях отражения от ясного неба достигают высот свыше 4000 м. Форма доплеровских спектров при этом имеет большую ширину и сильную изрезанность, что затрудняет обработку с целью определения профиля ветра. Радиолокационная отражаемость в летний период может превышать -20 dBZ , а в весенне-осенний и зимний периоды отражаемость и высота зондирования в условиях ясного неба снижается. При наличии облаков или осадков радиолокатор миллиметрового диапазона позволяет проводить измерения в любом типе облачности во всем слое облаков или осадков. Учитывая, что в средней полосе России облачность наблюдается более чем в 70% условий, работоспособность РЛС миллиметрового диапазона превысит этот уровень. По полученной нами статистике созданный радиолокатор 8-ми миллиметрового

диапазона позволяет получать ветровые данные в 70-80% случаев. Проведенная метеорологическая калибровка по объектам с известными радиофизическими характеристиками показала, что потенциал созданного профайлера позволяет на высоте 1 км регистрировать сигналы с радиолокационной отражаемостью на уровне $Z_{\min} = -55$ dBZ. Созданные ветровые профайлеры миллиметрового диапазона найдут применение для диагноза и предсказания опасных явлений, поскольку наилучшую работоспособность они имеют в сложных метеорологических условиях: при сильном ветре, тумане, облачности, выпадении осадков и приближении фронтов. Достоинством РЛС миллиметрового диапазона являются малые габариты и вес, высокая устойчивость к наводкам и сетям мобильной связи.

Литература:

1. Hamazu K., Hashiguchi H., Wakayama T., Matsuda T., Doviak R.J., Fukao S. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations // J. Atmos. Oceanic Technol. 2003. V. 20. P. 972–986.
2. Kollias P., Clothiaux E.E., Miller M.A., Albrecht B.A., Stephens G.L., Ackerman T.P. Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2007. V. 88. № 10. P. 1608–1624.
3. Lindholm T.A., Frazier E., Barron B., Blackburn G., Kessinger C., Delemarr M., Williams J.K. Demonstrating feasibility of tactical turbulence alerts // In: AMS 17th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 13.3.
4. Стерлядкин В.В., Кононов М.А. Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС миллиметрового диапазона длин волн // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 158. С. 52–59.
5. Стерлядкин В.В., Кононов М.А., Быковский С.С. Об оценке погрешностей измерений параметров профиля ветра, полученного методом круговых диаграмм и применением ИКР миллиметрового диапазона длин волн // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 176. С. 31–39.
6. Doviak R.J., Zrníc D.S. Doppler radar and weather observations: 2nd ed. Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 2006. 562 p.
7. Gossard E.E., Strauch R.G. Radar observations of clear air and clouds. Elsevier, 1983. 280 p.
8. Kropfli R.A., Kelly R.D. Meteorological research applications of MM-wave radar // Meteor. Atmos. Phys. 1996. V. 59. Iss. 1-2. P. 105–121.
9. Новые возможности для метеобеспечения // Арсенал. Военно-промышленное обозрение. 2010. Т. 5(23). С. 124–126.
10. Fang M., Doviak R.J., Melnikov V.M. Spectrum widths measured by WSR88D: Error sources and statistics of various weather phenomena // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. V. 21. P. 888–904.
11. Fang M., Doviak R.J. Coupled contributions in the Doppler radar SW equation // J. Atmos. Oceanic Technol. 2008. V. 25. P. 2245–2258.
12. Melnikov V., Straka J. Axis ratios and flutter angles of cloud ice particles: retrievals from radar data // J. Atmos. Oceanic Technol. 2013. V. 30. P. 1691–1703.
13. Lane T.P., Sharman R.D., Trier S.B., Fovell R.G., Williams J.K. Recent advances in the

understanding of near-cloud turbulence // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2012. V. 93. P. 499–515.

14. Al-Mommar S., Deierling W., Williams J.K. Examining in-cloud convective turbulence in relation to total lightning and the 3D wind field of severe thunderstorms // In: AMS 17th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 5.3.

15. Стерлядкин В.В., Стерлядкин А.В., Горелик А.Г., Коломиец С.Ф. Способ определения вертикального профиля концентрации газов в атмосфере: пат. 2510054 Росс. Федерация. № 2012145617/28. заявл. 26.10.2012; опубл. 20.03.2014. Бюл. № 8.

16. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В. Метеорологическая калибровка ветрового профайлера для космодрома Байконур // Сб. Международная научно-техническая конференция «Информатика и технологии. МНТК-ФТИ-2017», 2017. С. 633–636.

References:

1. Hamazu K., Hashiguchi H., Wakayama T., Matsuda T., Doviak R.J., Fukao S. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2003; 20: 972-986.

2. Kollias P., Clothiaux E.E., Miller M.A., Albrecht B.A., Stephens G.L., Ackerman T.P. Millimeter-wavelength radars: New frontier in atmospheric cloud and precipitation research. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2007; 88(10): 1608-1624.

3. Lindholm T.A., Frazier E., Barron B., Blackburn G., Kessinger C., Delemarr M., Williams J.K. Demonstrating feasibility of tactical turbulence alerts. In: AMS 17th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 13.3.

4. Sterlyadkin V.V., Kononov M.A. Calculation of potential and estimation of possibilities of a wind millimeter-wave meteorological radar. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* (Civil Aviation High Technologies). 2010; 158: 52-59. (in Russ.)

5. Sterlyadkin V.V., Kononov M.A., Bykovsky S.S. The accuracy of wind measurements by K-band Doppler meteo radar and VIA observation method. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* (Civil Aviation High Technologies). 2010; 176: 31-39.

6. Doviak R.J., Zrnić D.S. Doppler radar and weather observations: 2nd ed. Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 2006. 562 p.

7. Gossard E.E., Strauch R.G. Radar observations of clear air and clouds. Elsevier, 1983. 280 p.

8. Kropfli R.A., Kelly R.D. Meteorological research applications of MM-wave radar. *Meteor. Atmos. Phys.* 1996; 59(1-2): 105-121.

9. New opportunities for meteorological support. *Arsenal. Voenno-promyshlennoye obozreniye* (Arsenal. Military Industrial Review). 2010; 5(23): 124-126. (in Russ.)

10. Fang M., Doviak R.J., Melnikov V.M. Spectrum widths measured by WSR88D: Error sources and statistics of various weather phenomena. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2004; 21: 888-904.

11. Fang M., Doviak R.J. Coupled contributions in the Doppler radar SW equation. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2008; 25: 2245-2258.

12. Melnikov V., Straka J. Axis ratios and flutter angles of cloud ice particles: retrievals from radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2013; 30: 1691-1703.

13. Lane T.P., Sharman R.D., Trier S.B., Fovell R.G., Williams J.K. Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2012; 93: 499-515.

14. Al-Momar S., Deierling W., Williams J.K. Examining in-cloud convective turbulence in relation to total lightning and the 3D wind field of severe thunderstorms. In: AMS 17th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 5.3.

15. Sterlyadkin V.V., Sterlyadkin A.V., Gorelik A.G., Kolomiets S.F. The method for determining the vertical profile of the concentration of gases in the atmosphere. Patent RU 2510054; filled 10/26/2012; publ. 03/20/2014. (in Russ.)

16. Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V. Meteorological calibration of the wind profiler for the Baikonur cosmodrome. Int. Sci. Techn. Conf. «Informatics and Technology. MNTK-FTI-2017», 2017. P. 633-636. (in Russ.)

Об авторах:

Стерлядкин Виктор Вячеславович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Куликовский Константин Владимирович, аспирант кафедры физики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Калмыков Виктор Михайлович, начальник отдела АО «Центральное конструкторское бюро аппарато-строения» (300034, Россия, г. Тула, ул. Демонстрации, 36).

Ермилов Дмитрий Викторович, начальник сектора АО «Центральное конструкторское бюро аппарато-строения» (300034, Россия, г. Тула, ул. Демонстрации, 36).

About the authors:

Viktor V. Sterlyadkin, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Chair of Physics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Konstantin V. Kulikovskiy, Postgraduate Student, the Chair of Physics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Viktor M. Kalmykov, Head of the Department of the Central Design Bureau of Apparatus Engineering (36, Demonstratsii St., Tula, 300034, Russia).

Dmiriy V. Ermilov, Head of the Sector of the Central Design Bureau of Apparatus Engineering (36, Demonstratsii St., Tula, 300034, Russia).

Для цитирования: Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Калмыков В.М., Ермилов Д.В. Радиолокационные отражения от ясного неба в миллиметровом диапазоне длин волн // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 28–40. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-28-40

For citation: Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V., Kalmykov V.M., Ermilov D.V. Features of radar reflections from the clear sky in the millimeter wavelength range. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 28-40. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-28-40