

## Ветровой профайлер К<sub>а</sub> диапазона. Результаты сравнительных натуральных испытаний

В.В. Стерлядкин<sup>1</sup>, М.А. Кононов<sup>1</sup>, А.Н. Желтов<sup>1</sup>, А.Г. Горелик<sup>2</sup>, А.В. Прудывус<sup>3</sup>, А.В. Хомяков<sup>4</sup>, В.М. Калмыков<sup>4</sup>, Д.В. Ермилов<sup>4</sup>, М.А. Новицкий<sup>5</sup>, Н.Ф. Мазурин<sup>5</sup>, В.Н. Иванов<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Московский государственный университет приборостроения и информатики, (МГУПИ), 107996, Москва, ул. Стромынка, 20

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (МФТИ), 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9

<sup>3</sup> ФГУ «3 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации» (3 ЦНИИ МО РФ), 107564, г. Москва, пр. Погонный, д. 10

<sup>4</sup> ОАО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (ОАО ЦКБА), 300034, г. Тула, ул. Демонстрации, 3б

<sup>5</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»), 249038, г. Обнинск Калужской обл., ул. Победы, 4

e-mail address: sterlyadkin@mail.ru

*Обсуждаются достоинства и недостатки ветровых профайлеров 8 миллиметрового диапазона длин волн в сравнении с традиционными системами. Представлены результаты натуральных испытаний в г. Тула и сравнительных испытаний, проведённых вблизи высотной метеомачты в г. Обнинске. Обеспеченность измерений в 1000 метровом приземном слое составляет 82%, а максимальная высота зондирования достигает 7500м.*

*The advantages and disadvantages of 8 millimeter wind profilers in comparison with conventional systems are discussed. The results of field measurements in the Tula and the comparative tests conducted near the altitude meteorological tower in Obninsk are presented. The reliability of measure in the 1000m surface layer is 82%, and the maximum height sensing reaches 7500 m.*

Задачи дистанционного определения профиля ветра в атмосфере в любых погодных условиях является крайне важной для огромного числа потребителей. Сложность задачи ветрового зондирования заключается в том, что до настоящего времени нет надёжного решения этой проблемы. Список средств зондирования можно свести к 4 видам. Начнем с оптических систем — лидаров. Они хороши в ясную погоду, но не работают в тумане, осадках, облаках.[1-3]. Акустические измерители ветра - содары - имеют потолок около 800м и резко снижают работоспособность в осадках и при сильном ветре [4-6]. Третий вид - радиоакустические системы - сложны и имеют недостатки акустических систем [7,8]. Основой ветровых метеосетей в развитых странах являются профайлеры дециметрового и метрового диапазона длин волн. Их недостатками являются:

а) пропуск приземного слоя: нередко недоступна информация до высоты 300 - 400 м.

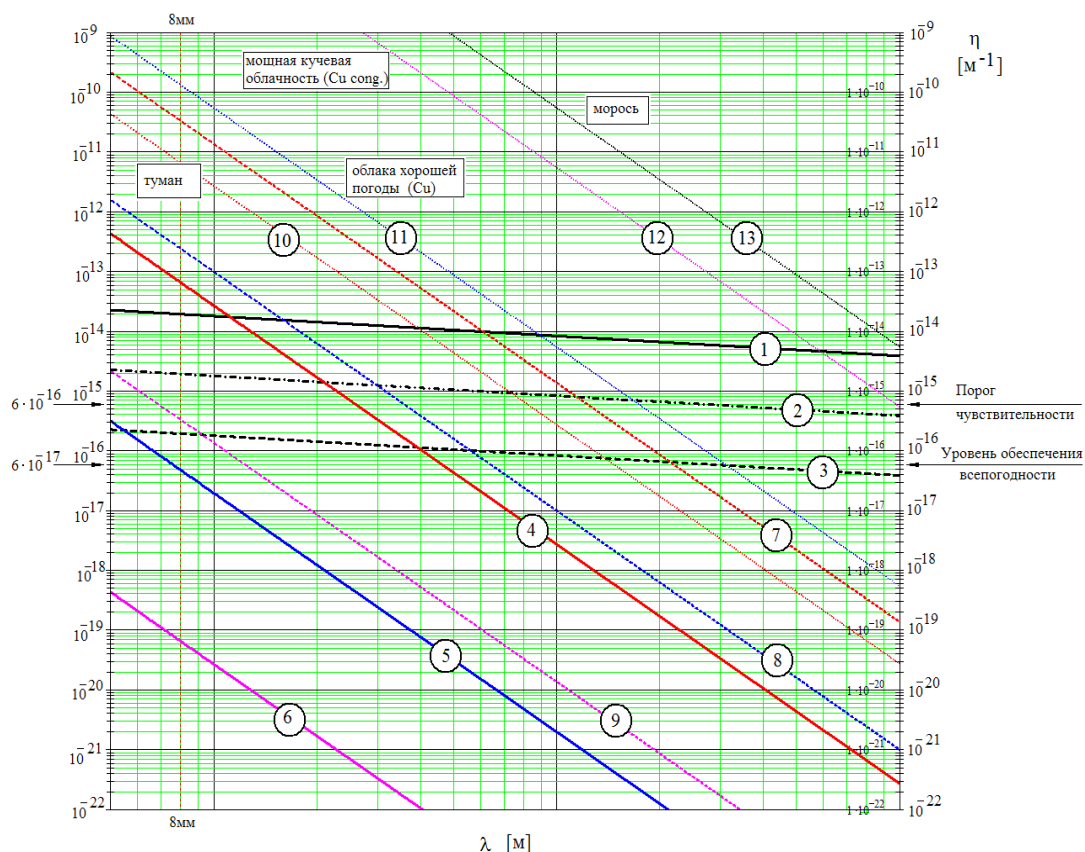
б) необходимость работы в удалении от населённых мест из-за высокого уровня помех от наземных движущихся объектов и сетей мобильной связи.

в) необходимость сверки получаемых данных с другими источниками информации из-за высокой вероятности ложных результатов [9,10].

В настоящей работе рассмотрены возможности импульсных доплеровских РЛС миллиметрового диапазона длин волн [11]. Приведены характеристики профайлера созданного в ЦКБА г.Тула по заказу Министерства обороны, обсуждаются результаты натуральных испытаний в различных погодных условиях. Особое внимание уделяется сравнительным испытаниям в Институте экспериментальной метеорологии (ФГБУ «НПО «Тайфун») г. Обнинск, где проводились сравнения результатов

радиолокационных измерений ветра с данными, полученными на 310 метровой метеовышке.

В сложившейся мировой практике миллиметровый диапазон длин волн считается неперспективным и фактически не используется. Действительно, если задача заключается в измерении ветра до высоты 5-10 км, или ещё выше, то миллиметровые волны не имеют перспектив. Причина - слабые отражения в ясную погоду, когда отсутствуют осадки и облака, а сигнал 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. Однако ситуация изменяется, если цель профайлера - пограничный слой атмосферы, где ветер наиболее изменчив и нужен практически всем потребителям, а также опасные метеоусловия, сопровождаемые облаками, осадками, умеренным или сильным ветром. В таких условиях миллиметровый диапазон является наиболее приемлемым и перспективным. Если оценить возрастание сигнала при переходе от традиционных 30 сантиметров к 8 мм по формуле Рэля  $D^6/\lambda^4$ , то мы получим выигрыш на 6 порядков. Рассмотрим рис. 1, на котором представлены графики радиолокационной отражаемости для различных источников формирования отраженных сигналов в зависимости от длины волны.



**Рис. 1.** Зависимости удельной радиолокационной отражаемости  $\eta$  от длины волны для различных метеобъектов: 1, 2, 3 – турбулентность с  $C_n^2=10^{-14}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-16}$  соответственно, 4, 5, 6 – для капли диаметром 100мкм, 30мкм, 10мкм соответственно с концентрацией 1 капля в м3, 7, 8, 9 – для концентрации 500 капель в м3 диаметром 100мкм, 30мкм, 10мкм соответственно, 10 – туман, 11 – облака хорошей погоды, 12 – мощная кучевая облачность, 13 – морозящий дождь.

На графике горизонтальной стрелкой показан порог чувствительности (регистрации сигнала) для рассматриваемого макета миллиметрового импульсно

когерентного радиолокатора, рассчитанный для дальности зондирования 1000м [12]. Из графиков видно, что в диапазоне 8 мм заметный вклад в отражённый сигнал начинают вносить аэрозольные частицы, которые почти всегда присутствуют в нижней атмосфере. Турбулентность средней и высокой интенсивности также может участвовать в формировании сигналов. Особую роль играют облака. Их отражаемость заметно превышает порог обнаружения почти для всех типов облаков. Это означает, что в миллиметровом диапазоне, велика вероятность получения сигналов в нижнем приземном слое атмосферы. Кроме того, почти все виды облаков формируют отраженный сигнал достаточного уровня и дадут информацию о ветре во всем слое облаков. Если учесть, что в средней полосе России "ясная" безоблачная погода составляет менее 30% времени, то миллиметровая РЛС будет работоспособна до высоты облаков в 70% случаев.

Наименее благоприятными с точки зрения обнаружения сигналов является безоблачная погода со слабым ветром. В этом случае высота зондирования может быть снижена до 200-300м, либо отражения не будет регистрироваться вовсе. Однако, эти метеоситуации довольно редки и не являются важными для потребителей. Наиболее значимой для большинства потребителей метеоинформацией являются ситуации, связанные с подходом или прохождением фронтов, когда присутствуют облака или осадки, наблюдается интенсивная турбулентность и возможны сдвиги ветра. В этих случаях достаточный для регистрации уровень сигналов возникает как за счёт турбулентности, так и за счёт крупного и среднего аэрозолей.

Анализ частоты появления различных метеоусловий в средней полосе России показывает, что работоспособность созданного 8 мм профайлера будет обеспечена в 83% времени. Выпадающие метеорологические ситуации соответствуют низкому уровню радиолокационной отражаемости, которые обычно связаны с безветренной ясной и стабильной погодой, которая не является опасной и не является важной для большинства потребителей.

Обратимся теперь к техническим характеристикам разработанного импульсно когерентного радиолокатора  $K_a$  диапазона. Основные параметры ветрового профайлера приведены в таблице 1.

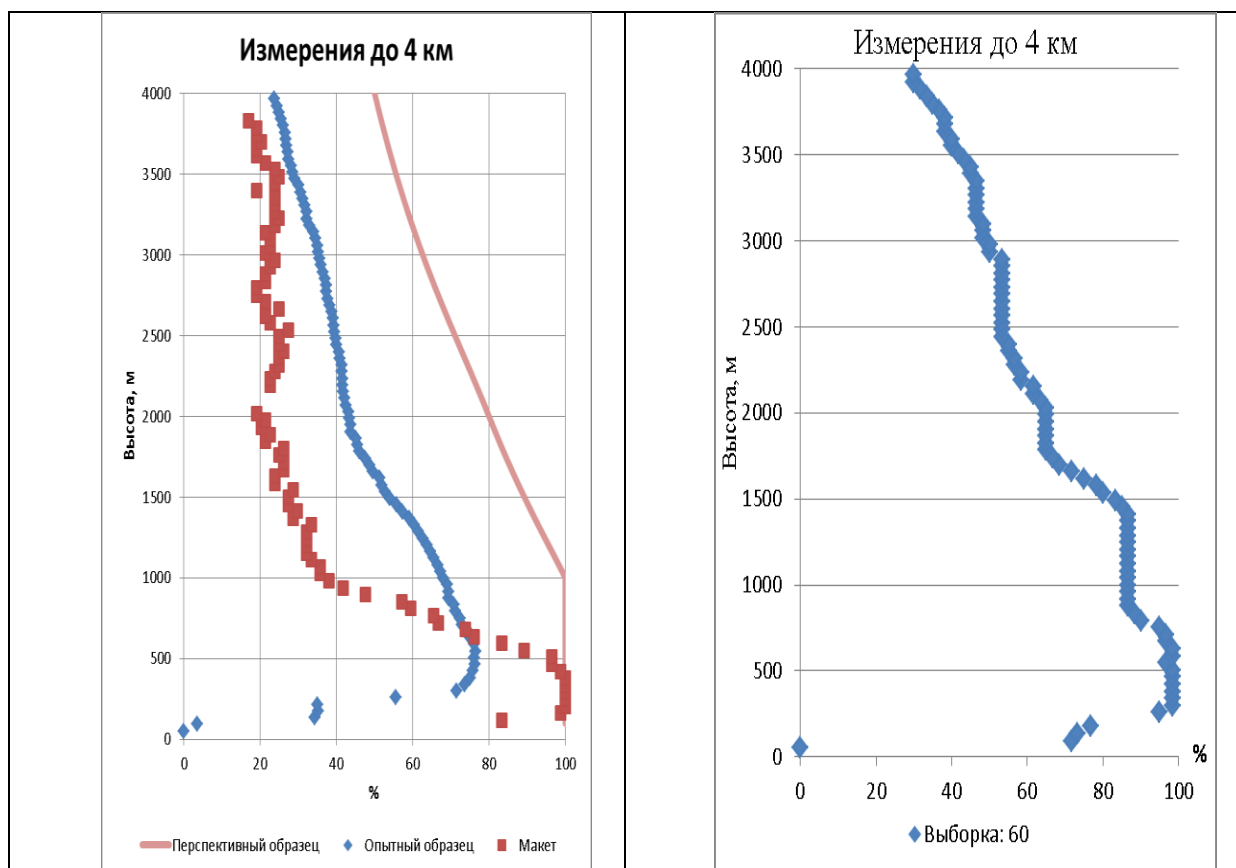
Таблица 1.

• Диапазон высот измерения профиля ветра, м	100 – 4000 (8000)
• Диапазон измерения скорости ветра, м/с	0,3 - 50
• 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
• Среднеквадратичная погрешность измерения направления ветра, град.	< 6
• Потребляемая мощность, Вт	< 800
• Масса аппаратуры метеокомплекса, кг	140
• Время подготовки к работе, мин.	3
• назначенный ресурс работы аппаратуры, циклов	>20000
• назначенный срок службы аппаратуры, лет	>15

Идеология построения ветрового профайлера, методика измерений и алгоритмы программного обеспечения были разработаны МГУПИ [12-14]. Макет изделия, опытные образцы и программное обеспечение изготавливались в ЦКБА г. Тула.

Натурные испытания макетного образца РЛС, которые проводились в Туле, в целом подтвердили ожидания разработчиков. На рис. 2 красным цветом показана

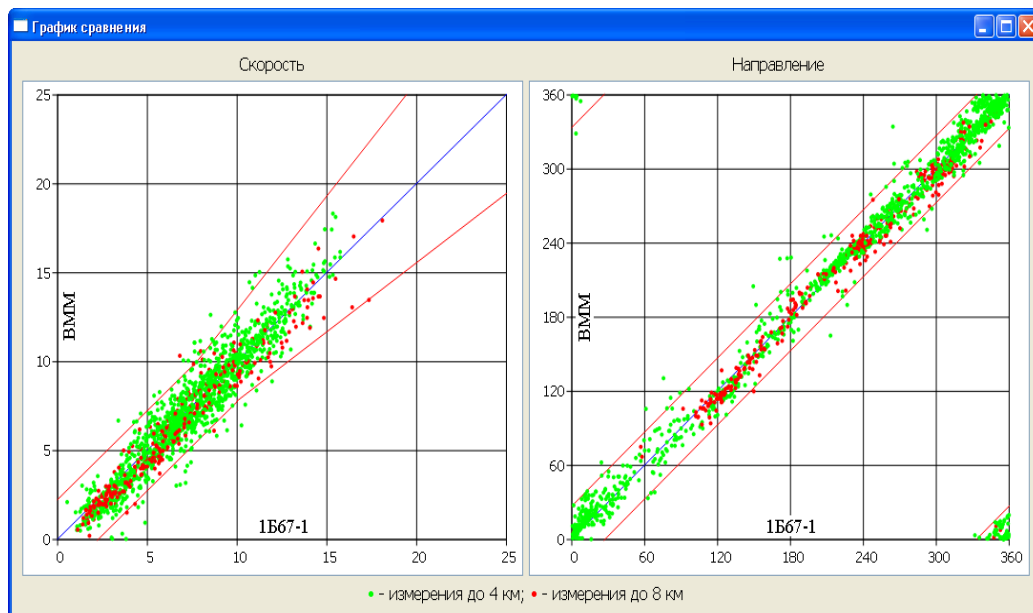
вероятность получения радиолокационной информации о вертикальном профиле ветра в зависимости от высоты, полученная с помощью макета РЛС в летний период. На том же рисунке 2 синим цветом показана вероятность получения сигналов на различных высотах для опытного образца РЛС, который имел несколько худшие по сравнению с макетом параметры. Статистический объем данных составлял более 1760 циклов измерений и получен в процессе проведения сравнительных натуральных испытаний на базе ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск в различные сезоны 2011 года.



**Рис.2. Красные прямоугольники – статистика (в %) надежности регистрации сигналов на разных высотах, полученная на макетном образце РЛС в летний период. Синие ромбы- статистика, полученная для опытного образца во все сезоны 2011 года. Сплошная линия - ожидаемая статистика для перспективного изделия.**

**Рис.3. Надежность получения данных в случае выпадения осадков.**

На рис.4 представлены результаты сравнения данных 8 мм профайлера с данными, полученными на близко расположенной метеомачте, которые проводились на базе Института экспериментальной метеорологии (ФГБУ «НПО «Тайфун» г. Обнинск). По результатам испытаний получено, что среднеквадратичное различие по измеряемым скоростям ветра составило менее 1 м/с, а расхождение по направлению ветра не превышало 6 градусов.



**Рис.4. Сравнение данных о скорости и направлении ветра, полученных на высотной метеомачте и с помощью 8 мм ветрового профайлера.**

Следует отметить, что в данный график не вошли данные, при которых наблюдалась сильная временная и пространственная изменчивость ветра. Эти ситуации обычно были связаны с прохождением фронта. Причина такой обработки - в некоторой удаленности пункта радиолокационного зондирования от метеомачты, что проводило к некорректности сравнения данных, полученных в различных объемах пространства.

В заключение отметим, что проведенные натурные испытания показали работоспособность и эффективность ветрового профайлера миллиметрового диапазона длин волн. Испытания показали высокую надежность измерений в сложных погодных условиях, при прохождении фронтов, при наличии облачности, среднего и сильного ветра. В то же время для повышения надежности измерений в ясную тихую погоду требуется повышение потенциала РЛС. Несомненными достоинствами созданного миллиметрового профайлера являются его малые габариты и низкое энергопотребление, высокая помехоустойчивость измерений, связанная с малым уровнем боковых лепестков, а также возможность проведения измерений в нижнем слое атмосферы, начиная от высоты 50-100 м..

### Литература

1. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинамирование. М.: Наука. 1985. 288с.
2. Frehlich R.G., Kavaya M.J. Coherent laser radar performance for general atmospheric turbulence // Applied Optics. 1991. V. 30. P. 5325-5337.
3. Henderson S.W., Hale C.P., Magee J.R., Kavaya M.J., Huffaker A.V. Eye-safe coherent laser radar system at 2  $\mu$ m using Tm. Ho: YAG lasers // Optics Letters. 1991. V. 16. P. 773–775.
4. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя.// 2001, Томск, СО РАН, с.280.
5. Новицкий М.А., Н.Ф. Мазурин, Л.К. Кулижникова, О.Ю. Калинчева, Л.А. Терев, Д.Р. Нечаев, В. Л. Сапронов. Сравнение данных измерений ветра при помощи выпускаемого промышленностью содара и Высотной метеорологической мачты в Обнинске. Метеорология и гидрология, 2011, № 10, с.74-83.
6. Finkelstein, P.L., J.C. Kaimal, J.E. Gaynor, M.E. Graves, and T.J. Lockhart, 1986: Comparison of wind monitoring system, part II. Doppler SODARs. J. Atmos. Ocean

Technol., **3**, 594-604.

7. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва, Наука, 1985, с.198.

8. Strauch, R.G., K.P. Moran, P.T. May, A.J. Bedard, and W.L. Ecklund, 1988: RASS temperature sounding techniques. NOAA Tech. Memo, ERL WPL-158.

9. Barth, M., Chadvik, R., Van de Kamp, D., Data processing algorithms, used by NOAA's wind profiler demonstration network, Ann. Geophys., 12, 518-528, 1994.

10. Schlatter, T.V., and (Editors), F.S.Z., Wind profiler assessment report, Tech report NOAA, U.S. Dept. of Commerce, Silver Spring, MD, available from NOAA Forecast Systems Laboratory, 325 Broadway, Boulder, CO, 80303, 1994.

11. Новые возможности для метеообеспечения. Арсенал. Военно-промышленное обозрение. 5, (23) 2010, 124-126.

12. Стерлядкин В.В. Кононов М.А., Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС миллиметрового диапазона длин волн. Научный вестник МГТУГА, сер. Радиофизика и радиотехника, М., МГТУ ГА, № 158, 2010. с.52-59.

13. Кононов М.А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. «Малогобаритная доплеровская РЛС, обеспечивающая ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы». МГТУ ГА, 2010г. 178 с.

14. Стерлядкин В.В. Кононов М.А., Быковский. Оценка погрешности измерения профиля ветра методом круговых диаграмм с применением метеорологической радиолокационной станции миллиметрового диапазона длин волн. Научный вестник МГТУГА, сер. Радиотехника, № 176, 25-30