

## Оценка возможностей использования ветровой РЛС в условиях ясного неба

В.В. Стерлядкин, М.А. Кононов

ГОУВПО Московский Государственный Университет Приборостроения и Информатики  
107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20, e-mail: m.kononov79@mail.ru

*Рассматриваются результаты разработки ветровой РЛС, предназначенной для работы, как при наличии осадков, так и в условиях чистой безоблачной атмосферы. Определяются требования к энергетическому потенциалу, облику и параметрам импульсно-когерентного ветрового радиолокатора, а также дана оценка степени всепогодности созданной модели.*

*The results of design of wind radar, operating under participations, clouds and clean air conditions are considered. The main parameters of a pulse Doppler radar, power potential and al., level of all weather measurements are estimated.*

Радиолокационные средства измерения профиля ветра известны достаточно давно. Однако они, впрочем, как и традиционные средства, имеют ограниченные возможности практического применения. Особую трудность представляют радиолокационные измерения ветра нижнего слоя атмосферы в условиях слабой отражаемости, которые характерны для чистой безоблачной атмосферы. Научной группой МГУПИ в последние годы большое внимание уделяется исследованию возможности использования высокопотенциальных РЛС миллиметрового диапазона длин волн для получения оперативных данных о поле ветра в пограничном слое атмосферы.

Рассмотрим сформированные в результате длительной работы над проблемой требования к потенциалу, облику и параметрам РЛС, работающей в импульсном когерентном режиме, с обеспечением высоты зондирования не менее 1000м в условиях слабых отражений – при чистой безоблачной атмосфере. Регистрация отраженных сигналов, пригодных для извлечения ветровой информации, в условиях “ясного неба” означает переход к практически всепогодным ветровым измерениям, что, безусловно, является важной метеорологической задачей.

Для обоснования облика метеорологической РЛС целесообразно использовать уравнение метеорологической радиолокации в следующем виде [1]:

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_p \cdot h \cdot \eta}{4 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot K_3 \cdot K_1 \cdot \rho^2 \quad (1)$$

где  $P_t$  и  $P_r$  – мощность (энергия) излученного и принятого сигнала соответственно [Вт];

$\eta$  – удельная радиолокационная отражаемость, [м<sup>-1</sup>];

$A_p$  – эффективная площадь апертуры антенны [м<sup>2</sup>];

$L$  – расстояние от радиолокатора до метеообъекта [м];

$K_3$  – фактор, учитывающий заполнение луча рассеивателями;

$\rho$  – пропускание атмосферы на трассе распространения;

$K_1$  – некоторый коэффициент, учитывающий параметры цели;

$h$  – пространственная протяженность зондирующего импульса ( $h=0.5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}}$ );

$\tau_{\text{имп}}$  – длительность зондирующего импульса.

Рассмотрим диапазон длин волн, который можно использовать при решении поставленной задачи, и обоснуем оптимальное значение рабочей длины волны. Важным представляется рассмотрение зависимостей каждого из параметров уравнения (1) от длины волны  $\lambda$ . Начнем рассмотрение с наиболее важного параметра – удельной радиолокационной отражаемости  $\eta$ .

Можно показать, что радиолокационные измерения ветра в осадках не представляют сложной задачи, поскольку удельная радиолокационная отражаемость  $\eta$  в осадках достаточно велика и регистрация сигналов не представляет особых трудностей. Наиболее сложным и проблемным является регистрация отраженных сигналов при отсутствии осадков и в ясную безоблачную погоду. Исследования показывают, что в условиях “ясного неба” основными источниками отражений являются неоднородности показателя преломления, обусловленные турбулизированностью атмосферы, и аэрозольные частицы, которые всегда присутствуют в атмосфере. Кроме того, в отсутствие осадков нередко наблюдаются облачные образования. Т.о. для оценки величины удельной отражаемости  $\eta$  следует рассмотреть все три источника отражений. Если рассеяние происходит на флуктуациях показателя преломления воздуха, обусловленных изотропной турбулентностью, то связь между удельной радиолокационной отражаемостью  $\eta$  и  $C_n^2$  описывается соотношением [1]:

$$\eta_1 = 0.38 \cdot C_n^2 \cdot \lambda^{-\frac{1}{3}}, \quad [M^{-1}] \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны, на которой ведется зондирование,  
 $C_n^2$  – параметр, характеризующий интенсивность турбулентности.

Отметим, что при сильной турбулентности значения  $C_n^2$  составляют  $10^{-14}$  [ $M^{-2/3}$ ] и более, при средней  $C_n^2 = 10^{-15}$  и слабой  $C_n^2 = 10^{-17} \dots 10^{-16}$  [ $M^{-2/3}$ ].

Второй источник отражений от “ясного неба” – аэрозольные частицы, которые можно условно разделить на капельный и сухой аэрозоль (пыль), а также ледяные кристаллы. Ввиду малого размера аэрозоля по отношению к длине волны  $\lambda$  имеет место рэлеевский механизм рассеяния, который описывается выражением [1]:

$$\eta_2 \approx \frac{d^6}{\lambda^4} \cdot |K_w|^2 \cdot \beta, \quad [M^{-1}] \quad (3)$$

где  $|K_w|^2$  – коэффициент, зависящий от  $\lambda$  (для водных капель  $|K_w|^2 = 0.75 \div 0.95$ , для сухого льда  $|K_w|^2 = 0.2$ );  $d$  – характерный размер отражателя (диаметр капли), [мм];  
 $\beta$  – специальный коэффициент, учитывающий размерность величины  $d$  ( $\beta = 10^{-18}$ ).

Учет распределения капель по размерам приводит выражение (3) к его точному виду:

$$\eta_2 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot |K_w|^2 \cdot \beta \cdot Z, \quad [M^{-1}] \quad (4)$$

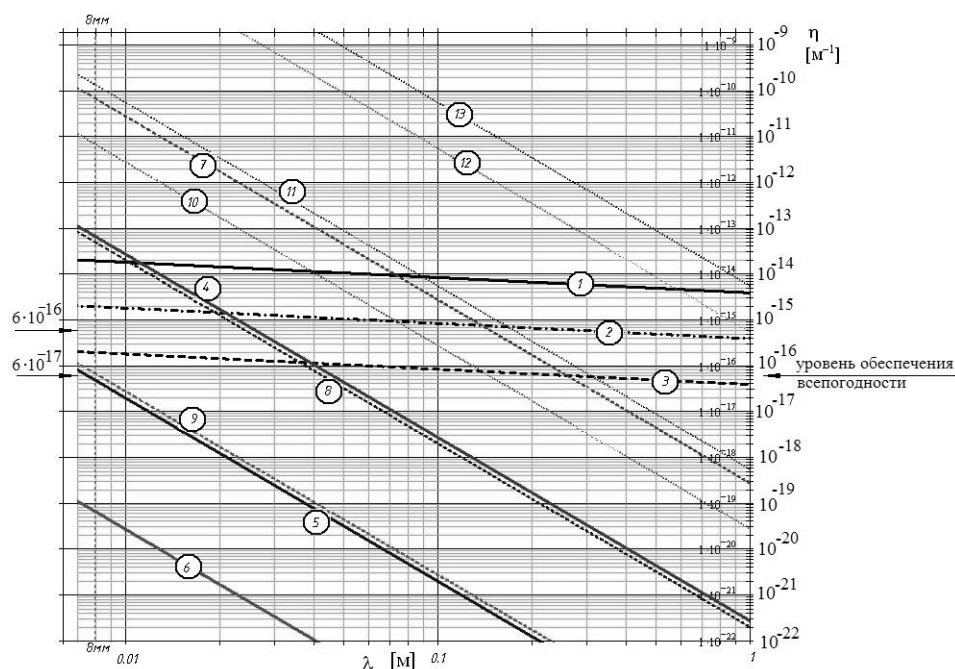
$$Z = \sum_i n(d_i) \cdot d_i^6$$

где  $Z$  – радиолокационная отражаемость;  $n(d)$  – распределение капель по размеру.

На рисунке 1 представлена зависимость  $\eta(\lambda)$  для различных метеообразований, а именно для турбулентности с интенсивностями  $C_n^2 = 10^{-16}$ ,  $= 10^{-15}$ ,  $= 10^{-14}$  [ $M^{-2/3}$ ], для капель диаметром 10мкм, 30мкм и 100мкм при концентрации одна капля в  $m^3$ , а также для капель тех же размеров при концентрации 1000 капель в  $m^3$ . На том же рисунке представлены уровни удельной радиолокационной отражаемости для различных облаков и слабых осадков. Из рисунка 1 видно, что практически любая облачность, осадки и аэрозоли дают уровни удельной отражаемости  $\eta$  значительно выше в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, чем в метровом и дециметровом диапазонах. Сигналы, обусловленные турбулентными флуктуациями показателя преломления, хотя и растут с укорочением длины волны, но в значительно меньшей степени. Отметим, что надежная регистрация сигналов от облаков неплохо обеспечивает получения оценки профиля ветра в облачном слое, поэтому целесообразно стремиться к регистрации облаков всех типов и аэрозольных частиц. Это возможно при использовании более коротких длин волн. Напомним, что удельная отражаемость  $\eta$  пропорциональна  $\lambda^{-4}$ . По этой

причине для обеспечения радиолокационных измерений как можно в более широком диапазоне метеоусловий нам представляется наиболее благоприятным верхний миллиметровый участок спектра в окрестности  $\lambda=8\text{мм}$ . Важным стимулом к использованию более коротких длин волн является также то, что с уменьшением длины волны  $\lambda$  уменьшаются дифракционные эффекты в антенной системе и снижается уровень боковых лепестков. Это позволяет уменьшить мертвую зону и повысить помехоустойчивость системы. Кроме того, при регистрации сигналов от таких объектов как аэрозоль необходимо уходить к коротким волнам в миллиметровый диапазон.

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай с точки зрения регистрации отраженных сигналов, а именно отсутствие осадков, облаков и аэрозолей. Поскольку крайне редки аэрозольные частицы размерами  $100\text{мкм}$  и более, то будем рассматривать отражения, вызванные только флуктуациями показателя преломления для атмосферы.

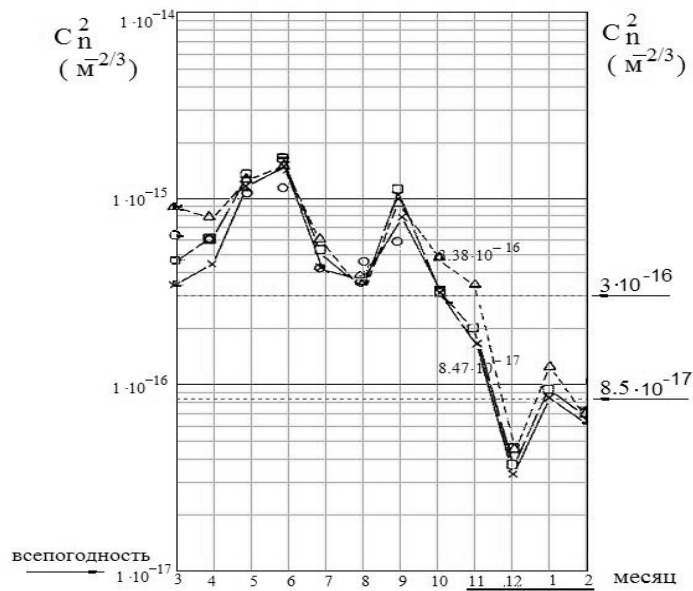


**Рис. 1.** Зависимости удельной радиолокационной отражаемости от длины волны для разных метеообъектов: (1, 2, 3 – турбулентность при  $C_n^2=10^{-14}, 10^{-15}, 10^{-16}$  соответственно, 4, 5, 6 – для капли диаметром  $100\text{мкм}, 30\text{мкм}, 10\text{мкм}$  соответственно с концентрацией 1 капля в  $\text{м}^3$ , 7, 8, 9 – то же для концентрации 1000 капель в  $\text{м}^3$ , 10 – туман, 11 – облака хорошей погоды, 12 – мощная кучевая облачность, 13 – морозящий дождь)

На рисунке 2 представлены данные об отражающих свойствах безоблачной атмосферы, полученные при помощи высокопотенциального непрерывного радиолокатора с  $\lambda=10\text{см}$  и ЛЧМ [2]. Этот радар, обладая высоким пространственным разрешением, был предназначен для исследования отражающих свойств нижних слоев атмосферы и ее связи с параметрами турбулентности. Измерения проводились круглосуточно и во все сезоны года вблизи города Boulder (США). Средняя величина  $C_n^2$  варьировалась от  $2 \cdot 10^{-15}$  до  $3 \cdot 10^{-17}$  [ $\text{м}^{-2/3}$ ]. Максимальные значения  $C_n^2$  были зарегистрированы в мае-июне, а минимальные в декабре-феврале. В течение суток также отмечались значительные изменения величины  $C_n^2$ , которая достигала максимальных значений днем, а минимальных в утренние часы.

Из рисунка 2 видно, что для обеспечения измерений в условиях “ясного неба” необходимо регистрировать отражения при слабой турбулентности с интенсивностью  $C_n^2=3 \cdot 10^{-17}$  [ $\text{м}^{-2/3}$ ]. Исходя из соотношения (2) это означает регистрацию сигнала при

удельной отражаемости  $\eta=6 \cdot 10^{-17} \text{ [м}^{-1}\text{]}$ . Таким образом, анализ радиолокационной отражаемости атмосферы в различных метеоусловиях показал, что для достижения практически всепогодной регистрации сигналов необходимо обеспечить надежное детектирование удельной радиолокационной отражаемости на уровне  $\eta=6 \cdot 10^{-17} \text{ [м}^{-1}\text{]}$ .



**Рис. 2. Сезонное изменение величины  $C_n^2$  по месяцам на различных высотах: [2]**  
 – 160м; ? – 480м; – 950м; – 1450м

Рассмотрим другой параметр в уравнении (1) на который влияет длина волны зондирования  $\lambda$ , а именно  $P_{\min}$  – минимальная мощность, регистрируемая РЛС. Очевидно, что она определяется уровнем шумов РЛС. В работе [3] показано, что мощность шумов при не слишком большом времени накопления сигнала почти не зависит от длины волны  $\lambda$ . В работе были рассчитаны параметры РЛС, необходимые для регистрации сигнала практически в любых погодных условиях. Были сделаны предположения о том, что шумовая температура приемной системы составляет около  $T_S=1200\text{К}$ , характерная ширина спектра полезного метеорологического сигнала оценена исходя из типичного разброса скоростей  $\Delta V \approx 0.5\text{м/с}$  (при  $\lambda=8\text{мм}$ , ширина полосы полезного сигнала составляет  $\Delta f=125\text{Гц}$ ). В наименее благоприятных метеоусловиях (“ясное небо”) целесообразно осуществлять накопление в течение примерно до 15мин ( $\approx 1000\text{с}$ ). С учетом всех возможных факторов, мощность шумов в полосе анализа составила величину  $P_S=2 \cdot 10^{-20}\text{Вт}$ . С учетом отношения сигнал/шум=2 получена оценка минимально обнаружимой мощности сигнала  $P_{\min}=4 \cdot 10^{-20}\text{Вт}$ .

Теперь выражение (1) можно записать в виде:

$$P_{\min} = \Pi \cdot \frac{\eta}{L^2} \cdot K_3 \cdot \rho^2 \quad (5)$$

где  $\Pi$  – потенциал радиолокатора, который определяется выражением:

$$\Pi = \frac{P_t \cdot A_p \cdot h}{4\pi} \cdot K_1 \quad (6)$$

Полагая, что рассеиватели полностью заполняют зондируемый объем ( $K_3=1$ ), и пренебрегая ослаблением по трассе ( $\rho=1$ ), для регистрации отраженного сигнала на уровне  $P_{\min}$  при удельной отражаемости  $\eta_{\min}=6 \cdot 10^{-17} \text{ [м}^{-1}\text{]}$  на дальности  $L=1000\text{м}$  необходимо обеспечить следующий потенциал  $\Pi=0.67 \cdot 10^3 \text{ [Вт} \cdot \text{м}^3\text{]}$ .

На основе соотношения (6) были оценены параметры радиолокатора, обеспечивающие требуемый потенциал. При этом сделаны следующие предположения: реальная

средняя излучаемая мощность  $P_t$  составляет около 25Вт, длительность импульса составляет  $\tau_{\text{имп}}=0.5\text{мкс}$ , пространственная протяженность импульса определяется уровнем  $h=75\text{м}$ ,  $K_1=1$ . Регулирующим параметром, подбором которого можно обеспечить требуемый потенциал, принята апертура антенны. Оценка эффективной площади апертуры антенны при условии полного заполнения луча рассеивателями определяется выражением [3]:

$$A_p = \frac{P \cdot 4\pi}{P_t \cdot h} \quad (7)$$

В соответствии в (7) необходимый размер эффективной площади апертуры составляет величину  $4.5\text{м}^2$ . С учетом эффективности использования площади антенны на уровне 0.7, получим, что геометрическая площадь антенны должна составлять  $A=6.5\text{м}^2$ . Это соответствует антенне с фактическим диаметром  $D=2.9\text{м}$ , что не укладывается в габаритные размеры проектируемой ветровой импульсно-когерентной РЛС.

Если реальный размер антенны при проектировании малогабаритной РЛС ограничен диаметром 1м, то потенциал, реализуемый РЛС, будет в 8.4 раза меньше, чем необходимо для регистрации сигнала в любых погодных условиях. Реализуемый потенциал соответствует регистрации удельной радиолокационной отражаемости на уровне  $\eta=6 \cdot 10^{-16}[\text{м}^{-1}]$ . Из соотношения (2) нетрудно получить, что данный уровень удельной радиолокационной отражаемости  $\eta$  соответствует параметру  $C_n^2=3 \cdot 10^{-16}[\text{м}^{-2/3}]$ . Если принять заданный уровень  $C_n^2$  за порог регистрации и отметить его на рисунке 2, то мы получим что с точки зрения регистрации турбулентности “слепым” периодом в году являются зимние месяцы с ноября по февраль. Однако даже в этот период не все так плохо, т.к. далеко не все дни являются полностью безоблачными, а любая облачность (см. рисунок 1) будет регистрироваться нашим радиолокатором. Регистрация ветра в нижнем слое атмосферы и в слое облачности позволяет с хорошей точностью восстановить весь профиль параметров ветра на основе полученных статистических априорных данных. Это замечание тем более справедливо, поскольку относится к метеоситуации со слабой турбулентностью и слабым ветром (самая стабильная ситуация). Очевидно, что в случае со слабым ветром такая аппроксимация обоснована и, следовательно, только дни с безоблачной атмосферой будут по-настоящему считаться “слепыми” для проектируемого радиолокатора.

По данным [3] с учетом статистических данных по осадкам и облачности на указанный период приходится 14.2 ясных дней, т.е. 3.9% всей длительности года. Остальной же период (96%) можно считать пригодным для эксплуатации системы за счет отсутствия облаков, осадков и аэрозольных образований в нижней приземной атмосфере. *Т.е. система измерения ветра на базе РЛС, обладающей указанными в настоящей работе параметрами, должна обеспечивать надежную регистрацию сигналов в 96% метеоситуаций в году.* Если же рассматривать зону  $H=250\text{м}$ , то в качестве порога применяем значение  $C_n^2=8.5 \cdot 10^{-17}$ . Данная граница отсекает только зимние месяцы (с декабря по февраль), на которых приходится 11.2 ясных дня (3% от года), т.е. в зоне  $H=250\text{м}$  обеспеченность работы станции составит 97%.

## Литература

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии, Л., Гидрометеиздат, 1978 – 343с.
2. Sekelsky S.M., Firda J.M., McIntosh R.E., Clothiaux E.E., Mace G.G. and Ackerman T.P. RCS-IOR millimeter-wave radar calibration and data intercomparison. Proc. of 5ARM science team meeting, San Diego, California, 1995
3. Кононов М.А., Стерлядкин В.В. Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС мм диапазона длин волн. / Научный вестник МГТУ ГА №158 / серия “Радиофизика и радиотехника”. – М.: МГТУ ГА. 2010г.