

# Дистанционное зондирование сред

УДК 551.501.8:551.509

## СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОН ПОВЫШЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ОЦЕНКИ ИХ ПАРАМЕТРОВ В ОБЛАКАХ

**Иванников Анатолий Петрович**

доктор технических наук, профессор;  
старший научный сотрудник АО «НПП «Полет»<sup>1</sup>.

**Иванников Дмитрий Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент;  
начальник отдела АО «НПО им. М.В.Фрунзе»<sup>2</sup>.

*E-mail:* otd24@niiem.ru.

**Измайлова Яна Алексеевна**

кандидат технических наук; начальник отдела научно-технической  
информации и управления интеллектуальной собственностью АО «НПП «Полет»<sup>1</sup>

*E-mail:* patent@npp-polyot.ru.

<sup>1</sup>Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, Комсомольская пл., 1.

<sup>2</sup>Адрес: 603009, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 174.

**Аннотация:** Зоны повышенной турбулентности являются фактором, определяющим образование и развитие облаков различных форм, атмосферных фронтов, циклонов и т.д. Они представляют особую опасность для полетов различных летательных аппаратов, нарушают связь, формируют смерчи, поэтому получение информации об интенсивности турбулентности, её пространственной и спектральной структурах в облаках различных форм, создание бортовых и наземных средств обнаружения и оценки параметров зон повышенной турбулентности является важной задачей. При анализе и систематизации радиолокационных исследований зон повышенной турбулентности в облаках и осадках необходимо учитывать особенности метеорологических объектов и влияние параметров метеорологических радаров, а также проводить анализ и более полно использовать признаки появления зон повышенной турбулентности в облаках и осадках. Для решения этой задачи предложен комплексный алгоритм обнаружения зон повышенной турбулентности и оценки их параметров в облаках метеорологическими радаром. Основу данного алгоритма составляет преобразование видеосигналов от двух импульсных объёмов облаков, разнесённых на время, равное выбранному масштабу турбулентности, в двух ортогональных каналах. Это позволило получить два уравнения, на базе которых синтезированы алгоритмы обнаружения и оценки нормированной ширины доплеровского спектра зон повышенной турбулентности, а также определения уровня мощности отражённых сигналов от облаков и их индикация.

**Ключевые слова:** зона повышенной турбулентности, пассивные помехи, видеосигнал, отражающая способность облаков, эффективная поверхность рассеяния (ЭПР).

### Введение

Зоны повышенной турбулентности являются фактором, определяющим образование и развитие облаков различных форм, атмосферных фронтов, циклонов [1]. Кроме того, они представляют особую опасность для полетов различных летательных аппаратов, нарушают связь, формируют смерчи и т.п. [1–3], поэтому

получение информации об интенсивности турбулентности, её пространственной и спектральной структурах в облаках различных форм, создание бортовых и наземных средств обнаружения и оценки параметров зон повышенной турбулентности является важной задачей.

При анализе и систематизации радиолокационных исследований зон повышенной турбу-

лентности в облаках и осадках необходимо учитывать особенности метеорологических объектов и влияние параметров метеорологических радаров, а также проводить анализ и более полно использовать признаки появления зон повышенной турбулентности в облаках и осадках.

Известно, что облака и осадки представляют собой систему из множества взвешенных (или выпадающих) пространственно распределённых гидрометеоров (капли, кристаллы и т.п.). Если размер их меньше, чем размер длин волн, то они рассеивают в так называемой рэлеевской области. Для распределённых целей эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) определяется соотношением [4]:

$$\sigma = V_{\tau} \eta, \tag{1}$$

где  $\eta$  – удельная отражающая способность облаков на единицу объема;  $V_{\tau}$  – импульсный объем;

$$\eta = \sum_{i=1}^N \eta_i, \tag{2}$$

где  $N$  – количество точечных отражателей в единице объема;  $\eta_i$  – значение удельной ЭПР  $i$ -го точечного отражателя,

$$V_{\tau} = \frac{c \tau_{\text{ф}}}{2} \pi \frac{\theta_{\alpha} \theta_{\beta} R^2}{4}, \tag{3}$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/сек – скорость распространения света;  $\tau_{\text{ф}}$  – длительность сигнала на выходе согласованного фильтра;  $\theta_{\alpha}$ ,  $\theta_{\beta}$  – диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места;  $R$  – расстояние до облака.

На рис. 1 приведён импульсный объём сигналов, отражённых от облака на расстоянии  $R_1$  и длительности импульсного объёма  $l_p$ .

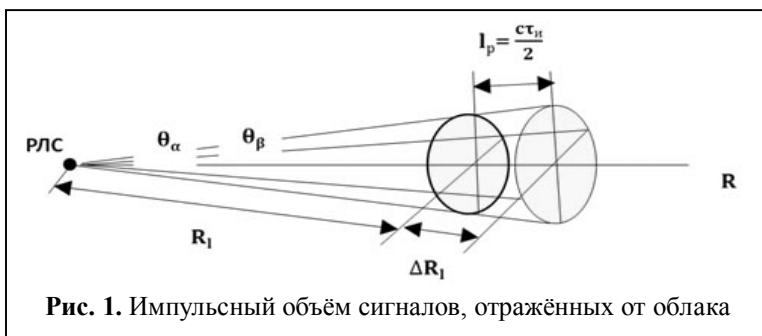


Рис. 1. Импульсный объём сигналов, отражённых от облака

В соответствии с соотношением (1) при анализе отражённых сигналов от облаков следует учитывать зависимость изменения импульсного объема  $V_{\tau}$ , а, следовательно, и эффективной отражающей поверхности, от расстояния  $R$  между радаром и облаком.

Влияние параметров метеорологических радаров на точность оценки пространственной и спектральной структур облаков различных форм следует из соотношения для удельной отражающей способности  $\eta$  облаков [4, 5]:

$$\lg(\eta) = 0,1q + 2\lg(R) - \lg(C_{\lambda}), \tag{4}$$

где  $q$  – пороговое отношение сигнал/шум на входе приёмника радара,  $C_{\lambda}$  – константа, характеризующая потенциал метеорологического радара и определяемая как

$$\lg(C_{\lambda}) = \lg(P_{\text{и}}) + 2\lg(G) + 2\lg(\lambda) + \lg(\tau_{\text{и}}) + \lg(\theta_{\alpha}) + \lg(\theta_{\beta}) - \lg(P_{\text{ш}}) - 0,1\zeta + 6,63, \tag{5}$$

где  $P_{\text{и}}$  – импульсная мощность излучения, (Вт);  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса, (с);  $\zeta$  – суммарное затухание, вносимое СВЧ-трактом, (дБ);  $\lambda$  – длина волны, (см);  $\theta_{\alpha}$ ,  $\theta_{\beta}$  – ширина диаграммы направленности антенны в азимутальной и вертикальной плоскостях, (рад);  $R$  – расстояние до облака, (см).

Как видно из выражения (5), точность измерения отражаемости от метеорологических объектов значительно зависит от величины и стабильности потенциала  $C_{\lambda}$ , поэтому необходимо обеспечить [4]:

– нормальное функционирование метеорологического радара путём оперативного контроля его основных параметров перед проведением метеорологических наблюдений с помощью встроенной автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры, например, энергетического потенциала радара с точностью до 3 дБ относительно номинального значения;

– автоматизацию процесса измерений радиолокационной отражаемости метеорологических объ-

ектов.

ектов при введении коррекции сигналов на расстоянии по закону  $1/R^2$  в диапазоне не менее 36 дБ с шагом 6 дБ и точностью  $\pm 1,5$  дБ с помощью ступенчатого СВЧ аттенуатора.

- высокое пороговое отношение сигнал/шум  $q$  на входе приёмника радара путем уменьшения влияния помех с помощью применения антенны метеорологических радаров с «игольчатой» диаграммой направленности с шириной не более  $1^\circ$  и зондирования импульсных сигналов длительностью порядка 1 мкс;

- уменьшение затухания радиоволн при распространении в пространстве путём выбора соответствующих диапазонов работы радаров.

В бортовых РЛС обычно применяются фазированные решетки с узкой диаграммой направленности в азимутальной плоскости (равной  $2,9^\circ$ ) и широкой в вертикальной плоскости (равной  $14^\circ$ ), которые приведены на рис. 2.

Поэтому в состав бортовых радаров входят устройства для компенсации пассивных помех до уровня минус 60 дБ и импульсных помех. Также предусмотрено перемещение диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости до  $+30^\circ$ .

При компенсации пассивных помех нужно учитывать диапазон изменения скорости ветра в зависимости от высоты, приведенный на рис. 3 [6].

Итак, рассмотрены особенности метеорологических объектов и влияние параметров метеорологических радаров на возможности их анализа. На следующем этапе проведём исследования основных признаков повышенной турбулентности в облаках и осадках.

Существующие эмпирические модели атмосферной турбулентности основываются на экспериментальных данных, ченных во время полетов самолетов и диолокационных измерений. При этом следует отметить многообразие причин возникновения атмосферной турбулентности, вследствие чего различают динамические и механические

сферные турбулентности [1, 5–10].

Общими их признаками являются более, чем на порядок увеличение интенсивности отражений и пульсаций скорости ветра, а также возникновение контраста температур. Рассмотрим это подробнее.

Известно, что скорость восходящих потоков в кучево-дождевых облаках превышает 10 м/с, но может достигать и 60 м/с, а скорость нисходящих потоков не превышает 10 м/с, и её максимум достигает 20–25 м/с. При этом в 90 процентах случаев абсолютная протяжённость турбулентных зон над и под облаками не превышала 22–27 км, а в облаках – 25–40 км [2]. Распределение пульсаций скорости ветра внутри зон повышенной турбулентности в облаках и осадках достаточно хорошо описывается законом нормального распределения [1].

Особенно опасным является смерч, который представляет собой вихрь с размерами сечения порядка сотен метров и скоростью кругообразного движения воздуха (50–100) м/с. Как правило, размер смерча меньше размера радиолокационного объёма и отражаемость области смерча сравнительно невелика, поэтому

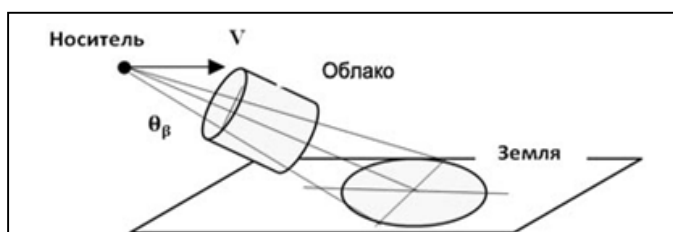


Рис. 2. Схема облучения бортовой РЛС облака и земли

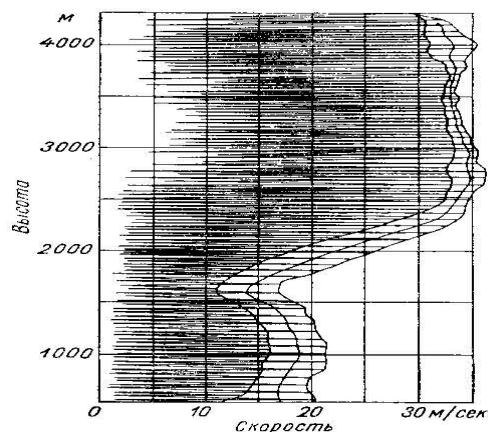


Рис. 3. Профили скорости ветра от высоты

непосредственное обнаружение самого смерча затруднительно даже с помощью доплеровского радиолокатора [8].

Турбулентные порывы ветра вовлекают в свое движение частички облаков и осадков, которые являются рассеивателями энергии, излучаемой метеорологическим радаром, поэтому повышение интенсивности турбулентности приводит к изменению (уменьшению) взаимной корреляционной функции отражённых сигналов от импульсных объемов облаков, разнесённых в пространстве [10].

С помощью прямого преобразования Фурье от взаимной корреляционной функции проводится оценка ширины спектра отражённых сигналов, которые связаны со среднеквадратическим отклонением скорости ветра следующим образом [5]:

$$\Delta F_d = \frac{\sqrt{2}b_v}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\Delta F_d$  – ширина спектра отраженных сигналов;  $b_v$  – среднеквадратическое отклонение скорости ветра;  $\lambda$  – рабочая длина метеорологического радара.

Данная связь скорости ветра с шириной спектра отражённых сигналов используется для обнаружения областей в облаках и осадках с высоким уровнем турбулентности. Точность оценки ширины спектра отражённых сигналов в значительной степени определяется частотой следования зондирующих импульсов радара, скоростью движения антенны, уровнем когерентности приёмо-передающей аппаратуры и т.п. [1, 10]. Например, для обеспечения оценки скорости пульсаций скорости ветра в зонах повышенной турбулентности в диапазоне  $V_r = \pm 70$  м/с и дальностях  $R = 125$  км при несущей частоте излучения  $\lambda = 5,6$  см вводится переменный период следования зондирующих импульсных сигналов с частотой следования от  $F_1 = 900$  Гц до  $F_2 = 1100$  Гц от периода к периоду [4].

Вторым важным признаком зон повышенной турбулентности в облаках является значительное увеличение отражаемости сигналов за

счет образования крупных капель при их слиянии в результате столкновений (так называемая коагуляция) при наличии восходящих потоков воздуха. Например, увеличение диаметра капли в два раза приводит к росту отражаемости в 64 раза.

Таким образом, восходящие потоки воздуха и турбулентность оказывают содействие конденсации и коагуляции, а значит, росту размеров капли и увеличению радиолокационной отражаемости, поэтому высокая радиолокационная отражаемость является важным признаком зоны повышенной турбулентности [10].

Существует ряд подходов к решению задачи обнаружения зон повышенной турбулентности в облаках и осадках на основе вышеприведенных связей между турбулентностью и характеристиками отражённых радиолокационных сигналов, которые находят практическое применение. Основу алгоритмов радиолокационного обнаружения зон повышенной турбулентности в облаках и осадках составляют оценка ширины спектров и радиолокационной отражаемости сигналов от двух импульсных объемов, разнесённых в облаках в соответствии с масштабом турбулентности [10–14].

В данной работе разрабатывается новый подход к решению задачи обнаружения и оценки параметров зон опасной турбулентности за счет предварительного преобразования отражённых сигналов в двух ортогональных каналах, что позволяет сформировать на единой основе алгоритмы, содержащие достаточно полную информацию о зонах опасных турбулентностей на их выходах. Рассмотрим предложенные алгоритмы подробнее.

В качестве входных сигналов рассматриваются импульсные сигналы  $u_{1N}(t)$  и  $u_{2N}(t)$  на промежуточной частоте  $f_{пр}$ , отражённые от двух импульсных объемов облака, разнесённых по дальности, соответствующей масштабу турбулентности  $\tau_M$ , следующих с периодом повторения  $T_{п}$  в течение длительности пакета из  $N$ -импульсных сигналов. Определяются они диаграммой направленностью антенны

$$u_{1N}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_{1n}(t)\delta(t-nT_n), \quad (7)$$

$$u_{2N}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_{2n}(t)\delta(t-nT_n - \tau_M), \quad (8)$$

где  $\tau_M$  – задержка во времени, которая обычно выбирается в пределах  $(3\tau_n - 5\tau_n)$ ;  $T_n$  – период повторения импульсов;  $\tau_n$  – длительность импульсов;  $u_{1n}(t)$ ,  $u_{2n}(t)$  – отражённые сигналы  $n$ -го периода повторения  $T_n$ , равные

$$u_{1n}(t) = a_{1n}(t)\cos[(\omega_{\text{пр}} - \omega_{d1})t], \text{ при } [t] \leq \frac{\tau_n}{2}$$

$$u_{1n}(t) = 0, \text{ при } [t] > \frac{\tau_n}{2} \quad (9)$$

$$u_{2n}(t) = a_{2n}(t)\cos[(\omega_{\text{пр}} - \omega_{d2})t], \text{ при } [t] \leq \frac{\tau_n}{2}$$

$$u_{2n}(t) = 0, \text{ при } [t] > \frac{\tau_n}{2} \quad (10)$$

$a_{1n}(t)$ ,  $a_{2n}(t)$  – амплитуды отражённых сигналов;  $\omega_{\text{пр}}$  – промежуточная частота;  $\omega_{d1}$ ,  $\omega_{d2}$  – доплеровские частоты;  $N$  – количество импульсов в пакете.

Для упрощения дальнейшего рассмотрения предложенного способа полагается, что случайные функции  $u_{1n}(t)$ ,  $u_{2n}(t)$  являются стационарными (среднее значение постоянно), а их взаимная корреляционная функция  $R_{12}(\tau)$  зависит только от разности моментов времени  $t$ .

На первом этапе проводится внутрипериодная обработка отражённых сигналов  $u_{1n}(t)$  и  $u_{2n}(t)$  от двух импульсных объемов облака, разнесенных по времени, равному масштабу турбулентности  $\tau_M$ , путём преобразования видеосигналов в двух ортогональных каналах, выполненных в виде суммирующего и вычитающего устройств первого порядка, нормированные коэффициенты передачи которых равны [11]:

$$K_c(j\omega) = \frac{1}{j(\omega - \omega_{\text{пр}})} \{1 + \exp[-j(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M]\}, \quad (11)$$

$$K_p(j\omega) = \frac{1}{j(\omega - \omega_{\text{пр}})} \{1 - \exp[-j(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M]\}. \quad (12)$$

С учетом соотношений [12]:

$$\cos(x) = \frac{1}{2} [\exp(jx) + \exp(-jx)],$$

$$\sin(x) = \frac{1}{2j} [\exp(jx) - \exp(-jx)],$$

коэффициенты передачи (11) и (12) приводятся к виду

$$K_c(j\omega) = 2\cos[(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M/2] \times \exp[-j(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M/2], \quad (13)$$

$$K_p(j\omega) = 2\sin[(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M/2] \times \exp\{-j[\pi - (\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M/2]\} \quad (14)$$

В соответствии с коэффициентами передачи (13) и (14) данные каналы являются ортогональными. Нормированные коэффициенты передачи по мощности рассматриваемых устройств можно представить соотношениями, из которых следует, что сумма нормированных коэффициентов передачи по мощности равна единице и подтверждает линейность преобразования.

$$K_c(\omega)^2 = \cos^2[(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M/2], \quad (15)$$

$$K_p(\omega)^2 = \sin^2[(\omega - \omega_{\text{пр}})\tau_M/2]. \quad (16)$$

Структурная схема преобразователя отражённых сигналов приведена на рис. 4.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

- 1 – первое вычитающее устройство;
- 2 – первая линия задержки;
- 3 – второе вычитающее устройство;
- 4 – первое множительное устройство;
- 5 – первое суммирующее устройство;
- 6 – вторая линия задержки;
- 7 – второе суммирующее устройство;
- 8 – второе множительное устройство;
- 9 – третье множительное устройство;
- 10 – третье суммирующее устройство;
- 11 – первое усредняющее устройство;
- 12 – формирователь порога;
- 13 – третье вычитающее устройство;
- 14 – формирователь спектра;
- 15 – первое нормирующее устройство;
- 16 – пороговое устройство;
- 17 – второе усредняющее устройство;
- 18 – второе нормирующее устройство;
- 19 – решающее устройство;
- 20 – индикатор кругового обзора.



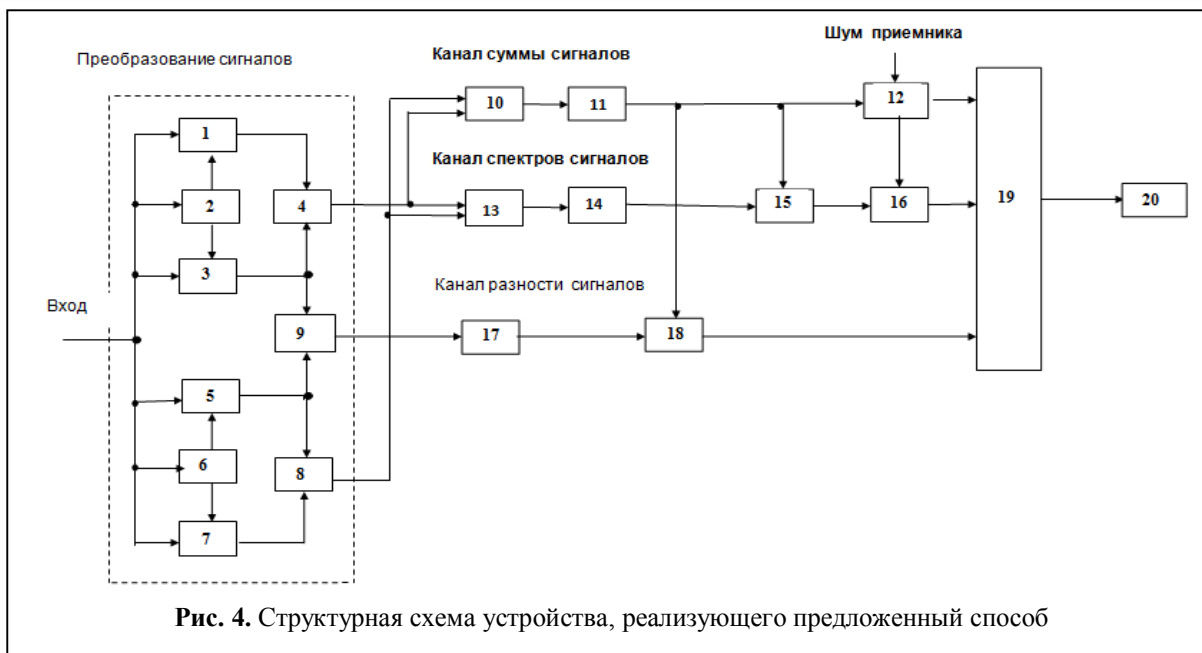


Рис. 4. Структурная схема устройства, реализующего предложенный способ

В состав преобразователя сигналов входит первый канал, включающий два вычитающих устройства 1 и 3, линию задержки 2 на время  $\tau_M$  и первое множительное устройство 4, а также второй канал, включающий два сумматора 5 и 7, линию задержки 6 на время  $\tau_M$  и второе множительное устройство 8.

Работа суммирующего и вычитающего устройств первого порядка с коэффициентами передачи (13) и (14) описана в работе [15]. Видеосигналы на выходе первого и второго каналов преобразования сигналов после умножения в первом 4 и втором 8 множительных устройствах в течение каждого периода повторения  $T_n$  соответственно равны

$$u_{свн}^2(t) = u_{1вн}(t)^2 + 2\overline{u_{1вн}(t)u_{2вн}(t)} \times \cos[(\omega_{d1} - \omega_{d2})t] + u_{2вн}(t)^2, \quad (17)$$

$$u_{рвн}^2(t) = u_{1вн}(t)^2 - 2\overline{u_{1вн}(t)u_{2вн}(t)} \times \cos[(\omega_{d1} - \omega_{d2})t] + u_{2вн}(t)^2. \quad (18)$$

Следует иметь в виду, что в общем случае

$$u_{1вн}(t) = \sigma_1(t) + \overline{u_{1вн}(t)}, \quad (19)$$

$$u_{2вн}(t) = \sigma_2(t) + \overline{u_{2вн}(t)}, \quad (20)$$

где  $\overline{u_{1вн}(t)}$ ,  $\overline{u_{2вн}(t)}$  – средние значения случайных функций  $u_{1вн}(t)$  и  $u_{2вн}(t)$ ;  $\sigma_1(t), \sigma_2(t)$  – переменные значения случайных функций  $u_{1вн}(t)$  и  $u_{2вн}(t)$ .

Тогда соотношения (17) и (18) примут вид:

$$u_{свн}^2(t) = u_{1вн}(t)^2 + 2[R_{12}(\tau) + \overline{u_1(t)u_2(t)}] \times \cos[(\omega_{d1} - \omega_{d2})t] + u_{2вн}(t)^2, \quad (17)$$

$$u_{рвн}^2(t) = u_{1вн}(t)^2 - 2R_{12}(\tau) + \overline{u_1(t)u_2(t)} \times \cos[(\omega_{d1} - \omega_{d2})t] + u_{2вн}(t)^2. \quad (18)$$

где  $R_{12}(\tau) = \overline{\sigma_1(t)\sigma_2(t)}$  – взаимная корреляционная функция;  $\tau$  – задержка во времени, соответствующая масштабу турбулентности.

Следующий видеосигнал, характеризующий изменение интенсивности отражённых сигналов от двух импульсных объёмов облака, разнесённых по времени, равному масштабу турбулентности  $\tau_M$ , получен в результате умножения сигналов с выхода второго вычитающего устройства 3 и первого суммирующего устройства 5 в третьем множительном устройстве 9 в течение каждого периода повторения  $T_n$  в виде

$$\Delta u_p^2(t) = [u_{1н}(t) - u_{2н}(t)][u_{1н}(t) + u_{2н}(t)] = u_{1вн}(t)^2 - u_{2вн}(t)^2. \quad (23)$$

Итак, в результате предварительной обработки сигналов в ортогональных каналах получены три алгоритма (17), (18) и (23), содержащие достаточно полную информацию о зонах опасных турбулентностей, в том числе, оценки нормированной ширины доплеровского спектра, интенсивность отражения и её из-

менение за счет появления зон повышенной турбулентности.

Рассмотрим подробнее реализацию комплексного алгоритма обнаружения и оценки параметров зон повышенной турбулентности в облаках на примере устройства, структурная схема которого приведена на рис. 4. Данное устройство содержит три канала: суммы сигналов, доплеровских сигналов, разностных сигналов.

Канал суммы сигналов предназначен для формирования суммарной мощности отраженных сигналов в третьем сумматоре 9 от разнесенных в пространстве импульсных объемов облаков и осадков. Алгоритм работы канала суммы сигналов определяется путем суммирования сигналов (17) и (18) с канала преобразования сигналов

$$u_{свн}^2(t) = u_{свн}^2(t) + u_{рвн}^2(t) = 2[u_{1вн}(t)^2 + u_{2вн}(t)^2]. \quad (24)$$

В результате усреднения в течение длительности пакета из  $N$  отраженных импульсных сигналов, определяемых диаграммой направленностью антенны, в первом усредняющем устройстве 11 сигнал (24) приводится к виду:

$$\overline{u_{свн}^2(t)} = 2[\overline{u_{1н}^2(t)} + \overline{u_{2н}^2(t)}]. \quad (25)$$

С выхода первого усредняющего устройства 11 сигнал (25) поступает на первый вход формирователя порога 12 и второй вход первого устройства нормирования 18 канала доплеровских сигналов. Канал доплеровских сигналов предназначен для определения параметров сигналов, отраженных от зоны повышенной турбулентности, в части оценки ширины спектров отраженных сигналов. Алгоритм работы данного канала определяется путем вычитания сигнала (22) из сигнала (21) с канала преобразования сигналов в третьем вычитающем устройстве 13 и принимает вид

$$u_{двн}^2(t) = u_{свн}^2(t) - u_{рвн}^2(t) = 4[R_{12}(\tau) + \overline{u_1(t)u_2(t)}] \cos[(\omega_{d1} - \omega_{d2})t]. \quad (26)$$

Как было сказано выше, сигналы  $u_{1N}(t)$  и  $u_{2N}(t)$  поступают на вход рассматриваемого устройства с периодом повторения  $T_n$  в течение

длительности пакета из  $N$  импульсных сигналов, определяемых диаграммой направленностью антенны. В этом случае периодический дискретный сигнал  $u_{двн}^2(t)$  можно разложить на синусоиды прямым преобразованием Фурье и представить в виде конечного ряда дискретных синусоид [16, 17].

С выхода третьего вычитающего устройства (13) сигнал  $u_{двн}^2(t)$  поступает на формирователь спектра 14, обеспечивающий формирование спектра путем прямого преобразования Фурье от соотношения (26) в течение длительности пакета из  $N$  импульсных сигналов, определяемых диаграммой направленностью антенны [17, 18]:

$$S(k\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} u_{двн}^2(n) \exp\left[-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk\right], \quad (27)$$

где  $\Omega = 2\pi/T_n$  – основная частота преобразования.

Соотношение (27) является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ), которое использовано для представления сигнала  $u_{двн}^2(n)$  конечной длины  $NT_n$ , определенного при  $n = 0, 1, \dots, N-1$  и равно нулю вне интервала  $[0, (N-1)T_n]$ . ДПФ представляет собой  $N$  отсчетов спектра, взятых на периоде с интервалом дискретизации по частоте, равным  $\Omega$ . При этом в формирователе спектра 14 обеспечивается устранение постоянной составляющей спектра, определяемого произведением  $u_1(t)u_2(t)$ .

Следующей операцией в канале доплеровских сигналов является нормирование спектра (27) в первом нормирующем устройстве 15 с помощью суммарного сигнала (25):

$$S_n(k\Omega) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} u_{д1н}^2(nT_n) \exp\left[-j\left(\frac{2\pi}{T_n}\right)nk\right]}{[\overline{u_{1н}^2(t)} + \overline{u_{2н}^2(t)}]}, \quad (28)$$

где  $k = 0, 1, \dots, N-1$ ,

$$u_{д1н}^2(t) = 4R_{12}(\tau) \cos[(\omega_{d1} - \omega_{d2})t]. \quad (29)$$

После этого информация о нормированных спектральных характеристиках отраженных сигналов с канала доплеровских сигналов поступает через пороговое устройство 16 на вто-

рой вход вычислительного устройство 19. Эта операция проводится в течение времени обзора антенной пространства, равного  $T_{\text{обз}} = 6$  с, так как в метеорологических радарах с круговым обзором пространства обновление метеорологической информации на индикаторе кругового обзора проводится один раз в течение обзора [4].

Канал разностных сигналов предназначен для оценки изменения разности интенсивности отражённых сигналов от разнесённых в пространстве двух импульсных объёмов облаков. Как было сказано выше, в зонах высокой турбулентности происходит значительное увеличение отражаемости сигналов за счёт образования крупных капель при их слиянии в результате столкновений (так называемая коагуляция) при наличии восходящих потоков воздуха [10]. Алгоритм работы данного канала описывается соотношением (23).

В результате усреднения в течение длительности пакета из  $N$  отражённых импульсных сигналов, определяемых диаграммой направленности антенны, во втором усредняющем устройстве 17 сигнал (23) приводится к виду

$$\overline{\Delta u_{\text{pN}}^2(t)} = \overline{u_{1\text{BN}}(t)^2} - \overline{u_{2\text{BN}}(t)^2}. \quad (30)$$

Следующей операцией в канале разностных сигналов является нормирование разности интенсивностей отражённых сигналов от разнесённых в пространстве двух импульсных объёмов облаков (28) с помощью суммарного сигнала (25) во втором нормирующем устройстве

$$\mu = \frac{\overline{u_{1\text{BN}}(t)^2} - \overline{u_{2\text{BN}}(t)^2}}{\overline{u_{1\text{BN}}(t)^2} + \overline{u_{2\text{BN}}(t)^2}} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}, \quad (31)$$

где

$$\alpha = \frac{\overline{u_{1\text{BN}}(t)^2}}{\overline{u_{2\text{BN}}(t)^2}}, \quad (32)$$

На рис. 5 приведена зависимость нормированной разности мощностей отражённых сигналов от разнесённых в пространстве двух импульсных объёмов облаков  $\mu = \psi(\alpha)$ .

При наличии зон повышенной турбулентности нормированная разность мощностей отражённых сигналов от разнесённых в про-

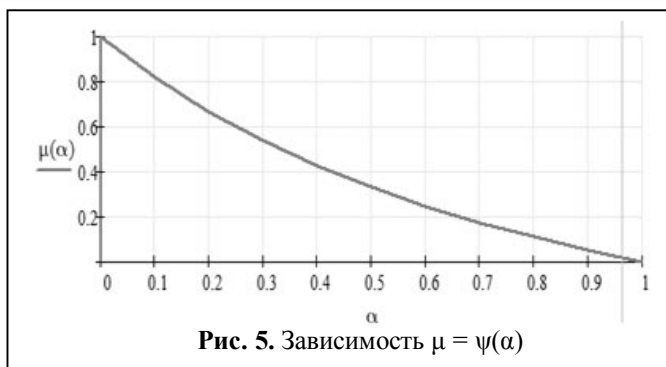


Рис. 5. Зависимость  $\mu = \psi(\alpha)$

странстве двух импульсных объёмов облаков увеличивается и достигает  $\mu \geq 0,75$ . Данная информация поступает на третий вход вычислительного устройства 19, которое принимает решение о наличии зоны повышенной турбулентности.

Итак, на вход решающего устройства 19 поступает информация о нормированных спектральных параметрах зон повышенной турбулентности и разности интенсивностей отражений от двух импульсных объёмов облаков, разнесённых в пространстве в соответствии с выбранным масштабом турбулентности. При этом учитываются собственные шумы приёмника, а также параметры облаков и радара.

В индикаторном устройстве, работающем обычно в масштабе 125 км, каждому уровню спектральной плотности отражённых сигналов в каждой ячейке дальности соответствует свой цвет изображения (на рис. 6) отличие показано яркостью). Электронные метки дальности для каждого масштаба соответствуют 1 км, азимутальные метки – через  $30^{\circ}$ .

Дополнение средств и систем, например, картографической системой с «технологией дополненной реальности» может существенно повысить качество и характер наблюдаемой реальной обстановки, что очень важно для полётов в сложных условиях. Комбинация на сенсорном мониторе подвижной карты местности с использованием GPS обеспечит не только просмотр поступающей информации, но и оперативное её наложение на карту местности с указанием объектов на ней. При этом осуществляется обработка радиолокационной информации и подготовка отображений на мо-



ниторе метеорологических выходных продуктов в виде карт.

Итак, с помощью предложенного способа на базе преобразования входных видеосигналов в двух ортогональных каналах получены базовые соотношения, содержащие достаточно полную информацию о зонах опасных турбулентностей. Это позволило синтезировать общие алгоритмы оценки нормированной ширины доплеровского спектра, интенсивности отражения, обеспечить их надежное обнаружение и информативную индикацию.

#### Выводы:

Предложенный способ на базе преобразования входных видеосигналов в двух ортогональных каналах дает возможность получить достаточно полную информацию о зонах опасных турбулентностей. Это позволило синтезировать общие алгоритмы оценки нормированной ширины доплеровского спектра, интенсивности отражения, обеспечить их надежное обнаружение и информативную индикацию.

#### Литература

1. Толмачева И.И. Исследование характеристик турбулентности в облаках и безоблачной атмосфере // Географический вестник. Метеорология. 2015. № 2(33). С. 46–53.
2. Сафонова Т.В. Авиационная метеорология : учеб. пособие. Ульяновск : УВАУ ГА, 2005. 215 с.
3. Патент США на изобретение №2470331 от 23.10.2007.
4. Абишев М.Т. и др. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л. : Гидрометеиздат, 1980. 230 с.

Поступила 2 февраля 2018 г.

English

### HIGHER TURBULENCE AREAS DETECTION METHOD AND ESTIMATION OF THEIR PARAMETERS IN CLOUDS

Anatoly Petrovich Ivannikov – Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Assistant, JSC "NPP "Polyot"<sup>1</sup>.

Dmitry Anatolyevich Ivannikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department Head, JSC "NNPO named after M. V. Frunze"<sup>2</sup>.

E-mail: otd24@niiem.ru.

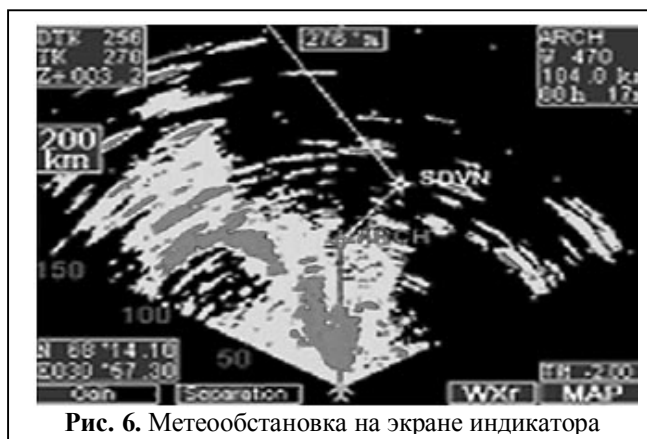


Рис. 6. Метеообстановка на экране индикатора

5. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 351 с.; 2-е изд., 1973. 343 с.
6. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. Пер. с англ. Л. : Гидрометеиздат, 1967. 194 с.
7. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1965. 876 с.
8. Брылёв Б.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г. Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 234 с.
9. Батман Л. Дж. Радиолокационная метеорология. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 196 с.
10. Яновский. И. Метеорологическое обеспечение авиации. Разделы 8.6–8.14 (С. 563–622) в книге: «Энциклопедия безопасности авиации» ; под ред. Н. С. Кулика. Киев : Техника, 2008. 1000 с.
11. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем : учеб. пособие для вузов. М. : Радио и связь, 1986. 280 с.
12. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. 4-е изд., перераб. М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963 г. 1100 с.
13. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1986. 512 с.
14. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб. : Питер, 2002. 608 с.

**Yana Alekseevna Izmailova** – Candidate of Technical Sciences, Department Head of the Scientific and Technical Information and Intellectual Property Management, JSC "NPP Polyot"<sup>1</sup>.

*E-mail:* patent@npp-polyot.ru.

<sup>1</sup>*Address:* 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Komsomolskaya sq., 1.

<sup>2</sup>*Address:* 603009, Russia, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 174.

*Abstract:* Higher turbulence zones are the factor determining the cloud formation and its development in various forms, atmospheric fronts, cyclones, etc. They are particularly dangerous for various flying vehicles as they disrupt communications and form tornadoes, etc., and therefore obtaining information about the turbulence intensity, its spatial and spectral structure in the clouds of various forms as well as developing vehicle-borne and ground detection and evaluation system of higher turbulence zones parameters and that is an important task. The peculiarities of meteorological objects and the meteorological radar parameters influence are to be taken into account when analyzing and organizing radar investigations of higher turbulence zones in clouds and precipitation, as well as it is necessary to analyze and more fully utilize the signs of forthcoming higher turbulence zones in clouds and precipitation. This research work proposes the comprehensive algorithm to detect and assess higher turbulence zones and their parameters in clouds by weather radars. The algorithm is based on the video signals conversion from two pulsed-type cloud volumes, spaced timely equal to the selected turbulence scale in two orthogonal channels. All this enabled to obtain two equations on the basis of which detection and estimation algorithms for the Doppler spectrum normalized width of higher turbulence zones, as well as the evaluation of the cloud echo-signal power and its indication.

*Key words:* higher turbulence zone, passive jamming, video signal, cloud echo property, effective echoing ratio (EER).

#### References

1. *Tolmacheva I.I.* Investigation of turbulence properties in clouds and cloud-free atmosphere // Geographical Bulletin. Meteorology. 2015. No 2 (33). Pp. 46-53.
2. *Safonova T.V.* Aviation meteorology: Textbook. Ulyanovsk : UVAU GA, 2005. 215 p.
3. US patent for the invention №2470331. 23.10.2007.
4. *Abshaev M.T.* and other colleagues. Manual for radars MRL-4, MRL-5 and MRL-6 in the hail suppression system. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1980. 230 p.
5. *Stepanenko V.D.* Radar detection in meteorology. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1966. 351 p.; 2nd ed. 1973. 343 p.
6. *Atlas D.* Advances in radar meteorology. Transl. from Engl. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 194 p.
7. *Matveev L.T.* General meteorology fundamentals. Atmospheric physics. Leningrad : Hydrometeorological publishing house, 1965. 876 p.
8. *Brylev B.B., Gashina S.B., Nizdoiminoga G.L.* Cloud and precipitation radar properties. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1986. 234 p.
9. *Battan L.J.* Radar in meteorology. Transl. from Eng. Leningrad : Gidrometeoizdat. 1967. 196 p.
10. *Yanovsky I.* Meteorological support of aviation. Sections 8.6-8.14 (Pp. 563–622) in the book: "The encyclopedia of aviation safety", ed. by *Kulik*. Kiev : Tekhnika, 2008. 1000 p.
11. *Lyozin Y.C.* Introduction to the theory and technology of radio engineering systems: Textbook for higher education institutions. Moscow : Radio i svyaz, 1986. 280 p.
12. *Gradstein I.S., Ryzhik I.M.* Tables of integrals, sums, series and products. 4th edition, revised. Moscow : State publishing house of physical and mathematical literature, 1963. 280 p.
13. *Gonorovsky I.S.* Radio circuits and signals: Textbook for higher education institutions. 4th ed., updated and revised. Moscow : Radio i svyaz, 1986. 512 p.
14. *Sergienko A.B.* Digital signal processing. Saint Petersburg : Piter, 2002. 608 p.