

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ

Канд. техн. наук, доц. ФЁДОРЦЕВ Р. В., магистр техн. наук КАРОЛИК Е. П., инж. КУДРЯШОВ А. А.

Белорусский национальный технический университет,
ОАО «Пеленг»

Авиация подвержена влияниям погоды более чем любой другой вид транспорта. Облака, туман и интенсивность выпадения осадков могут создавать потенциально опасные ситуации при взлете и посадке самолетов, что требует внесения существенных изменений в расписание их полетов. Измерители видимости и высоты нижней границы облаков (ВНГО) – оптико-электронные приборы, которые устанавливаются в аэропортах вблизи взлетно-посадочной полосы. Их конструкция постоянно совершенствуется в техническом отношении с целью улучшения выходных параметров [1].

ВНГО является одной из важнейших метеорологических величин, определяющих условия посадки и взлета воздушных судов. Полученные с помощью инструментальных измерений значения ВНГО позволяют судить о высоте обнаружения пилотом наземных ориентиров и возможности осуществления полетов при данных метеорологических минимумах [2].

На современном этапе развития ВНГО определяется с помощью дистанционного метода, основанного на явлении обратного рассеяния лазерного излучения. Для ближней инфракрасной области спектра (0,75–3,0 мкм) характерно только однократное рассеяние. В этом случае можно ограничиться учетом рассеяния первой категории.

При посылке в атмосферу короткого лазерного импульса мощность отраженного сигнала $P(z)$, приходящая с расстояния $z = c\tau_n/2$ на приемник моностатического лидара, определяется уравнением лазерного зондирования, которое при учете только однократного рассеяния, характерного для ближней инфракрасной области спектра, имеет вид [3]

$$S(z) = A_n b(z) \alpha_t(z) \exp\left[-2 \int_0^z \alpha_t(z') dz'\right], \quad (1)$$

где $S(z) = P(z)z^2$ – мощность эхосигнала, скорректированная на квадрат расстояния; $A_n = \pi r_n^2 P_0 c \tau_n / 2$ – аппаратная постоянная лидара; c – скорость света; τ_n – длительность лазерного импульса; r_n – эффективный радиус входного зрачка приемника; $b(z)$ – лидарное отношение (коэффициент обратного рассеяния); $\alpha_t(z)$ – коэффициент ослабления.

В данном уравнении правая часть содержит два неизвестных параметра аэрозольной среды: лидарное отношение $b(z)$ и коэффициент ослабления $\alpha_t(z)$. Поэтому для решения уравнения относительно одного из этих параметров, например $\alpha_t(z)$, необходимо внести дополнительные уточнения исходных данных.

В зависимости от количества и качества имеющейся априорной информации об атмосфере возможны различные варианты доопределения уравнения, которые соответствуют трем группам методов его решения [3]:

1) методы логарифмической производной и наклонных трасс, основанные на допущении послойной однородности атмосферы;

2) методы, построенные на предположении о постоянстве лидарного отношения по трассе локации $b(z) = \text{const}$ и численном решении уравнения зондирования;

3) методы, основанные на аналитическом решении уравнения зондирования.

Рассмотрим подробно наиболее важные положения этих методов.

В основу первой группы методов заложено предположение о том, что в вертикальном направлении атмосферу можно разбить на ряд протяженных горизонтальных слоев, включая приземный, в каждом из которых $\alpha_t(z) = \text{const}$ и $b(z) = \text{const}$. Однако практическое применение данного метода невелико из-за малой вероятности возникновения ситуаций, при

которых могут сложиться такие условия, однако его можно использовать для грубой количественной оценки прозрачности трасс, близких к горизонтальным.

Одним из известных и наиболее распространенных в данной группе является метод наклонных трасс, который обычно используется для определения вертикальной прозрачности атмосферы. Для его реализации осуществляют зондирование в двух наклонных направлениях, характеризующихся зенитными углами θ_1 и θ_2 при условии $\theta_1 > \theta_2$. Отраженный сигнал при этом формируется различными объемами однородного слоя атмосферы, расположенного на высоте H (рис. 1).

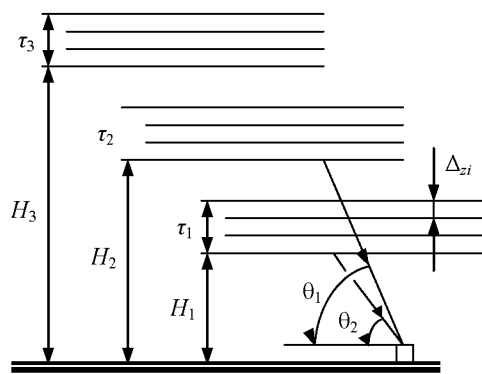


Рис. 1. Схема распределения слоев атмосферы на различной высоте

Данный метод устойчив к многократному рассеянию, по крайней мере до оптических толщин $\tau < 3$ [3]. Его целесообразно использовать для оценки прозрачности всей толщины атмосферы.

Ко второй группе относят метод последовательных слоев и итерационный метод.

В случае метода последовательных слоев трассу зондирования разбивают на ряд слоев толщиной Δz_i , в пределах которых оптические характеристики атмосферы считают постоянными.

Итерационный метод является модификацией упомянутого выше метода.

Применимость методов этой группы ограничена условиями слабозамутненной атмосферы. С увеличением оптической толщины слоя облаков решение быстро расходится, что является следствием отсутствия учета рассеяния высших кратностей.

В практике лазерного зондирования наиболее широкое распространение нашли методы

третьей группы, для которых диапазоны значений коэффициентов обратного рассеяния и ослабления атмосферы и облака (для различных метеоусловий) приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Коэффициенты обратного рассеяния и ослабления

Атмосфера		Облака	
$b(z), \text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$\alpha_i(z), \text{км}^{-1}$	$b(z), \text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$\alpha_i(z), \text{км}^{-1}$
0,001–0,100	0,05–200	0,5–50	10–100

Также при использовании данных методов можно ввести дополнительное соотношение между $\alpha_i(z)$ и $b(z)$, математическое описание которого осуществляется на основе экспериментальных или теоретических данных.

В настоящее время для реализации методов, основанных на аналитическом решении уравнения зондирования, существуют два наиболее распространенных алгоритма: в одном из них предлагается осреднение результатов измерений эхосигналов, а во втором – выбор из ряда измерений такого результата, который с заданной погрешностью совпадает с уровнем нижней границы облаков.

С целью выявления преимуществ того или иного алгоритма, а также определения эффективности их использования в сложных метеоусловиях была выполнена их сравнительная оценка с использованием реального массива данных [5]. Анализ показал, что в первом алгоритме за счет первоначального разделения результатов измерений по принадлежности к тому или иному слою облачности заметно повышается достоверность данных по сравнению с операциями обычного осреднения.

Второй алгоритм дает результаты, сопоставимые с первым, несмотря на то, что не использует операцию осреднения. Следовательно, повышение репрезентативности получаемых данных не обязательно связано с осреднением отчетов.

Таким образом, при отсутствии существенных различий в получении конечного результата, при написании нового алгоритма в качестве исходной базы была взята структура второго алгоритма, который содержит меньшее число операций и значительно проще в технической реализации.

Разработанный алгоритм состоит из последовательности действий, представленных ниже (рис. 2):

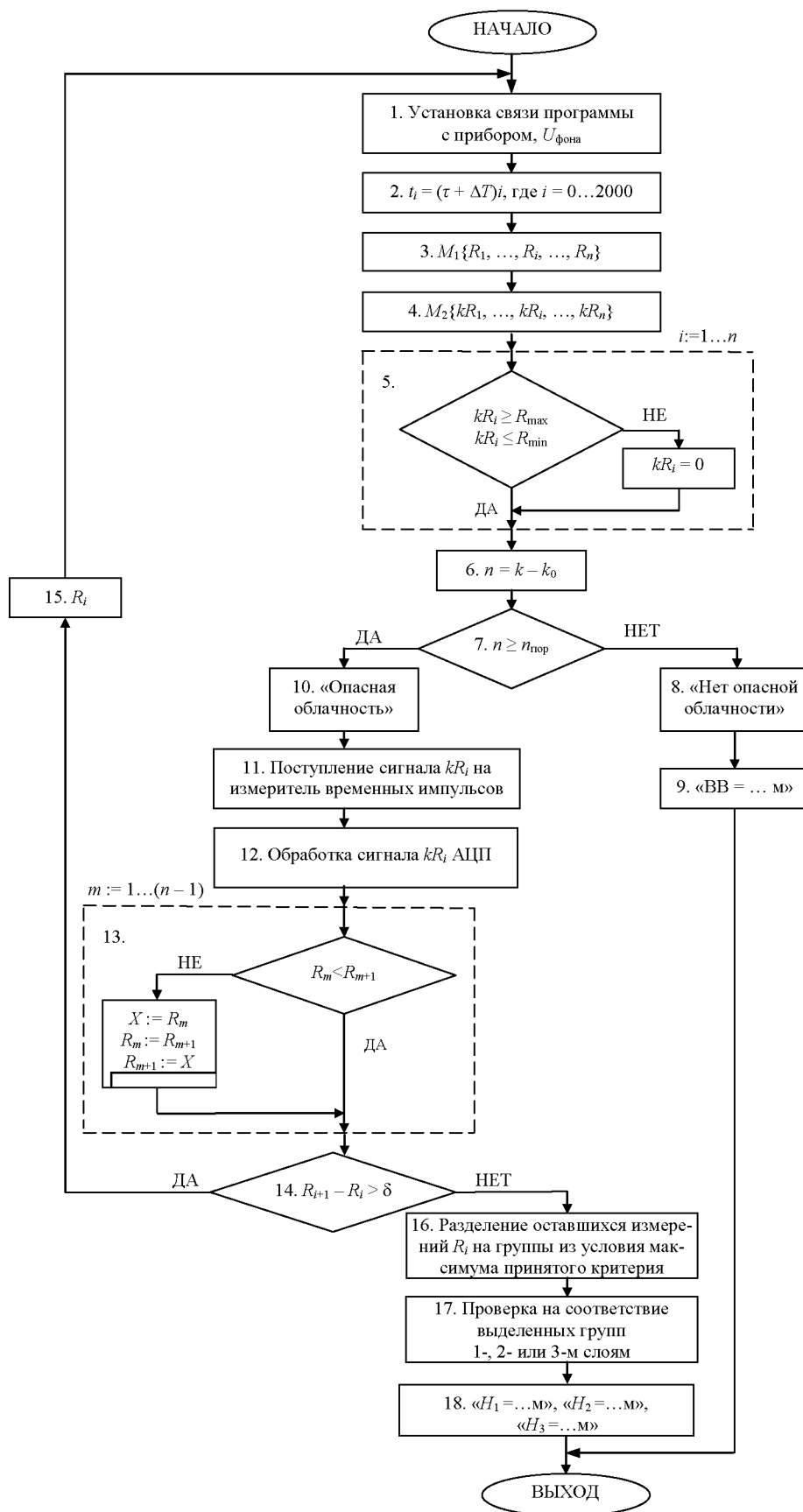


Рис. 2. Алгоритм для определения высоты нижней границы облаков

1. Установка связи программы с прибором и измерение уровня фона $U_{\text{фона}}$ без включенного лазера.

2. Излучение лазерным источником ($\lambda = 905$ нм) большого числа (до 2000 импульсов в пачке) коротких (длительность $\tau = 100$ нс) и мощных ($P = 75$ Вт) зондирующих импульсов света в направлении облачного слоя атмосферы с частотой следования $\Delta T = T/2000$ для подавления шумов. Период запуска пачки $T = 15$ с [4].

3. Измерение и формирование скользящего массива $M_1\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_n\}$ данных результатов измерений за период наблюдения. За счет накопления амплитуд отраженных импульсов происходит повышение отношения сигнал/шум, что позволяет увеличить дальность обнаружения ВНГО.

Число используемых ячеек памяти равно отношению $R_{\text{max}}/\Delta R$, где R_{max} – верхняя точка диапазона измерения; ΔR – разрешающая способность по дальности, $\Delta R = 10$ м. При $R_{\text{max}} = 7500$ м число используемых ячеек памяти $7500/10 = 750$. Таким образом, порядковый номер ячейки памяти соответствует определенному значению R_n .

4. Создание нового массива M_2 из массива M_1 посредством его умножения на коэффициент усиления k .

5. Проведение контроля, т. е. отбраковка значений kR_i , выходящих за границы диапазона измерений (от R_{min} до R_{max}). Выпадающему значению величины присваивается $H = 0$.

6. Определение числа измерений n , содержащих информацию о наличии облачности в диапазоне измерений, которое представляет собой разность между общим числом измерений k за период наблюдения T и числом измерений k_0 , содержащих информацию об отсутствии облаков (в случае разорванной нижней границы).

7. Сравнение полученного числа n с установленным пороговым значением $n_{\text{пор}}$ и принятие решения о наличии или отсутствии опасной по протяженности облачности в диапазоне измерений, где $n_{\text{пор}} = 0,3-0,5 N$, где N – число зондирований за интервал наблюдения $t_{\text{набл}}$.

8 и 9. При несоблюдении условия ($n < n_{\text{пор}}$) осуществляется определение вертикальной видимости.

10 и 11. При выполнении условия $n \geq n_{\text{пор}}$ происходит передача сигнала на измеритель временных импульсов с последующим формированием импульсов запаздывания по времени эхосигнала.

12. Аналого-цифровое преобразование (АЦП) значений в цифровую форму. В каждую ячейку массива записывается 1 или 0 в зависимости от наличия (отсутствия) соответствующего значения результата измерения в исходной выборке данных.

13. Упорядочивание выборки по мере возрастания измеренных значений высоты, т. е. запись в дублирующие последовательные ячейки памяти массива $M_1\{R'_1, \dots, R'_i, \dots, R'_n\}$.

Для упорядочения с учетом разрывов облачности используются определение минимального значения и запись его и номера его ячейки исходного массива по адресу первой ячейки, затем определение минимального значения из оставшихся и запись по следующему адресу и т. д.

14 и 15. Отбраковка выбросов на краях упорядоченной выборки. Разность последующего R_{i+1} и текущего R_i значений должна быть меньше допуска δ , если разность больше допуска, то последующее значение отбрасывается (15) и т. д.

Допуск $\delta = 2 \cdot \Delta R = 2 \cdot 10 = 20$ м.

16. Разделение оставшихся измерений на группы из условия максимума принятого критерия

$$D = aD_1 + (1-a) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k |m_i - m_j|, \quad (2)$$

где D – дисперсия групп, $0 < a < 1$; $D_1 = \sum_{i=1}^k M_i |m_i - m|$ – среднее абсолютное отклонение;

M_i – число измерений в i -й группе; k – число групп;

$m_i = \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} H_{ij}$ – математическое ожидание для i -й группы;

H_{ij} – результат j -го измерения из i -й группы;

$m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{M_i} H_{ij}$ – математическое ожидание для всей выборки.

Данная операция проводится делением N оставшихся упорядоченных отсчетов на два слоя.

Упорядоченные отсчеты разбиваются на две группы. Начальное положение – k_0 (старших) отсчетов во второй группе и $(N - k_0)$ отсчетов в первой. Затем последовательно прибавляется следующий отсчет ко второй группе и вычитается из первой до достижения $N - k_0$ отсчетов во второй группе и k_0 (наименьших) отсчетов в первой. Для задачи определения высоты и количества облаков для двух слоев облачности значение k_0 берется равным 0,05–0,1 от M (при $M \sim 50$ минимальное число измере-

ний в группе $k_0 = 3-5$). Для задачи определения текущих значений поиск может быть ограничен числом измерений в нижнем слое, соответствующим опасному количеству облачности этого слоя (например, равному 0,3). Для данного шага (i отсчетов во второй группе и $N-i$ отсчетов – в первой) вычисляются значения средних – $m_2(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i H_j$; $m_1(i) = \frac{1}{N-i} \sum_{j=i+1}^N H_j$ и определяется величина используемого критерия (2). В результате перебора по i определяется максимальное значение $D(i)$ при изменении i от k_0 до $N-k_0$ и соответствующее ему значение i , равное k_1 .

Аналогично может быть осуществлено разделение облачности на три слоя (фиксируется объем первой группы и осуществляется разделение оставшихся измерений до получения частного экстремума; затем последовательно увеличивается объем первой группы и осуществляется поиск абсолютного экстремума) [2].

17. Проверка для получения условия разделения, т. е. соответствуют выделенные группы одному, двум или трем слоям. Заключается в том, что после нахождения оптимального по выбранному критерию разбиения на две группы принимается решение, соответствуют ли эти группы одному или двум слоям облачности. В общем случае в решающем правиле целесообразно учитывать средние значения для двух групп (m_1 и m_2) при $i = k_1$, а также характеристики рассеяния данных внутри групп σ_1 и σ_2 , например в виде средних квадратических или средних абсолютных значений. Проверяемое условие может иметь вид: $m_2 - m_1 > c_1 \sigma_1 + c_2 \sigma_2$, где коэффициенты c_1 , c_2 могут зависеть от средней высоты слоя m_1 и m_2 . В более простом случае характеристики рассеяния не определяются и проверяется условие $m_2 - m_1 > c_3$, где c_3 является функцией высоты нижнего слоя (увеличивается с ростом m_1). При предварительном функциональном преобразовании может быть взято постоянное значение c_3 .

Если принятое условие при $i = k_1$ не выполняется, то принимается, что имеет место одна группа с n измерениями (один слой), если выполняется – две группы соответственно с k_1 и $(N - k_1)$ (два слоя).

В первом случае в качестве значения ВНГО и количества облачности выдается среднее зна-

чение m и N/M . Во втором случае выдаются значения высоты двух слоев облачности m_1 и m_2 и количества облачности в виде $\frac{N-k_1}{M}$ и $\frac{k_1}{M}$, а также общее количество облачности $\frac{N}{M}$. В случае необходимости выдачи только одного значения (например, текущего значения ВНГО) выдается средняя высота нижнего слоя m_1 при условии, что количество облаков нижнего слоя в баллах $\frac{N-k_1}{M}$ больше значения, принятого за опасное.

Как уже отмечалось, помимо средних возможна выдача других характеристик о слоях облачности.

18. Формирование выходных данных H_1 , H_2 , H_3 с учетом проверки характеристик высоты трех слоев облачности.

ВЫВОД

Описанный алгоритм носит предварительный характер и требует дальнейшего уточнения непосредственной оценки эффективности результатов по сравнению с данными современных измерителей облачности. Однако следует отметить, что использование рассмотренного алгоритма может заметно повысить надежность информации в системах автоматизированного метеобеспечения авиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Cloud-Base** Height Measurements with a Single-Pulse Erbium-Glass Laser Celiometer / J. L. Gaumet [et al.] // Journal of atmospheric and oceanic technology. – 1998. – № 15. – P. 37–45.
2. **Персин, С. М.** Измерение высоты нижней границы облаков и характеристик облачности как задача распознавания образов / С. М. Персин // Труды ордена Трудового Красного знамени Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – Вып. 512. – С. 79–91.
3. **Сигналы и помехи в лазерной локации** / В. М. Орлов [и др.]; под ред. В. Е. Зуева. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
4. **Светолокационный** измеритель высоты нижней границы облаков ДОЛ-2 / О. А. Волков [и др.] // Оптический журнал. – 2009. – № 10, вып. 76. – С. 29–33.
5. **Иевлева, Н. Н.** Алгоритмы машинной обработки результатов измерений высоты нижней границы облаков / Н. Н. Иевлева, Р. А. Круглов // Труды ГГО. – 1983. – Вып. 475. – С. 104–113.

Поступила 12.02.2010