

Д.В. Клочков*;
М.А. Коняев*;
А.С. Михайленко**

* БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

** ООО «НПП "Лазерные системы"», г. Санкт-Петербург.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Представлены результаты измерений высоты нижней границы облачности с помощью разработанного оптоэлектронного датчика, работающего на длине волны 1,5 мкм. Дано описание принципа работы, оптической схемы датчика, а также алгоритма определения нижней границы облачности. Представлены основные характеристики прибора.

Ключевые слова: нижняя граница облачности, облакомер, лидар, атмосферный приземный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасности гражданской авиации в условиях постоянного развития необходимо измерение и прогнозирование погодных условий, в том числе облачности вблизи аэропортов. Наличие сильной облачности, особенно на низких высотах, может оказать опасное влияние на взлет и посадку самолета. В связи с этим предъявляются высокие требования к точности и оперативности получения и представления информации о высоте облаков. Поэтому разработка оптоэлектронного датчика измерения высоты нижней границы облачности (ВНГО) и параметров атмосферы в приземном слое является актуальной и востребованной задачей. Это один из наиболее важных метеорологических элементов, определяющих условия видимости при взлете и посадке воздушных судов.

Основная цель статьи заключается в демонстрации потенциала разработанного изделия под шифром «Тропос-1.5» и оценке его конкурентоспособности на фоне зарубежных аналогов.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

На момент 2015 года в государственном реестре сертифицированного оборудования аэродромов и воздушных трасс зарегистрировано три отечественных прибора для измерения нижней границы облачности и два зарубежных.

К большому сожалению, отечественные приборы для измерения нижней границы облачности уступают зарубежным по предельным дистанциям измерения, показателям надежности и точности, удобству технического обслуживания оборудования. В связи с этим значительная доля объема на российском рынке облакомеров представлена зарубежным оборудованием, характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики приборов зарубежных производителей

Производитель	Наименование	Рабочие характеристики		
		Диапазон измерений, м	Длина волны излучения, нм	Точность измерения, м
Vaisala	CL31	0÷7600	910	±5
Jenoptik	CHM15K "NIMBUS"	5÷15000	1064	±5
Campbell Scientific	CS135	0÷10000	910	±4,6
Allweatherinc	Model 8339	0÷7600	910	±6
Degrean Horizon	ALC30	15÷7500	1530	±6

ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ «ТРОПОС-1.5»

Принцип действия разработанного датчика (рис. 1) основан на светолокационном методе определения ВНГО. Высота (h) облаков определяется по формуле

$$h = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость света;

t – время, за которое свет проходит путь от излучателя до облака и обратно.

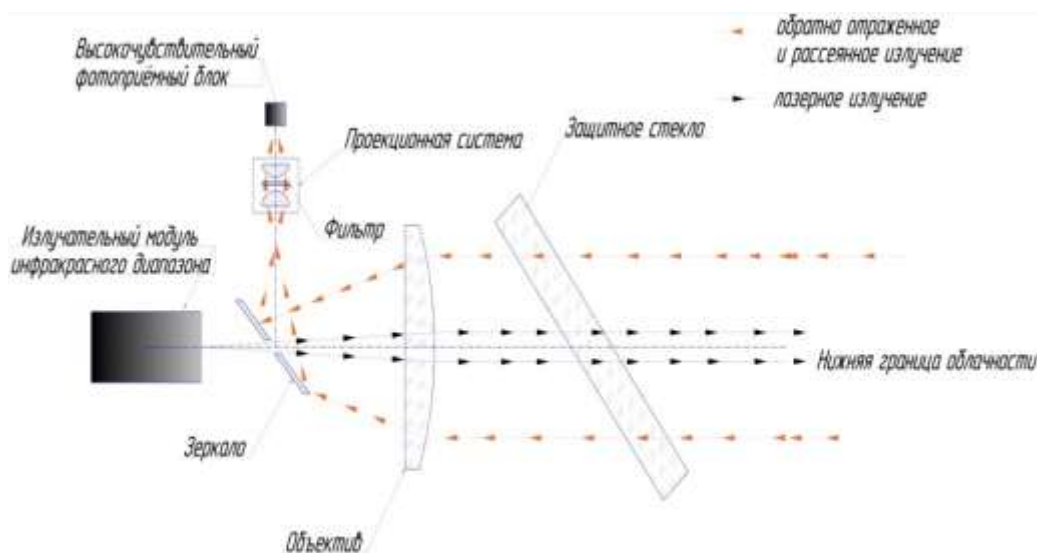


Рис. 1. Оптическая схема датчика

При светолокационном зондировании атмосферы принимаемый сигнал обратно рассеянного излучения определяется уравнением, которое при учете только однократного рассеяния имеет вид (2)

$$P(h) = P_0 A \beta_{\pi}(h) g(h) h^{-2} \exp \left[-2 \int_0^h \alpha(h) dh \right], \quad (2)$$

где $P(h)$ – мощность сигнала, принимаемого с высоты h ;

P_0 – мощность источника излучения;

A – постоянная, определяемая параметрами прибора;

$\beta_{\pi}(h)$ – коэффициент обратного рассеяния;

$g(h)$ – геометрический фактор прибора, зависящий от конструктивных параметров его оптической системы;

$\alpha(h)$ – коэффициент ослабления.

Облако, являясь аэрозольным образованием с большей плотностью крупных частиц, имеет больший коэффициент обратного рассеяния и ослабления, чем чистая, естественная атмосфера. В зависимости от типа облака его граница может быть очень резкой или плавной и достигать нескольких десятков метров. Поэтому определить наличие облака и его границы возможно, анализируя коэффициенты обратного рассеяния и ослабления лазерного излучения.

В табл. 2 приведены диапазоны значений коэффициентов обратного рассеяния и ослабления для атмосферы при различных метеоусловиях.

Таблица 2

Коэффициенты обратного рассеяния лазерные датчики

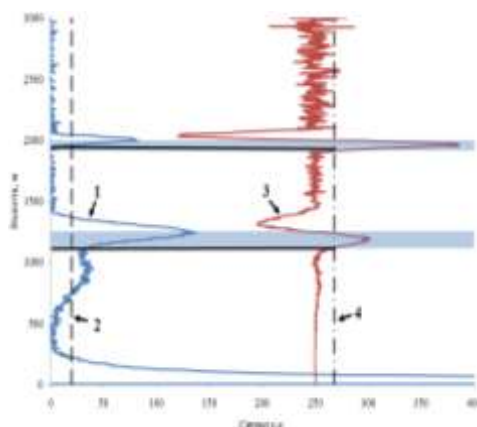
Состояние атмосферы (видимость)		Балл по коду	Метеорологическая дальность видимости V_M , км	Коэффициент ослабления, 10^{-3} км^{-1}
Туман	очень сильный	0	Менее 0,05	Более 21,221
	сильный	1	0,05–0,2	21,221–5,305
	заметный	2	0,2–0,5	5,305–2,122
	слабый	3	0,5–1	2,122–1,061
Дымка	очень сильная	4	1–2	1,061–0,531
	сильная	5	2–4	0,531–0,265
	заметная	6	4–10	0,265–0,11
	слабая	7	10–20	0,11–0,04
Хорошая видимость		8	20–50	0,04–0,009
Отличная видимость		9	50 и более	Менее 0,009

Для решения лидарного уравнения относительно β (коэффициента обратного рассеяния) или α (коэффициента экстинкции) необходимо провести первоначальную обработку данных лидарного зондирования, которая состоит из следующих основных этапов:

- вычитания фона;
- нормировки на R^2 ;
- сглаживания полученных данных медианным фильтром.

В разработанном изделии используются одновременно два алгоритма для фильтрации неоднородностей, что позволяет повысить эффективность детектирования облачности и ее границ.

Первый алгоритм позволяет вычислить метеорологическую дальность видимости (МДВ) по направлению луча. МДВ в облаке имеет условные значения от 50 до 150 м. Поскольку осадки или туман также обладают низкими значениями МДВ, то для достоверного детектирования облака необходимо провести дополнительный анализ распределения β . Этот анализ заключается в дифференцировании распределения и определения экстремумов распределения и скорости нарастания коэффициента обратного рассеяния. Графически это представлено ниже (рис. 2,а).



а)

Рис. 2. Обработка лидарного сигнала:

- а – графическое представление; 1 – детектируемый сигнал; 2 – порог по уровню коэффициента ослабления; 3 – первая производная от детектируемого сигнала (смещена для удобства визуализации); 4 – порог по величине градиента;
б – схема обработки сигнала оптоэлектронного датчика НГО (начало)

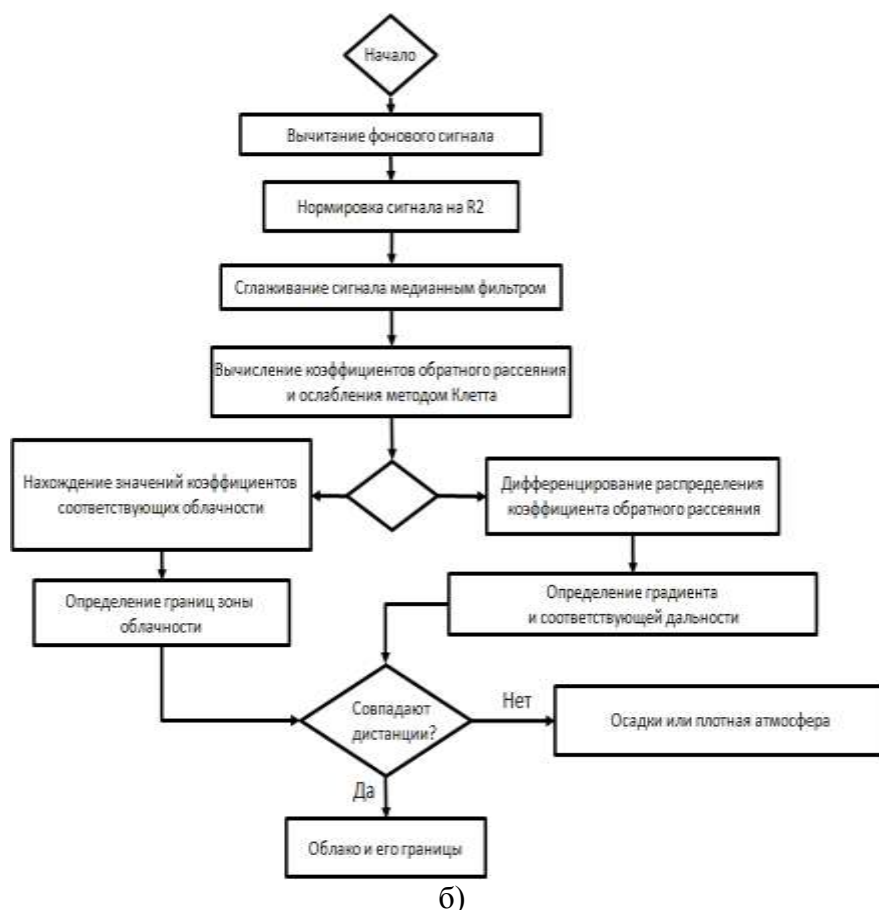


Рис. 2. Обработка лидарного сигнала:

а – графическое представление; 1 – детектируемый сигнал, 2 – порог по уровню коэффициента ослабления, 3 – первая производная от детектируемого сигнала (смещена для удобства визуализации), 4 – порог по величине градиента;
б – схема обработки сигнала оптоэлектронного датчика НГО (окончание)

Полный цикл обработки сигнала аэрозольного лидара можно представить схематично в виде циклограммы, отображенной на рис. 2,б.

Стоит отметить, что не существует четкого определения облака и его характеристик, поэтому количественные критерии коэффициента обратного рассеяния, МДВ и скорости нарастания β являются варьируемыми и могут быть скорректированы в зависимости от экспериментальных данных и особенности местности.

Внешний облик изделия и его технические характеристики представлены на рис. 3.



Длина волны, нм.....	1535
Класс безопасности.....	Class 1
Диапазон измерений ВНГО, м.....	0÷7500
Период выдачи измерений, с.....	2...120
Точность измерения, м.....	±5
Интерфейсы.....	Ethernet, RS-232, RS-485, Модем
Электропитание.....	187 ÷ 247В, 50Гц
Условия эксплуатации.....	-50°C÷+50°C
Габаритные размеры, мм.....	Ø530x860
Масса, кг.....	30

Рис. 3. Внешний вид разработанного датчика и его технические характеристики

«Тропос-1.5» выделяет до трех слоев облачности и определяет их нижнюю границу на расстоянии до 7,5 км. За счет большой полосы пропускания аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и короткой длительности импульса датчик обеспечивает пространственное разрешение 10 м, что позволяет получать информацию о тонкой структуре облаков.

В качестве излучателя используется компактный микроциповый лазер на длине волны 1535 нм, генерирующий импульсы длительностью 3 нс с энергией 7 мкДж. Для облегчения конструкции и минимизации габаритов, приемно-передающая система построена по оптической схеме с одним объективом, в фокусе которого находятся излучатель и активная площадка приемника. В качестве объектива используется асферическая линза со световым диаметром 100 мм. Для подавления части спектра солнечного излучения в изделии используется узкополосный фильтр, установленный в параллельный ход лучей приемного канала между компонентами проекционной системы.

Герметичность корпуса и система термостабилизации внутри изделия позволяют эксплуатировать датчик в условиях повышенной влажности (до 100%) при температуре от -50°C до 50°C . Прибор оборудован большим количеством типов интерфейсов для информационного взаимодействия и способен передавать данные на расстояния до 8 км.

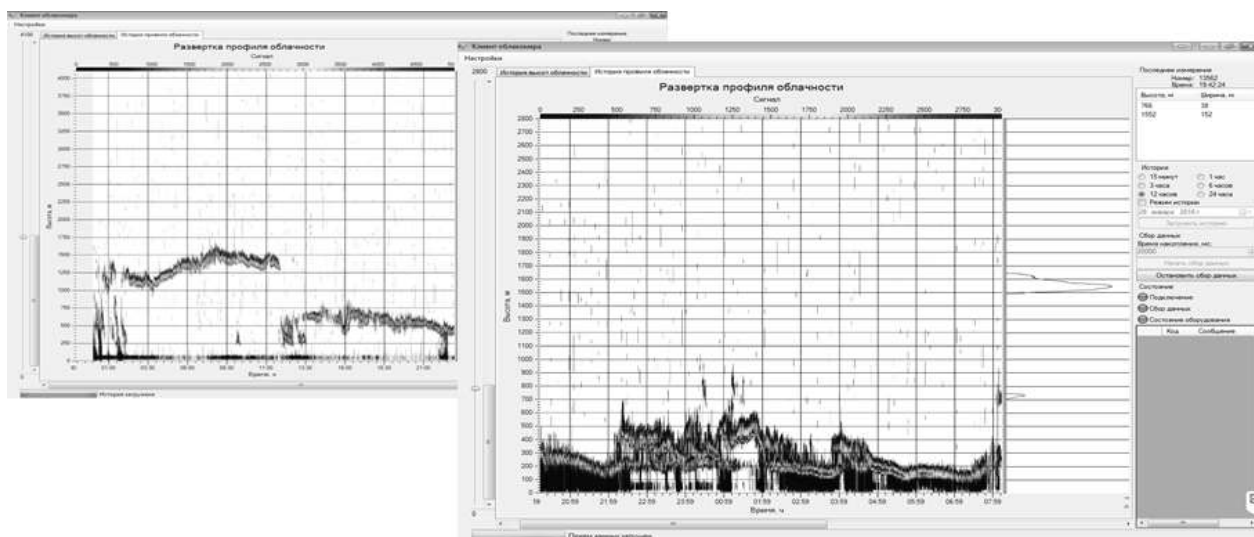


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программного обеспечения датчика

Программное обеспечение отображает и хранит данные о нижней границе облаков, профиле обратного рассеяния (рис. 4), а также выводит полную информацию о состоянии внутренних подсистем прибора.

Разработанное изделие полностью соответствует всем требованиям по измерению высоты нижней границы облачности во всей амплитуде изменчивости погодных условий и способно конкурировать с зарубежными аналогами на отечественном и мировом рынке.

Список используемых источников

1. Ковалев В.А., Рыбаков Е.Е., Щукин Г.Г. Некоторые характеристики лидарных сигналов при низкой облачности // Труды ордена Трудового Красного Знамени Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 1977. – Т. 395.
2. Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с накоплением / В.Г. Вильнер и др. // Фотоника. – 2007. – №6. – С. 22–26.