

Экспериментальная проверка измерителя высоты облачности

С.В. Зуев, Н.П. Красненко*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 2.10.2008 г.

Приводятся результаты экспериментального измерения высоты нижней границы облачности (ВНГО) пассивным моностатическим методом. Модель оптико-электронного измерителя ВНГО представляет собой две черно-белые телевизионные камеры на матрицах ПЗС с совмещенными линиями визирования. Фокусные расстояния оптических систем в применяемых камерах выбирались таким образом, чтобы оптимальный диапазон измеряемых высот лежал в пределах от 50 до 3000 м. Получаемые посредством телевизионных камер подобные разномасштабные изображения фрагментов облачности оцифровывались при помощи многоходовой компьютерной системы ввода изображения для последующей обработки. Приведены результаты экспериментальных измерений предложенной моделью измерителя и алгоритм определения ВНГО.

Ключевые слова: изображение объекта, фрагмент облачности, оптические системы измерителя, фокусное расстояние, коэффициент подобия изображений.

Введение

Поверхность земного шара в среднем на 50% закрыта облаками, которые являются одним из элементов кругооборота воды в природе. От состояния облачности в значительной степени зависит радиационный баланс земной поверхности. Высокое альbedo облаков увеличивает отражение излучения Солнца, что приводит к охлаждению системы «атмосфера–поверхность» (эффект солнечного альbedo). С другой стороны, облака поглощают и переотражают назад тепловое излучение поверхности планеты, что приводит к нагреванию системы «атмосфера–поверхность» (парниковый эффект) [1]. Таким образом, результирующее влияние облаков на радиационный баланс планеты и на формирование погоды и климата в том числе зависит и от облаков нижней и среднего ярусов, а также от облаков вертикального развития, имеющих нижнюю границу на высоте до 3–4 км [2].

Высота нижней границы облачности (ВНГО), наряду с высотой верхней границы облачности, количеством и формой облаков, относится к важнейшим характеристикам облачности. Для определения данного метеорологического параметра используются как косвенные методы измерения (по точке росы при данной приземной температуре воздуха и по атласу), так и прямые контактные (например, шаропилотный способ) и дистанционные. Дистанционные методы измерения, в свою очередь, классифицируются по используемому излучению на пассивные

и активные, а по используемому носителю на наземные, атмосферные и космические [1].

Среди активных методов широкое распространение получил светолокационный способ измерения ВНГО, основанный на измерении либо угла наблюдения светового пятна от прожектора (триангуляционный способ), либо времени распространения модулированного луча прожектора. Большое практическое использование получил лидарный метод, сущность которого заключается в анализе интенсивности излученного лазерного импульса, рассеянного под углом 180°.

У каждого из существующих методов определения ВНГО имеются свои преимущества и недостатки, как методологические, так и технологические. Например, спутниковый метод позволяет достаточно точно определять высоту верхней границы облачности, однако для определения нижней границы необходимо знать толщину облачного слоя [3], что связано с дополнительными сложностями и резко понижает достоверность получаемых спутниковых данных о значениях ВНГО.

Использование пассивных методов измерения позволяет значительно удешевить и упростить процесс измерения по сравнению с активными методами за счет простоты их реализации и отсутствия активных излучателей. Например, для реализации пассивного бистатического метода измерения [4] требуются два разнесенных на некоторое расстояние фотоприемника (например, телевизионные ПЗС-камеры) и устройство визуализации (персональный компьютер или телевизионный монитор). Недостатком такого метода является значительный территориальный разнос фотоприемников, что существенно затрудняет их оперативное обслуживание.

* Сергей Викторович Зуев (zuev@imces.ru, veuz@mail.ru),
Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru).

Принцип работы предлагаемого измерителя высоты облачности основан на использовании пассивного моностатического метода измерения ВНГО [5–7]. Измеритель прост в технической реализации и позволяет варьировать диапазоном и точностью измерений в зависимости от конкретных требований, условий эксплуатации и от типа используемого оборудования.

Сущность пассивного моностатического метода заключается в использовании зависимости изменения масштаба изображения объекта от расстояния до него при изменении фокусного расстояния оптической системы. При этом чем ближе расположен объект, тем больше будет изменение масштаба изображения объекта и, наоборот, чем дальше находится объект, тем изменение будет меньше.

Если в оптической системе используются два различных и известных фокусных расстояния f'_1 и f'_2 , то для предмета величиной y можно получить два подобных изображения y'_1 и y'_2 , отличающихся между собой только масштабом [8–10]. При этом размер предмета y и расстояние до него a будут постоянными (рис. 1).

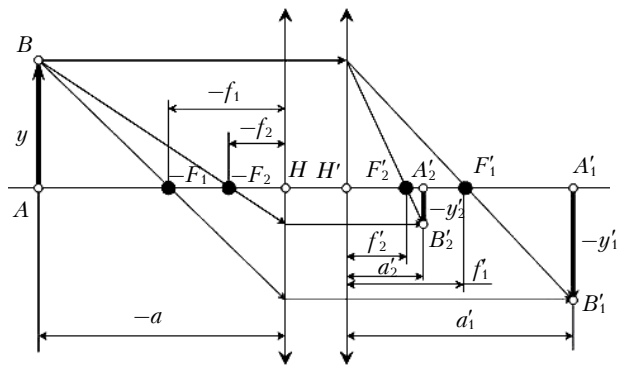


Рис. 1. Ход лучей в идеальных оптических системах с различными фокусными расстояниями

Используя законы геометрической оптики для случая наблюдения одного и того же объекта двумя оптическими системами, располагаемыми на одинаковом расстоянии от объекта, можно получить следующее выражение:

$$a = f'_2 \frac{1 - y'_1/y'_2}{(y'_1/y'_2)(f'_2/f'_1) - 1}, \quad (1)$$

из которого следует, что задачу определения расстояния a до предмета y можно свести к определению коэффициента подобия изображений y'_1 и y'_2 , полученных при f'_1 и f'_2 соответственно. Стоит отметить, что в выражении отсутствует значение y , т.е. для определения расстояния не требуется априорных знаний о величине предмета.

Экспериментальная модель измерителя ВНГО состоит из двух телевизионных камер, имеющих оптические системы с одинаковыми линиями визирования. Фокусные расстояния оптических систем (16 и 12 мм) были выбраны такими, чтобы оптимальный диапазон измеряемых высот нижней границы

облачности лежал в пределах от 50 до 3000 м. На рис. 2 показан график изменения коэффициента подобия изображений измеряемого фрагмента нижней облачности в зависимости от расстояния до него.

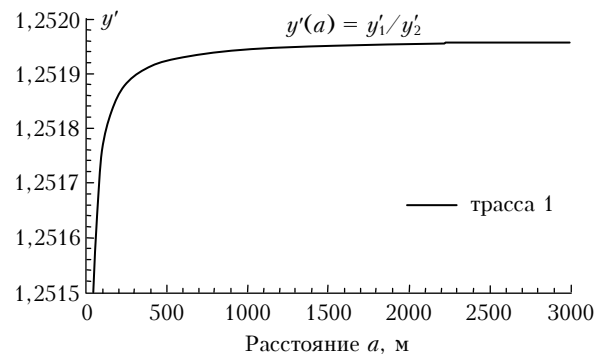


Рис. 2. Зависимость коэффициента подобия изображений от расстояния до измеряемого фрагмента облачности

Полученные разномасштабные изображения выбранного фрагмента облачности обрабатывались с помощью персонального компьютера. Алгоритм измерения высоты НГО содержал следующую последовательность действий:

- визуальный выбор фрагмента облачности;
- запись двух разномасштабных изображений выбранного фрагмента облачности;
- бинаризация и оконтуривание изображений;
- нахождение подобных фигур на оконтуренных разномасштабных изображениях;
- определение коэффициента подобия выбранных фигур;
- определение расстояния до выбранного фрагмента облачности;
- определение ВНГО с учетом влияния кривизны Земли.

Точность измерения высоты по предлагаемому методу в первую очередь зависит от точности определения коэффициента подобия фигур на разномасштабных изображениях, а также от точности калибровки фокусных расстояний оптических систем измерителя. Для определения ВНГО с максимальной возможной для данного метода точностью требуется определение коэффициента подобия изображений с точностью от 6 до 8 знаков после запятой в зависимости от измеряемого диапазона высот. Например, при заданных фокусных расстояниях оптических систем, для фрагментов облачности, находящихся на расстоянии $a = 1500$ м от точки измерения, расчетный коэффициент подобия изображений $y'_1/y'_2 = 1,25195187$, а для $a = 1600$ м коэффициент подобия $y'_1/y'_2 = 1,25195276$. Такая точность определения коэффициента подобия предъявляет аналогичное требование к точности калибровки фокусных расстояний оптических систем измерителя.

На рис. 3 приведен пример определения ВНГО предлагаемым измерителем.

Два представленных разномасштабных изображения фрагмента нижней облачности были получены 4 апреля 2008 г. в 13.08 по местному времени

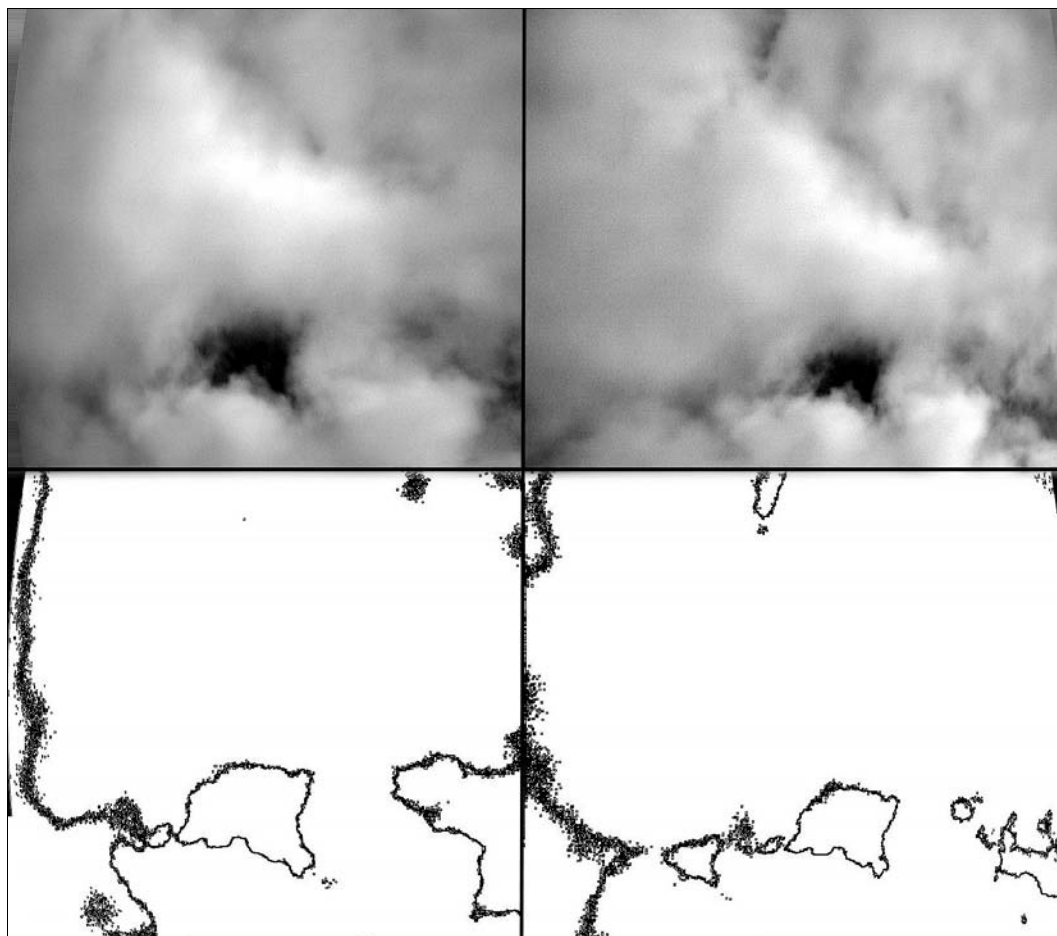


Рис. 3. Пример разномасштабных (подобных) изображений фрагмента облачности до и после обработки

(GMT +6). Относительная влажность воздуха на момент проведения измерения составляла 37%. Используя выражение (1) и учитывая, что измеряемый фрагмент облачности находился под углом 39° от горизонта, было получено значение высоты нижней границы – 1449 м. На момент измерения минимальный уровень конденсации, рассчитанный по эмпирической формуле Ипполитова [11]:

$$H = 24(100 - f), \quad (2)$$

где f – относительная влажность воздуха, составлял 1512 м, что, с учетом поправки для данной формулы $\pm 10 \div 20\%$, хорошо согласуется с полученным результатом.

Экспериментальная проверка пассивного моностатического измерителя высоты нижней границы облачности показала, что данный метод имеет хорошие перспективы развития. К его достоинствам можно отнести простоту технической реализации и, как следствие, низкую стоимость аппаратной части измерителя. Кроме того, автоматизация процесса производства измерения и последующего определения высоты облачности достаточно просто реализуется программным способом, что позволяет использовать измеритель автономно или в дистанционном режиме работы.

1. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
2. Атлас облаков / Под ред. А.Х. Новожилова. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 266 с.
3. Hutchison K., Huang A. Cloud base height. Visible/infrared imager/radiometer suite (VIIRS). Algorithm theoretical basis document. Ver. 5. Raytheon Systems Company, 2002. 46 p.
4. Способ определения высоты, направления и скорости движения нижней границы облачности: Пат. 2321029. Россия, МПК51, G01W 1/00. Зуев С.В.; ИМКЭС СО РАН. № 2006123966/28; Заявл. 04.07.06; Опубл. 27.03.08. Бюл. № 9.
5. Zuev S.V., Krasnenko N.P. Determination of cloud base height using the passive monostatic method // Proc. SPIE. 2007. V. 6936. P. 156–161.
6. Зуев С.В., Красненко Н.П. Определение высоты нижней границы облачности пассивным моностатическим методом // Седьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Мат-лы Рос. конф. Томск, 8–10 окт. 2007 г. Томск: ООО «Аграф–Пресс», 2007. С. 373–376.
7. Моностатический способ определения расстояния до объекта, его направления и скорости движения: Решение о выдаче патента на изобретение. Россия, МПК51, G01C 3/32. Зуев С.В.; ИМКЭС СО РАН. № 2007116632/28; Заявл. 02.05.07.

8. *Прикладная оптика* / Под общ. ред. Н.П. Заказнова. М.: Машиностроение, 1988. 312 с.
9. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
10. *Оптические приборы в машиностроении: Справочник* / М.И. Апенко и др. М.: Машиностроение, 1974. 238 с.
11. *Богаткин О.Г.* Авиационная метеорология. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2005. 328 с.

S.V. Zuev, N.P. Krasnenko. **Experimental research of ceilometer.**

Experimental researches of cloud base heights (CBH) by a passive monostatic ceilometer were carried out. The ceilometer experimental model consists of two television cameras MVK-16 with common sight lines. Cameras lens focal lengths were chosen for measurement of height from 50 to 30000 m. Obtained different scale images of the chosen cloudiness fragment entered a personal computer for processing. CHB measurement algorithm is described. The factors influencing the accuracy of measurements are specified and the obtained results of measurements are presented.