

Разработка голограммного оптического элемента для лидара

Е.А. Селедкина¹, А.В. Демин¹, А.А. Екименко¹

¹ИТМО, Кронверкский проспект, д.49, г. Санкт-Петербург, Россия, 197101

Аннотация. В данной работе предложено использовать концепцию сканирующего телескопа с использованием голографического оптического элемента в лидаре для измерения высоты нижней границы облаков, преимущества которой заключаются в уменьшении габаритных размеров и веса лидара, уменьшении стоимости прибора и увеличении производительности работы, упрощении работы по юстировке и калибровке. Предложена методика расчета параметров голограммного оптического элемента.

1. Введение

Облачность относится к приоритетным объектам изучения в физике атмосферы и климатозоологического мониторинга. Система мониторинга облачности включает в себя сеть как наземных, так и космических наблюдений, обеспечивающих получение непрерывных рядов наблюдения по основным объектам климатозоологического мониторинга [1-3]. В сложном комплексе метеорологических элементов и явлений, участвующих в формировании погоды и климата, облакам принадлежит определяющая роль. Поэтому, большое значение имеет мониторинг параметров облаков, таких как их количество, форма, направление движения и повторяемость на всех ярусах, водность, горизонтальная и вертикальная протяженность и др. Нижняя и верхняя границы облачности относятся к важнейшим параметрам, описывающим состояние облачности в определенные моменты времени. Непрерывные ряды наблюдений высоты нижней и верхней границ облачности, наравне с другими параметрами, характеризующими состояние облачности, используются в синоптико-климатических моделях облачности. Кроме того, облака оказывают существенное влияние на техногенную деятельность человека, связанную с использованием воздушного пространства земли. Так, например, в метеорологическом обеспечении авиации, высота нижней границы облачности, наряду с дальностью видимости, является одним из важнейших параметров в эксплуатационном метеорологическом минимуме аэродромов, определяющем режим их работы [4-6]. Приборы и аппаратуры контроля текущего состояния атмосферы с поверхности земли нашли широкое применение как в оперативной практике, так и в научных исследованиях, связанных с изучением строения атмосферы и динамических процессов, протекающих в ней. Вместе с тем, совершенствование и создание новых дистанционных методов и аппаратурных комплексов дистанционного контроля атмосферы и облачности остается одним из наиболее перспективных направлений развития метеорологического приборостроения.

2. Усовершенствование конструкции лидара

В данной статье предполагается усовершенствование конструкции лидара для измерения высоты нижней границы облаков, используя голограммный оптический элемент (ГОЭ) в качестве зеркала сканирования.

Как правило, лидарам требуется большая собирающая апертура, с целью максимизировать сигнал обратного рассеяния лазера и узкое поле зрения, необходимое для ограничения количества фонового излучения, достигающего детектор. Преимущество ГОЭ состоит в том, что они могут использовать непрозрачные подложки для поддержки голографической пленки или рисунка, что открывает возможность использования ультралегких материалов, таких как эпоксидные смолы графита и аналогичные композиты, таким образом мы можем уменьшить габаритные размеры и вес лидара, что повлечет за собой не только уменьшение стоимости прибора, но и увеличит его производительность работы, упростит работу по юстировке и калибровке.

В связи с этим представляем вашему вниманию концепцию сканирующего телескопа с использованием голографического оптического элемента (ГОЭ). [7-9]

В исследуемой конструкции зеркало сканирования заменяем на ГОЭ. В оптическом сканирующем устройстве (рис.1), используется источник оптической энергии (лазер), и вращающийся ГОЭ, имеющий ось вращения, перпендикулярную плоскости его подложки, и неподвижный фокус, который расположен на его оси вращения. При этом ГОЭ дифрагирует источник оптической энергии под углом к своей оси вращения, обеспечивая область конического сканирования.

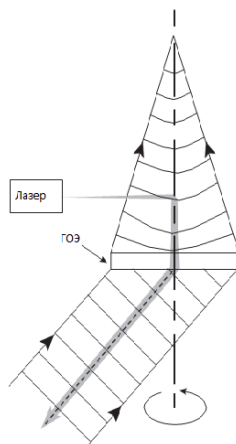


Рисунок 1. Оптическое сканирующее устройство.

3. Методика расчета голограммных оптических элементов

Голограммный оптический элемент не должен вносить искажений в ход лучей в оптике и на выходе из нее, а просто перенаправлять их, подчиняясь определенному закону, одинаковому для всех направлений хода лучей, т.е. должны обеспечивать эквивалентность вышедшего излучения вошедшему, а так же обеспечивать получение равномерного по всему полю и пределах области выходного зрачка. [10,11]

Задачей данного расчета является определение основных параметров голограммной пластинки (марка стекла, толщина, параметры ГОЭ), а также определение требований к параметрам схемы (размер выходного зрачка, угол поля), работающей в сочетании с данным элементом. [12]

Изначально, определим угол полного внутреннего отражения голограммной пластинки:

$$\alpha_{\text{пво}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1)$$

где n_2 и n_1 - показатели преломления стекла и среды, из которой лучи попадают в стекло.

Так как ГОЭ представляет собой дифракционные решетки, то для определения их периода запишем формулу решетки:

$$d_{\text{реш}}(n_{\text{ст}} \sin \alpha + n_1 \sin \theta) = m\lambda \tag{2}$$

где $n_{\text{ст}}$ -показатель преломления стекла; $n_1=1$ - показатель преломления воздуха; θ -угол дифракции на решетке; α -угол распространения излучения на пластинке; λ -длина волны излучения.

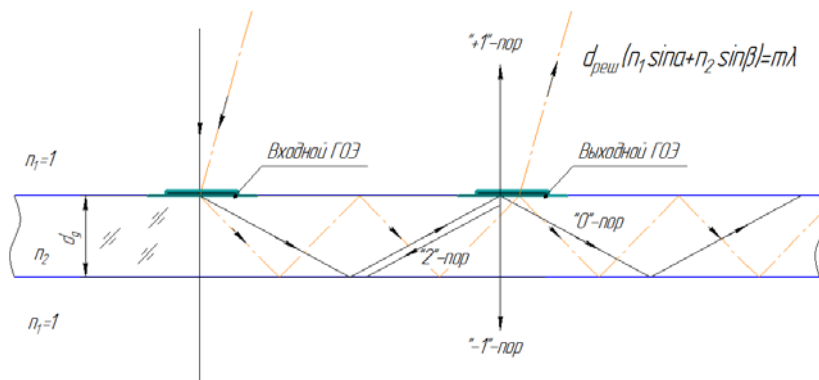


Рисунок 2. Ввод и вывод излучения в голограммную пластинку.

Учитывая, что излучение распространяется в пластинке под углом полного внутреннего отражения, получим:

$$n_{\text{ст}} \sin \alpha \geq n_1 \tag{3}$$

При подстановке выражения (3) в (2), выведем формулу для определения периода решеток, входящих в состав пластинки голограммного элемента:

$$d_{\text{реш}} = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\text{max}}} \tag{4}$$

Из формулы (2) определим максимальный угол входа в пластинку дифрагированного на входной решетке излучения, которое в дальнейшем будет необходимо нам для оценки размера выходного зрачка системы.

$$\sin \alpha_{\text{max}} = \frac{\frac{\lambda}{d_{\text{реш}}} + \sin \theta_{\text{max}}}{n_{\text{ст}}} \tag{5}$$

Затем определим расстояние между соседними переотражениями луча:

$$L_d = 2d_{\text{пл}} \cdot \text{tg} \alpha_{\text{max}} \tag{6}$$

где $d_{\text{пл}}$ -толщина пластинки, α_{max} -максимальный угол входа луча в голограммную пластинку. Приведем несколько расчетов и вывода соответствующих зависимостей.

Для примера используем марки стекла ТФ4, ТФ7, показатель преломления которых $n_{\text{ст}} = 1,73$, угол поля $\theta = 5^\circ$, тогда

$$\alpha_{\text{пво}} = \arcsin\left(\frac{1}{n_{\text{ст}}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,74}\right) = 35,3^\circ \tag{7}$$

$$\alpha_{\text{max}} = \arcsin\left[\frac{1 + 2 \cdot \sin \theta_{\text{max}}}{n_{\text{ст}}}\right] = 42,7^\circ \tag{8}$$

Период входной и выходной решеток:

$$d_{\text{реш}} = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\text{max}}} = \frac{0,532}{1 + \sin 5^\circ} = 0,489 \text{ мкм} \tag{9}$$

Период промежуточной решетки для поворота излучения на 45° для сохранения шага исследования зрачков отличается от периода входной и выводной решеток и вычисляется по формуле (5):

$$d_{\text{реш}}^{\text{пр}} = \frac{d_{\text{реш}}}{\sqrt{2}} = 0,346 \text{ мкм} \tag{10}$$

Для обеспечения двух данных периодов решеток для симметричной схемы получения углы схемы соответственно равны:

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda_{зан}}{2d_{реш}}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{0.4416}{2 \cdot 0.489}\right) = 53.6^{\circ} \quad (11)$$

$$\gamma^{np} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda_{зан}}{2 \cdot d_{реш}^{np}}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{0.4416}{2 \cdot 0.345}\right) = 79.3^{\circ} \quad (12)$$

4. Вывод

В статье предложено использовать концепцию сканирующего телескопа с использованием голографического оптического элемента в лидаре для измерения высоты нижней границы облаков, преимущества которого повлекут за собой уменьшение габаритных размеров и вес лидара, уменьшение стоимости прибора и увеличит его производительность работы, упростит работу по юстировке и калибровке. Рассчитаны зависимости между основными параметрами светопроводящей пластины (таблица 1). Проанализирована зависимость показателя преломления стекла голограммного элемента от угла ПВО, чем больше показатель преломления стекла подложки, тем меньше минимальный угол ПВО и соответственно максимальный угол ввода излучения в голограммную пластину (рисунок 3).

Из таблицы 1 следует, что данная схема построения голограммного оптического элемента может обеспечить углы поля в 30 градусов и выше, но при этом необходимо использовать стекла с высоким показателем преломления.

Таблица 1. Зависимость между основными параметрами светопроводящей пластины.

№	Поле, град	$n_{ст}$	$d_{реш}, \text{мкм}$
1	$\pm 5^{\circ}$	1.62	0.49
2	$\pm 5^{\circ}$	1.73	0.49
3	$\pm 10^{\circ}$	1.62	0.45
4	$\pm 10^{\circ}$	1.53	0.45
5	$\pm 7^{\circ}$	1.62	0.47
6	$\pm 7^{\circ}$	1.53	0.47
7	$\pm 5^{\circ}$	1.53	0.49
8	$\pm 15^{\circ}$	1.71	0.42
9	$\pm 15^{\circ}$	1.74	0.42
10	$\pm 18^{\circ}$	1.74	0.406

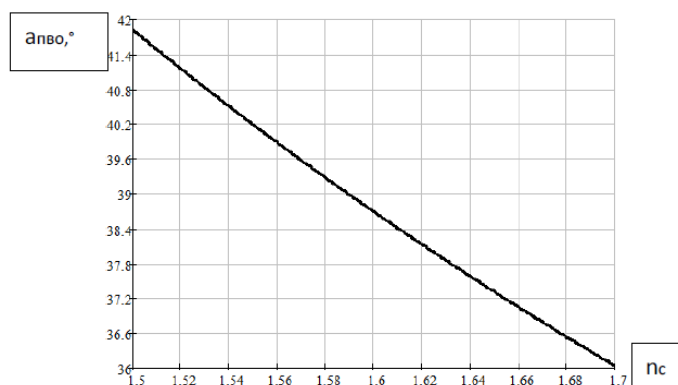


Рисунок 3. Зависимость угла ПВО от угла преломления стекла.

5. Литература

- [1] Ипполитов, И.И. Геофизический стационар ИОМ СО РАН для монито-ринга климато-экологических измерений / И.И. Ипполитов, М.В. Кабанов, В.Н. Маричев // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 1. – С. 36-43.

- [2] Богаткин, О.Г. Авиационные прогнозы погоды: учебное пособие / О.Г. Богаткин, Г.Г. Тараканов. – Спб.: Энергомашиностроение, 2005. – 250 с.
- [3] Комаров, В.С. Пространственная статическая структура поля общей облачности / В.С. Комаров, Н.Я. Ломкина, В.А. Ременсон // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10, № 1. – С. 113-118.
- [4] Крутиков, В.А. Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды и климата / В.А. Крутиков, Ю.М. Полищук // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 1. – С. 12-20.
- [5] Тудрий, В.Д. О климатической модели облачности регионов применительно к задачам эксплуатации оптико-электронных систем // Оптика атмосферы. – 1988. – Т. 1, № 9. – С. 87-89.
- [6] Руководство по определению дальности видимости на ВПП (RVR): РД 52.21.2006. – М.: АНО "Метеоагентство Росгидромета", 2006. – 96 с.
- [7] Корешев, С.Н. Основы голографии и голограммной оптики / С.Н. Корешев // СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 97 стр.
- [8] Schwemmer, G.K. Holographic optical elements as conically scanned lidar telescopes / G.K. Schwemmer, T.D. Wilkerson // Optical remote sensing of the atmosphere. Technical Digest Series. - Washington, DC: Optical Society of America. – 1991. – Vol. 18. – P.310-312.
- [9] Schwemmer, G. Conically scanned holographic lidar telescope / G. Schwemmer // United States Patent #5,255,065, issued October 19, 1993.
- [10] Schwemmer, G. Compact scanning lidar systems using holographic optics / G. Schwemmer, T. Wilkerson, D. Guerra // Optical remote sensing for industry and environmental monitoring. Proceedings of SPIE.– 1998. – Vol. 3504. – P.51-59.
- [11] Schwemmer, G. NASA lidar uses HOEs for lightweight scanning / G. Schwemmer, D. Miller, T. Wilkerson, D. Guerra, R. Rallison // Laser Focus World. – 2002. – Vol. 38(6). – P. 141-147.
- [12] Zhanjun, Y. Virtual display design using waveguide hologram in conical mounting configuration / Y. Zhanjun, L. Wenqiang // Optical engineering. – 2011. – Vol. 50.

Development of a hologram optical element for a lidar

E. Seledkina¹, A. Demin¹, A. Ekimenko¹

¹ITMO, Kronversky prospect, 49, St. Petersburg, Russia, 197101

Abstract. In this paper, we propose to use the concept of a scanning telescope with the use of a holographic optical element in the lidar to measure the height of the cloud base, the advantages of which are to reduce the overall dimensions and weight of the lidar, reduce the cost of the instrument, and increase the productivity of work, simplify the work of aligning and calibrating. A technique for calculating the parameters of a hologram optical element is proposed.

Keywords: lidar for measuring the height of the lower cloud boundary, holographic optical element, diffraction grating.