# Формирование и идентификация данных структуры облака методами цифровой голографии

**Е.А.** Екименко<sup>1</sup>, **А.А.** Екименко<sup>1</sup>, **А.В.** Демин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТМО, Кронверкский проспект 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101

**Аннотация.** В данной статье представлена методология измерения размера частиц на основе цифровой голографии. Так же обсуждается обработка цифровых голограмм для измерения размера и формы частиц как для сферических, так и для частиц произвольной формы. Описан автоматизированный алгоритм идентификации частиц по зарегистрированной голограмме и последующего измерения размера и формы. Экспериментальные результаты, полученные с помощью голограмм сферических и несферических частиц, демонстрируют эффективность предложенного алгоритма измерения.

### 1. Введение

В настоящее время методы цифровой голографии используются для исследования аэрозолей, оседающих частиц, двухфазных потоков, планктонных частиц, технологических сред, облачных частиц, применяются в задачах экологии, биологии, медицине, технологических процессах, оптике атмосферы, лабораторных исследованиях. Голографические методы обеспечивают большую глубину регистрируемого пространства и приемлемое разрешение одновременно, что не достигается другими методами[1,4].

В науках об атмосфере импульсная голография долгое время считалась потенциально универсальным инструментом для определения микрофизических величин, таких как размер, форма и распределение расстояний движущихся частиц в воздухе, таких как капли или ледяные кристаллы в облаках [2, 3, 6], необходимые для того, чтобы понять их роль в химии атмосферы или понять процессы, такие как изморозь или образование снега.

С помощью методов цифровой голографии можно получить информацию о форме частицы, её размере, трёхмерном положении и скорости перемещения в определённый момент времени, реконструировать трёхмерную траекториюдвижения.

В процессе голографической регистрации форма частицы в восстановленном изображении может искажаться, что в ряде случаев осложняет процедуру её идентификации, а также определения вышеперечисленных параметров. Поэтому для решения исследовательских и прикладных задач требуется обеспечить условия голографирования, гарантирующие совпадение форм частицы и её голографического изображения в пределах заданной погрешности. Для контроля этого совпадения, а также для отбора приемлемых голографических изображений частиц необходимы количественные критерии качества.

Использование современных видеокамер обеспечивает возможность регистрации голограмм в электронной форме и обработки их на компьютере. При этом возможно получение количественных данных об амплитуде и фазе волны, отраженной от исследуемого объекта или прошедшей через него.

### 2. Физический процесс записи цифровой голограммы

Физический процесс записи цифровой голограммы показан на рисунке 1. Рассмотрим частицу с амплитудной функцией пропускания  $O(\xi,\eta)$ , освещенную плоской волной единичной амплитуды с длиной волны  $\lambda$ . Распределение поля в плоскости записи на расстоянии z может быть математически выражено как [5]

$$\psi(x,y) = \left[1 - O(x,y)\right] \otimes h_z(x,y) \tag{1}$$

где  $\otimes$  обозначает операцию свертки, а  $h_{z}\left( x,y\right)$  - ядро дифракции Френеля, определяемое как

$$h_{z}(x,y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^{2} + y^{2})\right]$$
 (2)

При записи этого распределения поля  $\psi(x,y)$  коэффициент пропускания амплитуды голограммы пропорционален распределению интенсивности

$$I(x,y) = 1 + |\theta(x,y) \otimes h'_z(x,y)|^2 - O(x,y) \otimes h'_z(x,y)$$
  
+  $O^*(x,y) \otimes h'^*_z(x,y)$  (3)

где,

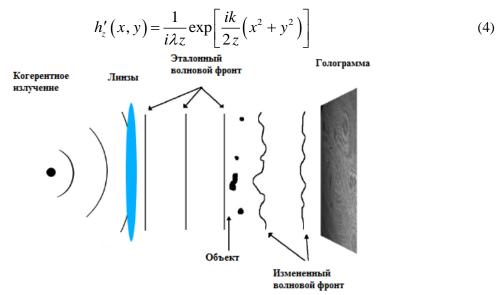


Рисунок 1. Физический процесс записи цифровой голограммы.

Первое и второе слагаемые уравнения (3) представляют прошедший свет и интермодуляцию, которым можно пренебречь, потому что его амплитуда очень мала по сравнению с другими слагаемыми [11]. Третье слагаемое соответствует виртуальному изображению, в то время как последнее слагаемое можно использовать для создания реального изображения распределения частиц. В оптической реконструкции голограмма освещается тем же коллимированным когерентным светом. Расстояние восстановления установлено равным расстоянию записи, восстановленное поле рассчитывается следующим образом

$$\phi(x,y) = I(x,y) \otimes h_z(x,y)$$

$$= 1 - O(x,y) \otimes h'_{2z}(x,y) + O^*(x,y)$$
(5)

Первые два слагаемых можно рассматривать как поле голограммы одной и той же частицы, записанной на расстоянии 2z, а третье слагаемое представляет собой восстановленное

изображение частицы. Из-за природы квадратичного детектора восстановленное изображение пропорционально интенсивности  $\left|O^*\left(x,y\right)\right|^2$ .

### 3. Извлечение информации из цифровых голограмм

В цифровой голографии, во-первых, голограммы записываются, а во-вторых, данные анализируются. При анализе данных выполняется восстановление объема, обнаружение частиц, затем вычисляются свойства частиц, что в итоге дает информацию о параметрах облака. На рисунке 2 представлены шаги алгоритма, необходимые для извлечения параметров облаков из облачных частиц. Первым шагом выполняется восстановление изображений с камеры. Каждое изображение с камеры содержит информацию о частицах. Для восстановления этой информации объем обнаружения восстанавливается путем реконструкции многих поперечных слоев, разделенных расстоянием dz. Каждый слой представляет сфокусированное изображение. В дополнение к обычной визуализации, голография выявляет не только информацию об амплитуде, но так же информацию о фазе[7,8,9]. Общий объем состоит из дискретных элементов, называемых вокселями, которые определяются апертурой пикселя и расстоянием между слоями dz. Воксели частиц отличаются от вокселей фона бинаризацией с использованием сложного порога. Воксели расширяются для включения некоторых вокселей фона и затем группируются с помощью метода, называемого маркировкой подключенного компонента, который группирует смежные воксели вместе.

Сгруппированные воксели представляют вероятную частицу. Следующий шаг - найти z-положение, в котором частица находится в фокусе. Наилучшая плоскость в фокусе определяется путем поиска максимальной резкости края с применением градиентного фильтра Собеля. В результате получается четкое двумерное изображение частицы. Из всех частиц голограммы, которых обычно несколько сотен, частицы вблизи границ исключаются для дальнейшего анализа, поскольку они могут быть зарегистрированы только частично и, таким образом, имеют неправильный размер. Все более мелкие частицы внутри цилиндрического объема вокруг более крупной частицы также исключаются.

- В результате проделанных шагов, получается набор контуров, соответствующих частицам, обнаруженным в рассматриваемой реконструкции. Для не сферических частиц могут быть получены следующие метрики:
- 1) Эквивалентный диаметр, соответствующий диаметру окружности с той же площадью, что и у идентифицированной области. Этот параметр используется для систем, которые являются сферическими или близкими к сферическим.
- 2) Длина большой и вспомогательной осей, соответствующая длине оси эллипса с таким же нормализованным центральным моментом второго порядка. В этой метрике используются несферические частицы, у которых одна характерная длина достаточно длиннее, чем у других (Kempkesetal., 2008).

Естественно, распределение эквивалентного диаметра соответствует распределению частиц по размерам (PSD) частиц, если частицы являются сферическими.

Таким образом, измеренные значения (эквивалентный диаметр и длина осей) необходимо преобразовать в истинные значения с использованием коэффициента увеличения:

$$r = \frac{r_{pixels} \Delta x}{M(d_0)} \tag{6}$$

где  $r_{pixels}$  - измеренный размер частицы в пикселях,  $\Delta x$  -размер апиксела на ПЗС-камере, а  $d_0$  -глубина фокусировки каждой частицы.

Чтобы получить гистограммы свойств частиц, необходима целая последовательность голограмм, чтобы вычислить статистически значимую оценку этих свойств. Например, расчет спектров размера требует достаточного объема, который необходимо исследовать, чтобы получить достаточное количество частиц для оценки распределения по размерам. Это особенно верно для более крупных кристаллов льда, которые имеют тенденцию встречаться в низких

концентрациях. Часто требуется последовательность не менее ста голограмм. Концентрации облачных частиц рассчитываются путем деления концентраций, измеренных внутри прибора, на эффективность на входе.

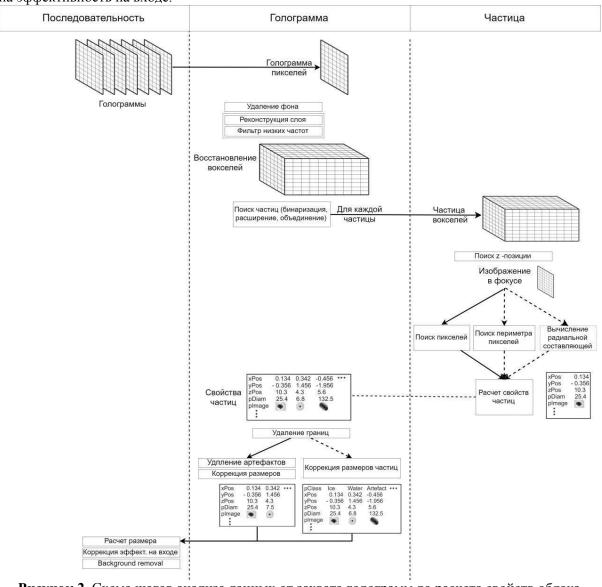


Рисунок 2. Схема шагов анализа данных от захвата голограмм до расчета свойств облака.

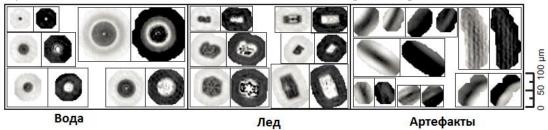


Рисунок 3. Полученные результаты.

#### 4. Заключение

В данной статье была представлена методология измерения размера частиц на основе цифровой голографии. Так же обсуждается обработка цифровых голограмм для измерение размера и формы частиц как для сферических, так и для частиц произвольной формы. Описан автоматизированный алгоритм идентификации частиц по зарегистрированной голограмме и

последующего измерения размера и формы. Экспериментальные результаты, полученные с помощью голограмм сферических и несферических частиц, демонстрируют эффективность предложенного алгоритма измерения.

## 5. Литература

- [1] Colbeck, S. A review of the friction of snow skis / S. Colbeck // Journal of Sports Sciences. 1994. Vol. 12(3). P. 285-295.
- [2] Fugal, J.P. Airborne digital holographic system for cloud particle measurements / J.P. Fugal, R.A. Shaw, E.W. Saw, A.V. Sergeyev // Applied Optics. 2004. Vol. 43(32). P. 5987-5995.
- [3] Kaikkonen, V. A holographic in-line imaging system for meteorological applications / V. Kaikkonen, D. Ekimov, A. Makynen // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). 2013 P. 1630-1635.
- [4] Yang, Y. Determination of depth-of-focus in lens lessin-line digital particle holography // Y. Yang, B. Kang // Optik-International Journal for Light and Electron Optics. 2011 Vol. 122(17). P. 1552-1557.
- [5] Kim, M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy / M.K. Kim // Journal of Photonics for Energy. 2010. P. 018005-50
- [6] Grabowski, W. Measurement of the size and position of aerosol droplets using holography / W. Grabowski // Opt Laser Technol. 1983. Vol. 8. P. 199-205.
- [7] Borrmann, S. On spatial distribution and inter-droplet distances measured instratus clouds with in-line holography / S. Borrmann, R. Jaenicke, P. Neumann // Atmos Res. 1998. Vol. 49. P. 199-212.
- [8] Owen, R.B. In-line digital holographic sensor for monitoring and characterizing marineparticulates / R.B. Owen, A.A. Zozulya // Opt. Eng. 2000. Vol. 39. P. 2187-2197.
- [9] Black, K.S. Incipient erosion of biostabilized sediments examined using particle-field optical holography // K.S. Black, H. Sun, G. Craig, D.M. Paterson, J. Watson, T. Tolhurst // Environ SciTechnol. 2001. Vol. 35. P. 2275-2281.

# Formation and identification of cloud structure data by digital holography

E.A. Ekimenko<sup>1</sup>, A.A. Ekimenko<sup>1</sup>, A.V. Demin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO, Kronversky Pr. 49, St. Petersburg, Russia, 197101

**Abstract.** This article presents a methodology for measuring particle size based on digital holography. The processing of digital holograms for measuring the size and shape of particles for both spherical and particles of arbitrary shape is also discussed. An automated algorithm for the identification of particles from a registered hologram and the subsequent measurement of size and shape is described. The experimental results obtained using holograms of spherical and non-spherical particles demonstrate the effectiveness of the proposed measurement algorithm.