

Новый сенсор устраняет оптические барьеры

Арсений Ворошилов, по материалам UConn College of Engineering

Традиционная для современных систем формирования изображения система обобщенно состоит из оптического устройства – объектива, фоточувствительного преобразователя «свет – сигнал» (датчика изображения) и подсистемы обработки данных, считанных с датчика – процессора. На выходе получается видеосигнал того или иного формата.

Конструкция такой системы требует очень точного сопряжения всех элементов, в том числе фокальной плоскости объектива и сенсора. Любое отклонение от оптимальных параметров приводит к видимому и довольно существенному ухудшению качества результирующего изображения. Поэтому вполне можно утверждать, что традиционной системе присущи значительные ограничения, в основном, в оптической ее части. Но, похоже, появилось решение, позволяющее преодолеть если не все, то многие из этих барьеров.

Лаборатория профессора Гуань Чжэна разработала новый датчик изображения, который способен обеспечить очень высокое оптическое разрешение вообще без использования объективов. По аналогии с массивом телескопов, который позволил сделать первый снимок черной дыры, в новом устройстве используется большое количество сенсоров, работающих синхронно, а результирующее изображение формируется с помощью компьютерных вычислений, совмещающих элементарные изображения от каждого из сенсоров, что позволяет получить на выходе очень высокое разрешение с отображением мельчайших деталей.

Надо сказать, что технологии съемки изменили то, как люди видят окружающий мир – от изучения дальних галактик с помощью масси-

вов радиотелескопов до рассмотрения микроскопических деталей внутри живых клеток. Тем не менее, несмотря на десятилетия новаторских разработок, сохранялся и фундаментальный барьер, состоящий в невозможности съемки высокоразрешающего изображения с широким углом поля зрения в оптическом диапазоне волн без применения громоздких объективов и точного сопряжения элементов съемочной системы.

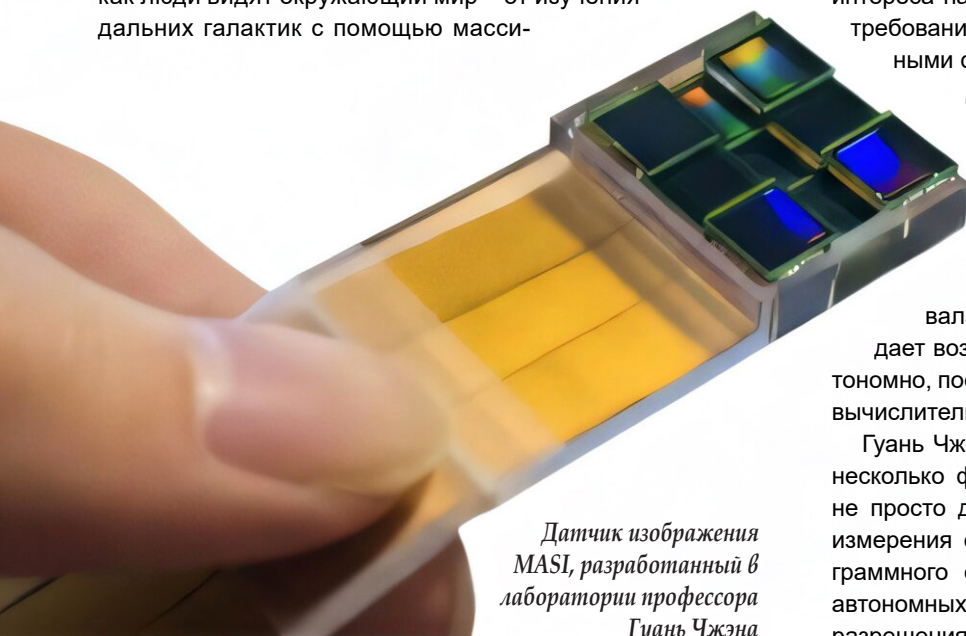
Новое исследование Гуань Чжэна – профессора биомедицинской инженерии и директора Центра биомедицинских и биоинженерных инноваций Университета Коннектикута (UConn Center for Biomedical and Bioengineering Innovation – CBBI) – и руководимого им коллектива ученых Колледжа инженерии Коннектикутского университета), опубликованное на [Nature Communications](#), представляет новаторское решение, способное изменить подход к съемке изображений в науке, медицине и промышленности.

«В основе этой инновации лежит давняя техническая проблема, – говорит Гуань Чжен. – Синтетическая апертурная съемка – метод, который позволил с помощью Телескопа горизонта событий (Event Horizon Telescope) выполнить съемку черной дыры – работает путем когерентного совмещения измерений от множества отдельных датчиков, чтобы имитировать значительно большую апертуру съемки».

В радиоастрономии это вполне осуществимо, потому что длины радиоволн гораздо больше, что делает точную синхронизацию между сенсорами возможной. Но в диапазоне длин волн видимого спектра, где масштаб области интереса на порядки меньше, выполнение традиционных требований синхронизации становится почти невозможными физически.

Датчик изображения MASI (Multiscale Aperture Synthesis Imager – многомасштабный апертурный синтезатор изображений) переворачивает проблему с ног на голову. Вместо попыток заставить множество сенсоров работать в режиме точной физической синхронности, для достижения чего потребовалась бы точность на уровне нанометров, MASI дает возможность каждому сенсору измерять свет автономно, после чего данные синхронизируются с помощью вычислительных алгоритмов.

Гуань Чжен объяснил, что процесс похож на тот, когда несколько фотографов снимают одну и ту же сцену, но не просто делают обычные фото, а проводят исходные измерения свойств длин волн, а затем с помощью программного обеспечения выполняется совмещение этих автономных снимков в одно изображение сверхвысокого разрешения.

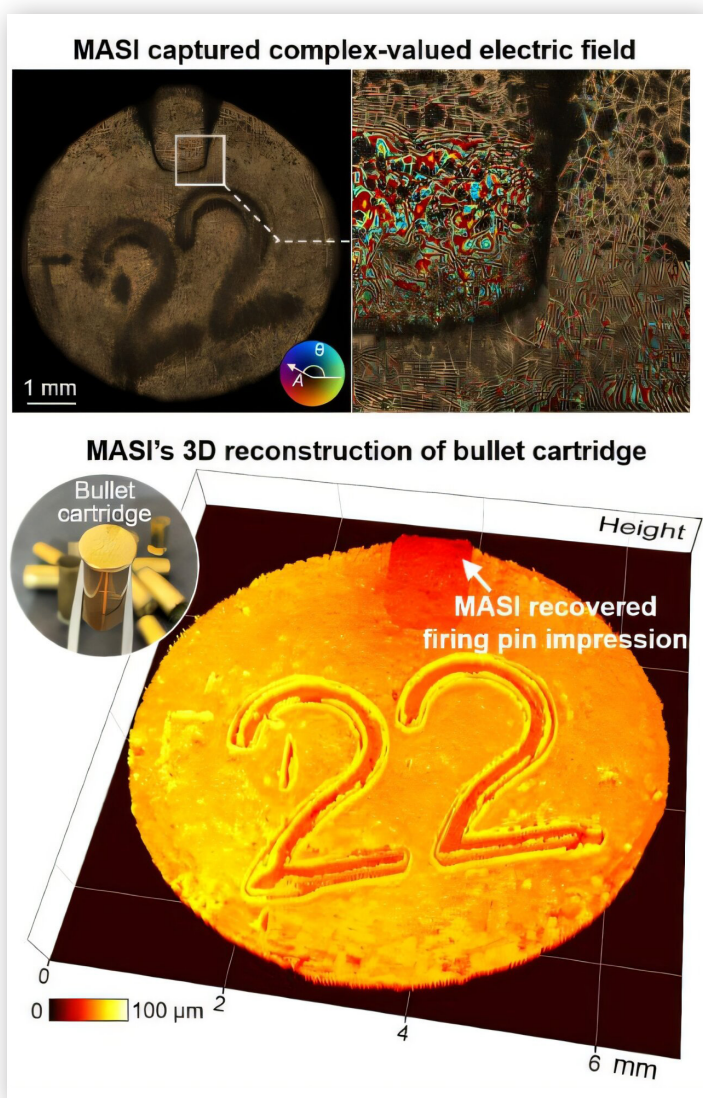


Датчик изображения MASI, разработанный в лаборатории профессора Гуань Чжэна

Такая схема фазовой синхронизации путем вычислений избавляет от необходимости в точных интерферометрических системах, которые до настоящего времени препятствовали практическому применению оптических систем с синтезированной апертурой.

MASI отличается от традиционного метода оптической съемки по двум ключевым аспектам. Вместо использования объективов для фокусировки света на сенсоре, в MASI применяется массив кодированных сенсоров, расположенных в разных местах дифракционной плоскости.

Каждый сенсор делает исходные (необработанные) дифракционные снимки – по сути, позволяя получить картину распределения световых волн после взаимодействия с объектом. Эти дифракционные измерения содержат как амплитудную, так и фазовую информацию, которая реконструируется с помощью вычислительных алгоритмов.



Гильза патрона, снятая с помощью MASI. Вверху: Снятое комплексное электрическое поле содержит как амплитудную (яркость), так и фазовую (цветность) информацию. Внизу: Эти данные позволяют выполнить 3D-реконструкцию с микронным разрешением, отображая отпечаток на капсуле – уникальную маркировку, позволяющую связать гильзу патрона с конкретным оружием (фото Университета Коннектикута)

Как только комплексное волновое поле с каждого сенсора реконструировано, система с помощью цифровых алгоритмов выравнивает и численно распространяет волновые поля обратно на плоскость объекта. Затем с помощью метода вычислительной фазовой синхронизации выполняется пошаговая настройка относительного смещения фаз для данных каждого из сенсоров, чтобы максимизировать общие когерентность и энергию унифицированной реконструкции.

Именно этот этап является ключевой новаторской разработкой – за счет программной оптимизации совмещенных волновых полей вместо физического сопряжения сенсоров MASI преодолевает дифракционный барьер, равно как и другие ограничения, присущие традиционной оптике.

Каков же результат? Вполне существенный – виртуальная синтетическая апертура получается гораздо большей, чем у любого одиночного сенсора, что позволяет достичь разрешения менее 1 мкм и широкого угла поля зрения, причем без применения объективов.

Естественно было бы задаться вопросом о достоинствах и перспективном потенциале сенсора MASI.

Обычные объективы, установленные на микроскопах, камерах или телескопах, заставляют конструкторов идти на компромиссы. Для съемки крупным планом, а также фиксации мелких деталей, объективы должны размещаться ближе к объекту съемки, часто на расстоянии нескольких миллиметров, из-за чего ограничивается рабочая дистанция, а некоторые съемочные задачи становятся непрактичными либо инвазивными.

Подход, основанный на сенсорах типа MASI, позволяет полностью отказаться от применения объективов, снимая дифракционные картины с расстояния в несколько сантиметров и реконструируя изображения с разрешением на субмикронных уровнях. Это равнозначно возможности рассмотреть наросты на человеческом волосе, положив их на стол, а не располагая в нескольких сантиметрах от глаза.

«Потенциальные варианты применения MASI охватывают множество сфер – от судебной медицины и диагностики болезней до промышленной инспекции и дистанционного зондирования, – говорит Гуань Чжен. – Но наиболее впечатляет масштабируемость. В отличие от традиционной оптики, сложность которой экспоненциально растет по мере увеличения размеров, наша система масштабируется линейно, потенциально позволяя формировать большие массивы для таких вариантов использования, которые мы пока даже не можем себе представить».

Многомасштабный апертурный синтезатор изображений – MASI – представляет собой изменение парадигмы оптической съемки изображения, в рамках которой вычисления позволяют устранить фундаментальные ограничения, присущие физической оптике. Отвязывая измерение от синхронизации и заменяя громоздкие объективы управляемым с помощью компьютерной программы массивом датчиков, MASI открывает новую главу в съемке изображений, делая ее высокоразрешающей, гибкой и масштабируемой. ■