

ханизмом резонансной флуоресценции в единичном атоме. Конечно, прямому сокращению пуассоновских флуктуаций во флуоресцентном свете мешает пуассоновское распределение атомов в луче лазера.

Другое высказанное в 1967 г. Ченом предложение по экспериментальной проверке неклассического поля с подпуассоновскими флуктуациями основывается на фильтрации пучка лазерного света оптически нелинейной средой. В нелинейной поглощающей среде поглощение тем больше, чем больше интенсивность падающего пучка света. Если пучок с флуктуирующей интенсивностью попадает в поглощающую среду, то она особенно сильно будет поглощать в момент, когда велика интенсивность. Нелинейная поглощающая среда способствует, таким образом, сглаживанию колебаний интенсивности и числа фотонов.

Способ имеет следующее ограничение: коэффициент полезного действия нелинейного оптического элемента при малой интенсивности света очень низкий. С другой стороны, при больших интенсивностях различие между классическими методами и неклассическими полями очень слабо. При больших интенсивностях имеются ограничения аппаратного характера, так как ширина полосы пропускания детектора и вычислительной электроники допускает лишь ограниченные скорости счета. По предложению Ритце и Бандилла эту трудность можно частично уменьшить за счет расщепления в интерферометре исследуемого пучка высокой интенсивности на два, из которых только один проходит через нелинейную среду. Другой пучок за нелинейной средой снова соединяется с первым пучком и служит лишь для того, чтобы ослабить интенсивность первого пучка перед детектором.

Вагнер и Куронски провели моделирующий эксперимент, чтобы изучить на модели влияние нелинейного взаимодействия на явления флуктуаций в различных полях. В качестве нелинейного элемента использовался удвоитель частоты. Распределение фотонов моделировалось с помощью соответствующего распределения интенсивности. При освещении удвоителя частоты хаотическим светом на его выходе наблюдалось уменьшение флуктуаций в основной (нижней) волне, в верхней — наоборот, усиление. Если при этом удвоитель частоты осветить пучком, распределение интенсивности которого соответствует пуассоновскому распределению фотонов, тогда за удвоителем как в нижней (основной), так и в верхней волне наблюдается уменьшение ширины распределения. Эти эксперименты позволяют выяснить, что сглаживание распределения фотонов путем нелинейного взаимодействия принципиально возможно также и в области подпуассоновских флуктуаций. Если бы действительно удалось создать такие поля, то мы имели бы простую и интересную макроскопическую квантовую систему для простого объяснения колебательных явлений.

*Поступила в редакцию 8 августа 1982 г.*

УДК 778.38

**В. ЛАУТЕБОРН**  
(Геттинген, ФРГ)

### **ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗ ГОЛОГРАММ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Введение.** Начиная с 1976 г. в III Физическом институте Геттингена проводятся исследования, направленные на изучение пузырьков воздуха в воде с помощью высокоскоростной голографии и цифровой обработки трехмерных изображений, восстанавливаемых с голограммы.

Эта проблема имеет, по крайней мере, три области применения. Первая область — оценка трехмерных распределений треков элементарных частиц в пузырьковых камерах при поиске новых короткоживущих частиц, предсказываемых теорией. Благодаря тому, что голография позволяет получать большую глубину резкости, появляется возможность запоминания тонких пузырьковых треков в большем объеме, чем при обычном фотографировании. Однако при этом возникает проблема, связанная с обработкой огромного числа голограмм, необходимых для получения достаточно достоверной информации о параметрах треков. Вторая область — гидродинамика. Во многих лабораториях мира исследуются процессы, связанные с движением кораблей в водных потоках. При этом для объяснения кавитации в начальных стадиях имеют большое значение пузырьки воздуха, существующие в воде. Эта задача может быть решена также с помощью голографического процесса и последующей автоматической цифровой обработки голограммы. Третья область — акустическая кавитация. В настоящее время — это основная научная проблема. Акустическая кавитация сопровождается шумом с необычным спектром, который пока еще изучен недостаточно.

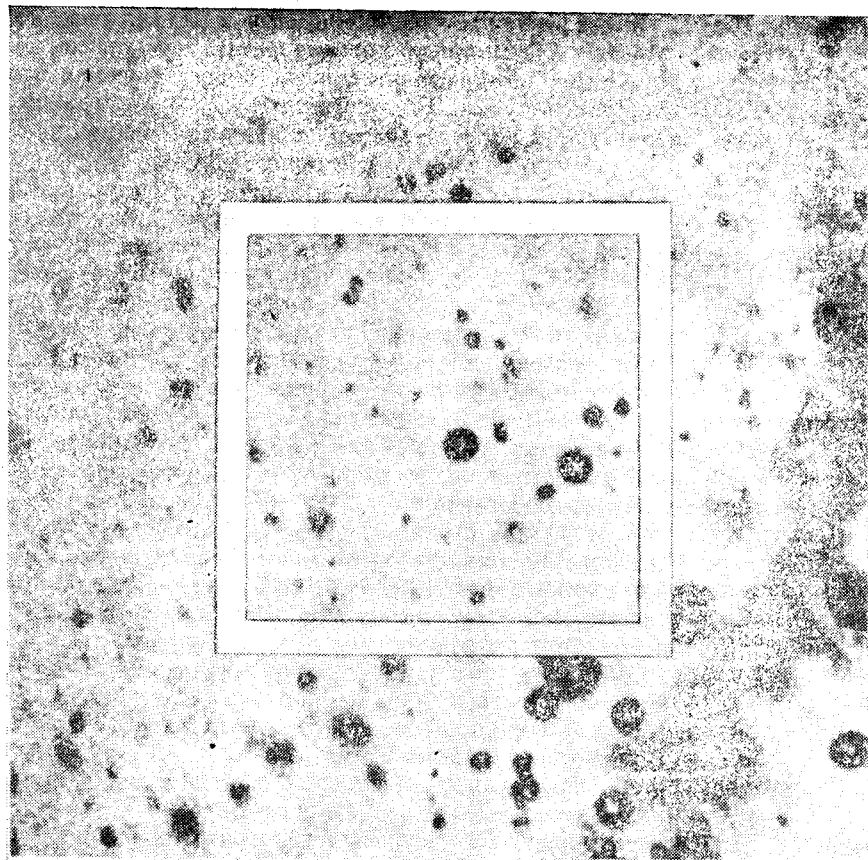
Спектр шума имеет явный стохастический характер, хотя лежащий в его основе механизм совершенно детерминирован. Здесь находится область активного поиска, и нужно приветствовать все эксперименты, направленные на изучение деталей этого механизма. Так как шум излучается трехмерным распределением пузырьков, мы сталкиваемся с той же проблемой, что и в предыдущих примерах. Высокоскоростные голографические картины нужно обработать в трех направлениях, определить число пузырьков, их размеры и координаты, а затем попытаться связать движение пузырьков с шумом, излучаемым ими.

**Этапы трехмерной обработки.** Цифровая обработка трехмерных изображений, восстановленных с голограмм, зависит от типа и качества голограмм. Проводилась обработка внеосевых голограмм пузырьков с размерами больше 50 мкм, освещенных через матовое стекло. Голограммы получались с помощью импульсного рубинового лазера. В будущем предполагается применение аргонового ионного лазера.

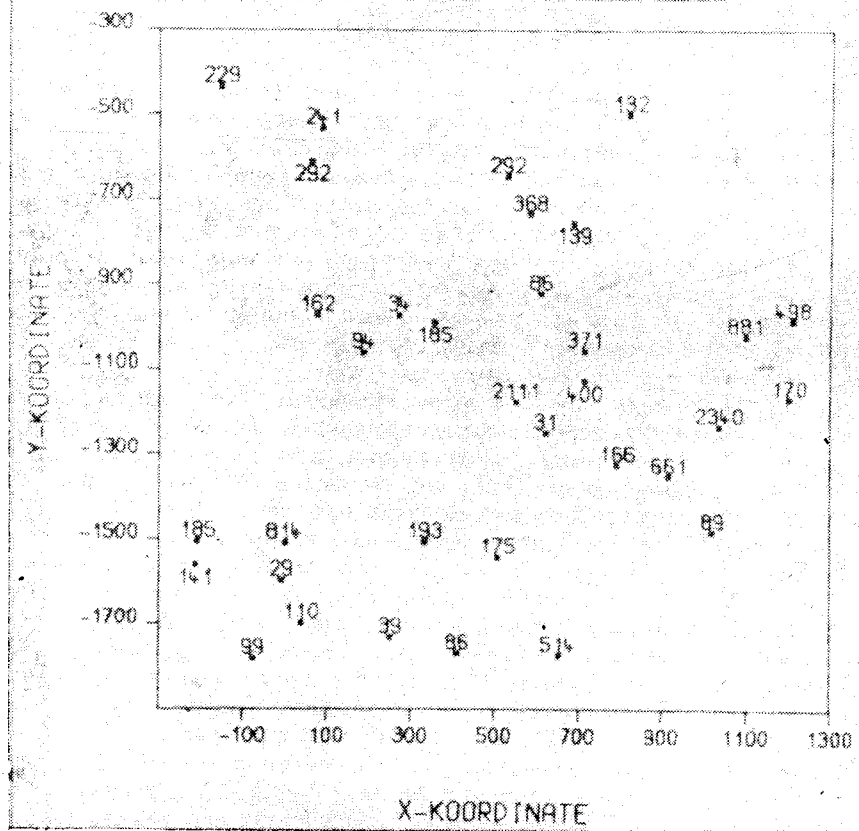
При освещении голограммы сопряженной опорной волной восстанавливается трехмерное действительное изображение. Это изображение вводится в мини-компьютер. Трехкоординатное сканирование осуществляется перемещением камеры (аналого-цифровой преобразователь оптических данных фирмы «Шлюмберже» с фотоматрицей на входе) в пространстве изображения. Произвольный доступ к некоторому элементу картины в точке  $(x, y, z)$  осуществляется с помощью двухкоординатного электронного сканирования по фоточувствительной поверхности камеры и однокоординатного продольного механического сканирования, выполняемого шаговым двигателем (шаг 5 мкм), который управляется от компьютера через интерфейс.

Одна из основных проблем автоматической обработки большого числа пространственно-распределенных пузырьков состоит в поиске пузырьков в различных  $z$ -сечениях изображения, восстановленного с голограммы, и фокусировке на них. Найдено, что резкость контурного изображения пузырька — простой критерий фокусировки камеры. Контур можно получить дифференцированием двумерного изображения пузырька, формируемого при продольной настройке камеры. Из-за сильного спекл-шума в изображении, вызванного диффузным освещением и когерентным светом, необходимо применять специальный локальный оператор, который способен подавить шумовой вклад спеклов в результат действия дифференциального оператора. Таким оператором может быть градиентный фильтр, работающий следующим образом. Дифференциально фильтруемую величину в ближайшей окрестности точки  $A$  обозначим  $GRAD(A)$  (например, это может быть кросс-производная Робертса [1]), а среднее от окружающих точку  $A$  значений —  $AV(A)$ . Шум устраняется из фильтруемого изображения путем согласованного взвешивания интен-

a



b



Результат исследования движущихся воздушных пузырьков в воде с помощью импульсного рубинового лазера:

*a* — восстановленное из голограммы объемное изображение; *b* — данные, полученные после автоматической обработки. (Числа дают величину пузырьков в относительных единицах).

сивности:  $GRADIW(A) = GRAD(A)WF[AV(A)]$ . Среднее  $AV(A)$  как аргумент весовой функции  $WF$  делает выход  $GRADIW$  нечувствительным к позиции точки на контуре объекта. Весовая функция  $WF$  частично известна заранее из предыдущего опыта обработки, частично определяется компьютером из анализа гистограмм яркостей точек изображения. Можно предположить, что это адаптивный фильтр, нечувствительный к вариациям яркости в изображении. Однако в связи с этим возможно возникновение серьезных проблем, обусловленных обычным гауссовым распределением яркости по сечению лазерного луча [2].

После подавления спекл-шума можно отделить оконтуренные точки от шумовых соответствующим выбором порога. Это пороговое изображение затем анализируется и представляется в цифровой форме. Изображения, лежащие в разных плоскостях, наносятся на карту с реальными осями, причем на некоторых из них имеются четко выраженные максимумы, которые наблюдаются как функция  $z$ , когда соответствующий объект (пузырек) находится в фокусе.

Когда компьютер установит камеру в  $z$ -сечение, соответствующее четкому изображению контура пузырька, начинаются вычисления по алгоритмам морфологических данных объекта: координат, формы, периметра и т. д. Эти алгоритмы применяются и к первоначальному изображению, которое было подвергнуто предварительной обработке.

Процедура фокусирования и обработки повторяется снова и снова до тех пор, пока не будет просканирован весь объем. Затем печатаются карты распределений найденных пузырьков (см. рисунок), которые могут использоваться для дальнейших исследований и обработки, например для определения числа и типов частиц в пузырьковой камере или для нахождения связи распределения пузырьков со спектром шума в акустической кавитации.

**Заключение.** В предварительных экспериментах найдены возможности автоматической обработки голограмм. Представлены методы определения координат трехмерного распределения пузырьков. В настоящее время разрешение системы позволяет работать с пузырьками, размер которых не менее 50 мкм, но путем увеличения изображения эта величина может быть существенно снижена. Вследствие малого объема памяти (24 К) мини-компьютера использовался простой последовательный алгоритм, требующий значительного времени. При современном быстродействующем оборудовании задача определения параметров трехмерных пузырьков не будет иметь принципиальных проблем. Более подробная информация содержится в работах [2—5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прэнт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982, т. 2, с. 508.
2. Haussmann G., Lauterborn W. Determination of Size and Position of Fast Moving Gas Bubbles in Liquids by Digital 3-D Image Processing of Hologram Reconstructions.— Appl. Opt., 1980., vol. 19, p. 3529.
3. Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics, Springer Series in Electrophysics/Ed W. Lauterborn.— Berlin, 1980, vol. 4.
4. Lauterborn W., Cramer E. Subharmonic Route to Chaos Observed in Acoustics.— Phys. Rev. Lett., 1981, vol. 47, p. 1349.
5. Merboldt R. D., Lauterborn W.— Opt. Comm., 1982, vol. 41, N 4, p. 233—238.

*Поступила в редакцию 8 августа 1982 г.*