

ОБ УЛУЧШЕНИИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЧЕРЕЗ РАССЕИВАЮЩИЕ СРЕДЫ

А. Д. Гальперн

Проведено теоретическое рассмотрение возможности улучшения качества изображения объектов, наблюдаемых через нестационарные рассеивающие среды, за счет накопления голограмм. Показано, что этот метод позволяет получить лучшее качество изображения по сравнению с обычным накоплением изображений по интенсивности. Проведен эксперимент, подтверждающий некоторые выводы теории.

Известно, что при наблюдении через рассеивающие среды, на изображение, создаваемое оптической системой, накладывается рассеянный фон, что приводит к ухудшению качества изображения или к полному его исчезновению. В случае, когда рассеивающая среда нестационарна во времени, оказывается возможным улучшить качество изображения, регистрируя в течение определенного времени не само изображение объекта, а его голограмму. Поскольку излучение, рассеянное меняющейся во времени средой, будет некогерентно относительно референтного излучения, то оно не запишется на голограмме и контраст восстановленного изображения повысится. Однако в кратком сообщении [1], содержавшем эту идею и описание эксперимента, не были приведены ни теория, ни результаты эксперимента.

Нами был проведен теоретический анализ вышеуказанного метода с использованием статистических представлений и проделаны некоторые эксперименты по его проверке. Теоретический анализ и эксперимент были проведены применительно к следующей схеме регистрации. Излучение от объекта, прошедшее сквозь рассеивающую среду, регистрируется на голограмме, одновременно изображение этого же объекта записывается методом обычной фотографии. Затем сравнивается качество восстановленного голограммой изображения объекта с качеством обычной фотографии этого же объекта. Таким образом, наше рассмотрение по существу сводится к исследованию преимуществ накопления голограмм по сравнению с фотографическим накоплением. При проведении теоретического анализа предполагалось, что в течение какого-то небольшого отрезка времени рассеивающая среда не меняет своих параметров. Разбив все время экспозиции на такие отрезки и считая запись линейной, можно представить, что на одной фотопластинке записано n голограмм одного и того же объекта, но при различных, независимых реализациях рассеянного фона.

Считая коэффициент контраста фотопроцесса $\gamma = -2$, распределение амплитудного пропускания суммарной голограммы можно записать следующим образом:

$$\tau_{\Sigma}(\bar{r}_r) = |U_r(\bar{r}_r)|^2 + \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |U_r^m(\bar{r}_r)|^2 + U_r^*(\bar{r}_r) \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n U_r^m(\bar{r}_r) + \\ + U_r(\bar{r}_r) \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n [U_r^m(\bar{r}_r)]^* \quad (1)$$

Здесь $U_r(\bar{r}_r)$ — распределение поля референтного источника; n — число реализаций рассеянного фона; U_r^m — реализация поля U_r , рассеянного объектом и прошедшего через среду; r_r — радиус-вектор произвольной точки на голограмме.

В (1) проведена нормировка на n , такая нормировка может быть произведена, например, с помощью фильтра, ослабляющего излучение в n раз, при этом средняя плотность голограммы не зависит от числа накопленных реализаций.

Распределение объектного поля, прошедшего через рассеивающую среду, в приближении однократного рассеяния может быть записано следующим образом [2]:

$$U_r(r_r) = C \int_{S_0} U_0(\bar{r}_0) \frac{\exp ik |\bar{r}_r - \bar{r}_0|}{|\bar{r}_r - \bar{r}_0|} dS_0 + \\ + C_1 \int_V U'_0(\bar{r}') \varepsilon_1(\bar{r}') \frac{\exp ik |\bar{r}_r - \bar{r}'|}{|\bar{r}_r - \bar{r}'|} dV. \quad (2)$$

Здесь $U_0(\bar{r}_0)$ — распределения поля на поверхности объекта; $U'_0(\bar{r}')$ — распределение объектного поля в рассеивающем объеме; $\varepsilon_1(\bar{r}')$ — флуктуирующая часть диэлектрической проницаемости среды; $\bar{r}_r$; $\bar{r}_0$; $\bar{r}'$ — радиус-вектор точек на поверхности голограммы, объекта и в объеме V рассеивающей среды; C и C_1 — несущественные постоянные.

Первое слагаемое в (2) представляет собой часть объектного поля, прошедшую через среду без рассеяния, оно соответствует нулевому приближению метода малых возмущений, интегрирование проводится по поверхности объекта. Второе слагаемое в (2) описывает рассеянное поле, интегрирование проводится по объему рассеивающей среды. Если размеры рассеивающего объема значительно превосходят радиус корреляции флуктуаций ε_1 , то, как отмечается в работе [2], рассеянное поле можно считать распределенным по Гауссовскому закону.

Предполагая, что объект находится в зоне дифракции Фраунгофера, определим поле в истинном изображении, восстановленном голограммой. Для этого поставим (2) в (1), умножим третье слагаемое выражения (1) на $U_r(\bar{r}_r)$ и используем принцип Гюйгенса—Френеля, свойства преобразования Фурье и теорему о свертке

$$U_u(\bar{r}_u) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (U_0 + F[N_m]) \otimes F[W]. \quad (3)$$

Здесь U_0 — распределение поля на поверхности объекта; $F[N_m]$ — Фурье-преобразование от m -й реализации распределения рассеянного поля, описываемого вторым слагаемым в (2); $F[W]$ — Фурье-преобразование от функции W , задающей ограничение размеров голограммы; значок $\otimes$ обозначает операцию свертки.

Для краткости дальнейшей записи введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} U_0 \otimes F[W] &= U_c, \\ F[N_m] \otimes F[W] &= M_m. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь U_c — распределение поля в изображении объекта, наблюдаемого без наличия рассеивающей среды; M_m — распределение рассеянного поля в изображении.

Используя обозначения (4), найдем математическое ожидание распределения интенсивности в изображении. Для этого умножим (3) на сопряженную величину и произведем усреднение по ансамблю реализаций. В результате получим

$$\overline{I(\bar{r}_u)} = \left| U_c + \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n M_m \right|^2. \quad (5)$$

Предполагая статистическую стационарность функций M_m и считая, что математическое ожидание $M_m=0$, нетрудно показать, что (5) может быть записано следующим образом:

$$I = |U_c|^2 + \frac{1}{n} \overline{|M|^2}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при $n \rightarrow \infty$ математическое ожидание интенсивности стремится к функции распределения интенсивности в изображении объекта, наблюдаемого без наличия рассеивающей среды.

Рассмотрим теперь, как изменяется величина дисперсии интенсивности в изображении при увеличении n . Пользуясь известными соотношениями [3], запишем выражение для дисперсии интенсивности в следующем виде:

$$D[I] = \overline{I^2} - (I)^2. \quad (7)$$

Определим вначале величину $\overline{I^2}$. При этом воспользуемся тем, что если величина рассеянного поля распределена по нормальному закону, то и преобразование Фурье от этого поля также распределено по нормальному закону. Запишем $\overline{I^2}$ в следующем виде:

$$\overline{I^2} = \overline{\left| U_c + \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n M_m \right|^4}. \quad (8)$$

Учитывая тот факт, что все нечетные моменты нормального распределения равны нулю, можно записать (8) следующим образом:

$$\overline{I^2} = |U_c|^4 + 6 |U_c|^2 \frac{1}{n^2} \overline{\left| \sum_{m=1}^n M_m \right|^2} + \frac{1}{n^4} \overline{\left| \sum_{m=1}^n M_m \right|^4}. \quad (9)$$

Пользуясь тем, что функция $\sum_{m=1}^n M_m$ распределена по нормальному закону, третье слагаемое в выражении (9) можно записать [3]:

$$\frac{1}{n^4} \overline{\left| \sum_{m=1}^n M_m \right|^4} = \frac{3}{n^4} \left[\overline{\left| \sum_{m=1}^n M_m \right|^2} \right]^2 \quad (10)$$

Для определения $(\overline{I})^2$ нужно возвести в квадрат (6). Произведя эту операцию, подставим полученный результат, а также (9) и (10) в (7), тогда получим

$$D[I] = \frac{2}{n^2} (\overline{|M|^2})^2 + \frac{4}{n} |U_c|^2 \overline{|M|^2}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что дисперсия интенсивности по мере увеличения n стремится к нулю. Таким образом, при накоплении голограмм распределение интенсивности стремится к математическому ожиданию интенсивности.

Определим теперь математическое ожидание и дисперсию интенсивности в случае обычного накопления изображений. В этом случае выражение для интенсивности в изображении может быть записано следующим образом:

$$I_1 = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |U_c + M_m|^2. \quad (12)$$

Пользуясь ранее описанными статистическими свойствами M_m , математическое ожидание функции I_1 можно записать в виде

$$I_1 = |U_c|^2 + \overline{|M|^2}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что при обычном накоплении изображений математическое ожидание интенсивности в изображении отличается от распределения интенсивности в изображении объекта при отсутствии искажающей среды на величину $\overline{|M|^2}$ — дисперсии рассеянного поля. Определим теперь дисперсию интенсивности в изображении для этого случая.

Выражение для дисперсии I_1 запишем следующим образом:

$$D[I_1] = \overline{\left(\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |U_c + M_m|^2 \right)^2} - \left(\overline{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |U_c + M_m|^2} \right)^2. \quad (14)$$

Рассмотрим первый член в правой части (14). Возведя в квадрат выражение, стоящее под знаком математического ожидания, и произведя почленное усреднение, получим

$$\overline{\left(\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |U_c + M_m|^2 \right)^2} = \frac{1}{n} \overline{|U_c + M|^4} - \frac{1}{n} (\overline{|U_c + M|^2})^2 + (\overline{|U_c + M|^2})^2. \quad (15)$$

Второй член (14) можно переписать

$$\left(\overline{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |U_c + M_m|^2} \right)^2 = (\overline{|U_c + M|^2})^2. \quad (16)$$

Подставим (16) в (14), тогда получим

$$D[I_1] = \frac{1}{n} \overline{|U_c + M|^4} - \frac{1}{n} (\overline{|U_c + M|^2})^2. \quad (17)$$

Рассмотрим первый член (17). Определив четвертую степень модуля выражения, стоящего под знаком математического ожидания, произведя почленное усреднение и воспользовавшись тем, что нечетные моменты нормального распределения равны нулю, имеем:

$$\frac{1}{n} \overline{|U_c + M|^4} = \frac{1}{n} [\overline{|U_c|^4} + 6 \overline{|M|^2} \overline{|U_c|^2} + 3 (\overline{|M|^2})^2]. \quad (18)$$

Выражение для второго члена (17) запишем следующим образом:

$$\frac{1}{n} (\overline{|U_c + M|^2})^2 = \frac{1}{n} [(\overline{|M|^2})^2 + 2 \overline{|M|^2} \overline{|U_c|^2} + \overline{|U_c|^4}]. \quad (19)$$

Подставив (19) и (18) в (17), получим окончательно

$$D[I_1] = \frac{1}{n} (\overline{|M|^2})^2 + \frac{4}{n} \overline{|U_c|^2} \overline{|M|^2}. \quad (20)$$

Сравнивая выражения (6), (11) и (13), (20), можно отметить следующее: по мере увеличения числа n накопленных голограмм или изображений дисперсия распределения интенсивности в изображении в обоих случаях убывает, и интенсивность стремится к своему математическому ожиданию, которое в случае накопления голограмм стремится к распределению интенсивности в изображении объекта, наблюдаемого в отсутствие рассеивающей среды, а в случае обычного накопления изображений отличается от полезного сигнала на величину дисперсии поля рассеянного излучения. Кроме того, первое слагаемое выражения (11) убывает быстрее, чем первое слагаемое (20). Скорость убывания вторых слагаемых в (11) и (20) одинакова, но эти слагаемые отличны от нуля только в тех точках пространства изображений, где отличен от нуля полезный сигнал. Отсюда следует, что там, где отсутствует полезное изображение, шум будет убывать быстрее в случае накопления голограмм, чем в случае накопления изображений. Таким образом, метод накопления голограмм должен более эффективно выделять контуры и яркие блики на объекте.

Для подтверждения преимуществ накопления голограмм был проделан эксперимент по накоплению голограмм и накоплению изображений по интенсивности.

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Излучение от плоского объекта O , находящегося в фокальной плоскости объектива O_1 , проходило через диффузор D , с помощью которого имитировалась рассеиваю-

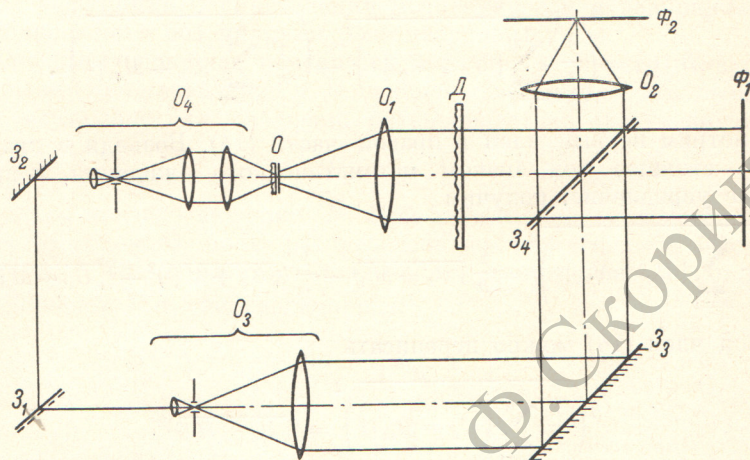


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

щая среда, и падало на полупрозрачное зеркало Z_4 , которое направляло часть излучения к объективу O_2 , формировавшему в плоскости Φ_2 изображение объекта. Другая часть излучения падала на фотопленку, находящуюся в плоскости Φ_1 регистрации голограммы. С помощью системы O_3 формировался референтный пучок, а с помощью системы O_4 — подсветка

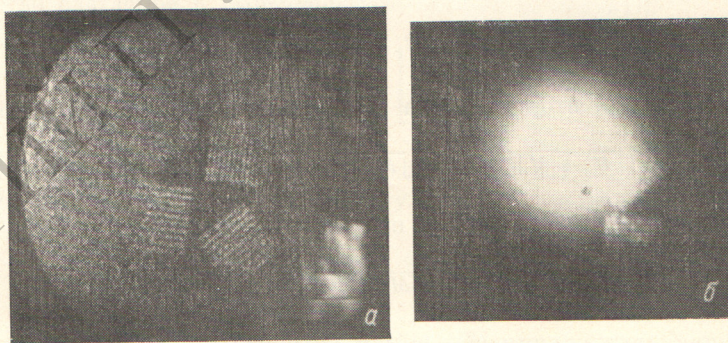


Рис. 2. Изображения, полученные при движущемся диффузоре. а — изображение, восстановленное накопленной голограммой; б — изображение, накопленное обычным образом.

объекта. В качестве объекта был выбран 13-й элемент мира № 4; для имитации диффузности объекта перед мирой устанавливалась матовая пластинка. Во время эксперимента диффузор перемещался непрерывно со скоростью порядка 1 мм/сек. Время экспозиции было 10 сек. В качестве регистрирующего материала для записи голограмм и изображений использовалась пленка Микрат-300.

Вначале была произведена запись голограммы и обычное фотографирование изображения при неподвижном диффузоре. При этом не наблюдалось ни обычного фото-изображения, ни изображения, восстановленного голограммой; лишь в области, где должно было быть изображение, наблюдался фон зернистой структуры. Затем была осуществлена запись

при движущемся диффузоре. На рис. 2 представлены фотографии изображений, полученных при движущемся диффузоре (на рис. 2, а — изображение, восстановленное голограммой, на рис. 2, б — изображение, снятое обычным образом). На рис. 2, б видно, что за счет обычного накопления фон в изображении сглаживается, но не исчезает; это согласуется с выводом теории о том, что математическое ожидание интенсивности в изображении отличается от полезного сигнала на величину дисперсии поля, рассеянного излучения. В то же время, как видно из рис. 2, а, фон в изображении, восстановленном накопленной голограммой, значительно слабее, так как математическое ожидание распределения интенсивности в изображении при накоплении голограмм стремится к величине полезного сигнала.

Литература

- [1] К. А. Stetson. J. Opt. Soc. Am., 57, 1060, 1967.
- [2] В. И. Татарский. Распространение волн в турбулентной атмосфере. Изд. «Наука», М., 1967.
- [3] Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Изд. «Наука», М., 1964.

Поступило в Редакцию 20 июня 1972 г.
