

УДК 621.373.626

О возможности существенного снижения уровня фона в системах получения изображений

У. Юсупалиев, С. А. Шутеев
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассмотрен новый метод снижения уровня фона в коротковолновом диапазоне спектра на основе системы получения послойного изображения. Экспериментально показана возможность получения изображения в такой системе при интегральном по времени отношении сигнал/шум порядка единицы.

Одна из основных задач систем получения изображений (видеосистем, электронно-оптических преобразователей и др.) — выделение полезной информации на фоне шума. Процедура выделения полезной информации в конечном счете сводится к улучшению отношения сигнал/шум, которое достигается за счет накопления полезного сигнала либо уменьшения уровня шума [1—6]. Эффективность улучшения

отношения сигнал/шум путем накопления полезного сигнала высока только при слабом сигнале и низком уровне шума [1, 3, 6]. Для повышения эффективности систем получения изображений желательно максимально снижать уровень шума в процессе их получения (здесь под шумом понимается фоновая помеха). Такая задача с практической точки зрения особенно актуальна в системах получения изображений в

мутных средах (при тумане, под водой) [7—9]. Снижение уровня фона в существующих системах осуществляется спектральной, поляризационной и пространственной фильтрацией изображения [1, 3—6, 10—12]. Для реализации последней используются различные растры анализатора изображения, мозаичные приемники, диафрагмы малых размеров и другие устройства. Спектральная и пространственная фильтрации изображения становятся малоэффективными при яркости объекта, близкой к яркости фона [1, 2, 6, 10—12]. Кроме фильтрации изображения, для уменьшения шума на аппаратном уровне используется еще так называемый компенсационный способ, суть которого состоит в вычитании сигнала от фонового шума из общего сигнала. Недостатком компенсационного метода является снижение чувствительности системы в целом [10, 11].

Кроме указанных методов снижения уровня фона, был предложен метод стробирования по времени телевизионных систем и электронно-оптических преобразователей [6, 10, 13, 15]. В этом методе фотоприемное устройство (ФПУ) открывается на определенный промежуток времени (время стробирования $\tau_{\text{строба}}$) после прихода импульса подсветки. Открывание ФПУ осуществляется оптическим затвором либо электронным способом. Минимальная длительность, достигнутая при стробировании ЭОП, составила примерно 100 нс [10, 13, 15], однако при этом оказалось, что рост уровня собственных шумов системы значительно снижает общую эффективность метода стробирования. Одна из причин роста собственных шумов — высокая крутизна высоковольтного электрического импульса, управляющего оптическим затвором либо ФПУ. Дальнейшее уменьшение длительности стробирования связано с трудностями фундаментального характера, которые до сих пор не преодолены [6].

Таким образом, опыт эксплуатации систем получения изображений показывает, что существующие методы снижения уровня фона недостаточно эффективны при отношении сигнал/шум порядка единицы. В этом случае применяются различные методы накопления полезного сигнала [6]. Однако при этом также происходит накопление собственного шума системы в целом, что снижает эффективность метода накопления. Поэтому задача разработки новых методов улучшения качества изображений при отношении сигнал/шум порядка единицы остается по-прежнему актуальной, чему и посвящена данная работа.

Исследование

Для проведения исследования в целях улучшения качества изображения при отношении сигнал/шум порядка единицы была создана экспериментальная установка (рис. 1). Она состояла из трех систем получения изображений: специальной системы получения изображений 1 с импульсным источником подсветки 2, цифровой видеосистемы 3, системы получения изображения на основе ЭОП 4. В качестве исследуемого объекта 7 использовался, в частности, плакат с надписью “МГУ им. М. В. Ломоносова”. Для создания дополнительного фона между системами получения изображений (СПИ) и плакатом натягивались два слоя марли 5 и 6 на расстоянии 100 и 105 см от СПИ, соответственно. Площадь плаката составляла 0,045 м². Слой марли полностью перекрывали поля зрения СПИ. Требовалось получить изображение плаката, находящегося на расстоянии $Z_0 = 200$ см от СПИ (см. рис. 1) при наличии шумовых помех и посторонних по отношению к объекту предметов (два слоя марли). При получении изображения с помощью ЭОП применялось стробирование по времени его работы электронным способом.

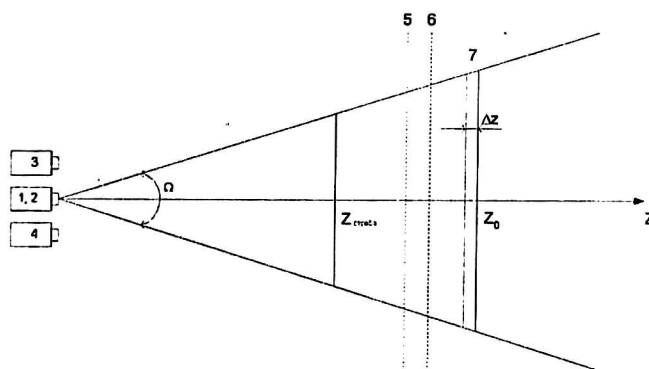
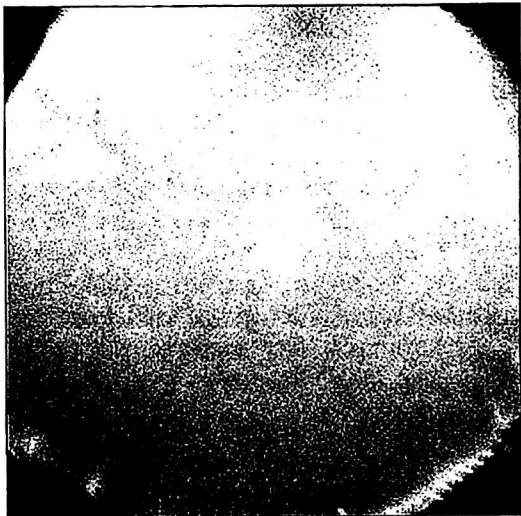


Рис. 1. Экспериментальная установка

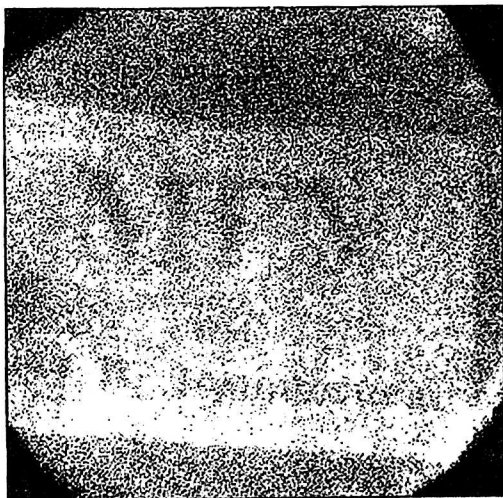
На входе объективов всех систем были установлены интерференционные фильтры со специальной блендой. Полоса пропускания фильтров $\Delta\lambda$ составляла 8 нм.

На рис. 2, а показано изображение плаката через два слоя марли, полученное с помощью видеосистемы. Изображение тех же объектов, полученное с помощью ЭОП при длительности его стробирования порядка 1 мкс, практически не отличается от изображения на рис. 2, а. Из приведенного изображения визуально ничего нельзя распознать. Следовательно, для изображения, представленного на рис. 2, а, отношение сигнал/шум меньше или порядка единицы. Это изображение получено в течение длительности "кадра" τ_k ($\tau_k = 40$ мс для видеосистемы,

$\tau_k \approx 1$ мкс — для ЭОП) и поэтому отношение сигнал/шум для этого изображения можно называть интегральным за промежуток времени τ_k . Интегральность по времени отношения сигнал/шум следует из физических принципов работы существующих СПИ. Действительно, они (видеосистема, ЭОП) за время длительности “кадра” накапливают электрический сигнал, возникающий вследствие падения фотонов на поверхность фоточувствительного блока систем (ПЗС-матрицы, фотокатода и пр.).



а



б

Рис. 2. Изображение:
а — интегральное; б — плаката

Для выделения полезного сигнала при использовании интегрального по времени отношения сигнал/шум необходимо оценить количество фоновых фотонов, попадающих на вход объектива СПИ. За время τ_k на вход объектива попадают фотоны из поля зрения системы (шаровой

сектор с вершиной в центре оптического блока системы и радиусом $Z_k = \tau_k c$ (где c — скорость света в среде). Будем считать, что фоновые фотоны распределены в пространстве равномерно, изотропно. Кроме того, не будем учитывать ослабление света приземной атмосферой. Тогда количество фоновых фотонов N_Φ за время τ_k равно

$$N_\Phi = n_\Phi(\lambda) \Delta\lambda \frac{1}{3} \Omega (c\tau_k)^3 \left[\left(1 - \frac{Z_0^3}{Z_k^3}\right) - \sum_i^n \frac{\Omega_i}{\Omega} \left(1 - \frac{Z_i^3}{Z_k^3}\right) \right] + n_\Phi \frac{1}{3} \Omega Z_0^3 \left[1 - \sum_j^m \frac{\Omega_j}{\Omega} \left(1 - \frac{Z_j^3}{Z_0^3}\right) \right], \quad (1)$$

где Ω — телесный угол поля зрения системы;
 $n_\Phi(\lambda)$ — спектральная плотность фоновых фотонов в единице объема, которая в пределах полосы пропускания интерференционного фильтра считалась постоянной;

Ω_i и Ω_j — телесные углы, под которыми видны i -й и j -й посторонние объекты с координатой Z_i и Z_j , соответственно.

Суммирование по i и j в выражении (1) проводится по неперекрывающимся телесными углами Ω_i , Ω_j . Координаты Z_k , Z_0 , Z_i , Z_j должны удовлетворять неравенствам $Z_0 < Z_i < Z_k$, $0 < Z_j < Z_0$. В (1) N_Φ записано в виде двух сумм, которые соответствуют количеству фоновых фотонов из областей поля зрения системы за и перед рассматриваемым объектом с координатой Z_0 .

К фоновым фотонам добавляются дополнительные фотоны, рассеянные атмосферными образованиями (облаками, локальными туманами и др.) и отраженные фоновые фотоны от поверхностей посторонних предметов. Дополнительные фотоны появляются также при облучении их источником подсветки. Если облучение осуществляется непрерывным источником света за время τ_k , то количество дополнительных фоновых фотонов, попадающих на вход объектива системы, равно

$$N_{\Phi_d} = \sum_i^n n(\lambda)_{\Phi_{di}} \Delta\lambda S_{ВХ} \tau_k + \sum_j^m n(\lambda)_{\Phi_{dj}} \Delta\lambda S_{ВХ} \tau_k, \quad (2)$$

где $n(\lambda)_{\Phi_{di}}$, $n(\lambda)_{\Phi_{dj}}$ — поверхностные спектральные плотности рассеиваемых фотонов посторонними предметами на входе объектива оптики системы с площадью $S_{ВХ}$, расположенными за и перед исследуемым объектом с координатой Z_0 , соответственно.

В (2) $n(\lambda)_{Фдл}$, $n(\lambda)_{Фд}$ в пределах полосы пропускания интерференционного фильтра считались постоянными.

Из (1) и (2) видно, что за счет уменьшения телесного угла Ω поля зрения системы спектральной полосы пропускания $\Delta\lambda$ и диафрагмирования площади $S_{Вх}$ входного объектива ее оптики можно добиться снижения уровня фона [1–12]. Способ снижения за счет уменьшения телесного угла используется в телескопах [14]. Диафрагмирование поля зрения системы происходит с помощью различных диафрагм и растров, помещаемых перед входом оптического блока системы получения изображений [1–12]. В последнее время предложены, кроме динамических (вращающихся, колеблющихся) диафрагм и растров, так называемые электронные диафрагмы [6].

Для получения изображения объекта (плаката) с линейным размером $\Delta Z = 3$ см (плакат поставлен под углом к оси Z), находящегося на расстоянии Z_0 , по глубине обозрения требуется длительность "кадра" системы в пассивном режиме ее работы всего лишь равной $t_{\Delta Z} = \Delta Z/c = 10^{-10}$ с = 100 пс (а в активном режиме ее работы — $2\Delta Z/c = 200$ пс), так как за время $t_{\Delta Z} = 100$ пс длина пути распространения света равна $\Delta Z = 3$ см. Отсюда ясно, что видеосистема и ЭОП в течение их длительности "кадра" при получении изображения объекта с размером $\Delta Z = 3$ см, кроме фоновых фотонов в рассматриваемом объеме $\Delta V_{\Delta Z}$ поля зрения с характерным размером ΔZ , накапливают огромное количество фоновых фотонов из других областей поля зрения. Исходя из выражения (1), можно определить отношение количества таких фотонов к количеству фоновых фотонов в рассматриваемом объеме $\Delta V_{\Delta Z}$ поля зрения системы без учета фоновых фотонов от посторонних предметов

$$\frac{(1/3)\Omega Z^3 - V_{\Delta Z}}{\Delta V_{\Delta Z}} = \left(\frac{Z^2}{Z_0^2}\right) \left(\frac{\tau}{t_{\Delta Z}}\right) \left[\frac{1}{3 + 3\left(\frac{\Delta Z}{Z_0}\right)\left(\frac{\Delta Z^2}{Z_0^2}\right)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $\frac{Z_k}{Z_0} > 1$; $\frac{\Delta Z}{Z_0} \ll 1$.

Из формулы (3) видно, что при получении изображения исследуемого объекта с размером $\Delta Z = 3$ см, расположенного на расстоянии $Z_0 = 100$ м, видеосистемы ($\tau_k = 4 \cdot 10^{-2}$ с) накапливают в 10^{18} раз большее количество фоновых фотонов по сравнению с неизбежным фоном (из объема $\Delta V_{\Delta Z}$). Для ЭОП (длительность стро-

бирования $\tau_k = 10^{-6} - 10^{-7}$ с) соответствующее отношение равно $\sim 10^3 - 10^4$. Отсюда ясно, что уменьшение длительности "кадра" является одним из эффективных методов снижения уровня фона в системах построения изображений. Такой же вывод можно сделать из выражений (1), (2).

Действительно, количество фоновых фотонов $N_{Ф}$ пропорционально кубу длительности "кадра" (первый член в (1)), тогда как зависимость от Ω , $S_{Вх}$, $\Delta\lambda$ пропорциональна первой степени.

Одной из разновидностей метода снижения уровня фона является вышеупомянутый метод стробирования телевизионных систем и электронно-оптических преобразователей. Существенное снижение уровня помехи обратного рассеяния методом стробирования ЭОП в работе [15] позволило в слабом тумане распознать исследуемый объект.

При уменьшении длительности "кадра", кроме снижения уровня однородного фона, отсекаются дополнительные фоновые фотоны от атмосферных образований и поверхностей посторонних предметов, находящихся за исследуемым объектом по направлению обозрения. Что касается однородных и дополнительных фоновых фотонов от области поля зрения СПИ, находящихся между исследуемым объектом и СПИ (вторые члены в выражениях (1), (2)), то метод уменьшения длительности "кадра" не дает возможности их отсекания. Метод стробирования ЭОП позволяет отсекал фоновые фотоны из областей поля зрения системы только за и перед объемом обозрения (усеченный конус с высотой $Z_0 - Z_{строба}$). Что касается фоновых фотонов из самой области обозрения, то они в методе стробирования ЭОП будут зарегистрированы. Оценки показывают, что количество фоновых фотонов из объема обозрения при стробировании пропорционально $\tau_{строба}$. Чем меньше длительность стробирования $\tau_{строба}$, тем меньше количество фоновых фотонов из объема обозрения. Минимальное значение $\tau_{строба}$, достигнутое в настоящее время, составляет ~ 100 нс и высота усеченного конуса равна $Z_0 - Z_{строба} = \tau_{строба} c = 30$ м. Стремление уменьшить $\tau_{строб}$ за счет уменьшения длительности высоковольтного импульса управления оптического затвора либо ЭОП приводит к росту собственных шумов всей системы в целом [11, 13, 15].

Итак, метод стробирования ЭОП, существенно снижая количество фоновых фотонов (примерно до 10^{13} раз) по сравнению с видеосистемой, тем не менее не позволяет отсекал фоновые фотоны из области обозрения, находящейся перед рассматриваемым объектом (при $Z_{строба} < Z < Z_0 - \Delta Z$). С практической точки зрения именно этот случай имеет существенное

значение, например туман между исследуемым объектом и ФПУ. Следовательно для отсекаания этих фоновых фотонов необходимо разработать новый метод.

Метод снижения уровня фона

Новый эффективный метод снижения уровня фона реализован в специальной системе получения послойного изображения. Суть метода состоит в отсекании фоновых фотонов как из области поля зрения между исследуемым объектом и объективом системы (второй член в (1), (2)), так и из области за объектом (первый член в (1), (2)). Одно из отличий этой системы от существующих систем получения изображения заключается в возможности изменения длительности "кадра" изображения как на аппаратном, так и на программном уровне. Минимальное значение длительности "кадра", достигнутое в данной системе, составляет $\sim 10^{-11}$ с. В качестве импульсного источника подсветки использовался импульсный лазер (на длине волны 635 нм с длительностью импульса 30 нс (на уровне половины максимальной амплитуды) и частотой повторения до 1 МГц), который синхронизировался со специальной системой получения изображений.

На рис. 2, б представлено изображение плаката с надписью, полученное с помощью предложенного метода снижения уровня фона. Оно получено отсеканием фоновых фотонов как из области поля зрения между плакатом и объективом системы ($Z \leq Z_0 - \Delta Z = 197$ см), так и из области за плакатом (200 см $\geq Z$). Поскольку пространственное разрешение специальной системы получения изображения составляет $\delta Z \approx 2$ мм, то изображение на рис. 2, б по сути есть сумма из $\Delta Z/\delta Z \approx 15$ слоев. А интегральное

изображение, показанное на рис. 2, а, состоит из 500 слоев, и основными фоновыми фотонами этого изображения, которые мешают распознаванию плаката с надписью, являются фотоны, рассеянные от двух слоев марли.

Таким образом, экспериментально показана возможность существенного снижения уровня фона с помощью системы получения послойного изображения.

Литература

1. Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. — М.: Радио и связь, 1981.
2. Якушенков Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1989.
3. Копейка Н. С., Бордовья Дж. // ТИИЭР. 1980. Т. 58. № 10. С. 170—185.
4. Сигналы и помехи в лазерной локации / Под ред. В. Е. Зуева. — М.: Радио и связь, 1986.
5. Хинрикус Х. В. Шумы в лазерных информационных системах. — М.: Радио и связь, 1987.
6. Optical Pattern Recognition XI // Proceedings of SPICE, V. 4043, Orlando, Florida, 26—27 April, 2000.
7. Заге Э. П., Иванов А. П., Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. — М.: Наука и техника, 1985.
8. Левин И. М. Справочник по подводному видению. — Л., 1991.
9. Зеленский В. В., Мартынов В. Л., Колобков В. С. и др. // Сб. матер. юбилейной науч.-практич. конф. 15 ЦНИЛ ВМФ МО. — С.-Петербург, 2001. С. 15—16.
10. Всесоюз. науч. конф. "Оптика моря и атмосферы". Ч. 2. — Красноярск, 1990. С. 8, 9.
11. Агашев А. В. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. — М.: Машиностроение, 1994.
12. 7-й международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана". — Томск, 16—19 июня 2000.
13. Ошлаков В. Г. // ПТЭ. 1984. № 1. С. 178—179.
14. Михельсон Е. Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. — М.: ФМЛ, 1995.
15. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.

On possibility of essential decreasing a background level in a images reception systems

U. Yusupaliev, S. A. Shuteev

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

A new method of decreasing a background level in the short wave length of spectrum using the system of obtaining the layer-by-layer image is considered. Experimentally it's shown that a possibility of obtaining layer-by-layer image by such system under the condition when the time integral ration signal/noisy is about 1.