

Метод преобразования динамического диапазона цифровых изображений с целью улучшения различимости объектов*

Д.В. Начаров, Ю.П. Михайлюк

denis_nacharov@list.ru|mypsev@gmail.com

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В работе предложен метод преобразования динамического диапазона с целью улучшения различимости объектов, применимый к цифровым изображениям, полученным в условиях недостаточной видимости.

Ключевые слова: недостаточная видимость, контраст, динамический диапазон, преобразование яркости.

The method of digital images dynamic range transformation in purpose of improvement of object distinctiveness*

D. V. Nacharov, Y. P. Mikhayluch

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The method of dynamic range transformation in purpose of improvement of distinctiveness of objects on digital images recorded in adverse visibility conditions is presented.

Keywords: low visibility, contrast, dynamic range, intensity transformation

1. Введение

При регистрации изображений в условиях недостаточной видимости, вызванных такими метеороусловиями как туман, дымка и т.п., происходит снижение контраста и, как следствие, ухудшение различимости объектов сцены. Это приводит к снижению эффективности работы систем визуализации, и обработки изображений, предполагающих как визуальный, так и машинный анализ изображений, таких как системы видеонаблюдения и распознавания автомобильных номеров. Снижение контраста объектов сцены на изображениях, полученных в условиях недостаточной видимости, характеризуется пространственной неравномерностью: как правило, области изображения, отображающие удаленные объекты имеют малый динамический диапазон и характеризуются низким контрастом. В свою очередь области изображения, отображающие объекты ближней сцены, имеют больший динамический диапазон и контраст. Задача увеличения контраста и улучшения различимости объектов может рассматриваться как задача согласования динамических диапазонов различных областей изображения с динамическим диапазоном воспроизводящего устройства.

В работе предлагается метод улучшения различимости объектов сцены, предполагающий увеличение контраста путем преобразования динамического диапазона яркостей изображения.

2. Постановка задачи

Простейшим методом увеличения контраста изображений является линейное контрастирование [1].

Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-20347.

Исходное полутоновое изображение представляется как двумерный массив яркостей $I(x, y)$, $x = 1, \dots, M$; $y = 1, \dots, N$; M, N – вертикальный и горизонтальный размеры изображения, а обработанное изображение – массив $s(x, y)$. Для общности изложения можно пользоваться значениями яркости, нормированными к числу градаций яркости L , в диапазоне $0 \dots 1$. Максимальный динамический диапазон изображения при этом будет равен 1. Линейное контрастирование является поэлементным преобразованием и описывается функцией преобразования яркости общего вида $s = T(I)$. Обозначим минимальную и максимальную яркости исходного изображения как I_{min} и I_{max} , а минимальную и максимальную яркости обработанного изображения – s_{min} и s_{max} . Функция преобразования яркости линейного контрастирования описывается выражением

$$s(x, y) = T(I) = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} * (s_{max} - s_{min}) + s_{min}$$

Увеличение динамического диапазона изображения определяется крутизной преобразования яркости \varkappa .

На рис. 1 показаны изображение $I(x, y)$, полученное в условиях тумана, имеющее динамический диапазон $I_{min} \dots I_{max} = 0, 48$, нормированная гистограмма яркости $p(I)$ этого изображения и линейная функция преобразования яркости $T(I)$.

Крутизна функции преобразования составляет $\varkappa = 2, 11$. На рис. 2 показаны обработанное изображение $s(x, y)$ и его нормированная гистограмма яркости $p(s)$. Из визуального анализа рис. 2 следует, что обработанное изображение по-прежнему характеризуется низким контрастом удаленных объектов сцены.

На изображении рис.1 объекты дальней сцены располагаются в верхней половине изображения, а объекты ближней сцены – в нижней. Рассмотрим верхнюю и нижнюю части изображений $I(x, y)$ и $s(x, y)$, определенные как: верхние части изображений – $I_{top}(x, y) = I(x, 1 < y < N/2)$; $s_{top}(x, y) = s(x, 1 < y < N/2)$; нижние части изображений – $I_{bot}(x, y) = I(x, N/2 \leq y < N)$; $s_{bot}(x, y) = s(x, N/2 \leq y < N)$.

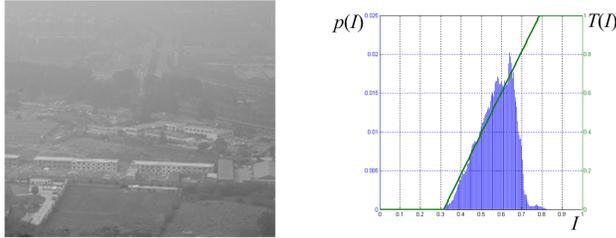


Рис. 1: Изображение $I(x, y)$, полученное в условиях тумана (слева), нормированная гистограмма $p(I)$ и функция преобразования яркости $T(I)$ (справа).

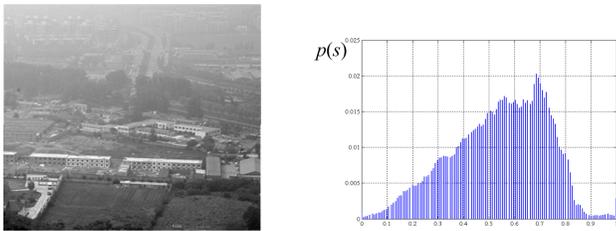


Рис. 2: Обработанное изображение $s(x, y)$ (слева) и его нормированная гистограмма $p(s)$ (справа).

Динамический диапазон изображения $I_{bot}(x, y)$ составляет 0,47, динамический диапазон изображения $I_{top}(x, y)$ – 0,26. В результате линейного преобразования яркости с крутизной $\kappa = 2,11$ динамический диапазон изображения $s_{bot}(x, y)$ близок к максимальному и составляет 0,99. Динамический диапазон изображения $s_{top}(x, y)$ составляет 0,56. Таким образом, линейное контрастирование изображений, полученных в условиях недостаточной видимости, не учитывает неравномерность динамических диапазонов и контрастов областей изображения, отображающих объекты, расположенные на различном удалении от регистрирующего устройства.

С учетом этого предлагается следующий подход к коррекции изображений, полученных в условиях недостаточной видимости. Диапазон яркостей исходного изображения разделяется на два поддиапазона, соответствующих ближней и дальней сценам изображения. В основе предлагаемого подхода к разделению диапазона яркости находится предположение о зависимости яркости объекта от его

удаленности: объекты с большей яркостью считаются более удаленными, чем объекты с меньшей яркостью. На основе исходного изображения формируются два изображения: изображение, содержащее поддиапазон малых яркостей (изображение ближней сцены) и изображение, содержащее поддиапазон больших яркостей (изображение дальней сцены). Сформированные таким образом изображения подвергаются процедуре линейного контрастирования, при этом оба поддиапазона яркостей преобразовываются на весь возможный диапазон яркостей. Затем выполняется процедура совмещения этих двух изображений.

3. Описание метода

Коррекция дальней сцены изображения

Уровни яркости изображений, полученных в условиях недостаточной видимости, располагаются в верхней части диапазона, что обусловлено наличием аддитивной составляющей рассеянного света [2]. Величина рассеянного света может оцениваться значением средней яркости изображения I_{mean} . Поэтому первым этапом коррекции дальней сцены изображения является вычитание средней яркости изображения. В результате этой операции формируется разностное изображение, динамический диапазон которого увеличивается путем умножения на масштабный коэффициент.

Яркость разностного изображения s_d описывается как

$$s_d = k_m(I - I_{mean}),$$

где $k_m = \frac{I_{max}}{I_{max} - I_{mean}}$ – масштабный коэффициент.

Эффективность использования всего диапазона яркостей можно повысить за счет линейного контрастирования разностного изображения. При этом входной диапазон преобразования может быть ограничен уровнями яркости, наиболее часто встречающимися на изображении. Для определения ограниченного диапазона яркостей используется интегральная функция распределения яркостей $F(s_d)$, определяемая как

$$F(s_{dj}) = \sum_{j=1}^L p(s_{dj}).$$

Значение функции $F(s_{dj})$ от j -го уровня яркости s_d характеризует количество пикселей, яркость которых находится в диапазоне яркостей $0 \dots s_{dj}$.

На рис. 3 показана интегральная функция распределения $F(s_d)$ разностного изображения. Из рис. 3 видно, что 99% пикселей разностного изображения имеют яркость в диапазоне $0 \dots 0,69$. Таким образом, за счет исключения редко встречающихся уровней яркости, можно значительно увеличить динамический диапазон разностного изображения.

На рис. 4 показаны изображение, полученное в результате линейного контрастирования разностного изображения с ограничением входных уровней, и его нормированная гистограмма.

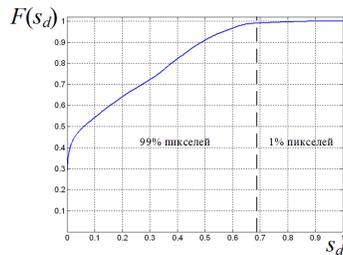


Рис. 3: Интегральная функция распределения яркости s_d .

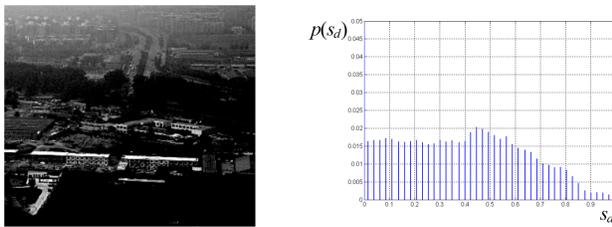


Рис. 4: Изображение, полученное в результате линейного контрастирования изображения $s_d(x, y)$ (слева), и его нормированная гистограмма $p(s_d)$ (справа).

На рис. 4 объекты ближней сцены с яркостью, меньшей I_{mean} , на изображении отсутствуют. Таким образом, достигается селекция объектов, находящихся на разном удалении от регистрирующего устройства.

Коррекция ближней сцены изображения В результате коррекции дальней сцены на разностном изображении присутствуют уровни яркости в диапазоне $I_{mean} \dots I_{max}$. Коррекция ближней сцены изображения заключается в линейном контрастировании оставшегося поддиапазона яркостей $I_{min} \dots I_{mean}$ и описывается выражением

$$s_n = T(I) = \begin{cases} \frac{I - I_{min}}{I_{mean} - I_{min}}, & \text{при } I_{min} < I < I_{mean}; \\ 1, & \text{при } I \geq I_{mean}. \end{cases}$$

На рис. 5 показаны результаты линейного контрастирования изображения ближней сцены $s_n(x, y)$ и его нормированная гистограмма $p(s_n)$. Для повышения эффективности преобразования входной диапазон также ограничен 99% наиболее часто встречающимися уровнями яркости.

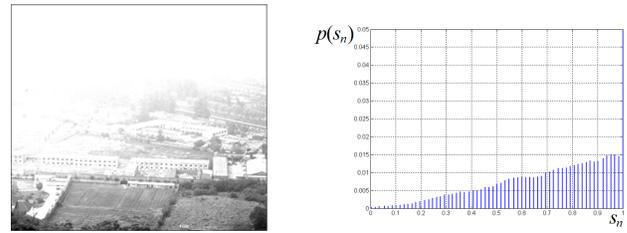


Рис. 5: Изображение ближней сцены $s_n(x, y)$ (слева) и его нормированная гистограмма $p(s_n)$ (справа).

Таким образом, в результате линейного контрастирования поддиапазонов ближней и дальней сцен исходного изображения $I(x, y)$ сформированы два изображения $s_n(x, y)$ и $s_d(x, y)$ с динамическими диапазонами, равными 1. Следующим этапом предлагаемой обработки является совмещение изображений ближней и дальней сцен.

Совмещение изображений ближней и дальней сцен Совмещение изображений ближней и дальней сцен заключается в представлении диапазонов яркостей этих изображений в одном общем диапазоне яркостей. Процедура совмещения заключается в суммировании изображений ближней и дальней сцен, умноженных на весовые коэффициенты. Яркость суммарного изображения s_Σ будет описываться выражением

$$s_\Sigma = w_g s_d + (1 - w_g) s_n,$$

где w_g – «глобальный» весовой коэффициент.

Коэффициент w_g назван «глобальным», поскольку его значение одинаково для всех пикселей изображения. Значение коэффициента w_g определяет вклад яркостей изображений ближней и дальней сцен в яркость суммарного изображения. При $w_g > 0,5$ суммарное изображение в большей степени определяется изображением дальней сцены, при $w_g < 0,5$ – изображением ближней сцены. На рис. 6 показаны результаты совмещения изображений ближней и дальней сцен при различных значениях коэффициента w_g .



Рис. 6: Результаты совмещения изображений ближней и дальней сцен при значениях «глобальных» весовых коэффициентов $w_g = 0,2$ (слева), $w_g = 0,8$ (справа).

Как видно из рис. 6, применение «глобального» весового коэффициента w_g не позволяет учитывать пространственную неравномерность ухудшения контраста, свойственную изображениям, полученным в условиях недостаточной видимости. Использование коэффициента w_g нивелирует выигрыш от увеличения динамического диапазона различных поддиапазонов яркости за счет усреднения с экстремальными значениями яркости изображений $s_d(x, y)$ и $s_n(x, y)$.

Для наилучшего отображения обоих поддиапазонов яркости следует применять весовые коэффициенты, определяемые значениями и пространственным распределением яркости изображения $I(x, y)$. В области больших яркостей следует выбирать большие весовые коэффициенты для изображения дальней сцены, а в области малых яркостей – для изображения ближней сцены. Для учета локальных свойств изображения $I(x, y)$ вместо «глобального» коэффициента w_g может применяться массив локальных весовых коэффициентов $w_l(x, y)$ с размерами, равными размерам $I(x, y)$.

В качестве массива весовых коэффициентов $w_l(x, y)$ используется локально усредненные яркости исходного изображения $\bar{I}(x, y)$, нормированные к максимальному значению \bar{I}_{max}

$$w_l(x, y) = \frac{\bar{I}(x, y) - \bar{I}_{min}}{\bar{I}_{max}}.$$

Локальное усреднение осуществляется с помощью сглаживающей пространственной фильтрации. Изображение $\bar{I}(x, y)$ определяется в результате свертки изображения $I(x, y)$ с маской фильтра $g(x, y)$ и описывается как

$$\bar{I}(x, y) = I(x, y) * g(x, y) = \sum_{\tau=-\frac{A-1}{2}}^{\frac{A-1}{2}} \sum_{\nu=-\frac{B-1}{2}}^{\frac{B-1}{2}} g(\tau, \nu) I(x + \tau, y + \nu),$$

где τ, ν – переменные сдвига; A, B – размеры маски сглаживающего фильтра.

Маска фильтра $g(x, y)$ определяется выражением

$$g(x, y) = \frac{1}{AB} \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \dots & 1 & \dots \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Соотношение размеров маски фильтра A, B выбирается таким же, как и соотношение размеров изображения M, N . Для известных M, N достаточно задавать только один, например, горизонтальный размер маски B . Суммарное изображение $s_\Sigma(x, y)$ определяется выражением

$$s_\Sigma(x, y) = w_l(x, y) s_d(x, y) + [1 - w_l(x, y)] s_n(x, y).$$

На рис. 7 показан весовой массив $w_l(x, y)$ при $B = 10$ и соответствующее ему изображение $s_\Sigma(x, y)$. Применение сглаживающего фильтра с размерами A, B эквивалентно снижению пространственного разрешения изображения в AB раз. Массив весовых коэффициентов $w_l(x, y)$ является изображением $I(x, y)$ с подавленными верхними пространственными частотами. Выражение для $s_\Sigma(x, y)$ содержит как коэффициенты $w_l(x, y)$, так и инверсные коэффициенты $[1 - w_l(x, y)]$. Инверсия весовых коэффициентов приводит к обратному эффекту – происходит подавление нижних частот и усиление верхних частот изображения $s_n(x, y)$. При малых B это проявляется в виде изменения значения постоянной составляющей и повышения резкости контуров в области ближней сцены изображения $s_\Sigma(x, y)$ (см. рис.7).



Рис. 7: Массив $w_l(x, y)$ при $B = 10$ (слева) и соответствующее ему изображение $s_\Sigma(x, y)$ (справа).

Представим изображение $s_n(x, y)$ в виде суммы низкочастотной $s_n^{LF}(x, y)$ и высокочастотной $s_n^{HF}(x, y)$ составляющих

$$s_n(x, y) = s_n^{LF}(x, y) + s_n^{HF}(x, y).$$

При $B = 10$, что соответствует отсутствию сглаживания, получим

$$\begin{aligned} [1 - w_l(x, y)] s_n(x, y) &= \\ &= [1 - I^{LF}(x, y)] [s_n^{LF}(x, y) + s_n^{HF}(x, y)] = \\ &= s_n(x, y) - I^{LF}(x, y) s_n^{LF}(x, y) - I^{LF}(x, y) s_n^{HF}(x, y). \end{aligned}$$

Поскольку к изображениям применяются только линейные яркостные преобразования, то спектры изображений $I(x, y)$ и $s_n(x, y)$ одинаковы по составу пространственных частот. Поэтому, без учета амплитудных соотношений, можно записать

$$I^{LF}(x, y) \approx s_n^{LF}(x, y).$$

Тогда, при $B = 0$, получим

$$\begin{aligned} [1 - w_l(x, y)] s_n(x, y) &= \\ &= s_n(x, y) - s_n^{LF}(x, y)^2 - I^{LF}(x, y) s_n^{HF}(x, y) \end{aligned}$$

При $B = N$, что соответствует снижению пространственного разрешения в MN раз, изображе-

ние $I^{LF}(x, y)$ содержит только постоянную составляющую, и тогда получим

$$\begin{aligned} w_l(x, y) &= I^{LF}(x, y) = const = w_g; \\ [1 - I^{LF}(x, y)] &= const \leq 1; \\ [1 - w_l(x, y)]s_n(x, y) &= (1 - w_g)s_n(x, y). \end{aligned}$$

Таким образом, при $B = N$ все коэффициенты массива $w_l(x, y)$ равны между собой и его применение эквивалентно применению глобального весового коэффициента w_g .

Для снижения эффекта подавления нижних частот изображения $s_n(x, y)$ и, в то же время, сохранения пространственного распределения значений коэффициентов массива $w_l(x, y)$, размер маски фильтра B должен выбираться из интервала $(0, N)$. Анализ относительно большого числа изображений, полученных в условиях недостаточной видимости, показал, что в силу слабоконтрастной природы таких изображений и малой ширины спектра пространственных частот уже при $B = 0, 1N$ обеспечивается значительное снижение эффекта ослабления нижних частот. Массив $w_l(x, y)$ при $B = 0, 1N = 60$ и соответствующее ему изображение $s_\Sigma(x, y)$ показаны на рис. 8.

Итоговый результат применения предложенного метода преобразования показан на рис.9. Динамические диапазоны верхней $s_{\Sigma t}(x, y) = s_\Sigma(x, 1 < y < N/2)$ и нижней $s_{\Sigma b}(x, y) = s_\Sigma(x, N/2 \leq y < N)$ частей изображения $s_\Sigma(x, y)$ равны 0,88 и 0,99, соответственно.



Рис. 8: Массив $w_l(x, y)$ при $B = 60$ (слева) и соответствующее ему изображение $s_\Sigma(x, y)$ (справа).



Рис. 9: Исходное изображение, полученное в условиях тумана (слева) и результат применения предложенного метода преобразования (справа).

В результате применения предложенного метода увеличены динамические диапазоны и контрасты различных областей обрабатываемого изображения, в следствие чего улучшена различимость объектов сцены.

4. Заключение

В работе предложен метод преобразования динамического диапазона с целью улучшения различимости объектов, применимый к изображениям, полученным в условиях недостаточной видимости. На примере изображения, полученного в условиях тумана, проведены качественная и количественная оценки эффективности предложенного метода.

Литература

- [1] Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 352 с.
- [2] Mikhailyuk Y.P., Nacharov D.V. The method of correction of digital television images recorded in bad weather // Proc. of 21st International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». - Sevastopol, 2011. - pp.1122-1123.

Об авторах

Начаров Денис Владимирович — младший научный сотрудник кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Севастопольского государственного университета.

Михайлюк Юрий Петрович — к.т.н, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Севастопольского государственного университета.