

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ЗАЩИТЫ ВИДОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАСКИРУЮЩИХ ПОМЕХ

А.Н. Маковейчук¹, В.А. Подлипаев², Г.В. Худов³
(¹ЗАО „Авикос-Электрон”, Львов, ²в/ч А0515,
³Харьковский университет Воздушных Сил)

В работе теоретически обосновывается методика защиты видовых изображений от воздействия протяженных маскирующих помех. Существенным является использование двумерного преобразования Гильберта для выделения квазипериодической компоненты изображения.

видовое изображение, протяженная маскирующая помеха, двумерное преобразование Гилберта, квазипериодическая компонента

Общая постановка проблемы. В настоящее время для привязки изображений используются реперные объекты [1, 2]. С целью оптимизации обнаружения указанных объектов на видовых изображениях представляется актуальной задача обработки изображений с целью устранения искажений, обусловленных аэрозольными частицами в приземном слое (дымки, полупрозрачные туманы, дым).

При этом используется известная модель формирования и регистрации изображения [3, 4], которая представляется в виде

$$f(x, y) = I(x, y) \cdot r(x, y), \quad (1)$$

где $f(x, y)$ – наблюдаемая освещенность в точке (x, y) ; $I(x, y)$ – внешняя освещенность, изменение которой (затенение) и создает эффект помехи; $r(x, y)$ – коэффициент отражения от подстилающей поверхности.

Предполагается [3, 4], что функция $I(x, y)$ пространственно изменяется существенно медленнее, чем $r(x, y)$, т.е. наблюдаемая освещенность $f(x, y)$ (для изображения в целом) является узкополосным двумерным сигналом. С физической точки зрения узкополосные сигналы представляют собой квазигармонические колебания.

Модель регистрации изображения записывается [3, 4] в виде

$$g(x, y) = \alpha(x, y) \cdot f(x, y) + \beta(x, y), \quad (2)$$

где $g(x, y)$ – регистрируемая освещенность в точке (x, y) ; $\alpha(x, y)$ – коэф-

фициент изменения контраста; $\beta(x, y)$ – коэффициент изменения яркости.

Таким образом, в принятых обозначениях, поставленная задача формулируется как нахождение истинного изображения (функции, пропорциональной $g(x, y)$) по регистрируемому изображению $g(x, y)$.

Анализ последних достижений и публикаций. Известно [5], что для контрастирования изображений наиболее распространенными являются следующие методы: гистограммные, ранговые, разностные, методы растяжения и методы преобразования локальных контрастов. При этом основной акцент в [5] делается на кусочно-нелинейный метод растяжения. Тем не менее, в работе [5] указано, что в настоящее время не существует теоретического решения проблемы оптимальности преобразования изображений путем усиления их локальных контрастов.

Основываясь на представленной модели формирования и регистрации изображения (1), (2), для оценки истинного изображения $\hat{r}(m, n)$ различными авторами предлагаются следующие методики:

1. **Линейная фильтрация** [4, 6]:

$$\hat{r}(x, y) = g(x, y) - h(x, y) * g(x, y) + \text{const}, \quad (3)$$

где $*$ – оператор свертки; $h(x, y)$ – сглаживающая функция, в качестве которой обычно выбирается гауссиан

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right)$$

или функция усреднения

$$h(x, y) = \frac{1}{(2\sigma + 1)^2} \begin{cases} 1, & |x| \leq \sigma \ \& \ |y| \leq \sigma; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

где σ – параметр (масштабный фактор) фильтра.

2. **Гомоморфная фильтрация** [4, 7].

Принимается, что в уравнении (2) коэффициент изменения яркости $\beta(x, y) \approx 0$, в этом случае

$$g(x, y) = \alpha(x, y) \cdot I(x, y) r(x, y),$$

логарифмируя, получаем

$$\log g(x, y) = \log [\alpha(x, y) I(x, y)] + \log r(x, y),$$

при этом первое слагаемое есть быстро меняющаяся функция, а второе – медленно. Поэтому в результате применения фильтра высоких частот, например, в виде $H(x, y) = 1 - h(x, y)$, где $h(x, y)$ определено выше, имеем:

$$H(x, y) * \log g(x, y) \approx \log r(x, y),$$

откуда

$$\hat{r}(x, y) = \exp\{H(x, y) * \log g(x, y)\}. \quad (5)$$

3. *Retinex (RETINa+cortEX).*

Retinex – это семейство алгоритмов, моделирующих яркостное и цветное восприятие человеческого зрения [8]. Основные модификации:

– SSR (Single Scale Retinex – одномасштабная модель Retinex) [8, 9]:

$$\hat{r}(x, y) = \log g(x, y) - \log(h(x, y) * g(x, y)), \quad (6)$$

где в качестве сглаживающей функции также обычно используется гауссиан.

– MSR (Multi Scale Retinex– многомасштабная модель Retinex) [10 – 13]:

$$\hat{r}(x, y) = \sum_k \omega_k \cdot [\log g(x, y) - \log(h_k(x, y) * g(x, y))], \quad (7)$$

где индекс k нумерует используемые параметры σ_k от которых зависят функции h_k ; ω_k – весовые коэффициенты.

Кроме того, предложены алгоритмы Retinex для обработки цветных изображений [14], известны и другие модификации [15].

4. *Морфологическая фильтрация* [4].

Аналогично линейной фильтрации, можно использовать морфологический сглаживающий фильтр $\eta(\cdot)$. При этом уравнение (3) запишется как

$$\hat{r}(x, y) = g(x, y) - \eta(g(x, y)) + \text{const}. \quad (8)$$

Как показано в работе [4], морфологический сглаживающий фильтр представим в виде

$$\eta(g(x, y)) = \min_W \max_W \max_W \min_W g(x, y),$$

где W – окрестность точки (x, y) .

5. *Априорная оценка* [4].

В этом случае необходимо иметь 2 изображения: $b(x, y)$ («черное») и $w(m, n)$ («белое»), регистрирующие нулевую и максимальную освещенности соответственно. В этом случае

$$r(x, y) = \frac{g(x, y) - b(x, y)}{w(x, y) - b(x, y)}. \quad (9)$$

В работе [16] А.Н.Маковейчуком предложена несколько иная модель формирования изображения и связанный с этим алгоритм коррекции [16]. В работе было принято, что действие искажения сосредоточено в узком приземном слое атмосферы, который считался однородным, а искажающий фактор моделировался множественными отражениями от эффективного полупрозрачного экрана, который находится на линии

раздела слоев (рис. 1).

$$\text{В этом случае получено выражение } g(x, y) = \alpha + \frac{(1 - \alpha)^2 \gamma^2 r(x, y)}{1 - \alpha \gamma^2 r(x, y)},$$

откуда

$$\hat{r}(x, y) = \gamma^{-2} \frac{g(x, y) - \alpha}{1 + \alpha g(x, y) - 2\alpha}, \quad (10)$$

где α – коэффициент отражения от экрана; γ – коэффициент (в общем случае оператор), учитывающий взаимодействие в искажающем слое.

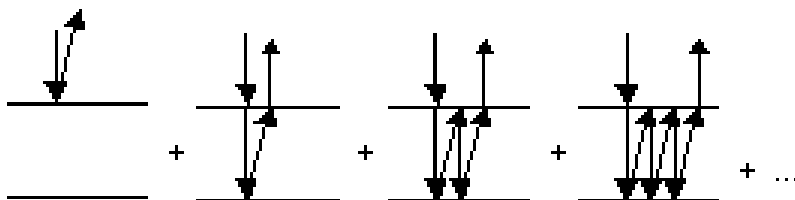


Рис.1. Диаграмма расчета множественных отражений (верхняя линия соответствует экрану)

Параметры модели определялись из условия максимума дисперсии восстановленного изображения.

Формулировка цели статьи. Целью статьи является разработка методики защиты видовых изображений от воздействия протяженных маскирующих помех.

Постановка задачи и изложение материалов исследований. Основным недостатком обработки изображения с использованием перечисленных выше известных алгоритмов является наличие значительных флуктуаций яркости (с характерным пространственным масштабом – порядка размерам окна обработки), что приводит к маскированию мелких деталей изображения. Кроме того, изображение будет искажено наличием мелких теней, положение которых зависит как от формы рельефа, так и от вариаций освещенности.

С учетом указанных недостатков предлагается расширить существующие методики дополнительным этапом: разделением изображения при помощи двумерного преобразования Гильберта на огибающую и квазипериодическую составляющие. При этом в одномерном случае для заданной функции $v(t)$ функция $w(t)$, сопряженная к ней по Гильберту, определяется как [7, 17 – 19]

$$w(t) = v(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v(\tau) d\tau}{t - \tau}, \quad (11)$$

Обратное преобразование

$$v(t) = -w(t) * \frac{1}{\pi t} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w(\tau) d\tau}{t - \tau}. \quad (12)$$

Поскольку функция $1/(t - \tau)$ (ядро преобразований) имеет разрыв в точке $t = \tau$, интегралы (11), (12) следует понимать в смысле главного значения [19].

Введем функцию

$$z(t) = v(t) + j \cdot w(t), \quad (13)$$

называемую аналитическим сигналом, отвечающему вещественному колебанию $v(t)$ (рис.2).

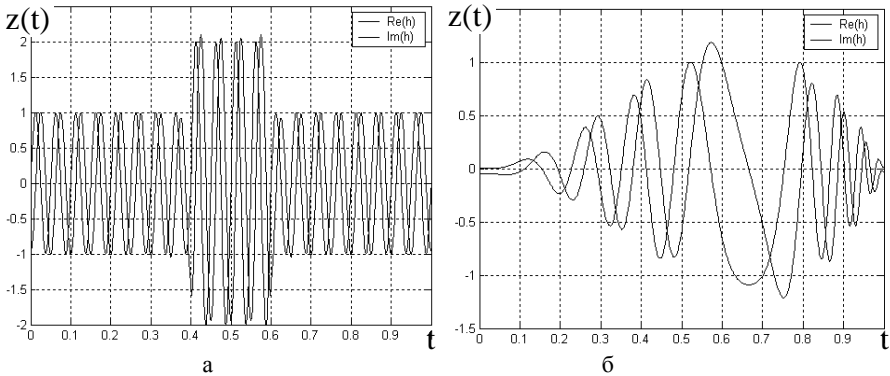


Рис. 2. Примеры аналитических сигналов (показаны действительная и мнимая части): а – модулированный периодический сигнал; б – модулированный квазипериодический сигнал

В рамках метода преобразования Гильберта огибающая $u(t)$ произвольного сигнала $v(t)$ определяется как модуль соответственного аналитического сигнала [19]:

$$u(t) = |z(t)| = \sqrt{v^2(t) + w^2(t)}. \quad (14)$$

Обычно преобразование Гильберта используется для демодуляции узкополосного сигнала (выделения огибающей), однако в работе оно применяется для выделения несущей (квазипериодической составляющей), понимаемой как

$$s(t) = \frac{v(t)}{u(t)}. \quad (15)$$

На рис. 3 показаны примеры применения изложенного подхода для выделения нормализованной несущей.

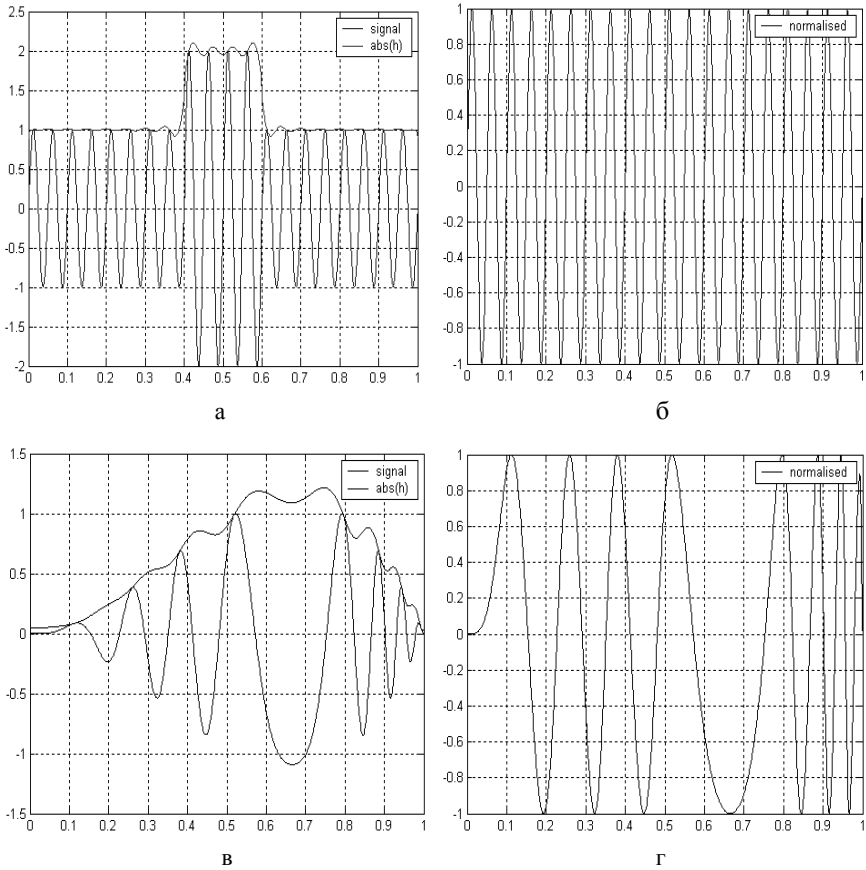


Рис. 3. Примеры выделения несущей:
а, в – исходный сигнал и его огибающая по Гильберту;
б, г – нормализованное значение несущей

Как известно [7, 17], преобразование Гильберта можно трактовать как операцию над спектром сигнала, при которой амплитудный спектр практически не изменяется (за исключением подавления постоянной составляющей), а фаза претерпевает существенные изменения – скачком уменьшается

на $\pi/2$ для положительных частот и увеличивается на $\pi/2$ для отрицательных частот. Это дает возможность эффективного вычисления аналитического сигнала по Гильберту, используя преобразование Фурье:

$$z = F^{-1}[F[v] \cdot h], \quad (16)$$

где v – n -точечный вектор исходного сигнала; $F[\bullet]$, $F^{-1}[\bullet]$ – прямое и обратное дискретные преобразования Фурье; точка обозначает поэлементное умножение векторов; h – вектор, принимающий следующие значения:

$$h[1] = 1; \quad h[i] = 2, \quad i = 2, n/2; \quad h[n/2 + 1] = 1; \quad h[i] = 0, \quad i = n/2 + 2, n. \quad (17)$$

Соотношения (16), (17) легко обобщаются на двумерный случай:

$$Z = F^{-1}[F[V] \cdot H], \quad (18)$$

где V – матрица размером $m \times n$, содержащая исходный сигнал; $F[\bullet]$, $F^{-1}[\bullet]$ – прямое и обратное двумерные дискретные преобразования Фурье; точка обозначает поэлементное умножение матриц; H – матрица

$$H = h_1^T h_2, \quad (19)$$

а h_1 , h_2 – векторы длиной m и n соответственно, значения которых вычисляются согласно выражению (17).

На рис. 4 показано выделение огибающей по Гильберту для модельного двумерного сигнала.

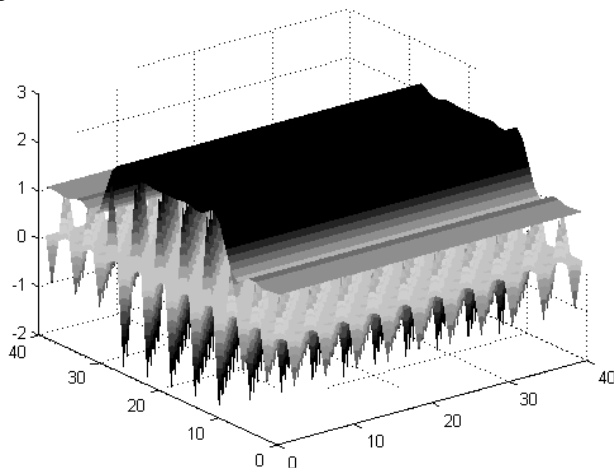


Рис. 4. Пример выделения двумерной огибающей по Гильберту

Двумерное преобразование Гильберта не нашло широкого распространения [20 – 22], при этом в указанном выше смысле (для выделения

квазипериодической составляющей в обработке изображений) оно не использовалось. Для улучшения качества работы предложенного метода, аналогично работе [16], использовался подгоночный параметр, значение которого, выбиралось из условия максимума дисперсии преобразованного изображения [16, 23].

Описанные методы предназначены для обработки изображений в градациях серого, но они легко обобщаются для цветных изображений. Естественным является их применение к каждому цветовому каналу по отдельности, однако лучшие результаты получаются при переходе от цветовой модели RGB (Red, Green, Blue) к модели HSV (Hue, Saturation, Value) и обработке в V-канале [24].

Для дальнейшего контрастирования изображения следует применять методы постобработки (примером постобработки изображений является выравнивание гистограмм [4], [6], [24]).

Таким образом, обобщая все вышеизложенное, можно предложить следующую методику защиты полноцветных видовых изображений от воздействия протяженных маскирующих помех:

Шаг 1. Производим преобразование RGB->HSV.

Шаг 2. Для V-компоненты (матрица V) вычисляем матрицу S, содержащую ее свертку с двумерным гауссианом G:

$$S = V * G.$$

Шаг 3. Нормализуем значения матрицы V, деля ее поэлементно на матрицу S:

$$W = V // S,$$

где // – знак поэлементного деления матриц.

Шаг 4. Используя соотношения (18), (19), находим двумерную огибающую по Гильберту Ω для W.

Шаг 5. Выделяем квазипериодическую составляющую Ξ из W:

$$\Xi = W // (\Omega + \lambda),$$

где значение подгоночного параметра λ находится из условия максимума дисперсии обработанного изображения.

Шаг 6. Масштабируем значения матрицы Ξ на диапазон 0..1 по формуле:

$$\Xi = (\Xi - \min \Xi) // (\max \Xi - \min \Xi).$$

Шаг 7. Производим преобразование HSV -> RGB, используя в качестве V-компоненты матрицу Ξ .

Шаг 8. Производим выравнивание гистограмм для каждого канала RGB.

Выводы и направления дальнейших исследований. Результаты

исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Известные методы защиты изображений от воздействия маскирующих помех не свободны от артефактов и не являются оптимальными при последующем поиске и обнаружении реперных объектов для привязки видовых изображений.

2. Использование двумерного преобразования Гильберта для последующей обработки позволяет более точно восстановить искаженное изображение.

3. Параметры модели адекватно оцениваются по максимуму информации восстановленного изображения, мерой которой является дисперсия изображения.

4. Предложенная методика является эффективной в вычислительном отношении благодаря использованию быстрого преобразования Фурье для вычисления двумерных сверток.

При выполнении дальнейших исследований необходимо произвести натурное моделирование для проверки работоспособности предложенной методики на реальных видовых изображениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Худов Г.В., Бутко И.Н., Маковейчук А.Н. Теоретическое обоснование методики выбора реперных объектов на видовых изображениях // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ. – 2005. – Вып. 2. – С. 92 – 94.

2. Бутко И.Н., Маковейчук А.Н. Спектральный и корреляционный анализ широкополосных участков видовых изображений для решения задач совместного поиска и обнаружения реперных объектов // *Моделювання та інформаційні технології*. – К.: НАНУ, ІПМЕ. – 2003. – Вип. 22. – С. 44 – 48.

3. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 336 с.

4. Young I.T., Gerbrands J.J., v. Vliet L.J. *Image Processing Fundamentals* // *The Digital Signal Processing Handbook*, V.K. Madisetti and D.B. Williams, Eds. Boca Raton, Florida: CRC Press in cooperation with IEEE Press. – 1998. – P. 51.1 – 51.81.

5. Журавель І.М. Локально-адаптивні методи підвищення контрастності зображень: Дис... канд. техн. наук: 05.13.06. – Львів, 2001. – 154 с.

6. Ярославский Л.П. *Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику*. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

7. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. *Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. С.Я. Шаца*. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

8. Land E. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision // *Proc. Nat. Acad. Sci.* – 1986. – Vol. 83. – P. 3078 – 3080.

9. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. *Properties and Performance of a Cen-*

ter/Surround Retinex. – *IEEE Transactions on Image Processing*, March 1997.

10. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. A Multi-Scale Retinex For Bridging the Gap Between Color Images and the Human Observation of Scenes. – *IEEE Transactions on Image Processing: Special Issue on Color Processing*, July 1997.

11. Rahman Z., Woodell G.A., Jobson D.J. A Comparison of the Multiscale Retinex With Other Image Enhancement Techniques. – *Proceedings of the IS&T 50th Anniversary Conference*, May 1997.

12. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. A Multi-Scale Retinex For Bridging the Gap Between Color Images and the Human Observation of Scenes. – *IEEE Transactions on Image Processing: Special Issue on Color Processing*, July 1997.

13. Thompson B., Rahman Z., Park S. A Multi-scale Retinex for Improved Performance In Multi-Spectral Image Classification. – *SPIE International Symposium on AeroSense, Visual Information Processing IX*, April 2000.

14. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. Retinex processing for automatic image enhancement. – *Human Vision and Electronic Imaging VII, SPIE Symposium on Electronic Imaging*, Proc. SPIE 4662, (2002).

15. Rahman Z., Woodell G.A., Jobson D.J. Retinex Image Enhancement: Application to Medical Images. – *Presented at the NASA workshop on New Partnerships in Medical Diagnostic Imaging, Greenbelt, Maryland, July 2001*.

16. Маковейчук А.Н. Методы улучшения качества изображений по результатам натуральных экспериментов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2004. – №2 (8). – С. 38 – 41.

17. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

18. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: В 2-х ч. Ч. 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 360 с.

19. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов по спец. Радиотехника. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.

20. Larkin K.G. PhD Thesis “Topics in Multi-dimensional Signal Demodulation”. – *PhD. University of Sydney*, 2001.

21. Larkin K.G., Bone D., Oldfield M.A. Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns: I. General background to the spiral phase quadrature transform. – *J. Opt.Soc. Amer.*, A 18, (8), tba, (2001).

22. Larkin K.G. Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns: II. Stationary phase analysis of the spiral phase quadrature transform. – *J. Opt.Soc. Amer.*, A 18, (8), tba, (2001).

23. Moayeri N., Konstantinides K. An Algorithm For Blind Restoration Of Blurred And Noisy Images. Tech Report: HPL-96-102, July 01, 1996. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hpl.hp.com/techreports/96/HPL-96-102.html>.

24. Прэнт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Кн. 1 – 312 с.; Кн. 2 – 480 с.

Поступила 22.06.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор Д.В. Голкин,
Харьковский университет Воздушных Сил.
