

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

А. И. МИТЮХИН

**СЕГМЕНТАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПОСРЕДСТВОМ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МИНСК 2020

1. Цель работы

Изучение метода понимания сцен на основе сегментации динамических изображений. Метод позволяет определять параметры движения объекта распознавания, решать задачу различения объектов на фоне несущественных деталей или пространственных помех.

В лабораторной работе рассматривается задача нахождения параметров движения малозаметного (скрытного) объекта, присутствующего на последовательности изображений (снимках).

2. Теоретические сведения

2.1. Сегментация динамических изображений посредством дискретных преобразований

В ряде приложений, например, робототехника, промышленный технический контроль, обнаружение скрытно движущейся военной техники, дистанционное зондирование земной поверхности с целью метеорологических наблюдений и др. требуется произвести оценку скорости, траекторию (направление) движения, пройденного объектом расстояния.

Предлагается сегментацию динамических изображений эффективно осуществлять в частотной области с помощью дискретных преобразований. К таким преобразованиям относятся: дискретное преобразование Фурье (ДПФ), дискретное преобразование Хартли (ДПХ), дискретное преобразование Уолша-Адамара, дискретное косинусное преобразование и др. В лабораторной работе рассматривается применение для целей сегментации ДПХ. В отличие от ДПФ, преобразование Хартли относится к действительным преобразованиям и поэтому вычислительно более эффективное.

Пусть представление цифровых изображений отвечает системе пространственных координат, показанной на рис. 1.

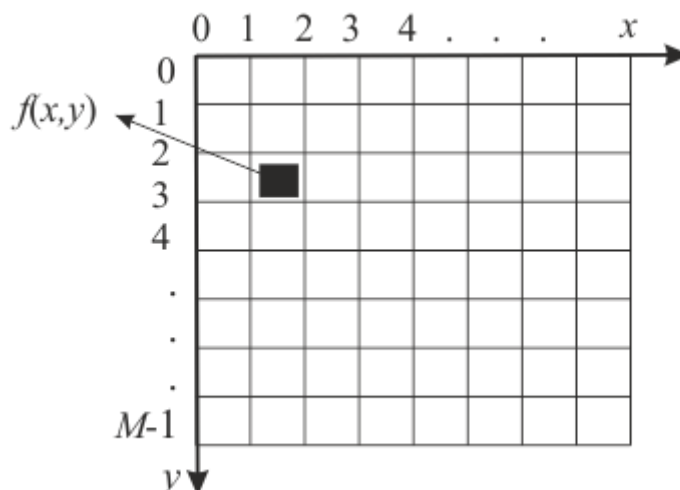


Рис.1. Система координат для цифрового

представления движущегося объекта

Известно, что при сегментации динамических изображений может применяться такой атрибут как движение объекта. Имеется последовательность 2D цифровых изображений $f(x, y, t)$ (кадров изображений). Изображения получены неподвижной камерой, например, с космического аппарата, самолета и пр. Последовательность состоит из B цифровых изображений. Будем предполагать, что обнаруживаются изменения содержания изображений в последовательности кадров в моменты времени $t = 0, 1, \dots, i, \dots, B - 1$. Изменения изображений $f(x, y, t)$ в моменты времени $t_0, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots, t_{B-1}$ происходят из-за наличия движущегося сегментируемого объекта. Если объект наблюдается в моменты $t = 0, 1, \dots, B - 1$, в точках (признаковых точках) с соответствующими координатами (x, y) , то последовательность признаковых точек образует траекторию движения объекта.

Пусть объект представляется одиночной признаковой точкой – одним пикселем (рис. 1). Яркость пикселя равна единице, т.е. в момент времени t_i , точке с координатами (x_m, y_n) соответствует $f(x_m, y_n, t_i) = 1$.

Рассмотрим шаги алгоритма сегментации.

Шаг 1. Последовательность из B изображений размером $M \times N$ можно представить в виде проекций изображений $f(x, y, t)$ каждого кадра на оси x и y . Для одного кадра проекция на ось x записывается в виде последовательности f_x с B отсчетами. В последовательности f_x имеется только один ненулевой отсчет. Яркость этого отсчета равна единице. Аналогично, для одного кадра проекция изображения $f(x, y, t)$ на ось y записывается в виде последовательности f_y с B отсчетами, в которой имеется также один ненулевой отсчет.

Шаг 2. Выполняется кодирование (преобразование), полученных на первом шаге последовательностей с использованием множества дискретных функций Хартли. В непрерывном представлении функция Хартли определяется выражениями

$$\text{cas}(\varphi) = \cos \varphi + \sin \varphi = \cos \omega t + \sin \omega t, \quad (1)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T} \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$ – круговая частота функции, T – период функции.

Из (1) функция Хартли определяется как

$$\text{cas}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) = \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (2)$$

Обозначим $k = \frac{1}{p}$ – длительность кадра, p – частота кадров. Длительность (период) съемки $T = Bk = \frac{B}{p}$. Подставляя в (2) параметры съемки выражение (2) примет вид

$$\text{cas}\left(\frac{2\pi t}{Bk}\right) = \text{cas}\left(\frac{2\pi pt}{B}\right) = \cos\left(\frac{2\pi pt}{B}\right) + \sin\left(\frac{2\pi pt}{B}\right), \quad (3)$$

где $\left(\frac{2\pi p}{B}\right) = \omega_d$ частота функции Хартли. Пусть значение параметра p остается постоянным за время съемки и $p = 1$.

Процесс кодирования сведется к формированию кодовых последовательностей, принадлежащих множествам дискретных функций Хартли

$$h_x(t) \in \left\{ \text{cas}\left(\frac{2\pi xt}{B}\right) \right\}, t = 0, 1, \dots, B-1, x = 0, 1, \dots, M-1.$$

$$h_y(t) \in \left\{ \text{cas}\left(\frac{2\pi yt}{B}\right) \right\}, t = 0, 1, \dots, B-1, y = 0, 1, \dots, N-1.$$

Пример 1. Рассмотрим формирование дискретных функций Хартли, если $B = 4, t = 0, 1, 2, 3; M = 5, x = 0, 1, 2, 3, 4$.

Решение. Для $x = 1$ функция $h_1(t)$ записывается последовательностью

$$h_1(t) = \text{cas}\left(\frac{2\pi 1t}{B}\right) = \cos\left(\frac{2\pi 1t}{B}\right) + \sin\left(\frac{2\pi 1t}{B}\right) = (11 - 1 - 1).$$

Множество функций Хартли в матричной форме

$$\mathbf{H}_x = \begin{pmatrix} h_0(t) \\ h_1(t) \\ h_2(t) \\ h_3(t) \\ h_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Закодированная 1D последовательность как проекция изображения на ось x вычисляется по формуле

$$g_x(t) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y, t) \text{cas}\left(\frac{2\pi xt}{B}\right), t = 0, 1, \dots, B-1. \quad (4)$$

Аналогичное выражение проекции плоскости изображения кадра на ось y имеет вид

$$g_y(t) = \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} f(x, y, t) \text{cas}\left(\frac{2\pi yt}{B}\right), t = 0, 1, \dots, B-1. \quad (5)$$

Пример 2. Записать кодовое слово $g_x(t)$, если $B = 4, x = 2, M = 5, N = 5, y = 0, 1, \dots, 4$

$$\text{Решение. } g_2(t) = \sum_{x=0}^4 \sum_{y=0}^4 f(x, y, t) \text{cas}\left(\frac{2\pi xt}{4}\right) = (1 - 11 - 11).$$

Если наблюдаемый объект движется с равномерной скоростью, то сдвиг за время между двумя кадрами по оси x на l_x пикселей приведет к новому

вещественному значению $\left(\frac{2\pi}{B}l_x\right)$ частоты. Очевидно, чем больше величина l_x , тем больше значение частоты функции Хартли, и тем с большей скоростью движется объект. Значения l_x и $\left(\frac{2\pi}{B}l_x\right)$ непосредственно связаны с составляющей скорости движения объекта в пикселях на кадр по оси x .

Приращение в l_x раз значения $\left(\frac{2\pi}{B}\right)$ частоты приводит к изменению кодовой структуры последовательности $g_x(t)$ (4) (см. пример 2).

Аналогичные рассуждения справедливы относительно движения по оси y .

Шаг 3. Вычисляя 1D ДПХ последовательностей $g_x(t)$ и $g_y(t)$, можно определить параметры, позволяющие вычислить составляющие скорости движения объекта по осям x и y .

Для последовательности $g_x(t)$ преобразование Хартли равно

$$\hat{g}_x(v) = \sum_{t=0}^{B-1} g_x(t) \cos\left(\frac{2\pi vt}{B}\right), v = 0, 1, \dots, B - 1. \quad (6)$$

где v – частотный индекс (номер коэффициента преобразования Хартли).

Соответственно, последовательность коэффициентов Хартли проекции изображения $g_y(t)$ на ось y определяется как

$$\hat{g}_y(u) = \sum_{t=0}^{B-1} g_y(t) \cos\left(\frac{2\pi ut}{B}\right), u = 0, 1, \dots, B - 1. \quad (7)$$

где u – номер коэффициента Хартли.

Преобразования (6) и (7) определяют спектральные представления в системе базисных функций Хартли последовательностей (сигналов) (4) и (5). Для равномерного движения спектральные образы будут характеризоваться единственными компонентами на частотах v и u . В свою очередь, значения v и u определяются величинами сдвига за время съемки по оси x – L_x и оси y – L_y (см. пример 2). Тогда связь между частотой и скоростью определяется как

$$v = L_x. \quad (8)$$

$$u = L_y. \quad (9)$$

Максимальные значения спектральных коэффициентов $\hat{g}_x(v)_{max}$ и $\hat{g}_y(u)_{max}$ формируются в точках с теми номерами нормированных частот v и u , которые пропорциональны скорости движения объекта.

Формулы ((4) – (9)) позволяют вычислить сдвиги пикселей по осям x и y , произвести расчет реальной физической скорости движения наблюдаемого объекта.

Пусть сдвиг объекта в пикселях по оси x за B имеющихся кадров составляет

$$L_x = l_x B.$$

Если известно расстояние d между двумя соседними пикселями, путь пройденный объектом равен

$$D = dL_x.$$

Время t_Σ , затраченное на съемку всех B кадров можно найти, задавая длительность кадра $k = \frac{1}{p}$ (или частоту кадров p . Тогда получаем

$$t_\Sigma = \frac{B}{p}.$$

Зная путь D пройденный объектом, время t_Σ , затраченное на съемку B кадров, частоту кадров p , сдвиг объекта в пикселях за B кадров и номер ν максимального значения спектрального коэффициента $\hat{g}_x(\nu)_{max}$, получаем следующее выражение составляющей скорости движения объекта по оси x :

$$V_x = \frac{D}{t_\Sigma} = \frac{dL_x p}{B} = \frac{dl_x B p}{B} = d\nu p. \quad (10)$$

Аналогично рассчитывается составляющая скорости по оси y .

$$V_y = \frac{D}{t_\Sigma} = \frac{dL_y p}{B} = \frac{dl_y B p}{B} = d\nu p. \quad (11)$$

Реальная физическая скорость объекта

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (12)$$

Таким образом, если известны: расстояние между пикселями d , частота съемки p и такие атрибуты, извлеченные из изображения, как значения координат нормированных частот ν и u , соответствующие максимальным уровням коэффициентов Хартли, становится возможным эффективное вычисление скорости движения объекта.

Пример 3. Оценка параметров движения объекта на изображении на основе ДПХ.

Для упрощения представления примера рассматривается бинарное изображение сцены в растровой системе координат. Начальное (опорное) изображение, содержащее неподвижный объект в момент времени t_0 , содержит единственный пиксел, рис. 2. Его положение на изображении задают пространственные переменные (x_0, y_0) . В последующие моменты времени единичные пиксели изображения отождествляются с движущимся объектом. На рис. 3 показаны восемь совмещенных кадров изображений с

движущимся объектом. После 8 кадров съемки объект сдвинулся на 8 пикселей и его положение определяется координатами (x_7, y_{14}) .

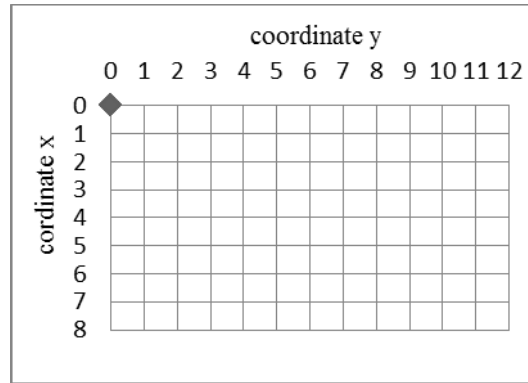


Рис. 2. Начальное изображение

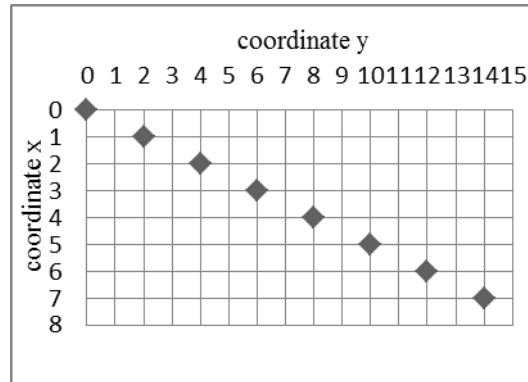


Рис. 3. Совмещенные кадры с изображениями движущегося объекта

Последовательность отсчетов проекций изображений на ось x (4) равна

$$g_x(t) = \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^{15} f(x, y, t) \cos\left(\frac{2\pi t x}{8}\right) = (1, \sqrt{2}, 1, 0, -1, -\sqrt{2}, -1, 0). \quad (13)$$

Аналогично, по формуле (5) вычисляется последовательность отсчетов проекций на ось y

$$g_y(t) = \sum_{y=0}^{15} \sum_{x=0}^7 f(x, y, t) \cos\left(\frac{2\pi t y}{8}\right) = (1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1). \quad (14)$$

В матрично-векторном представлении операции ДПХ над последовательностями (13) и (14) приводят к следующим значениям векторов:

$$\hat{g}_v = \mathbf{H}g_x = [0 \ 8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad \hat{g}_u = \mathbf{H}g_y = [0 \ 0 \ 8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

Структура матрицы ядра ДПХ размером 8×8 иллюстрируется рис. 4.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \sqrt{2} & 1 & 0 & -1 & -\sqrt{2} & -1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & \sqrt{2} & -1 & 0 & 1 & -\sqrt{2} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -\sqrt{2} & 1 & 0 & -1 & \sqrt{2} & -1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -\sqrt{2} & -1 & 0 & 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix}.$$

Рис. 4. Ядро ДПХ

На рис. 5 и 6 показаны спектры Хартли в виде модулей $|\hat{g}_v|$ и $|\hat{g}_u|$

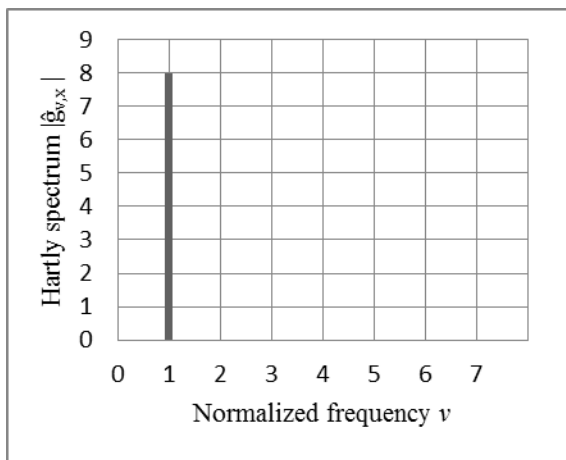


Рис. 5. Спектр проекции $g_x(t)$

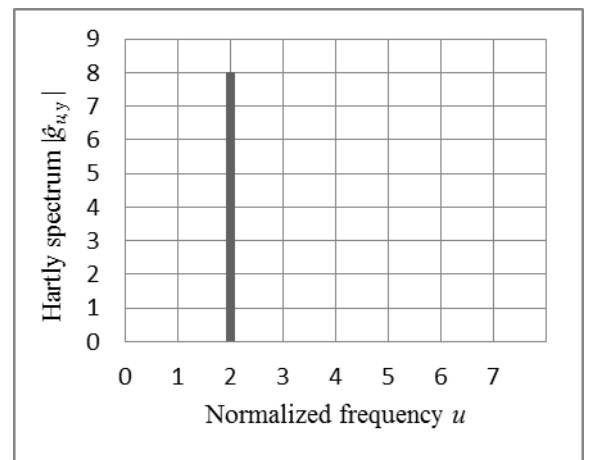


Рис. 6. Спектр проекции $g_y(t)$

Как видно, максимальное значение спектральных коэффициентов формируется на частотах $v = 1$ и $u = 2$. Используя формулы (10) и (11), можно вычислить составляющие скоростей по осям x и y . Например, если расстояние между пикселями $d = 0,25$ м, частота съемки $p = 30 \frac{\text{кадр}}{\text{с}}$, то составляющая скорости по оси x равна

$$V_x = dvp = 0,25 \cdot 1 \cdot 30 = 7,5 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$$

Подобным образом вычисляется значение составляющей скорости в y -направлении

$$V_y = dup = 0,25 \cdot 2 \cdot 30 = 15 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$$

Реальная физическая скорость объекта составит величину

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{108,5} \cong 16,8 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$$

Рассмотрим сегментацию объекта на изображениях, искаженных аддитивным шумом.

Пример 4. Оценка параметров движения трудноразличимого (скрытого) объекта на искаженном изображении.

Пусть имеются искаженные кадры изображения $g(x, y, t)$. Искажения обусловлены наличием аддитивного шума $\eta(x, y, t)$, т.е.

$$g(x, y, t) = f(x, y, t) + \eta(x, y, t).$$

Будем считать, что значения описывающие шум $\eta(x, y, t)$ являются случайными величинами. Например, возможные совмещенные кадры искаженных изображений движущегося объекта имеют вид, как показано на рис. 7. Два единичных пиксела с координатами $(4, 11, t_5)$ и $(5, 13, t_6)$ появились на изображениях пятого и шестого кадров из-за воздействия шумов.

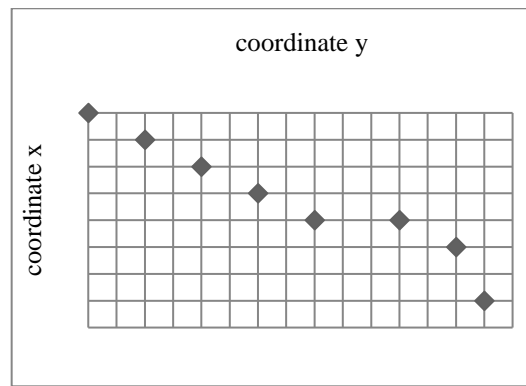


Рис. 7. Искаженные шумом совмещенные кадры с изображениями движущегося объекта

Используя формулы (4) и (5), получаем две последовательности отсчетов проекций на оси x и y

$$\begin{aligned} g_x(t) &= (1, \sqrt{2}, 1, 0, -1, -1 - \sqrt{2}, 0), \\ g_y(t) &= (1, 1, -1, -1, 1, 0, -\sqrt{2}, -1). \end{aligned}$$

Далее выполняются ДПХ последовательностей $g_x(t)$ и $g_y(t)$. В результате имеем следующие значения спектральных коэффициентов Хартли:

$$\begin{aligned} \hat{g}_v &= \mathbf{H}g_x = [0; 7,828; 0,828; -0,414; -0,828; 1; 0; -0,414]^T; \\ \hat{g}_u &= \mathbf{H}g_y = [-1; 4,14; 1,828; 7,414; -0,414; 0,528; -1; 1,414; -0,414]^T. \end{aligned}$$

На рис. 8 и 9 показаны графики спектров (их модулей $|\hat{g}_v|$ и $|\hat{g}_u|$), отражающие воздействие шумов в пространственной области.

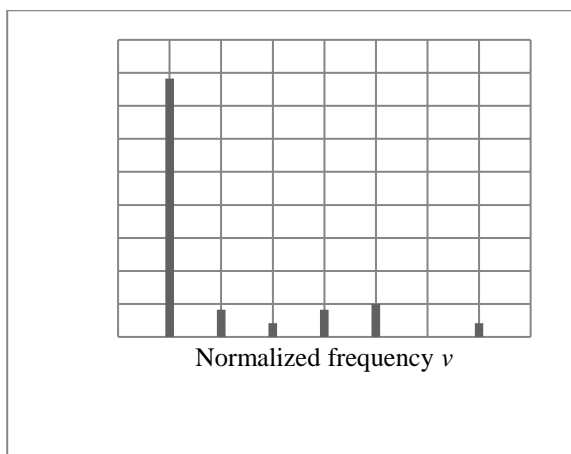


Рис. 8. Спектр проекции $g_x(t)$

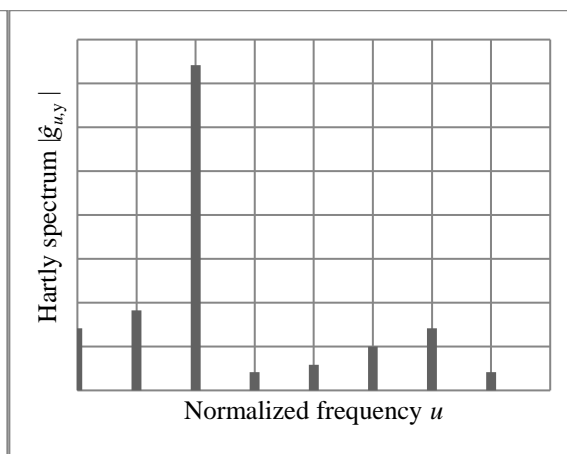


Рис. 9. Спектр проекции $g_y(t)$

В сравнении с коэффициентами \hat{g}_v и \hat{g}_u примера 3, максимальные значения коэффициентов ДПХ \hat{g}_x и \hat{g}_y имеют меньшие значения. Это объясняется наличием шумов на изображениях. Однако, по-прежнему величины максимумов на множествах коэффициентов $\{\hat{g}_v\}$ и $\{\hat{g}_u\}$ однозначно определяют координаты $v = 1$ и $u = 2$. Очевидно, результаты оценки скорости V по формуле (12) в примерах 3 и 4 совпадают.

Для помехоустойчивой обработки скрытых движущихся объектов необходимо рассматривать изменения положения каждого пиксела на протяжении нескольких кадров. Увеличение времени наблюдения (числа кадров) уменьшает вероятность ошибочной оценки скорости. Неправильные значения координат наблюдаемого объекта, встречающиеся в последовательности кадров, в этом случае исправляются.

Вывод. Использование ДПХ в задачах сегментации динамических объектов позволяет осуществлять эффективное его выделение. В сравнении с комплексным алгоритмом ДПФ, применение ДПХ для анализа движения объектов дает существенное сокращение количества выполняемых вычислительных операций.

3. Лабораторное задание

3.1. Предварительное задание

3.1.1. Записать дискретную функцию Хартли для следующих параметров: $B = 8, x = 3$.

3.1.2. Построить график дискретных отсчетов функции Хартли для задания 3.1.1.

3.1.3. Записать кодовое слово $g_y(t)$, если $B = 8, y = 3, M = 8, N = 8$, $x = 0, 1, \dots, 7$.

3.1.4. Вычислить спектр в базисе разложения Хартли последовательности $g_y(t)$ для задания 3.1.3.

3.1.5. Построить график модуля спектра последовательности $g_y(t)$ для задания 3.1.4.

3.2. Выполнение лабораторного задания

3.2.1. Лабораторная работа выполняется на ПК в среде системы MATLAB (или с использованием других инструментов (математических приложений)). Это позволяет сравнительно легко моделировать все задания. При выполнении пунктов лабораторного задания следует производить записи данных, имеющих принципиальное значение, формулы, расчеты, таблицы, графики и пр.

Лабораторная работа предусматривает выполнение двух экспериментальных исследований. Для выполнения исследований необходимо создать (нарисовать) произвольное дискретное изображение совмещенных кадров (см. рис. 3). Минимальное число кадров $B = 16$. Выбор значений других параметров: N, M, p, d, l_x, l_y , остается за студентом.

3.2.2. Первый эксперимент реализует процедуру сегментации объекта по скорости движения без помех на изображении.

3.2.3. Второй эксперимент реализует процедуру сегментации объекта на изображении с помехами.

Напомним, исправление ошибок из-за помех, (см. курс «Теория информации»), связано с минимальным расстоянием кода. В нашем случае кодовое расстояние определяется значением B . Так как последовательности Хартли ортогональны, то их кодовое расстояние равно $\frac{B}{2}$. Максимальное число исправляемых ошибок равно $\left\lfloor \frac{B-2}{4} \right\rfloor$. Выбор числа ошибочных пикселей на изображении (см. рис. 7) остается за студентом.

4. Содержание отчета

4.1. Результаты выполнения предварительного задания.

4.2. Результаты выполнения лабораторного задания. Исходные данные, изображения, расчеты, графики спектров.

4.3. Анализ результатов и выводы.

5. Контрольные вопросы

5.1. В чем состоит принцип сегментации динамического объекта с использованием спектральных преобразований?

5.2. В чем состоит смысл применения действительных дискретных преобразований при осуществлении сегментации объекта наблюдения?

5.3. Какова связь между физической скоростью объекта и частотой кадров?

5.4. Какова связь между физической скоростью объекта и расстоянием между пикселями?

5.5. Как осуществить сегментацию движущегося объекта, если он движется неравномерно?

5.6. Если объект не двигается, какой функцией Хартли описывается кодовая (временная) последовательность?

5.7. Поясните, из каких соображений выбирается размерность матрицы (ядра) преобразования.

5.8. Чем отличаются спектры движущегося объекта на основе ДПХ и ДПФ?

5.9. Позволяет ли использование в качестве ядер ДПХ и ДПФ реализацию быстрых алгоритмов сегментации?

5.10. Какой параметр процесса сегментации движущегося объекта определяет частоту дискретизации?

5.11. Какова связь между частотой дискретизации и диапазоном частот ДПХ.

Литература

1. Яне, Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера 2007.

2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005.

3. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином, 2006.

4. Сэломон, Д. Сжатие данных, изображений и звука : учеб. пособие для вузов/Д. Сэломон. – М. : Техносфера, 2004.

5. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений. В 2 т. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982.

6. Mitsiukhin, A. Extraction of the motion indications in the sequence of images. Proceedings 58. International Scientific Colloquium, DE, Ilmenau, 08–12 September 2014, Technische Universität Ilmenau. – TU Ilmenau, 2014. – URN (Paper): urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwbk-0,75:0, id 2066.

7. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2006.

8. Теория прикладного кодирования: учеб. пособие. В 2 т. / В. К. Конопелько [и др.]. – Минск: БГУИР, 2004.

Содержание

1. Цель работы.....	2
2. Теоретические сведения.....	2
2.1. Сегментация динамических изображений посредством дискретных преобразований.....	2
3. Лабораторное задание.....	10

3.1. Предварительное задание.....	10
3.2. Выполнение лабораторного задания.....	11
4. Содержание отчета.....	11
4.1. Результаты выполнения предварительного задания.....	11
4.2. Результаты выполнения лабораторного задания. Исходные данные, изображения, расчеты, графики спектров.....	11
4.3. Анализ результатов и выводы.....	11
5. Контрольные вопросы.....	11
Литература	12