

УДК 621.397.42: 621.372.544: 528.8

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В.БОНДАРЕНКО¹, И.В.ДОКУЧАЕВ¹, К.А.ЯДЧУК¹, М.А.БОНДАРЕНКО², В.Н.ДРЫНКИН³

¹ ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ»

² Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ им. М.В.Ломоносова)

³ Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП "ГосНИИАС")

Приводятся результаты разработки трехмерного пространственно-временного фильтра нижних частот, осуществляющего эффективное подавление помех и шумов в реальном времени в изображениях быстродвижущихся сцен.

Ключевые слова: пространственно-временная фильтрация, трехмерный фильтр нижних частот, отношение сигнал/помеха, быстродвижущееся изображение.

Бондаренко Андрей Викторович – генеральный директор, e-mail: rastermsk@gmail.com

Докучаев Игорь Вадимович – главный специалист, e-mail: olga_igor@mail.ru

Ядчук Константин Александрович – инженер-электроник, e-mail: thecoha@mail.ru

Бондаренко Максим Андреевич – аспирант, e-mail: max.bond@bk.ru

Дрынкин Владимир Николаевич – начальник сектора, e-mail: drynkinv@gosniias.ru

SPATIO-TEMPORAL FILTERING OF MOVING IMAGES

A.V.BONDARENKO¹, I.V.DOKUCHAEV¹, K.A.YADCHUK¹, M.A.BONDARENKO², V.N.DRYNKIN³

¹Raster Technology Co. Ltd

²The Lomonosov Moscow State University

³ State research institute of aviation systems (FGUP "GosNIAS")

The results of the development of 3D spatio-temporal low-pass filter are present. The filter produces effective interference and noise suppression in real time in the fast-moving scenes.

Key words: spatio-temporal filtering, 3D low-pass filter, signal/noise ratio, fast moving image.

Bondarenko Andrey Victorovich – General Director, e-mail: rastermsk@gmail.com

Dokuchaev Igor Vadimovich – Chief Specialist, e-mail: olga_igor@mail.ru

Yadchuk Konstantin Alexandrovich – Electrical Engineer, e-mail: thecoha@mail.ru

Bondarenko Maxim Andreevich – Post-graduate Student, e-mail: max.bond@bk.ru

Drynkin Vladimir Nikolayevich – Head of Sector, e-mail: drynkinv@gosniias.ru

Несмотря на существенный прогресс в области разработки цифровых сенсоров получения визуальной информации проблема предварительной обработки изображений с целью подавления помех и шумов, особенно в быстроменяющихся сценах, по-прежнему актуальна для астрономии, космонавтики, авиации, медицины, контроля производственных процессов, систем безопасности и т.д. Традиционные методы пространственно-временной обработки изображений, основанные на одномерном усреднении нескольких кадров и на двухмерных линейных или нелинейных процедурах фильтрации внутри кадра, дают приемлемые результаты лишь в случае неподвижных или малоподвижных сцен. Применение аналогичных технологий для быстроменяющихся сцен приводит к значительным артефактам, среди которых наиболее существенными являются остаточные помехи дискретизации, смазы движущихся объектов и др. Причина кроется в том, что изображения обрабатываются с помощью операторов, которые зачастую представляют собой прямое или тензорное произведение одномерных функций, что не соответствует природе реальных изображений, являющихся неразделимыми многомерными [1 – 3].

В статье рассматривается подход, который учитывает природу появления помех дискретизации и определяет алгоритм восстановления движущегося изображения по его отсчетам на основе многомерной фильтрации, что приводит к эффективному подавлению остаточных помех дискретизации типа «гребенка» и высокочастотных шумов.

В любой системе технического зрения (СТЗ) осуществляется дискретизация воздействующего излучения сцены по элементам пространства $x\{x_1, x_2, \dots, x_{M_1}\}$, $y\{y_1, y_2, \dots, y_{M_2}\}$, времени $t\{t_1, t_2, \dots, t_{M_3}\}$, длинам волн спектра излучения $\lambda\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{M_4}\}$ и др. В случае монохромной телевизионной (ТВ) системы формируемое изображение можно рассматривать как трехмерную функцию $I(x, y, t)$. На сегодняшний день в ТВ-системах все еще широко применяются стандарты PAL, SECAM и NTSC с чересстрочной структурой, при которой каждый кадр передается за два полукадра (поля). Такой подход позволяет в два раза сократить полосу частот канала передачи ТВ-сигнала и, по-видимому, будет достаточно долго применяться в ТВ-системах.

При современных высоких контрастах и яркости воспроизведение чересстрочного сигнала на мониторах с прогрессивной разверткой приводит к специфическим дефектам дискретизации, среди которых наиболее неприятным является так называемая гребенка, особенно сильно заметная на быстро движущихся объектах. Вызвана она тем, что за время формирования второго полукадра движущийся объект успевает сместиться на некоторое расстояние по сравнению с его положением на первом полукадре. При преобразовании чересстрочной развертки в прогрессивную (так называемый деинтерлейсинг) используют различные линейные и нелинейные процедуры [4], имеющие разную степень эффективности подавления помех дискретизации, вызванных чересстрочностью.

К первой группе относятся методы (например, Bob Deinterlacing, EEDI2), в которых частота кадров удваивается за счет использования в качестве кадров полей, а внутри каждого поля недостающие строки восстанавливаются при помощи интерполяции или дублирования. При этом происходит частичная потеря пространственного и временного разрешения.

Во второй группе методов (Yadif, MSBob и др.) применяются некоторые адаптивные процедуры, в которых по последовательности кадров определяется степень динамичности сцены. Для неподвижных пикселей полукадры объединяются без смешивания. В динамичных сценах полукадры некоторым образом смешиваются. При этом может применяться компенсация движения: для движущихся объектов используется информация об объекте с предыдущего или последующего кадра. Адаптивные алгоритмы позволяют получить более детальное изображение, но требуют увеличения вычислительных ресурсов. Эти алгоритмы достаточно эффективно подавляют чересстрочную структуру, но применяются, как правило, в дорогих специализированных видеопроцессорах, встроенных в видеопроекторы и плоские ТВ-приемники высшего класса.

Что касается СТЗ, задача разработки недорогих, но в то же время эффективных по производительности и степени подавления помех дискретизации методов и алгоритмов деинтерлейсинга остается актуальной.

Большое разнообразие и разная степень эффективности современных алгоритмов деинтерлейсинга объясняются тем, что они зачастую носят эвристический характер, который не учитывает природу появления помех дискретизации.

Далее приводятся результаты разработки трехмерного пространственно-временного фильтра нижних частот (ФНЧ) с областью пропускания D_0 пространственно-частотной характеристики (ПЧХ) в виде октаэдра:

$$D_0 : |v_x| + |v_y| + |v_t| = a,$$

где $a \leq 1$; v_x, v_y, v_t – соответствующие нормированные продольные, поперечные и временные частоты, принимающие значения от 0 до 1.

Область пропускания D_0 представляет собой аппроксимацию изоэнергетической поверхности, которая с достаточной для практики точностью согласована со спектрами реальных изображений [5]. Фильтр осуществляет эффективное подавление помех дискретизации типа «гребенка» и высокочастотных шумов в движущихся телевизионных изображениях в реальном времени.

На рис. 1,а приведен кадр быстродвижущегося изображения маятника, на котором хорошо заметны помехи дискретизации, вызванные чересстрочным разложением сигнала изображения. На рис. 1,г показан пример фильтрации с помощью реализованного рекурсивно-нерекурсивного ФНЧ первого порядка, осуществляющего трехмерную фильтрацию изображения по двум соседним кадрам в реальном времени.

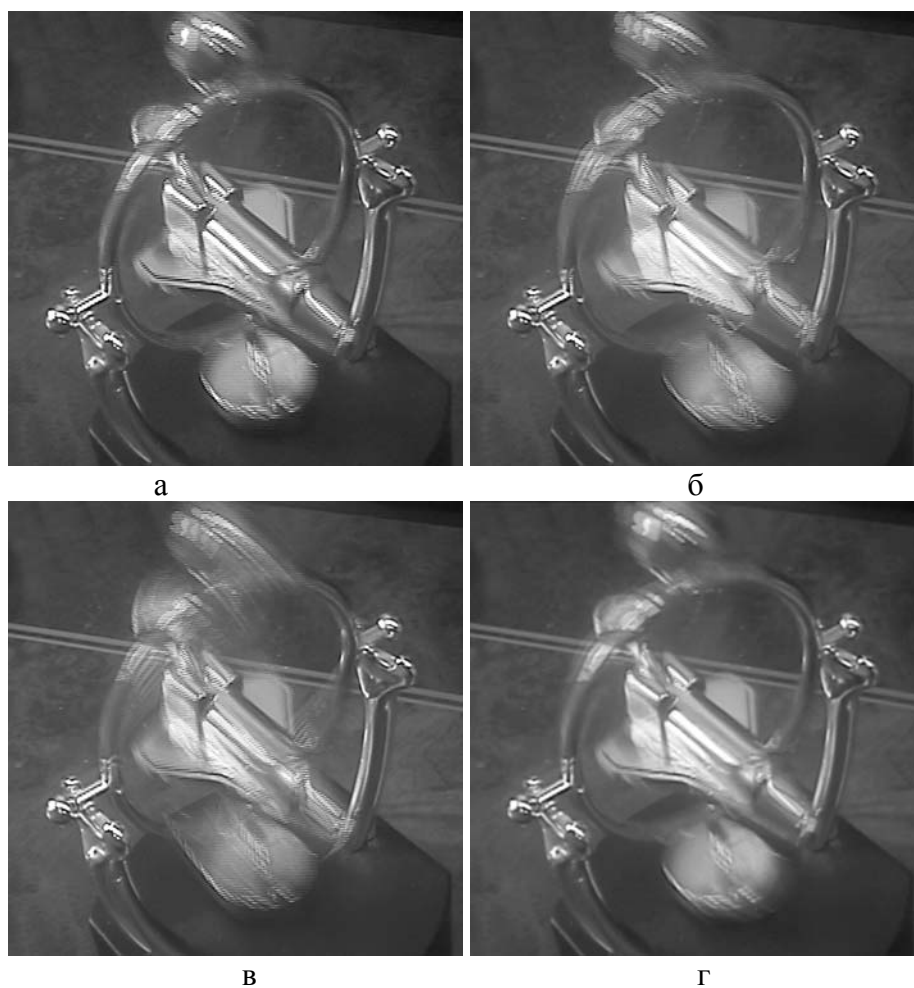


Рис. 1. Примеры фильтрации быстродвижущегося изображения:
а – исходное изображение с помехой дискретизации, вызванной чересстрочной разверткой;
б – одномерное нерекурсивное усреднение по двум кадрам; в – одномерная рекурсия по двум кадрам;
г – трехмерный пространственно-временной ФНЧ

Для сравнения на рис. 1,б,в приведены варианты одномерной временной фильтрации по двум соседним кадрам. Из рисунка следует, что трехмерный фильтр практически полностью подавляет помеху дискретизации, в то время как ее уровень в случае одномерной фильтрации почти не уменьшается по сравнению с исходным изображением.

На рис. 2 приведена диаграмма отношения сигнал/помеха σ [6] для рассмотренных вариантов фильтрации.

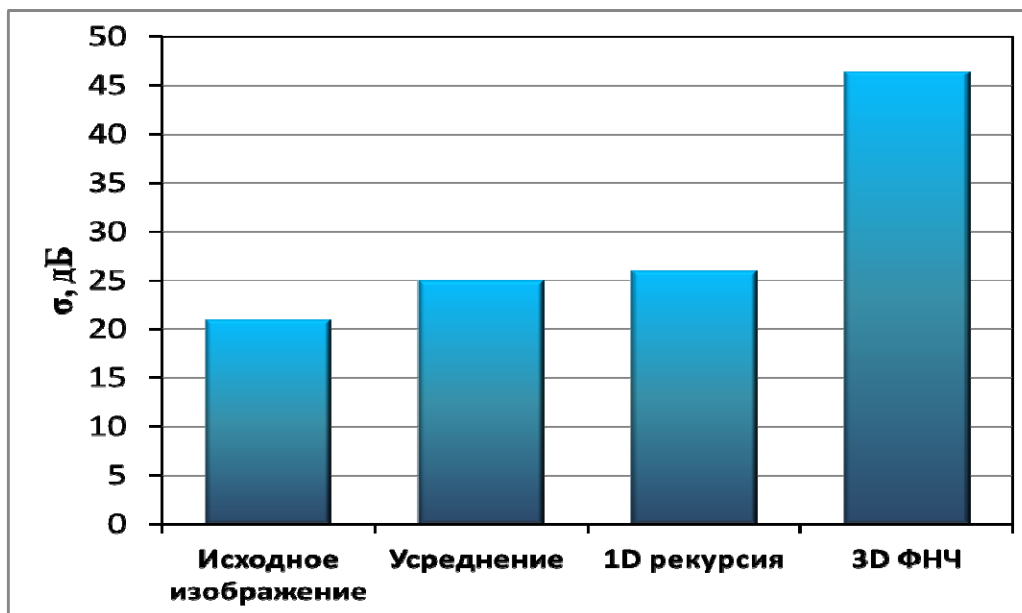


Рис. 2. Отношение сигнал/помеха для разных вариантов фильтрации

Как видно из рис. 1 и 2, трехмерный пространственно-временной ФНЧ существенно ослабляет помеху дискретизации по сравнению с одномерными аналогами.

Трехмерный пространственно-временной ФНЧ был реализован в двух вариантах: программном, на языке C# с использованием библиотек WPF 4.0, и аппаратном, на ПЛИС EP4CE55F23C6N фирмы ALTERA семейства Cyclone IV [7].

Собственно процедура фильтрации в программной реализации занимает 110 строчек кода на C# и имеет алгоритмическую сложность порядка $O(20*W*N)$ операций умножения и $O(30*W*N)$ операций сложения и вычитания для обработки монохромного изображения, где W – ширина, а N – высота входных кадров видеопотока. Среднее время обработки мегапиксельного кадра составляет 0,12 с на процессоре Intel Core i7 M620 с тактовой частотой 2,67 ГГц. В варианте аппаратной реализации трехмерного фильтра обработка производится в реальном времени.

Аппаратная реализация предлагаемого алгоритма фильтрации на ПЛИС была выполнена на базе устройства RT-853vp фирмы ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ» [8]. Проект для программатора микросхемы ПЛИС написан в среде Quartus II v.12 на языке VHDL. При этом было задействовано 5 779 логических ячеек из имеющихся 55 856, 89 кбайт встроенной памяти из 292, 31 аппаратный умножитель 9x9 из 154, что в совокупности заняло чуть более 10% ресурсов микросхемы. Для сравнения одномерный рекурсивный фильтр требует 4 281 логическую ячейку и 70 кбайт встроенной памяти.

На рис. 3 представлен стенд, демонстрирующий работу аппаратно реализованного трехмерного ФНЧ: видеопоток от телевизионной камеры с чересстрочной разверткой, направленной на движущийся объект (качающийся маятник), поступает на два видеопроцессора, расположенных внутри системного блока компьютера (справа). Оба видеопроцессора работают синхронно:

один производит обработку одномерным рекурсивным фильтром (его выходное изображение выводится слева на мониторе), другой – трехмерным ФНЧ (его выходное изображение показано в правой части монитора). В нижней части монитора для сравнения выводятся профили распределения яркости по произвольно выбранной строке для обработанных кадров (слева – одномерная рекурсия по двум кадрам, справа – трехмерный ФНЧ). Как видно из рис. 3, уровень шумов после трехмерного ФНЧ существенно ниже по сравнению с одномерной рекурсией.

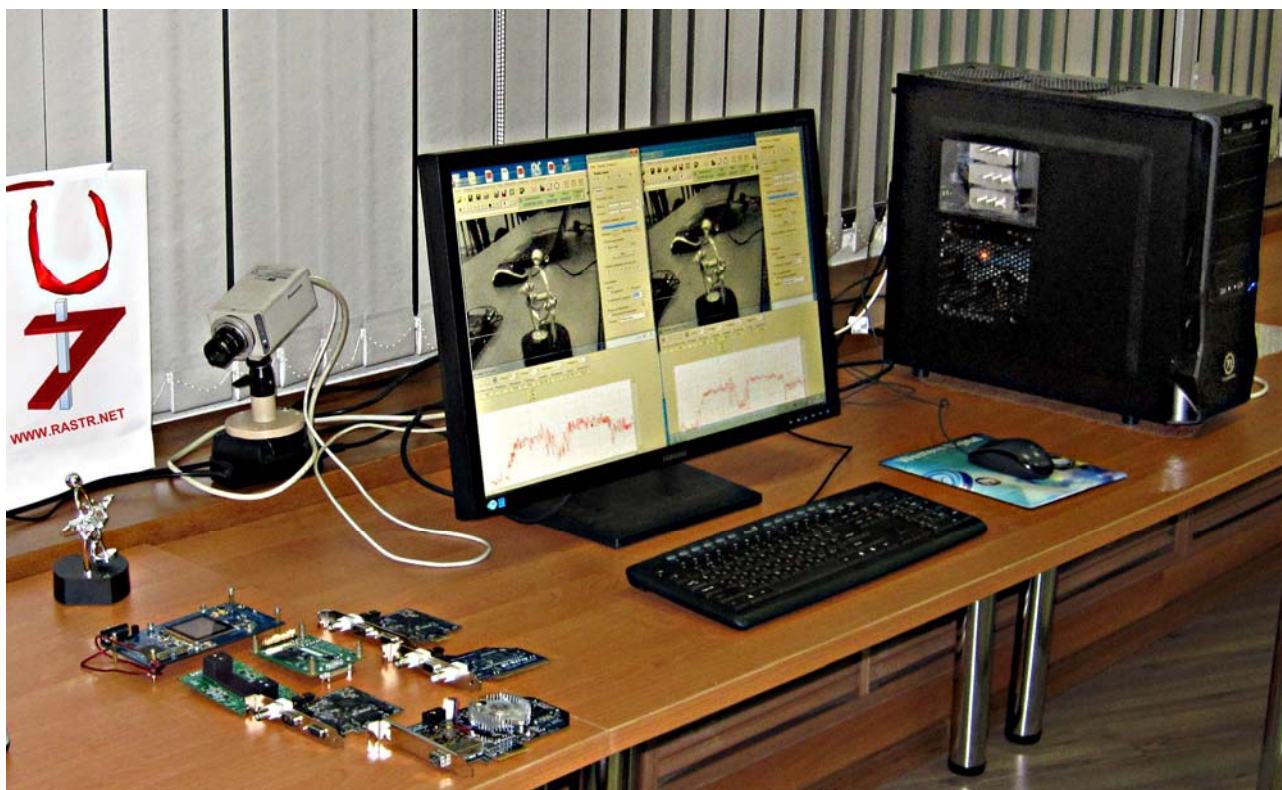


Рис.3. Демонстрация работы аппаратно реализованного трехмерного ФНЧ

Высокая эффективность трехмерной пространственно-временной фильтрации связана с учетом известной пространственно-временной анизотропии спектров реальных изображений [5] и структуры дискретизации, приводящей к помехам типа «гребенка». Область пропускания ПЧХ трехмерного ФНЧ в виде октаэдра обеспечивает требуемую протяженность этой характеристики по осям ν_x, ν_y, ν_t , что позволяет сохранить разрешающую способность изображения вдоль этих осей, и в то же время обеспечивает нулевой коэффициент передачи на частотах $(|\nu_x|, |\nu_y|, |\nu_t|) = (1,1,0)$, $(|\nu_x|, |\nu_y|, |\nu_t|) = (1,0,1)$, $(|\nu_x|, |\nu_y|, |\nu_t|) = (0,1,1)$ и $(|\nu_x|, |\nu_y|, |\nu_t|) = (1,1,1)$, что приводит к эффективному подавлению помех дискретизации и высокочастотных шумов [6].

Полученные результаты могут служить основой для разработки СТЗ, осуществляющих эффективную обработку высокодинамичных сцен в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. БОРОДЯНСКИЙ А.А. Гипертреугольная дискретизация n-мерных сообщений. – Радиотехника, 1985, № 4, с. 49 – 52.
2. ДАДЖИОН Д., МЕРСЕРО Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.

3. ЧОБАНУ М., ВОЛКОВ М. Современные подходы к обработке многомерных сигналов. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2007, № 3, с. 64 – 73. [Электронный ресурс]. URL: http://electronics.ru/files/article_pdf/0/article_550_604.pdf
4. ПЕТРОВ А. Современные методы деинтерлейсинга [Электронный ресурс]. URL: http://compression.ru/video/seminar/slides/2009_New_deinterlacing_methods.pdf
5. БОНДАРЕНКО А.В. и др. Аппаратная реализация трехмерного фильтра. – Техническое зрение в системах управления, 2013.
6. ДРЫНКИН В.Н. и др. Эффективность двухзональной бортовой авиационно-космической системы формирования комбинированного изображения. – Техническое зрение в системах управления, 2013.
7. Техническая документация на микросхему ПЛИС EP4CE55F23C6N [Электронный ресурс]. URL: <http://alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/508707/ALTERA/EP4CE55F23C6N.html>
8. Видеопроцессор RT-853VP [Электронный ресурс], 2013. URL: <http://rastr.net/product/video-proc/rt853vp.html>