

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВИДЕОКАМЕР НА ОСНОВЕ БИННИНГА С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Дрынкин В.Н., начальник сектора ФГУП «ГосНИИАС», e-mail: drynkinv@gosniias.ru

Царева Т.И. к.б.н., старший научный сотрудник ФГУП «ГосНИИАС», e-mail: tsareva@gosniias.ru

Павлов Ю.В., начальник лаборатории ФГУП «ГосНИИАС», кандидат технических наук, e-mail: pavlov@gosniias.ru

Мысин Д.В., начальник сектора ФГУП «ГосНИИАС», e-mail: mysin@gosniias.ru

METHOD FOR INCREASING THE SENSITIVITY OF VIDEO CAMERAS BASED ON BINNING WITH RESTORATION OF SPATIAL RESOLUTION

Drynkin V.N., Tsareva T.I., Pavlov U.V., Mysyn D.V.

Reducing the image resolution is a limiting use of binning in video cameras and video surveillance systems. The article describes an experimentally tested method for increasing the sensitivity of video cameras, based on a method for increasing the sensitivity and frame rate using the procedure of binning of adjacent pixels of photodetector matrix for a sequence of video frames with subsequent restoration of spatial resolution.

Key words: digital image processing, increasing the sensitivity of video cameras, procedure of binning of adjacent pixels.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, повышение чувствительности видеокамер, восстановление пространственного разрешения, биннинг, трехмерная пространственно-временная фильтрация.

Введение

Одним из способов повышения чувствительности видеокамер за счет увеличения отношения сигнал/шум является аппаратный биннинг (или бинирование), представляющий собой процесс суммирования зарядов смежных ячеек матрицы приемника излучения в один суперпиксель в процессе считывания информации из матрицы перед оцифровкой [1, 2]. При этом происходит уменьшение амплитуды суммированного шумового сигнала, носящего случайный характер, и увеличение полезного сигнала яркости суммированного заряда, пропорционально которому увеличивается чувствительность матрицы. Это позволяет получать более контрастные изображения при низкой освещенности на объекте. На рис. 1 показаны примеры повышения контраста сцены, изображенной на рис. 1 а, при биннинге 2x2 (рис. 1 б) и 4x4 (рис. 1 в).

Для удобства сравнения контрастов изображений воспользуемся относительным контрастом (1), который определим отношением разницы яркостей между самой светлой B_{max} и самой темной B_{min} областями изображения к максимальному значению диапазона яркостей D . Для полутонового восьмимбитного изображения, характерного для большинства современных мониторов, значение $D = 255$.

$$K = \frac{B_{max} - B_{min}}{255} 100 \% \quad (1)$$

Для кадров видеоизображений сцены, фрагмент которой представлен на рис. 1 а, относительный контраст

Снижение разрешения является ограничивающим фактором применения биннинга в видеокамерах и системах видеонаблюдения. В статье описывается экспериментально апробированный метод повышения чувствительности видеокамер, основанный на способе повышения чувствительности и частоты кадров с использованием процедуры биннинга смежных пикселей матрицы фотоприемного устройства для последовательности видеокадров с последующим восстановлением пространственного разрешения.

увеличился в 2,5 раза при биннинге 2x2 (рис. 1 б), и в 7 раз при биннинге 4x4 (рис. 1 в).

При биннинге количество эффективных пикселей матрицы (которые участвуют в формировании изображения) уменьшается пропорционально кратности биннинга, что наряду с повышением чувствительности обеспечивает возможность увеличения частоты кадров [3]. Однако следствием уменьшения пиксельного размера кадров видеоизображения является падение пространственного разрешения в изображении сцены [4]. Для количественной оценки пространственного разрешения при использовании биннинга были проведены эксперименты с измерительными штриховыми мирами Фуко [5], один из примеров которых изображен на рис. 2.

Каждый элемент мира состоит из чередующихся темных и светлых прямоугольных полос одинаковой ширины, ориентированных в четырех разных направлениях. Ширина полос от группы к группе убывает в 1,06 раз.

Разрешение определялось методом визуальной оценки по группе штрихов с самой узкой шириной полос, разрешаемых по меньшей мере 80 % участвующих в эксперименте наблюдателей. Группа штрихов считалась разрешенной, если по всей длине чередующихся темных и светлых полос при сохранении их одинаковой ширины визуально ощущалась разница в уровнях серого тона.

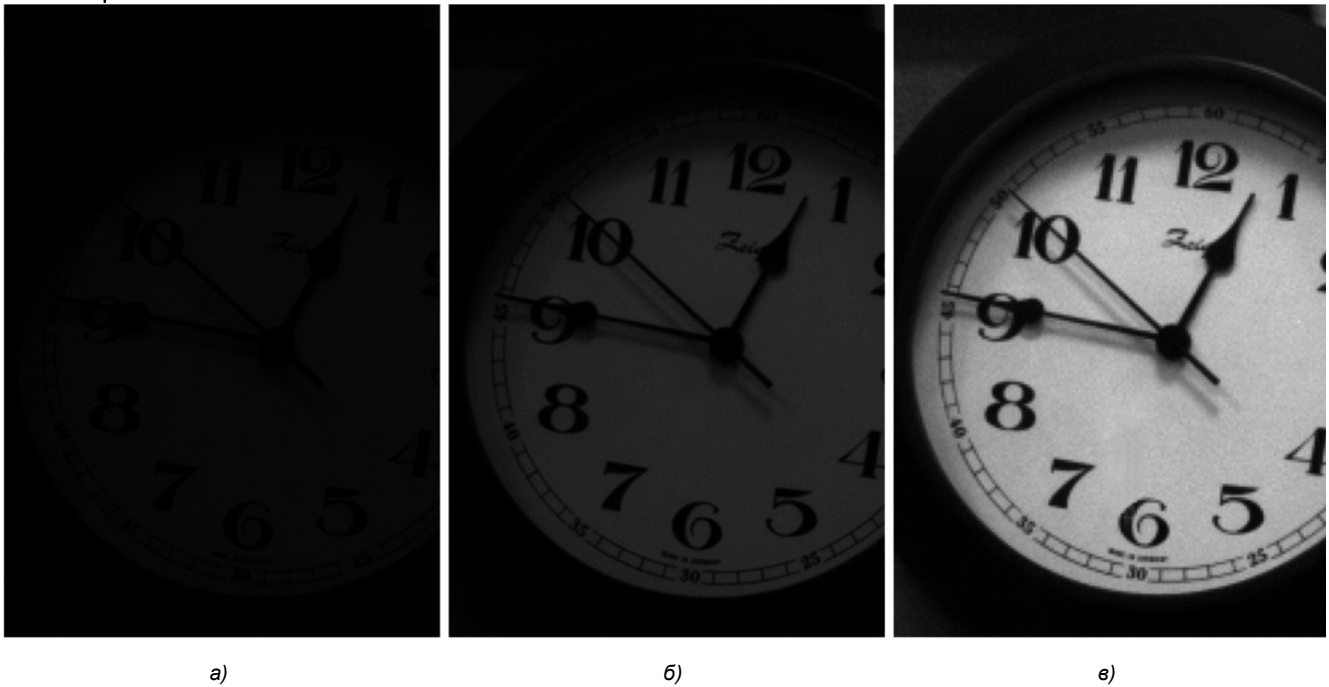


Рис. 1. Примеры повышения контраста сцены (а) при биннинге 2x2 (б) и 4x4 (в)

На рис. 3 а показан увеличенный фрагмент изображения штриховой миры без биннинга, на котором критерию разрешения соответствует 24 группа, а на рис. 3 б – увеличенный фрагмент изображения той же миры при биннинге 2x2, на котором разрешается 12 группа штрихов. Это соответствует падению разрешения в 2 раза. Дальнейшие эксперименты показали, что при переходе к биннингу 4x4 разрешение падает еще в 2 раза дополнительно.

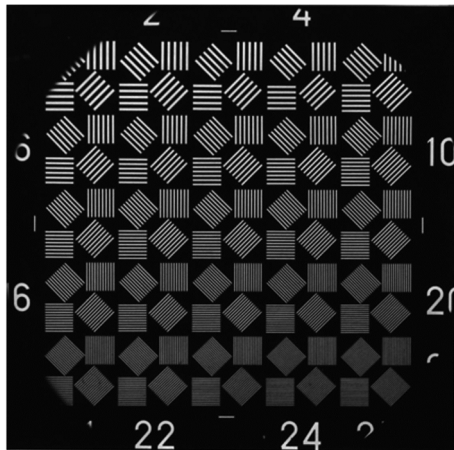


Рис. 3. Измерительная штриховая мира Фуко

Данные эксперименты проводились в студии, поэтому падение разрешения совпало с кратностью биннинга. В реальных же условиях вследствие воздействия дополнительных факторов на процесс формирования изображения (влияние атмосферы, погодных условий, изменения освещенности и др.) пространственное разрешение может падать сильнее.

Снижение разрешения является ограничивающим применением биннинга фактором в целом ряде случаев, например, в охранных телевизионных видеокамерах, в инфракрасных системах видеонаблюдений и т.п.

Ниже предлагается метод повышения чувствительности видеокамер, основанный на способе повышения

чувствительности и частоты кадров видеокамер (далее – Способ) с использованием процедуры биннинга смежных пикселей матрицы приемника излучения для последовательности видеокадров с восстановлением пространственного разрешения [6].

Описание способа повышения чувствительности и частоты кадров видеокамер

Согласно этому Способу биннинг в видеокадрах производят со сдвигом, по крайней мере, на один пиксель матрицы приемника излучения по диагонали так, что в соседних видеокадрах образуется пространственно-временная решетка с шахматным расположением значений яркостей полученных в результате биннинга пикселей, затем видеокадры, полученные посредством биннинга, перед оцифровкой считывают с повышенной или исходной кадровой частотой, после чего пиксельные размеры данных видеокадров увеличивают до размера матрицы приемника излучения путем введения в их матричную структуру нулевых столбцов и строк и осуществляют их интерполяцию с помощью трехмерного интерполяционного пространственно-временного фильтра нижних частот (ФНЧ) с областью пропускания трехмерной пространственно-частотной характеристики (ПЧХ) в виде октаэдра. На выходе ФНЧ формируется последовательность видеокадров повышенной чувствительности исходного пиксельного размера с восстановленным за счет трехмерной интерполяции пространственным разрешением.

Пример выполнения процедуры биннинга 2x2 пикселей со сдвигом на один пиксель матрицы приемника излучения по диагонали в соседних видеокадрах приведен на рис. 4 а. Один из вариантов диагонального сдвига в соседних видеокадрах для биннинга 4x4 приведен на рис. 4 б. На этом рисунке белыми квадратиками на сером фоне показаны полученные в результате биннинга пиксели. Серым цветом показаны области соседних пикселей, подвергаемых процедуре биннинга.

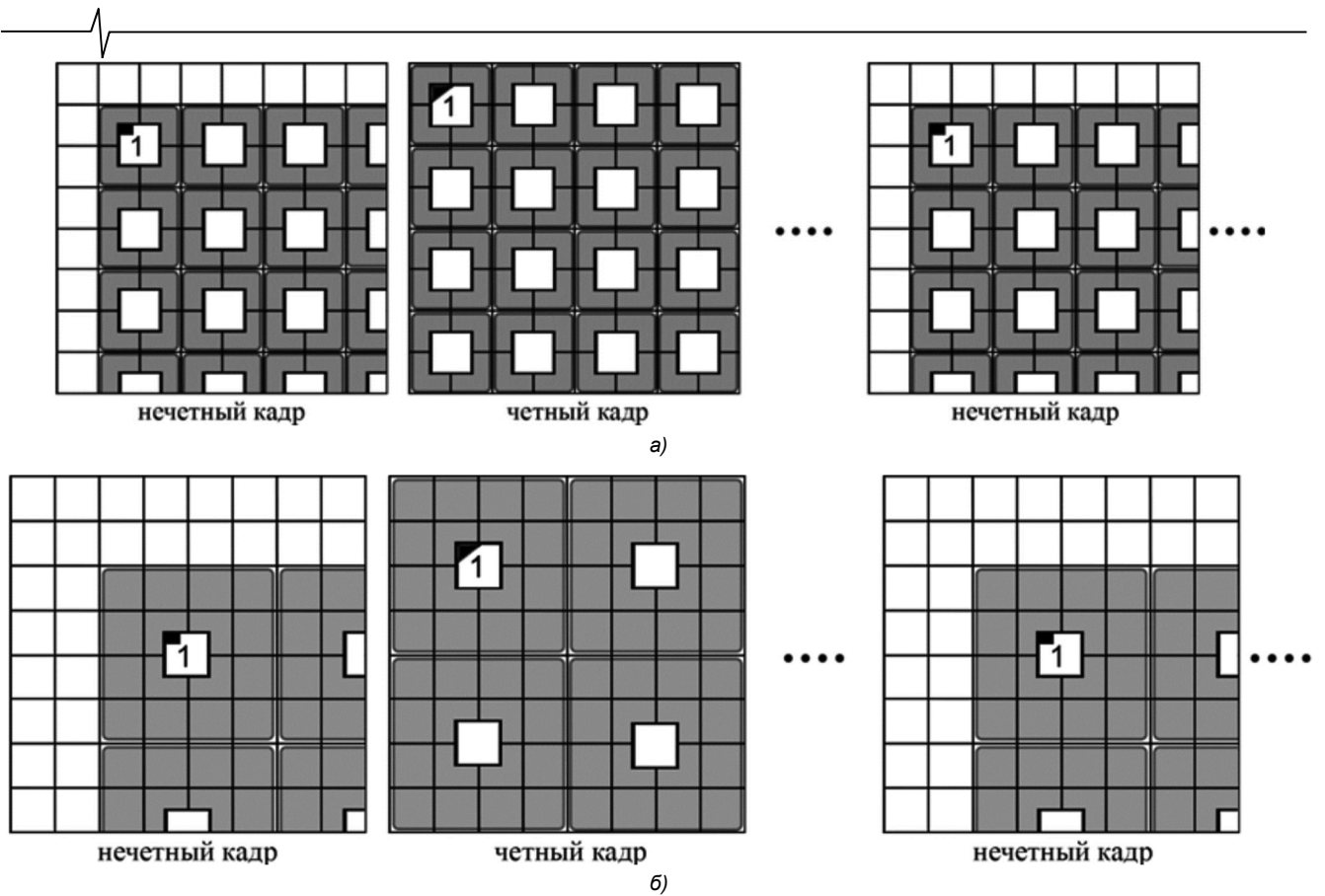


Рис. 4. Примеры выполнения процедуры биннинга матрицы приемника излучения с диагональным сдвигом в соседних видеокадрах для биннинга 2x2 (а) и 4x4 (б)

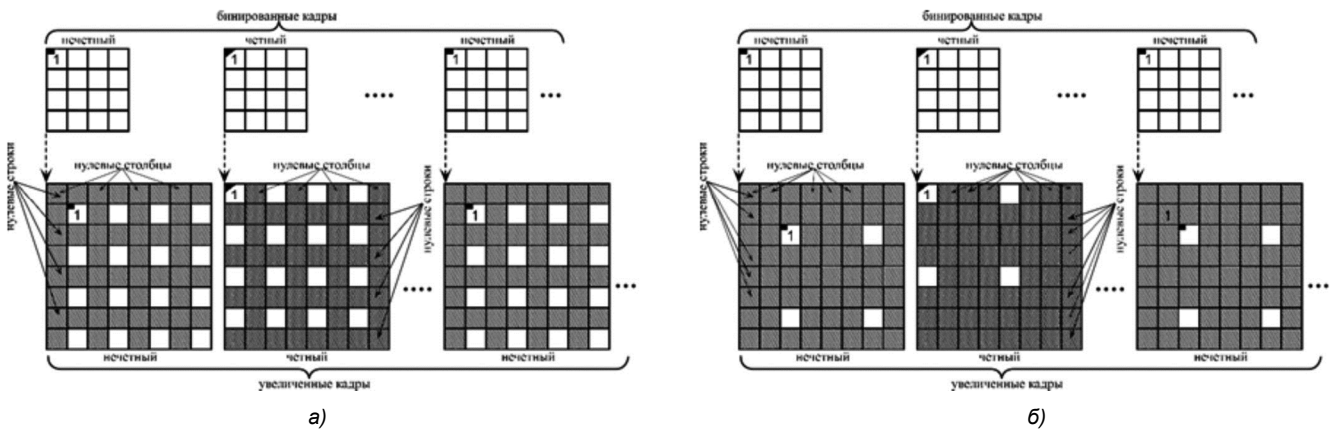


Рис. 5. Примеры увеличения пиксельного размера видеокадров для биннинга 2x2 (а) и 4x4 (б)

В каждом случае согласно Способа может быть четыре варианта диагонального сдвига в зависимости от направления смещения. Перед восстановлением разрешения пиксельный размер видеокадров, полученных в результате биннинга, увеличивают, дополняя их нулевыми столбцами и строками согласно варианту сдвига, применяемого в каждом конкретном случае. На рис. 5 приведен пример увеличения пиксельного размера видеокадров для биннинга 2x2 (рис. 5 а) и 4x4 (рис. 5 б) согласно вариантов, изображенных на рис. 4.

Таким образом значения яркостей пикселей увеличиваемых видеокадров, полученных в результате биннинга, перемежают нулевыми столбцами и строками так, что в любых двух соседних кадрах формируется пространственно-временная решетка с шахматным расположением значений яркостей полученных в результа-

те биннинга пикселей.

Кадры видеоизображений увеличенного пиксельного размера (см. рис. 5) представляют собой разреженные данные, не удовлетворяющие главному критерию теоремы отсчетов для восстановления исходного сигнала. Однако их можно рассматривать с точки зрения парадигмы compressive sensing [7], которая означает сжатые измерения, сжатые ощущения или опознание со сжатием [8], интенсивно развивающейся в последние годы для разработки видеосистем. В нашем случае видеокадры увеличенного пиксельного размера представляют собой разреженные выборки на неортогональном растре дискретизации, возможность восстановления которых с помощью трехмерного интерполяционного пространственно-временного ФНЧ с областью пропускания в виде октаэдра была исследована в работе [9].

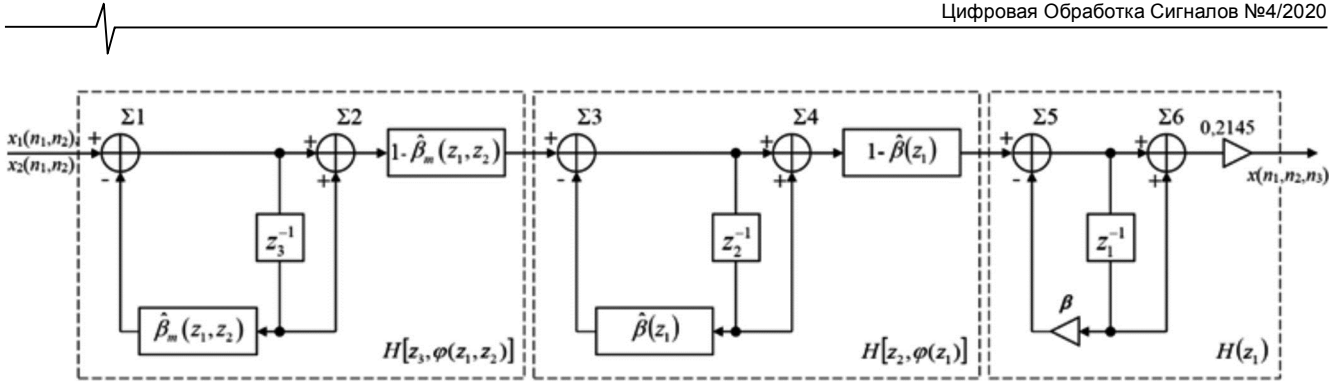


Рис. 6. Обобщенная структурная схема трехмерного интерполяционного ФНЧ

Для осуществления трехмерного интерполяционного пространственно-временного ФНЧ с областью пропускания в виде октаэдра использовалась комбинированная структура, представляющая собой каскадное включение трехмерного, двумерного и одномерного рекурсивно-нерекурсивных звеньев [10].

Передаточная функция восстанавливающего трехмерного интерполяционного пространственно-временного ФНЧ имеет вид:

$$H(z_1, z_2, z_3) = H[z_3, \phi(z_1, z_2)]H[z_2, \phi(z_1)]H(z_1) = 0,2145 \frac{(1+z_3^{-1})}{1-\hat{\beta}_m(z_1, z_2)z_3^{-1}} [1-\hat{\beta}_m(z_1, z_2)] \times \frac{(1+z_2^{-1})}{1-\hat{\beta}(z_1)z_2^{-1}} [1-\hat{\beta}(z_1)] \frac{1+z_1^{-1}}{1+0,716z_1^{-1}}, \quad (2)$$

где

$$\hat{\beta}(z_1) = 0,114 - 0,389(z_1 + z_1^{-1}) + 0,026(z_1^2 + z_1^{-2}) + 0,001(z_1^3 + z_1^{-3}) - 0,04(z_1^4 + z_1^{-4}) \quad (3)$$

представляет собой передаточную функцию одномерной нерекурсивной цепи обратной связи двумерного звена; m – размер апертуры (в элементах) импульсной характеристики двумерной цепи обратной связи трехмерного звена, $3 \leq m \leq k$ и принимает нечетные значения из множества \mathbb{N} , $k = 2, 3, 4, \dots$ – кратность биннинга. Протяженность апертуры двумерной цепи обратной связи $\hat{\beta}_m(z_1, z_2)$ трехмерного звена зависит от кратности биннинга k и должна захватывать соседние значащие отсчеты (которые на рис. 5 показаны белыми квадратиками) видеокадров увеличенного пиксельного размера, т.е. для биннинга 2x2 достаточно иметь $m \geq 3$, а для биннинга 4x4 – не менее 5. Для случая $m = 3$ передаточная функция двумерной нерекурсивной цепи обратной связи будет иметь вид

$$\hat{\beta}_3(z_1, z_2) = 0,531 - 0,156(z_1 + z_1^{-1} + z_2 + z_2^{-1}) - 0,109(z_1 + z_1^{-1})(z_2 + z_2^{-1}); \quad (4)$$

z_3^{-1} представляет собой память на кадр видеоизображения, z_2^{-1} и z_2 – память на строку видеоизображения, z_1^{-1} и z_1 – память на элемент строки видеоизображения.

Обобщенная структурная схема фильтра приведена на рис. 6.

На рис. 7 показана результирующая пространственно-частотная характеристика восстанавливающего трехмерного интерполяционного пространственно-временного

ФНЧ в виде поверхности уровня $K(v_1, v_2, v_3) = 0,8$ для положительного октанта трехмерной области $\{v_1, v_2, v_3\}$ нормированных вертикальных v_1 , горизонтальных v_2 и временных v_3 частот.

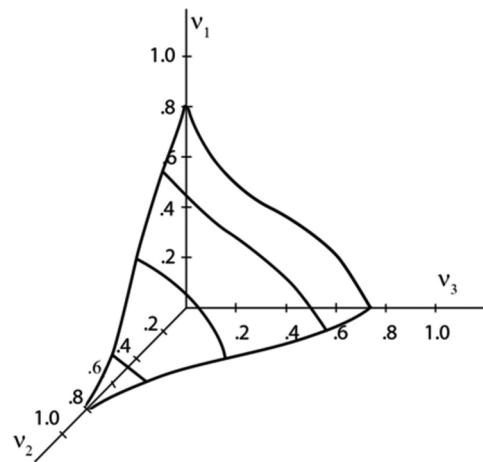


Рис. 7. ПЧХ трехмерного интерполяционного ФНЧ

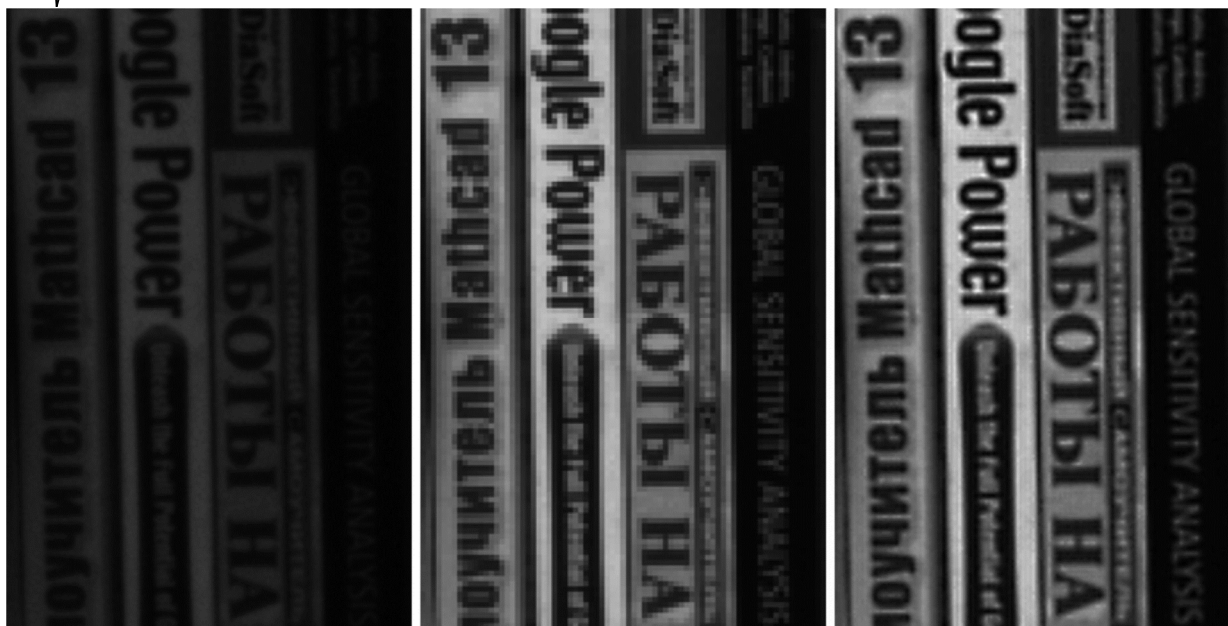
Согласованная со спектрами реальных видеоизображений и с ПЧХ зрения человека область пропускания восстанавливающего трехмерного интерполяционного пространственно-временного ФНЧ в виде октаэдра позволяет при восстановлении видеоизображений по дискретным отсчетам наилучшим образом выделять из дискретного спектра основной спектр изображения исходного разрешения и подавлять побочные составляющие и высокочастотные шумы, что позволяет восстанавливать пространственное разрешение изображений с незначительными для наблюдателя потерями [11].

Тестирование метода

Методами имитационно-математического полунатурного моделирования с использованием реальной видеокамеры с биннингом была исследована возможность восстановления пространственного разрешения изображений сцены при биннинге 2x2 и 4x4.

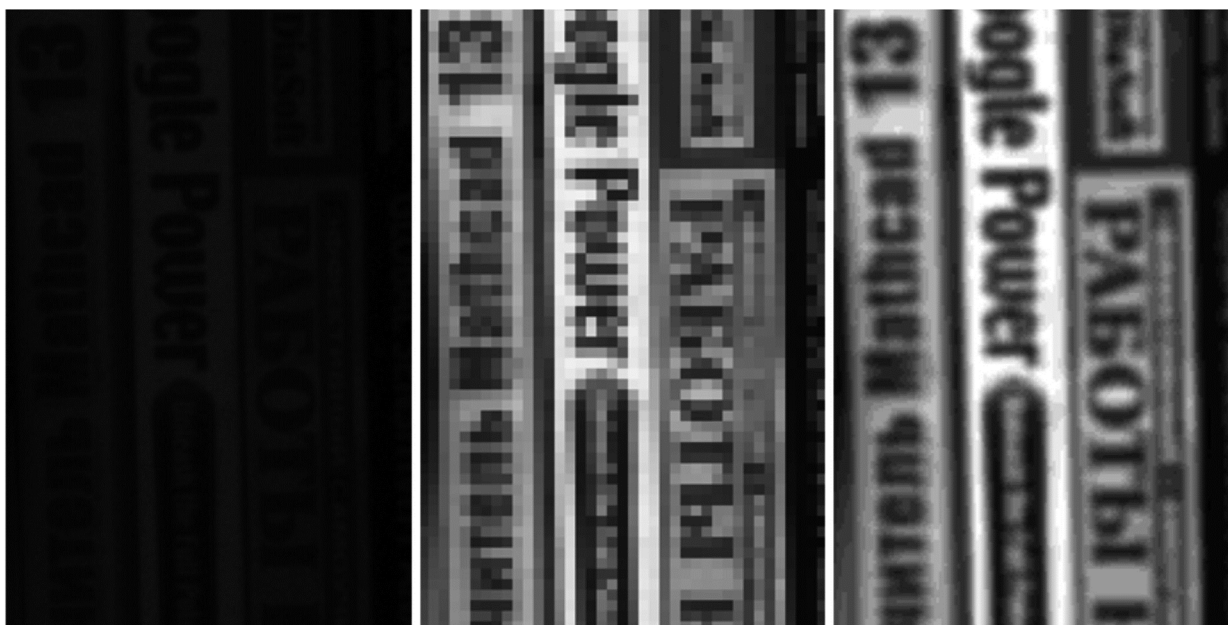
В экспериментах применялась камера BOVCAT ICL-B2520 фирмы Imrex [12], имеющая следующие основные характеристики:

- максимальное разрешение 2456 x 2058 пикселей;
- максимальная частота кадров 50 Гц;
- максимальное отношение сигнал/шум 53 дБ;
- кратность биннинга (горизонтального и вертикального) $\times 1, \times 2, \times 3, \times 4, \times 8$;
- возможность ручной регулировки настроек камеры.



а) б) в)

Рис. 8. Пример восстановления пространственного разрешения изображения сцены при биннинге 2x2



а) б) в)

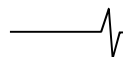
Рис. 9. Пример восстановления пространственного разрешения изображения сцены при биннинге 4x4

Поскольку реализация электронного сдвига биннинга согласно Способа требует разработки новой видеокамеры, то в эксперименте была реализована имитация покадрового сдвига бинированных кадров с помощью естественного дрожания камеры в режиме биннинга при отключенных автоматических настройках с покадровой фиксацией бинированных видеок кадров неподвижной сцены. Далее с помощью программного коррелятора из полученной последовательности бинированных кадров выявлялись видеок кадры с необходимым согласно Способа субпиксельным сдвигом относительно друг друга, по которым затем и осуществлялось восстановление пространственного разрешения с помощью трехмерного интерполяционного ФНЧ с областью пропускания в виде октаэдра.

Рис. 8 демонстрирует один из примеров восстановления пространственного разрешения изображения сцены при использовании биннинга 2x2. На рис. 8 а показан увеличенный фрагмент видеок кадра сцены без биннинга (биннинг 1x1), на рис. 8 б – тот же фрагмент с биннингом 2x2, а на рис. 8 в – восстановленный фрагмент.

На рис. 9 приведен еще один из примеров восстановления пространственного разрешения (рис. 9 в) изображения сцены, увеличенный фрагмент которой показан на рис. 9 а, после применения процедуры биннинга 4x4 (рис. 9 б).

Из рис. 8 и 9 следует, что биннинг 4x4 позволяет «вытягивать» информацию при более низком уровне освещенности сцены, однако падение пространственно-



го разрешения практически разрушает мелкие детали сцены (см. рис. 9 б). Процедура же восстановления пространственного разрешения (рис. 9 в) существенно улучшает полученную картину, хотя уровень восстановления ниже, чем при биннинге 2x2 (рис. 8 в), что вполне естественно: ведь при биннинге 4x4 в изображении сцены (рис. 9 б) остается всего 1/16 часть (6,25 %) информации исходного кадра (рис. 9 а), тогда как при биннинге 2x2 – 25 %.

Для количественной оценки уровня восстановления пространственного разрешения была проведена серия экспериментов с мирами Фуко (рис. 2). Эксперименты показали, что при биннинге 2x2 исходное разрешение восстанавливается в среднем более, чем на 80 %, а при биннинге 4x4 – не менее, чем на 40 %.

Заключение

Разработан метод, позволяющий повышать чувствительность видеокамер с помощью биннинга. Метод содержит процедуру увеличения пиксельного размера подвергнутых биннингу видеокадров, сдвинутых относительно друг друга, по крайней мере, на один пиксель по диагонали, до исходного значения матрицы приемника излучения за счет дополнения их матричной структуры нулевыми столбцами и строками. Полученная последовательность увеличенных видеокадров подвергается затем интерполяции с помощью трехмерного пространственно-временного ФНЧ с областью пропускания в виде октаэдра, что позволяет восстанавливать пространственное разрешение изображений сцены с незначительными для наблюдателя потерями.

Устройство, реализующее представленный метод, может быть выполнено как элемент видеосистемы, интегрированный в видеокамеру [13], что позволит обрабатывать подвергнутые биннингу видеокадры в реальном масштабе времени, и может найти применение в различных областях обработки изображений, в том числе системах видеонаблюдения, техническом зрении, в медицине, неразрушающем контроле и т.п.

Благодарности

Авторы выражают благодарность фирме «Лазерные компоненты» за любезно предоставленную видеокамеру BOBCAT ICL-B2520 фирмы Imregx с биннингом для проведения эксперимента, а также выражают признательность сотруднику ФГУП ГосНИИАС Фролкину Д.В. за техническую помощь при проведении экспериментов.

Литература

1. Способы улучшения чувствительности камер видеонаблюдения // Настройка видеонаблюдения, август 2019. URL: <http://zapishemvse.ru/sposoby-uluchsheniya-chuvstvitelnosti-kamer-videonablyudeniya/> (дата обращения 19.06.2020).
2. Цыцулин А.К., Зубакин И.А., Левко Г.В., Морозов А.В. Измерение качества видеоинформации, формируемой телекамерой // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. 2016, вып. 4. С. 26-32.
3. Binning // Quantum Imaging, 2018. URL: <https://quantumimaging.com/binning/> (дата обращения 03.12.2020).
4. Биннинг // Спецтелетехника, 2004. URL: <http://www.sptf.ru/sptf/docs.php?l=1&part=3> (дата обращения 19.06.2020).
5. Дрынкин В.Н., Царева Т.И. Метод повышения разрешающей способности изображений // Цифровая обработка сигналов. 2014. №3. С. 9-14.
6. Дрынкин В.Н., Царева Т.И., Павлов Ю.В. Способ повышения чувствительности и частоты кадров видеокамер. Заявка на изобретение № 2020139588 (W20073570) от 02.12.2020. Н04N 5/347. / Заявитель – ФГУП ГосНИИАС.
7. Donoho D.L. Compressed sensing // IEEE Trans. Inform. Theory. 2006. Vol. 52. Pp. 1289-1306.
8. Граничин О.Н., Павленко Д.В. Рандомизация получения данных и ℓ_1 -оптимизация (опознание со сжатием) (Обзор) // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11. С. 3-28.
9. Drynkin V.N., Nabokov S.A., Tsareva T.I. Non-Orthogonal Sampling as the Basis for Video Data Compression and Reconstruction // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, No. 3. Pp. 115-122. DOI: 10.1134/S1064230719030080.
10. Drynkin V.N., Nabokov S.A., Tsareva T.I. Video images compression and restoration methods based on optimal sampling // Computer Optics. 2019. Vol. 43, Issue 1. Pp. 115-122. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-115-122.
11. Дрынкин В.Н. Разработка и применение многомерных цифровых фильтров. М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2016/
12. Описание камеры BOBCAT ICL-B2520. URL: <https://cameralab.ru/sites/default/files/icl-b2520.pdf> (дата обращения 04.11.2020).
13. Бондаренко А.В., Ядчук К.А., Бондаренко М.А., Дрынкин В.Н. Аппаратно-программная реализация алгоритма повышения разрешающей способности цифровых видеокамер // Сб. тезисов докладов НТК «Техническое зрение в системах управления-2016 (ТЗСУ-2016)». Москва. 14-16 марта, 2017. С. 38-39.