

УДК 621.384.3

Исследование нейронной схемы формирования изображения для фотоприемного устройства с микросканированием

С. И. Жегалов, В. В. Фадеев

Исследуется нейронная схема формирования изображения для ФПУ с микросканированием. Нейронная схема достигает сопоставимых результатов с коррекцией неоднородности по опорным сигналам с увеличением кадровой скорости ФПУ. Нейронная схема, как и двухточечная коррекция, не корректирует влияние нелинейной составляющей характеристики элементов ФПУ.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: моделирование, нейронная схема, формирование изображения, ФПУ, микросканирование, градиентный метод, коррекция неоднородности, двухточечная коррекция, неоднородность.

Введение

Нейронная схема формирования изображения для фотоприемных устройств (ФПУ) с микросканированием определена в [1]. Нейронная схема реализует градиентный метод [2, 3] обработки изображения с распараллельным процессом формирования изображения.

В [1] приведены результаты, иллюстрирующие монотонность повышения качества изображения с ростом числа итераций работы нейронной схемы, улучшение качества параллельной схемы в сравнении с последовательной, формирование изображения с матричного ФПУ и с линейчатого ФПУ.

Целью настоящей работы является исследование возможностей нейронной схемы формирования изображения для ФПУ с микросканированием. При этом решаются следующие задачи:

- определение меры качества выходного изображения в зависимости от характеристик микросканирования. Эта зависимость — при коррекции неоднородности с использованием корректирующих коэффициентов, рассмотрена в [4] и ранее (см. ссылки в [4]). Здесь зависимость исследуется при использовании нейронной схемы, которая не использует инструмент корректирующих коэффициентов;
- сравнение качества коррекции неоднородности и дефектов при использовании нейронной схемы со схемой калибровки по опорным сигналам;

– анализ характеристики схем с «двойным разрешением», т. е. построения выходного изображения удвоенного размера перекеживанием пикселей 4-х соседних микросканов, при сдвиге микросканирования на полуширину элемента. Кавычки в «двойном разрешении» подчеркивают, что перекеживание по определению не может достигнуть характеристик с использованием ФПУ с удвоенной размерностью.

Инструмент исследования

Общие положения

Инструментом для исследования является модель микросканирования с градиентной обработкой изображения, представленная на рис. 1.

Источником информации для формирования сцены является последовательность выходных кадров с тепловизора.

Источником информации для построения модели ФПУ являются измерения сигналов с реального ФПУ по входным сигналам с АЧТ для диапазонов температур и времен накопления.

Поток кадров с модели ФПУ обрабатывается градиентным методом, т. е. с использованием нейронной схемы, и методом с использованием двухточечной коррекции неоднородности и дефектов. Оба получаемые потока кадров по критериям качества сопоставляются с потоком кадров сцены.

Построение кадров удвоенного размера осуществляется перекеживанием 4 выходных кадров. Подобным же образом, при обработке градиентным методом, перекеживанием кадров градиентов — получаются кадры градиентов удвоенного размера, по которым нейронная схема строит выходные кадры. Удвоенные выходные кадры сопоставляются соответственно с удвоенными кадрами сцены.

Жегалов Станислав Иванович, главный специалист¹.
Фадеев Владислав Викторович, зам. генерального директора по науке².

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² НТЦ ВДМ-ТЕХНОЛОГИИ.

Россия, 121002, Москва, пер. Карманицкий, 9.

Статья поступила в редакцию 27 октября 2015 г.

© Жегалов С. И., Фадеев В. В., 2015



Рис. 1. Блок-схема моделирования микросканирования с градиентной обработкой изображения

Формирование кадров сцены на вход модели ФПУ

Записанный в файл поток последовательных кадров с выхода тепловизора (частота 25 Гц) — источник сцены — используется для формирования исходного для моделирования потока сцены, его пропуска через микросканер и подачи на вход ФПУ.

На вход ФПУ подается поток кадров сцены — размер кадра по числу элементов ($n \times m$), содержаемое этих кадров определяется содержимым выходных кадров тепловизора и сдвигами микросканера. Для тепловизора использована меняющаяся сцена. Дополнительные изменения возникали из-за колебаний самого тепловизора относительно наблюдаемой сцены.

Микросканер имеет два варианта функционирования.

В первом варианте микросканирования направлений сдвига четыре: влево, вверх, вправо, вниз — относительно принимаемого за нулевой (с нулевым сдвигом) кадра. В другом варианте — три: влево, влево-вверх, вверх.

Величина сдвига микросканирования варьируется: 1 и 0,5 (т. е. на элемент и полэлемента ФПУ). Вариант с числом направлений микросканирования 3 (при величине сдвига 0,5) удобен с точки зрения моделирования «двойного разрешения», т.к. порождаемые им отсчеты плотно упаковывают кадр удвоенной размерности (см. рис. 2).

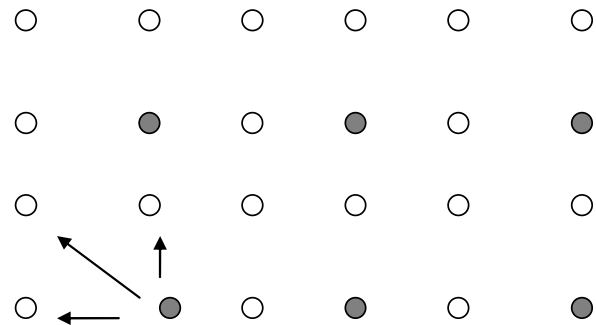


Рис. 2. Упаковка кадра двойной размерности

В модели кадровая скорость поступающего на ФПУ потока лежит в пределах от практически бесконечности до частоты исходной сцены 25 Гц, умноженной на увеличенное на единицу число направлений микросканирования. Также есть вариант в 25 Гц. Изменение содержимого сцены во времени между отсчетами моделируется интерполированием величин отсчетов между соседними кадрами сцены источника.

Формирование модели ФПУ

Модель использует измерения сигналов ФПУ, в данном случае устройство с размерностью (256×320) , для «плоской», с АЧТ, сцены при различных температурах из диапазона $(T_1 \div T_2)$, и временах накопления сигнала.

Передаточная характеристика ФПУ представляется в следующем виде:

$$S_{\text{вых}} = A \cdot P + A_P(P) + B + SH, \quad (1)$$

где выходной сигнал $S_{\text{вых}}$ по входному потоку P создается линейной составляющей $A \cdot P$, нелинейной составляющей $A_P(P)$, постоянной составляющей B и временным шумом SH .

В качестве постоянной составляющей принимается снятый с выхода ФПУ кадр «плоской» входной сцены при температуре T_1 . Линейную составляющую образует разность «плоских» сцен для T_1 и T_2 . Нелинейную составляющую образует подобранная модель для остатков — разностей между отсчетами для «плоской» сцены при разных температурах диапазона температур ($T_1 \div T_2$) и линейной составляющей, причем подбор регламентирован условием прохождения передаточной характеристики через отсчеты для температур T_1 и T_2 .

Способы построения передаточной характеристики вида (1), ориентированные на свободный подбор (без регламентации) уводят искомые характеристики (за счет перераспределения вкладов получаемой оценки между постоянной, линейной и нелинейной частями) от привычной интерпретации смещения и усиления и поэтому неудобны для работы.

По смыслу, передаточная характеристика переводит температуру входного сигнала в отсчеты АЦП, поэтому при преобразовании ФПУ входной поток сцены пересчитывается в температуру, причем масштабирование исходит из диапазона температур сцены.

Отклонение временного шума принимается исходя из оцененного остаточного шума ФПУ (при коррекции неоднородности и дефектов «плоских» сцен методом двухточечной калибровки), при этом для ФПУ 256×320 взято 20 мК, что соответствует в отсчетах АЦП выходного сигнала ФПУ порядка 1.

Формирование градиентов

Градиенты — это попиксельные разности принятых кадров [2]. При вычитании смещения элементов (неоднородность по постоянной составляющей) устраняются, остаются градиенты сцены и шумы. К определению шумов в [2], добавим определение одной из трех шумовых компонент, присутствующих в градиенте, обусловленной изменением сцены в течение отрезков времени между микросканами — это изменение назовем шумом микросканирования.

Формирование выходных кадров изображения посредством двухмерного накопления градиентов

Для последовательного варианта накопления это формирование описано в [2]. Основой эффекта повышения качества изображения является двухмерность накопления — когда выходной сигнал в каждом пикселе формируется из других, через связывающие их градиенты, на основании сигналов с не менее чем с двух соседних пикселей. Это условие может выполняться различными способами, но систематическим и проверенным способом является алгоритм из работы [5].

В модели используется параллельный метод двухмерного накопления, который по результативности является асимптотикой многократного применения последовательного накопления. Использование параллельного метода и есть отличительный признак нейронной схемы формирования изображения.

Параллельный метод однотипен по элементам изображения и по пикселям, причем во времени выполняет одни и те же действия и состоит только из операций суммирования. Для моделирования на компьютере алгоритм из-за своей сугубой параллельности неудобен, так как в компьютере в каждый момент времени выполняется только одна операция алгоритма, и, в целом, до 99 % времени компьютера занимает работа нейронной схемы. Увеличение размерности кадра в 2 раза увеличивает время моделирования в 16 раз. Применение встроенной в моделирующую систему нейронную схему даст время вычислений пропорционально $(n \times m)$ в сравнении с $(n \times m)^2$ с использованием только компьютера.

Изображение строится по градиентам. Начальное изображение очередного выходного кадра равно нулю по всем пикселям. Далее в течение числа итераций, пропорционального числу пикселей изображения, для каждого пикселя на каждой итерации осуществляется суммирование сигналов с соседних пикселей, при этом к сигналу с каждого соседнего пикселя добавляется градиент между этим пикселем и пикселем, в который осуществляется суммирование. Суммирование в пиксель взвешенное, каждый вход делится на общее число входов в пиксель. В процессе итераций выходное изображение как бы проявляется, становится точнее.

Первый выходной кадр — нулевой (без сдвига), далее — сдвинутый влево, далее (например, для микросканирования по трем направлениям) сдвинутый влево-вверх, далее — вверх, и далее повторяется. Выходной нулевой кадр получается по его градиентам с остальными тремя, выходной сдвинутый влево — по его градиентам с другими тремя, и т. д. Процедура получения очередных 4 вы-

ходных кадров основывается на 4 полученных соответствующих кадрах и идентична для каждого из 4 выходных кадров, меняется только структура градиентов.

На рис. 3 представлены топологии суммирования в пиксель.

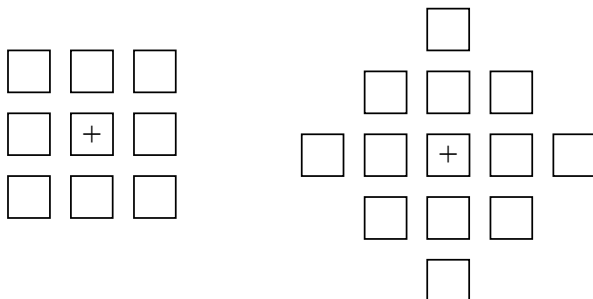


Рис. 3. Топологии суммирования в пиксель: слева — микро-сканирование по 3 направлениям, справа — по 4

Восстановление кадров изображения может происходить и по скользящей схеме: 1-й кадр формируется по первым 4 (для варианта с тремя направлениями микро-сканирования) принятым кадрам, 2-й — по 2—5 кадрам и т. д.

Формирование изображения с использованием двухточечной коррекции (вариант с калибровкой)

Вариант формирования изображения с калибровкой используется для сопоставления с вариантами обработки без калибровки.

Двухточечная коррекция обеспечивается формированием двух уровней сигнала (уровни располагаются на плюс-минус два среднеквадратичных отклонения сцены от ее среднего уровня), определением дефектов и корректирующих коэффициентов и корректированием недефектных и восстановлением дефектных по недефектным элементам.

Критерии сопоставления выходных кадров с входными

Критериев — два:

- по коэффициенту корреляции кадра сцены и выходного кадра;
- по минимуму среднеквадратичной ошибки, в расчете на пиксель разности выходного кадра и кадра сцены.

Корреляционный критерий по определению обеспечивает приведение сопоставляемых кадров по смещению и усилению (смещению — вычетом матожиданий, усилению — делением на среднеквадратическое отклонение). Максимальное значение критерия 1. Критерий обозначаем через K .

Критерий по минимуму включает принудительное приведение (по смещению и усилению) выходной сцены к входной, а так как оба варианта — с нейронной схемой и с калибровкой, приводятся к одной и той же входной сцене, то обеспечивается сопоставимость этих вариантов. Минимальное значение критерия — 0. Критерий обозначаем СКО.

Результаты моделирования

Цель моделирования — сопоставить характеристики метода с нейронной схемой с методом с двухточечной калибровкой при различных значениях параметров (по микро-сканированию, по сцене, по модели ФПУ, по обработке).

Моделирование осуществляется прогоном вариантов, каждый из которых соответствует фиксированной комбинации параметров модели.

Проиллюстрируем проход по отдельным вариантам, чтобы отметить главные моменты.

Просчитаем начальный, т.н. нулевой вариант, чтобы подтвердить идеальный результат при нулевых возмущениях — корреляция должна быть $K = 1$, а ошибка — СКО = 0, включив идеальную передаточную характеристику в модели ФПУ, нулевой временной шум, нулевой шум микро-сканирования (увеличением к бесконечности кадровой скорости). Здесь и далее вариант микро-сканирования — по 3-м направлениям, сдвиг микро-сканирования — 0,5.

Результат при нулевых возмущениях:

- с нейронной схемой — $K = 1$ и СКО = 0,12 отсчета АЦП (для представления масштаба — диапазон сигнала пикселей выходных кадров составляет около 400 отсчетов АЦП; почему ошибка не нуль — нейронная схема восстанавливает изображение итеративно — критерий по мере итераций асимптотически приближается к нулю);
- с двухточечной калибровкой — $K = 1$ и СКО = 10^{-12} .

Далее проверяется предположение, что оба метода — с нейронной схемой и с двухточечной калибровкой, не чувствительны к нелинейности передаточной характеристики. Результат:

- с нейронной схемой — $K = 0,97375$ и СКО = 12,305;
- с двухточечной калибровкой — $K = 0,97346$ и СКО = 12,371.

Далее, убрав нелинейность из передаточной характеристики, получаем результаты:

- с нейронной схемой — $K = 0,9977$ и СКО = 3,41;
- с двухточечной калибровкой — $K = 0,9997$ и СКО = 1,27.

Другими словами, оба метода — нейронный и с двухточечной калибровкой — обрабатывают ли-

нейность передаточной характеристики, но не чувствительны к ее нелинейности.

Возвратим нелинейность в передаточную характеристику и, добавив временной шум величинной (среднеквадратическое отклонение) в 1 отсчет (составляет 20 мК), получаем:

– с нейронной схемой — $K = 0,96983$ и $СКО = 13,164$;

– с двухточечной калибровкой — $K = 0,97345$ и $СКО = 12,372$.

Добавление временного шума в 1 отсчет чуть больше повлияло (в сторону ухудшения) на метод с нейронной схемой, чем с двухточечной калибровкой.

Для получения тенденции примем временной шум равным 10. Получаем результат:

– с микросканированием — $K = 0,9685$ и $СКО = 13,441$;

– с двухточечной калибровкой — $K = 0,9695$ и $СКО = 13,248$.

Теперь включим шум микросканирования (он влияет на метод с нейронной схемой — при бесконечной скорости кадров этот шум равен 0), установив кадровую скорость в 500 Гц, временной шум возьмем 1 (20 мК), получаем результат:

– с нейронной схемой — $K = 0,97$ и $СКО = 13,13$;

– с двухточечной калибровкой — $K = 0,97346$ и $СКО = 12,37$.

Увеличим шум микросканирования, понизив кадровую скорость до 100 Гц. Получаем результат:

– с нейронной схемой — $K = 0,9204$ и $СКО = 21,145$;

– с двухточечной калибровкой — $0,97324$ и $12,475$.

Видно, что происходит ухудшение метода с нейронной схемой при уменьшении кадровой скорости.

Для подтверждения тенденции установим скорость в 25 Гц. Для метода с нейронной схемой корреляция падает почти до 0, а ошибка составляет 50. Таким образом, метод с нейронной схемой соизмерим с двухточечной калибровкой только с частот кадра 500 Гц.

Для снижения влияния шума микросканирования был рассмотрен способ коррекции градиентов перед подачей их на нейронную схему. Суть коррекции состоит в том, что через 4 кадра (при 3-х направлениях микросканирования) и через 5 кадров (при 4-х) кадры с ФПУ имеют одинаковую фазу сдвига, и их разность, хотя и искаженная неоднородностью по усилению, несет информацию

об изменении сигнала. Эти разности и используются для коррекции градиентов. Такая коррекция позволяет нейронной схеме достигать соизмеримых характеристик с двухточечной калибровкой уже при кадровых скоростях, начиная со 100—150 Гц.

Моделирование удвоенной размерности кадров дает аналогичные результаты — использование нейронной схемы дает соизмеримые с методом двухточечной калибровки результаты только с увеличением кадровых скоростей.

Следует отметить, что граница 100—150 Гц получена для конкретного типа сцены. С уменьшением подвижности сцены эта граница уменьшается, с увеличением — будет расти.

Заключение

Нейронная схема привлекательна простотой операций, однородностью структуры, но ахиллесовой пятой нейронного метода является шум микросканирования, он имманентно присущ методу. По этой причине нейронный метод становится соизмеримым по качеству с методом двухточечной калибровки с увеличением кадровой скорости ФПУ. Использование компенсации градиентов по разности однофазных микросканирований только ослабляет требования к этой скорости.

Оба метода — нейронный и с двухточечной калибровкой — не чувствительны к нелинейности передаточной функции элементов ФПУ и по корреляционному критерию не добирают до единицы около 0,02. Представляется, что только трехпараметрическая коррекция может снизить влияние нелинейности. Коррекция четырехпараметрическая и выше не приемлема из-за сложности обработки, вносящей в конечный результат дополнительный шум.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жегалов С. И., Соляков В. Н. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 398.
2. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 149.
3. Жегалов С. И., Пиголкина А. М., Соляков В. Н. и др. Исследование свойств градиентной коррекции неоднородности фотоприемных устройств с микросканированием / Тез. докладов XXII Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М: ФГУП «НПО «Орион», 2012. С. 88—90.
4. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 80.
5. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Филачев А. М. «Способ коррекции неоднородности МФПУ с микросканированием». Патент РФ № 2349053, 10.03.2009.

A neural scheme for the FPA image formation with microscanning

S. I. Zhegalov¹ and V. V. Fadeev²

¹ Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² STC VDM-TECHNOLOGY
9 Karmanitsky al., Moscow, 121002, Russia

Received October 27, 2015

The neural scheme of formation of the image for FPA with microscanning is researched. The neural scheme achieves comparable results with nonuniformity correction on basic signals with increase in a FPA speed. The neural scheme, as well as 2-point nonuniformity correction, do not eliminate of the nonlinear making characteristic of FPA elements

PACS: 85.60.-q

Keywords: modeling, neural scheme, formation, image, FPA, microscanning, gradient method, non-uniformity correction, comparison.

REFERENCES

1. S. I. Zhegalov and V. N. Solyakov, *Uspehi Prikladnoy Fiziki* **2**, 398 (2014).
2. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and V. G. Fetyukhina, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 149 (2011).
3. S. I. Zhegalov, A. M. Pigolkina, V. N. Solyakov, et al., in *Proceedings of the XXII International Conference on Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, May, 2012), P. 88.
4. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and V. G. Fetyukhina, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 80 (2011).
5. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and A. M. Filachev, RF Patent, No 2349053, October 3, 2009.