

УДК 520.34, 520.6

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ВИДЕОСИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКИМ СЛОЖЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Котцов В.А., научный сотрудник Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), e-mail: vladkott@mail.ru

INCREASE THE DYNAMIC RANGE OF THE VIDEO SYSTEM LOGICAL ADDITION OF DIGITAL IMAGES

Kottsov V.A.

The possibility of rapid increase of the dynamic range of digital images by obtaining images with mutually additional characteristics and their parallel logical summation in the streaming mode is shown.

Key words: dynamic range, digital images, logical summation, streaming mode.

Ключевые слова: динамический диапазон, многоканальное наблюдение, логическое сложение, потоковая обработка.

Показана возможность оперативного увеличения динамического диапазона цифровых изображений путем получения изображений с взаимно дополнительными характеристиками и их параллельного логического суммирования в потоковом режиме.

Введение

Видеоинформационные системы играют важную роль в изучении природы Земли и других планет, в навигации, обеспечении безопасности, робототехнике и других важных приложениях. Материалы аэро и космической съемки, в частности, служат важным источником информации для изучения земных ресурсов, состояния природной среды, условий существования на других планетах и многих других направлений исследований необходимых для человеческой деятельности. Результаты этих исследований прямо зависят от качества получаемой видеоинформации. Однако условия наблюдения с космических аппаратов на разных участках орбиты постоянно меняются. На поверхности Луны и других небесных тел, не имеющих атмосферы, условия наблюдений характеризуются резкими изменениями освещенности различных участков. Телевизионные средства наружного наблюдения в системах обеспечения безопасности тоже вынуждены работать в широком диапазоне изменения условий освещения.

Роль динамического диапазона для видеосистемы

Одной из основных характеристик съемочной системы является ее динамический диапазон, который определяет возможность отображения всего многообразия яркостей объектов, наблюдаемых в поле зрения. Большой диапазон изменения яркости объектов реальных сцен далеко не всегда вписывается в ограниченные технические возможности средств наблюдения. При этом может теряться часть необходимой видеоинформации.

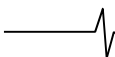
При наблюдении сцен в естественных условиях освещенность земной поверхности в течение суток меняется в широком диапазоне. В полдень ясного дня освещенность максимальна и доходит до 10×10^4 лк. Диапазон изменений освещенности с течением суток составляет около 180 Дб. Для адаптации съемочных систем к этим изменениям применяют меняющееся

диафрагмирование входной оптической системы, светофильтры с различным пропусканием, выбирают соответствующую освещенности светочувствительность фотоприемника, а также время его экспонирования (накопления сигнала).

Различные участки сцены могут иметь существенно разные условия освещения. Это приводит к тому, что в реальных условиях наблюдения, часть яркостной информации может выходить за рамки области линейного отображения и, следовательно, не будет правильно отображаться на снимке. Всем хорошо известны потери деталей на фотографиях в «теньях» или «светах». Например, вы фотографируете в неосвещенной комнате и за окном солнечный день. Глазами хорошо видны предметы, как в комнате, так и за окном. Но на снимке, в зависимости от параметров съемки, мы увидим либо предметы в комнате, либо за окном. Типичным примером может служить различие условий фотографирования на уровне крон деревьев и под пологом леса при аэрофотосъемке, которое может быть критичным для фотограмметрических определений. Наличие облачности при съемке тоже приводит к несоответствию условий отображения на снимке объектов с прямым и рассеянным освещением.

Еще одним важным примером высоких требований к динамическому диапазону служит задача наблюдения полного лимба планеты в произвольной фазе, например, для навигационного определения направления местной вертикали.

Камера с большим динамическим диапазоном иногда позволяет обеспечить получение видеоинформации даже в условиях далеких от идеальных. Так цифровая камера в составе научного комплекса микроспутника «Чибис-М» за счет большого динамического диапазона обеспечила получение ценной видеоинформации даже в режиме неуправляемой съемки. Были получены мелкомасштабные снимки разных регионов, снимки горизонта с проработкой атмосферных слоев, ночные снимки с



населенными пунктами, которые позволили дать оценки скорости и направления перемещения спутника [1]. Нестандартную задачу наблюдения звезд в дневных условиях равнинной местности решали специалисты из Сарова. По результатам сравнительных испытаний образцов камер зарубежного и российского производства, уверенные дневные наблюдения звезд слабой яркости 7-й и 8-й звездной величины обеспечила только российская камера RT-1000DC производства ООО «Растр Технолоджи» [2].

Эти несколько примеров показывают важность обеспечения необходимого динамического диапазона системы наблюдения при решении конкретных задач.

Проблема увеличения динамического диапазона

Чтобы получить всё желаемое отображение сцены нужно выбрать такие параметры съемки, чтобы весь необходимый диапазон градаций наблюдаемой яркости укладывался в пределах участка линейного отображения. Однако, желание увеличить диапазон отображаемой яркости нередко приводит к соответствующему снижению контраста получаемого изображения, что в свою очередь ведет к размыванию границ и уменьшению распознаваемости объектов.

Любая съемочная аппаратура характеризуется определенным ограниченным динамическим диапазоном. Он может задаваться различным образом. Для фотографических систем его определяет фотографическая широта, для цифровых систем наблюдения – число передаваемых градаций яркости. Манипулируя величиной контраста отображения и величиной экспозиции, подбирают оптимальные условия получения изображения. Однако, реальные условия наблюдения и технические возможности аппаратуры не всегда позволяют этим путем достигнуть необходимого результата. В качестве примера сложного для отображения объекта сошлемся на особенности распределения яркости при наблюдении картины оптического преобразования Фурье, в центральной части поля зрения наблюдается высокая яркость, соответствующей низким пространственным частотам, а к краям поля зрения, с увеличением пространственных частот происходит быстрое падение яркости наблюдаемой картины пространственного спектра. Правильное отображение этой картины весьма проблематично.

В настоящее время для получения видеoinформации широко используют цифровые съемочные системы с матричными фотоприемниками, которые обеспечивают получение дискретизованных и квантованных изображений. Однако, их динамический диапазон всё еще меньше чем у фотоматериалов и часто бывает недостаточен для решения многих прикладных задач.

Если результаты съемки важны и снижение требований к качеству изображения нежелательно, то следует искать путь увеличения динамического диапазона без снижения контраста формируемого изображения.

Использование многоканального наблюдения

Из постановки задачи следует необходимость увеличения числа градаций получаемого изображения, но

оно всегда будет ограничено техническими возможностями конкретной съемочной системы.

Вариантом решения этой задачи может быть многократное или параллельное получение изображений одной и той сцены при разных, дополняющих друг друга параметрах съемки. Наиболее просто, например, для статической сцены можно выполнять съемку с изменением времени экспонирования при фотографировании для каждого последующего кадра, что соответствует изменению времени накопления заряда в случае съемки камерой с твердотельным матричным фотоприемником. Каждое из полученных таким образом изображений будет характеризовать только часть видеoinформации, заключенной в пределах области линейного отображения. Следовательно, каждый из полученных в серии снимков будет дополнять наблюдаемую картину и для последующей интерпретации следует рассматривать одновременно все полученные снимки. Но, выполнение такого анализа на нескольких отдельных снимках заметно усложняется и становится менее эффективным.

Современные цифровые съемочные системы могут формировать изображения с 8, 10, 12 и большим числом бит, а цифровая видеoinформация может затем поступать в процессорные блоки, обрабатываться математически и анализироваться без принципиального ограничения к числу градаций. Полученный результат будет оцениваться в виде цифрового массива или представлен для отображения в соответствии с тем числом градаций, которое может реализовать применяемая техника воспроизведения. Следовательно, основные ограничения числа градаций мы имеем на этапе получения видеoinформации.

Можно указать множество случаев, когда последовательная схема для получения набора изображений с разными свойствами неосуществима. Достаточно привести любой пример быстро изменяющейся ситуации в процессе наблюдения. В этом случае съемку такого набора изображений с разными свойствами необходимо выполнять только одновременно. Подобная технология одновременной съемки с разными параметрами известна и широко применяется на практике, в частности, для определения спектральных различий объектов с использованием многозональной (многоканальной) съемочной системы [3]. Допустим, что мы получили требуемый набор таких изображений, отображающих весь необходимый динамический диапазон. Очевидно, что для практических целей эту одновременно полученную видеoinформацию целесообразно скомпилировать в одно изображение. Так же поступают и при представлении для анализа результатов многозональной съемки, синтезируют цветокодированное изображение из отдельных кадров, полученных в разных зонах спектра.

Но, в ряде случаев существенное значение может иметь выбор технологии для выполнения этой компиляции из серии полученных при разных условиях изображений. От этого зависит выбор используемой техники, её скоростные характеристики и стоимость используемого оборудования. Это может быть важно в бортовой аппаратуре и особенно если возникает необходимость оперативного решения этой задачи в темпе поступления видеoinформации.

Вариант арифметического решения

Как следует из общей формулировки задачи, требуемое решение может осуществляться, например, арифметическим сложением видеосигналов изображений, для соответствующих точек изображения, полученных на двух и более кадрах, а затем последующей нормализации результата, если это необходимо. Такое решение предложено, в частности в [4]. Однако, сложение цифровой видеoinформации в процессорных устройствах является не совсем простой процедурой. Необходимо многократно осуществить последовательную выборку соответствующих пикселей изображений, полученных при разных условиях экспонирования. Значения цифровых сигналов, характеризующих наблюдения в одной и той же точке сцены, необходимо просуммировать.

Всякое устройство, выполняющее действия над цифровыми сигналами, является функциональным преобразователем, в основе работы которого применяют логические элементы. Архитектура ЭВМ состоит из типовых логических устройств, работающих на основе аппарата математической логики с определением переполнения разрядов и переносом данных в более высокие порядки. Для обеспечения работы таких арифметических устройств в их схемах предусмотрены блоки запоминания и синхронизации [5]. Очевидно, что в процессе вычислений, в зависимости от количества накоплений и переносов, происходит переменная задержка и скорость обработки данных меняется. Это усложняет арифметическое решение задачи, реализуемое в устройствах электронно-вычислительной техники.

Вариант логического решения

Нами предложен логический вариант решения задачи увеличения динамического диапазона цифровых приборов. Он также заключается в получении при съемке набора изображений одной и той сцены при разных, дополняющих друг друга параметрах съемки и последующего формирования суммарного изображения, которое содержит всю полученную видеoinформацию. Отличие заключается в технологии выполнения самой операции суммирования.

Рассмотрим этот вариант логического решения задачи. В современных твердотельных электронных съемочных системах изображение формируют в виде матрицы дискретных значений яркости, наблюдаемой в каждой разрешаемой точке. Величину самой яркости в цифровом изображении также дискретизируют или квантуют на заданное ограниченное число уровней. Любой из таких выбранных уровней яркости характеризует фотометрический срез изображения и может быть представлен, как одномерный слой информации кодированный в бинарной форме. Каждый такой слой в бинарном представлении содержит только значения 0 и 1. Восемьбитное изображение, например, можно представить квантованным набором изображений, как наложение 256 одноуровневых слоев бинарных матриц.

В соответствии с требованием попиксельного совмещения всего полученного набора изображений, представленную таким образом картину квантованных уров-

ней одного кадра мы можем дополнить квантованными уровнями, полученными в другом кадре. Сложность заключается в том, что такого простого совмещения будет недостаточно для получения правильной картины. Структура изображения имеет определенную упорядоченность информации по уровням, которая нарушается при простом наложении бинарных слоев двух разных изображений. Это происходит всегда, даже для изображений одной и той же сцены. Организация размещения квантованных слоев в любом изображении такова, что все единичные значения должны быть сосредоточены на нижних уровнях, а нулевые значения на верхних уровнях над ними. То есть, между слоями со значениями единица не должно быть слоев со значениями ноль. При простом совмещении структур изображений это условие нарушается.

Заметим, что каждый из квантованных слоев цифрового изображения можно также рассматривать, как пространственную совокупность логических сигналов (0 и 1). Если считать уровни с 1 заполненными, а уровни с 0 пустыми, то пространственное отображение многослойной модели такой видеoinформации легко представить в виде рельефа поверхности образованной наложением заполненных уровней единиц, например.

Известно также, что для двух бинарных сигналов эта же процедура арифметического сложения может быть представлена наложением двух логических операций – операции логического сложения и операции логического умножения [6]. Математическое выражение суммы, получаемой для логических операторов в этом случае можно записать следующим образом

$$\omega(\Sigma) = 1 \# (x \vee y) \# (x \& y) \# 0,$$

где $\&$ – логическая операция И, а \vee – логическая операция ИЛИ.

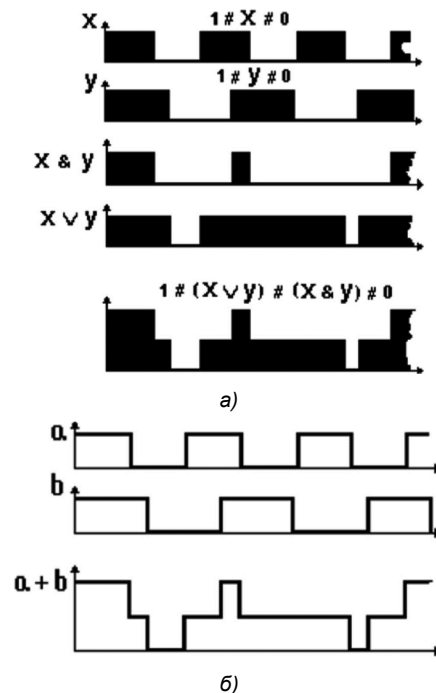


Рис.1. Сравнительные особенности выполнения операции сложения для логической процедуры (а) и для арифметической процедуры (б)

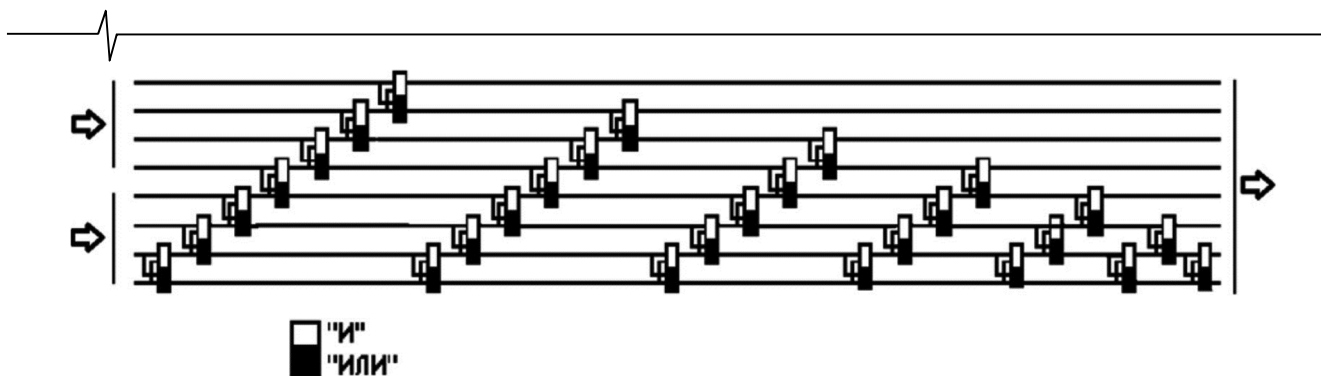


Рис. 2. Суммирующее устройство для квантованных сигналов на двоенных логических элементах И и ИЛИ

На рис. 1 показаны сравнительные особенности операции сложения двух бинарных сигналов в случае выполнения логической процедуры (рис. 1 а) и в случае выполнения арифметической процедуры (рис. 1 б). Опираясь на сказанное, можно организовать схему, в которой арифметические операции заменяются логическими операциями между значениями на квантованных уровнях для выполнения совмещения видеoinформация двух или более кадров.

Однако, размещение видеoinформации по уровням при выполнении этих операций для изображений с несколькими уровнями квантования нарушается. Для восстановления правильного размещения видеoinформации по уровням следует все значения с 1 опустить, а значения с 0 поднять. То есть, для формирования изображения необходимо вернуться к принятой нами модели размещения логических сигналов по уровням путем выполнения операций сортировки. Однако, более эффективно такая процедура может выполняться в процессе сложения с помощью сортирующего устройства с применением логической фильтрации, идею которого предложил О.А. Ханджян для разрабатываемой им интервальной версии теории сигналов [7].

Функциональная схема такого логического сумматора показана на рис. 2, она представляет суммирующее и сортирующее устройство, сформированное на спаренных логических элементах И и ИЛИ. Светлые элементы на схеме соответствуют логическим элементам И, а зачерненные логическим элементам ИЛИ.

На вход суммирующего и сортирующего устройства одновременно поступают бинарные логические сигналы соответствующих уровней каждого из двух изображений. Размещение видеoinформации двух разных изображений по квантованным уровням вводится в произвольном порядке, что перемешивает её распределение по уровням и нарушает имевшуюся упорядоченную структуру уровней выходных сигналов входных изображений. Логическое устройство, показанное на рис. 2, перераспределяя размещение значений с 1 и 0 восстанавливает упорядоченную структуру их размещения по уровням для формирования суммарного изображения. Значения 1 при прохождении через такой фильтр концентрируются на нижних уровнях, а значения 0 соответственно на верхних.

Очевидно, что работа на уровне логических операций упрощает обработку сигналов. Нет необходимости учитывать переполнение и перенос разряда, следовательно, нет промежуточного запоминания и переноса,

то есть процедура обработки может выполняться в темпе поступления видеoinформации. Более того, скорость обработки данных даже увеличивается по сравнению с процессорной и остается постоянной. Вновь сформированный суммарный видеосигнал будет иметь число уровней квантования соответственно суммарному числу уровней совмещаемых изображений, что обеспечивает необходимое увеличение динамического диапазона.

Технология логического увеличения динамического диапазона

Технология осуществления предлагаемого логического решения заключается в том, что при съемке получают не менее двух дискретизованных и квантованных на уровни изображений, которые формируют отображение наблюдаемой сцены в не менее двух разных, взаимно дополнительных частях требуемого динамического диапазона. Преобразуют представление значения амплитуд видеосигнала этих изображений из величин по уровням квантования в соответствующий этой величине набор единичных логических значений, размещенных по уровням квантования, заполняя остальные логическими нулями. Затем формируют общий, суммарный массив видеoinформации с суммарным для полученных снимков числом уровней квантования P . Для этого дополняют квантованные уровни одного изображения уровнями одного или более других изображений этой же сцены, полученных в дополняющих областях динамического диапазона в соответствии с координатами совмещаемых элементов изображения (пиксел). В полученном прямом совмещением общем видеoinформационном массиве уровни квантования отдельных составляющих изображений будут перемешаны произвольным образом. Поэтому для получения правильной структуры распределения видеoinформации по уровням квантования полученный массив сортируют. Операции сортировки производят по результатам выполнения логических операций И и ИЛИ между всеми парами уровней квантования. При этом результат операции ИЛИ между двумя уровнями (K и $K+1$) относят к нижнему уровню (K) в каждой паре, а результат операции И между теми же уровнями (K и $K+1$) относят к верхнему уровню ($K+1$). Этот цикл сравнений повторяют $P-1$ раз, уменьшая число сравниваемых уровней при каждом шаге на 1. В результате сортировки получают видеoinформационный массив с общим числом уровней P , представленный упорядоченным размещением логических единиц по этим уровням. Для представления ее видеосигналом полученный набор логиче-

ских единиц для дискретизованных элементов снова преобразуют в амплитуду сигнала формируемого суммарного изображения с увеличенным динамическим диапазоном. При этом число уровней изображения будет соответствовать сумме числа уровне всех используемых входных изображений P . Описанное решение было защищено патентом РФ [8].

Выполнение предложенной процедуры совмещения видеоинформации в описанном способе не содержит собственно арифметической операции суммирования. Формирование суммарного изображения осуществляется в потоковом режиме сумматором на основе сортирующего устройства для уровней квантования общего массива полученной видеоинформации с применением логических функций. Все операции осуществляются применением каскада только логических операций И и ИЛИ.

Экспериментальная проверка предложенного решения

Для иллюстрации особенностей решения поставленной задачи было выполнено её моделирование. Цифровой камерой последовательно с одной точки наблюдения получено два изображения одной и той же сцены при разных параметрах съемки. Как показано на рис. 3 а первое изображение отображает хорошо освещенные детали сцены, при этом детали в тени остались не проработанными. На рис. 3 б показано второе изображение, где детали в тени хорошо просматриваются, зато светлые участки сцены наоборот оказались не проработанными.

Многоступенчатая структура логического фильтра, показанная на рис. 2 была сформирована программным путем. В качестве входных сигналов использовались изображения, которые показаны на рис. 3 а и на рис. 3 б. Квантованные значения видеосигналов каждого из этих изображений были преобразованы в совокупность бинарных слоев видеоинформации и поступали на вход логического преобразователя в произвольном распределении уровней. На выходе блока – преобразователя было получено синтезированное изображение, представленное на рис. 3 в. Это цифровое изображение характеризуется увеличенным динамическим диапазоном и большим числом уровней, чем на исходных изображениях. Как хорошо видно на рис. 3 в, синтезированное изображение содержит всю информацию о деталях сцены, как первого, так и второго входных изображений.

Процедура многократных или параллельных наблюдений должна также уменьшать влияние шумов фотоприемника на получаемом изображении и, следовательно, повышать качество формируемого изображения. Однако, в данной работе уменьшение влияния шумов нами не оценивалось. Визуальное качество полученного в результате логического суммирования изображения, показанного на рис. 3 в, значительно повысилось по сравнению с показанными отдельными исходными изображениями.



а)



б)

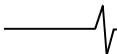


в)

Рис. 3. Изображения, полученные при разных условиях съемки (а, б) и результат их логического суммирования (в)

Заключение

Многократное или параллельное наблюдение с параметрами, перекрывающими весь требуемый динамический диапазон отображаемой сцены, позволяет получить всю необходимую информацию о разрешаемых деталях изображения. Операцию синтеза суммарного изображения можно эффективно выполнять на основе использования только логических операций с применением описанного логического сумматора. Его структура легко реализуется аппаратно, например, на программируемых логических элементах и может функционировать в темпе поступления видеоинформации. Получаемое изображение будет содержать увеличенное число градаций соответственно суммарному числу градаций во взаимно дополняющих наблюдениях.



Предложенная схема решения относится к классу потоковых устройств обработки информации. Их отличительной особенностью является возможность выполнения преобразования сигналов в условиях непрерывного изменения наблюдаемой сцены. Технология параллельной обработки видеосигналов обеспечивает высокую эффективность предложенного способа. Применение для решения только логических операций сближает его с процедурами, которые выполняются в живых организмах. Как известно, в природных биологических организмах именно этот принцип позволяет создавать рекордные по быстродействию и сложности системы [9]. Описанное техническое решение может также служить примером возможного подхода к построению арифметических узлов компьютеров следующего поколения.

Литература

1. Бондаренко А.В., Докучаев И.В., Котцов В.А. Опыт работы цифровой фотокамеры на микроспутнике «Чибис-М» // Международная научно-техническая конференция «Академический микроспутник «Чибис-М». Результаты, уроки, перспективы». ИКИ РАН, 2014.

2. Гаранин С. Г., Зыков Л. И., Климов А. Н. и др. Дневное наблюдение звёзд слабой яркости (7 m-8 m) с равнинной местности. // Оптический журнал, т. 84, № 12, 2017.

3. «Союз-22» исследует Землю. / совместное издание АН СССР и Акад. наук ГДР – Москва; Berlin: Наука, 1980.

4. Виленчик Л.С., Гончаренко Б.Г., Курков И.Н и др. Способ расширения динамического диапазона передаваемых градаций яркости и/или освещенности в телевизионной системе. Патент РФ 2199827 // Бюллетень изобретений №6, 2003.

5. Карцев М.А. Арифметика цифровых машин. – М.: Наука, 1969.

6. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем. – М: Энергия, 1968.

7. Ханджян О.А. Линейная фильтрация, основанная на теории симметрических функций // Радиотехника и электроника, вып. 8, 1986.

8. Котцов В.А. Способ получения изображений с увеличенным динамическим диапазоном. Патент РФ 2578799 // Бюллетень изобретений №9, 2016.

9. Бергсон А. Творческая эволюция. – М.: ТЕРРА-Книжный клуб, 2001.