

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2020

Компьютерное моделирование формирователей сигнала изображения для систем космического наблюдения

Б.И. Седунов

Автономная некоммерческая организация высшего образования "Российский Новый Университет", E-mail: sedunov.b@gmail.com

Представлено компьютерное моделирование режима временной задержки и накопления (ВЗН) зарядов в формирователях сигналов изображения (ФСИ) на основе матриц приборов с зарядовой связью (ПЗС), нашедших широкое применение в системах космического наблюдения. Продемонстрированы: алгоритм подавления алиасинга и влияние движения изображения на разрешение матрицы ПЗС.

The computer modeling of the time delay and integration (TDI) regime of charge coupled devices (CCD) matrix imagers, widely used in the space observation systems, is presented here. To be modeled, the anti-aliasing algorithm and the image motion influence on the matrix resolution.

Введение

Широкое использование фоточувствительных матриц приборов с зарядовой связью (ПЗС) в системах исследования космических объектов и наблюдения поверхности Земли из космоса произвело революцию в астрофизике, астрономии и в науках о поверхности Земли. В знак признания высокого вклада в науку и технологию изобретатели ПЗС Бойл и Смит [1] были удостоены в 2009 году Нобелевской премии по физике. Дальнейшему совершенствованию технологии ПЗС способствует широкое применение матриц ПЗС в веб-камерах и смартфонах, а также в камерах видеонаблюдения. Неуклонный прогресс в микро- и нано-электронной технологии приводит к постоянному росту числа элементов изображения (пикселей) матриц, повышению их разрешения и чувствительности, обеспечивая совершенство характеристик систем космического наблюдения.

Наряду с матрицами ПЗС в космических исследованиях применяют и фоточувствительные КМОП матрицы [2]. Для обоих типов матриц характерны искажения выходного сигнала, вызванные дискретной структурой матрицы. Такие искажения особенно существенны, если характерные размеры изображения приближаются к размерам фоточувствительных элементов (пикселей), они получили название "алиасинг". Часто именно объекты, наблюдаемые на пределе разрешения, наиболее интересны для систем наблюдения. Поэтому разработка методов понижения нежелательных эффектов дискретности преобразования представляет большую важность.

Великий советский учёный В.А. Котельников в 1933 году сформулировал теорему [3] о дискретном временном преобразовании сигнала с ограниченным спектром и показал, что преобразование с частотой дискретизации, превышающей в 2 и более раз максимальную частоту исходного сигнала, позволяет восстановить непрерывный сигнал с абсолютной точностью. При этом подразумевается, что входной и выходной сигналы пропущены через фильтры низких частот с частотой среза, равной максимальной частоте входного сигнала, и оба фильтра низких частот на входе и выходе преобразователя идеальны, что означает постоянство коэффициента передачи при частоте ниже частоты среза и равенство нулю коэффициента передачи выше частоты среза.

В мировой науке эту теорему называют теоремой Найквиста, но Найквист в статье [4] 1928 года говорил только о полосе частот, необходимой для передачи импульсного

сигнала, а не о восстановлении исходной формы непрерывного сигнала. 16 лет после Котельникова и независимо от него аналогичную теорему сформулировал Клод Шеннон [5]. Теорема Котельникова применима не только к временным дискретным преобразованиям сигналов, но и к дискретным средствам передачи непрерывных изображений с ограниченным спектром пространственных частот.

В системах космического наблюдения ограничение спектра исходного изображения происходит в результате размывания изображения на выходе оптической системы, но закон фильтрации изображения оптической системой не соответствует в полной мере характеристикам идеального фильтра низких частот. Это является одной из причин неидеальности формирователя сигналов изображения (ФСИ).

Отсутствие или неидеальность фильтра низких частот на выходе ФСИ приводит к ещё одному виду искажений выходного сигнала ФСИ - алиасингу. В настоящее время большое внимание уделяется подавлению алиасинга в смартфонах, но ограниченные возможности смартфонов не позволяют использовать сложные алгоритмы анти-алиасинга. В данной статье рассмотрен алгоритм введения девяти отсчётов выходного сигнала на каждый пиксель (A_1^9), приближающий характеристику такого преобразования к свойствам двумерного фильтра низких частот. Сложный алгоритм A_1^9 можно реализовать в наземном комплексе цифровой обработки сигналов изображений системы космического наблюдения, возможности которого существенно превосходят производительность бортовых вычислителей или смартфонов. Оценить степень отличия результирующего изображения от исходного можно методом компьютерного моделирования процессов преобразования изображения в ФСИ [6].

Если для исследования космических объектов широко применяются фоточувствительные матрицы, работающие в кадровом режиме [7], то для высокодетального наблюдения поверхности Земли используют матрицы ПЗС, осуществляющие накопление заряда синхронно с продвижением изображения по поверхности матрицы. Такой режим работы матрицы ПЗС получил название "режим временной задержки и накопления заряда (ВЗН)" [8]. Здесь возникает ещё одна проблема дискретности преобразования: мы перемещаем накопленные заряды дискретно во времени, тогда как изображение движется непрерывно. Поэтому за время накопления одного дискретного отсчёта исходное изображение успевает сдвинуться относительно фоточувствительного элемента, приводя к некоторому размыванию сигнала на выходе приёмника движущихся изображений (ПДИ). В статье рассмотрено влияние этого размывания на функцию передачи модуляции ПДИ.

Синхронное накопление энергии движущихся изображений в ВЗН-матрицах позволяет повысить разрешающую способность ПДИ за счёт многосекционной конструкции матрицы и сдвига сеток расположения пикселей секций относительно друг друга на долю пикселя [9]. Компьютерное моделирование позволяет оценить эффективность суммирования сигналов изображений от различных секций [10].

Моделирование алгоритма анти-алиасинга A_1^9

Для реализации алгоритма A_1^9 имитации двумерного фильтра низких пространственных частот массив значений зарядов на выходе матрицы ПЗС подвергается свёртке с ядром фильтра, размножающего массив пикселей в 9 раз: по 3Х3 субпикселя для каждого пикселя. Ядро двумерного фильтра показано на Рисунке 1. Центральные 9 субпикселей, отмеченные красным цветом, соответствуют одному исходному пикселю. Возрастание числа субпикселей по сравнению с их исходным числом решает задачу цифровой интерполяции данных [11]. Цифровая обработка массива данных [12], получаемых по космической линии связи, вместо

непосредственной их фоторегистрации позволяет существенно повысить качество изображения и снизить шумы алиасинга.

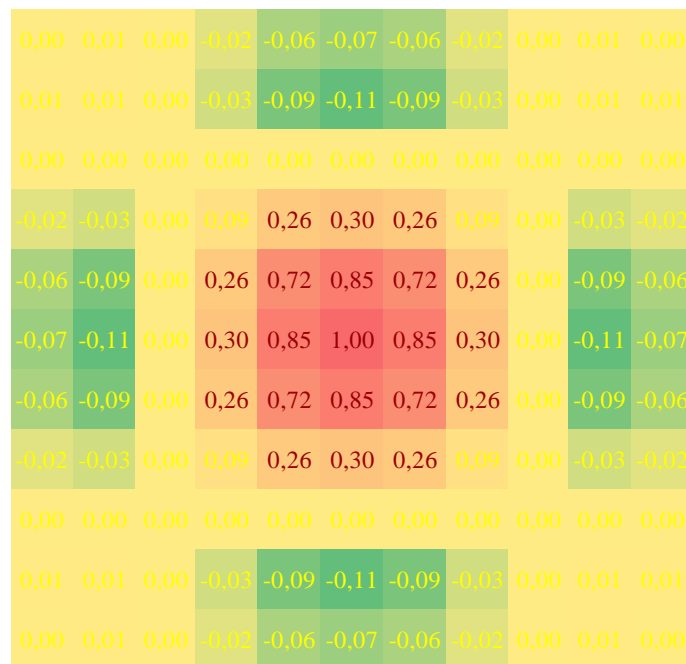


Рис.1. Ядро двумерного фильтра для алгоритма A_1^9 . Красным обозначены области с положительными, зелёным - области с отрицательными, жёлтым - с близкими к нулю значениями

Ядро фильтра напоминает вейвлет, но не является им, поскольку сумма значений ячеек фильтра не равняется нулю, как это требуется для вейвлета [13].

Исходная форма ядра в соответствии с теоремой Котельникова представляла произведение двух функций $\text{sinc}(x)$ и $\text{sinc}(y)$, но необходимость иметь ограниченное число элементов фильтра заставила скорректировать значения на периферии квадратной зоны фильтра. Подбор значений периферийных элементов был сделан методом компьютерного моделирования передаточных характеристик одномерного фильтра, представляющего собой обрезанный вариант $\text{sinc}(x)$, Рисунок 2.

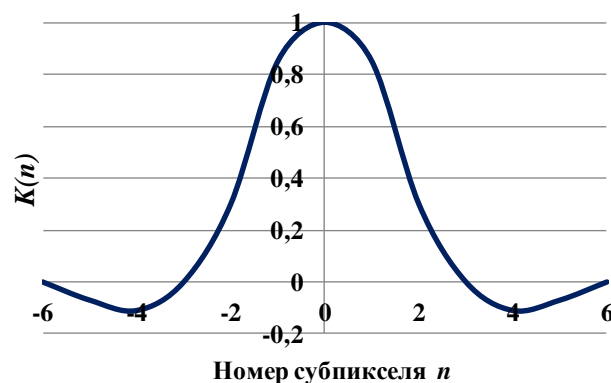


Рис. 2. Характеристика одномерного варианта фильтра, использованная для подбора значений элементов методом компьютерного моделирования

Критерием подбора периферийных элементов было качество формы отфильтрованного сигнала: близость его к синусоидальному виду, отсутствие выходов в область отрицательных значений. Рисунок 3.

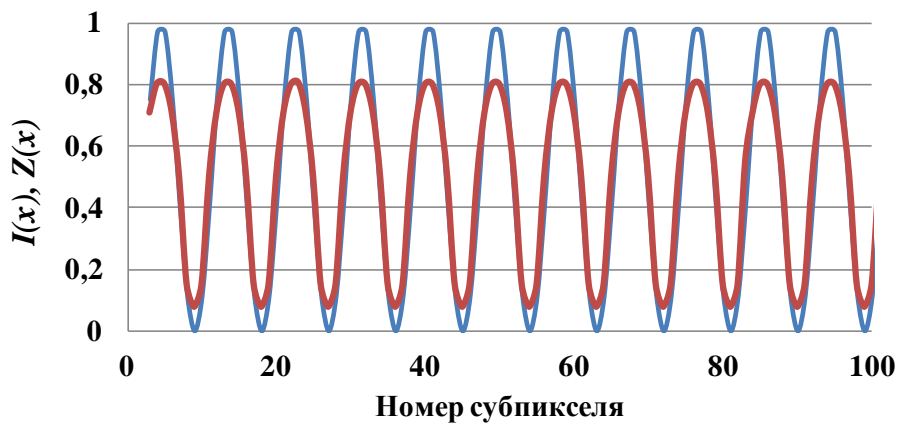


Рис. 3. Отфильтрованный сигнал $Z(x)$ (красная линия) от синусоидальной миры $I(x)$ (синяя линия) с шириной шпалы в 1,5 пикселя

Рисунок показывает, что при ширине шпалы больше 1,5 пикселя отсутствуют шумы алиасинга, тогда как при уменьшении ширины шпалы они становятся заметными, Рисунок 4, хотя и не такими большими, как при отсутствии фильтрации.

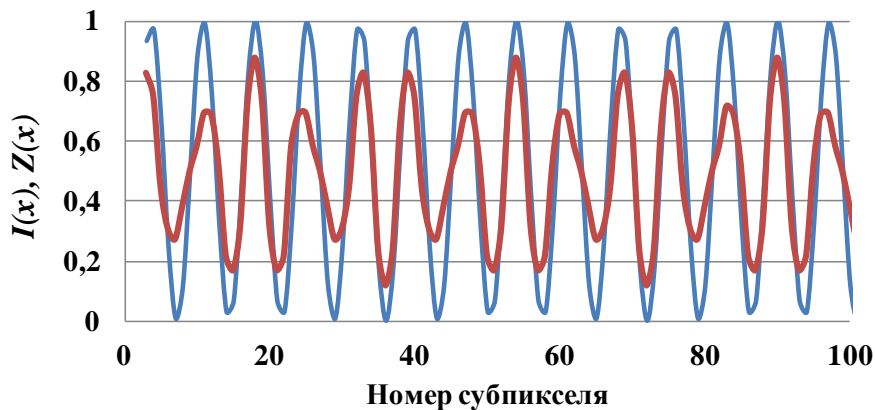


Рис. 4. Отфильтрованный сигнал $Z(x)$ (красная линия) от синусоидальной миры $I(x)$ (синяя линия) с шириной шпалы в 1,2 пикселя

Остаточные шумы алиасинга при малой ширине шпалы миры возникают по причине ограничения ширины ядра фильтра пространственных частот величиной в 4 пикселя. Практически неограниченные возможности наземного комплекса цифровой обработки изображений системы космического наблюдения позволяют реализовать цифровые фильтры с повышенной шириной ядра. При этом мультиматричная структура приёмника движущихся изображений (ПДИ) не должна испытывать нежелательных искажений изображения на краях отдельных матриц, так как режим ВЗН позволяет иметь в наземном комплексе единый цифровой массив от всех матриц, представляющий ПДИ, как единую огромную матрицу.

Дополнительным подтверждением влияния ограниченной ширины ядра фильтра на качество восстановления сигналов изображений служит моделирование функции передачи модуляции ФСИ.

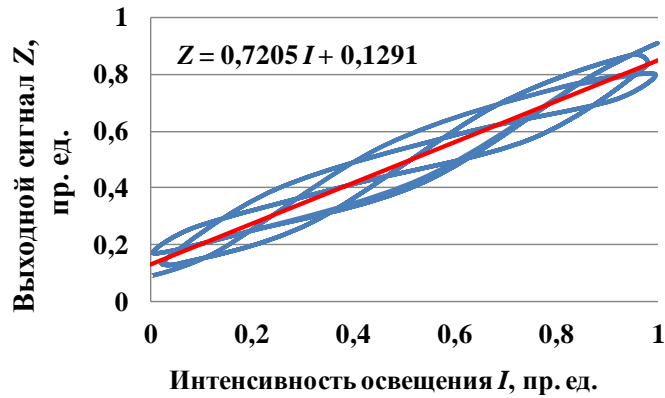


Рис. 5. Зависимость выходного отфильтрованного сигнала (синие линии) от интенсивности освещения матрицы ПЗС через синусоидальную мишу с шириной шпалы в 1,4 пикселя; Усреднённая зависимость (красная линия) и её тренд

Усреднённая зависимость выходного отфильтрованного сигнала Z от интенсивности освещения матрицы ПЗС I имеет вид $Z = k I + a$. Коэффициенты уравнения зависят от отношения ширины шпалы миры к размеру пикселя Δ . Моделирование этой зависимости при разных величинах этого отношения позволяет найти по формуле: $\Phi_{\text{ПМ}} = k / (k + 2 a)$ усреднённую функцию передачи модуляции в зависимости от пространственной частоты ν : $\Phi_{\text{ПМ}}(\nu)$, Рисунок 6.

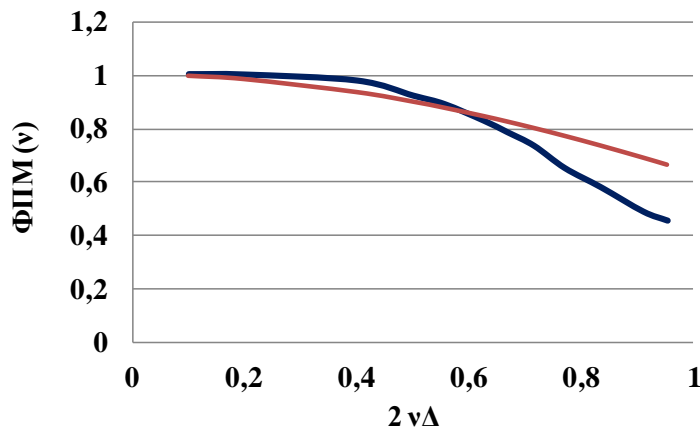


Рис. 6. Усреднённая функция передачи модуляции (синяя линия) в сравнении с функцией Найквиста $\Phi_{\text{ПМ}} = \text{sinc}(\pi\nu\Delta)$ (красная линия)

Рисунок показывает, что при $2 \nu\Delta < 0,4$ $\Phi_{\text{ПМ}}(2 \nu\Delta)$ почти не отличается от единицы. Значит, в этой области пространственных частот результаты моделирования соответствуют теореме Котельникова о точном воспроизведении исходного сигнала. Но при $2 \nu\Delta > 0,4$ растёт отклонение от единицы. В литературе господствует мнение, что ФПМ матричного преобразователя описывается формулой Найквиста $\Phi_{\text{ПМ}} = \text{sinc}(\pi\nu\Delta)$, но результаты моделирования показывают, что это не так. Большое значение ФПМ Найквиста при частоте среза не может быть использовано, оно сопровождается большими шумами алиасинга, что ограничивает практическое применение матричных фотоприёмников диапазоном $2 \nu\Delta < 0,8$.

Влияние движения изображения на ФПМ матричного преобразователя в режиме ВЗН

ФПМ матричного преобразователя, работающего в режиме ВЗН, различается для направлений вдоль и поперёк движения изображения. Вдоль движения изображения наблюдается сдвиг изображения относительно матрицы на ширину одного тактового электрода. При трёхтактном сдвиге зарядов наблюдается уширение площади прихода энергии изображения на третью часть пикселя. Подставляя уширенную зону сбора энергии изображения в формулы для оценки усреднённой ФПМ с помощью выше использованного алгоритма A_1^9 , получаем ФПМ для режима ВЗН, Рисунок 7.

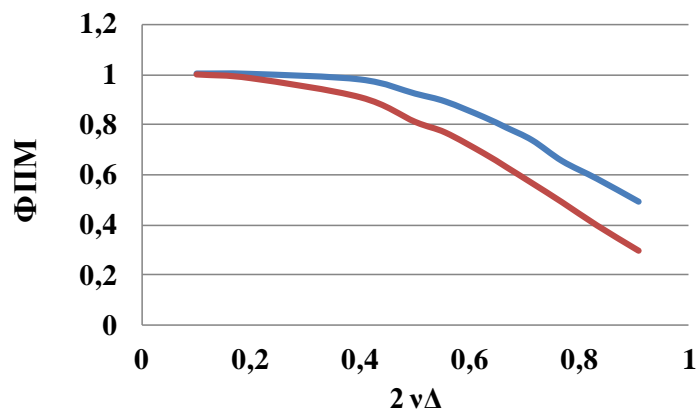


Рис. 7. ФПМ трёхтактной матрицы с ВЗН вдоль направления движения изображения (красная линия) и поперёк (синяя линия) для квадратного пикселя с размером Δ

Рисунок показывает, что ухудшение разрешающей способности вдоль направления движения составляет около 20%. В 1974 году автор заложил в технические задания на разработку матриц ПЗС с ВЗН для космического наблюдения разницу в размерах пикселя вдоль и поперёк движения в 30%. Проведенное моделирование показывает, что разницу в размерах пикселя можно было бы сократить на 10%.

Подавление алиасинга с помощью алгоритма A_1^9 будет полезным и при реализации идеи сверхразрешения в многосекционных матрицах со сдвигом сеток расположения фоточувствительных элементов на долю пикселя.

Заключение

Математическое моделирование процессов преобразования сигналов изображений в приёмнике движущихся изображений на ПЗС с ВЗН позволяет прийти не только к новым практическим рекомендациям, но и к новым теоретическим взглядам на принципы работы этих важных устройств, таким как:

- связь характеристик сквозного тракта преобразования сигналов с алгоритмами наземной обработки потоков цифровой информации, генерируемой системами космического наблюдения;
- природа ФПМ матричных фотоприёмников и наблюдаемого в них алиасинга;
- возможные пути дальнейшего повышения разрешающей способности систем космического наблюдения.

Литература

1. W. S. Boyle, G. E. Smith. Charge Coupled Semiconductor Devices. Bell Syst. Tech. J. 1970. Vol. 49 (4): P. 587–593. doi:10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x.

2. G. C. Holst, T. S. Lomheim. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems, Second Edition. 2011. doi.org/10.1117/3.2524677
3. В. А. Котельников. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи. УФН, 176:7 (2006), 762—770.
4. Н. Nyquist. Certain topics in telegraph transmission theory. Trans. AIEE, vol. 47, pp. 617—644, Apr. 1928.
5. С. Е. Shannon. Communication in the presence of noise. Proc. Institute of Radio Engineers. Vol. 37. No. 1. 1949. P. 10—21.
6. Б.И. Седунов. Моделирование алиасинга в ПЗС-формирователе сигналов изображений. Вестник РосНОУ. Сложные системы, модели, анализ и управление. Выпуск 3, 2017, С. 17 - 23.
7. J. R. Janesick (2001). Scientific charge-coupled devices. SPIE Press. Washington USA pp. 3—4. ISBN 978-0-8194-3698-6.
8. Ya. Bulayev. TDI Imaging: An Efficient AOI and AXI Tool. Hamamatsu Corporation Bridgewater, New Jersey As originally published in the IPC APEX EXPO Proceedings, 2012.
9. Eremeev V., Kuznetsov A., Myatov G., Presnyakov O., Poshekhonov V., Svetelkin P. Image structure restoration from sputnik with multi-matrix scanners. Proc. SPIE 9244, Image and Signal Processing for Remote Sensing.
10. Б.И. Седунов. Моделирование ПЗС-формирователя сигналов изображений со сверхразрешением. Вестник РосНОУ. Сложные системы модели, анализ и управление. Выпуск 4, 2019, С. 23 - 34.
11. E. Meijering. A Chronology of Interpolation From Ancient Astronomy to Modern Signal and Image Processing, Proc. IEEE, 90, 2002. doi:10.1109/5.993400.
12. Mark Owen (2007). Practical signal processing. Cambridge University Press. p. 81. ISBN 978-0-521-85478-8.
13. R.J.E. Merry. Wavelet Theory and Applications : A literature study. University of Technology, Department of Mechanical Engineering. Eindhoven, 2005.