

Б.И. Седунов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЗС-ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ

Посвящено компьютерному моделированию формирователей сигналов изображений при разных углах между шпалами штриховой миры и строками матрицы и при различных отношениях ширины шпалы миры к ширине пикселя. Обнаружен резонансный характер неоднородности функции передачи модуляции матрицы при некоторых углах. Проведено сравнение функций передачи модуляции одиночной секции матрицы и матрицы, реализующей режим сверхразрешения. Показано, что синтезированная виртуальная матрица с двумя секциями обеспечивает повышение разрешающей способности формирователей сигналов изображений на 25% при том же размере пикселя, как и в одиночной секции.

Ключевые слова: прибор с зарядовой связью, ПЗС, коэффициент передачи контраста, функция передачи модуляции, штриховая мира, алиасинг, сверхразрешение.

B.I. Sedunov

SUPER RESOLUTION CCD IMAGER MODELING

The paper presents the CCD-imager modeling at different angles between the test grating strokes and CCD matrix rows for different strokes width to the pixel size ratios. A resonance like modulation transfer function inhomogeneity has been discovered for some angles. The modulation transfer functions for a single section and for a super resolution imager have been compared. The 25% resolution growth is demonstrated for the super resolution virtual imager with the same pixel size as for a single section.

Keywords: charge-coupled device, CCD, contrast transfer coefficient, modulation transfer function, grating, aliasing, super resolution.

Введение

Размеры фоточувствительных элементов (пикселей) современных матриц ПЗС или КМОП достигли значений в районе 4–6 мкм [3; 11]. Возникает вопрос, почему нельзя еще больше уменьшить размер пикселя, если сегодня можно изготовить элементы кремниевых микросхем с размерами меньше десятых долей микрометра. Ответ на этот вопрос связан с глубиной проникновения фотонов в кремний, показанной на рисунке 1 для видимого диапазона длин волн. Глубина проникновения фотонов зависит от степени легирования кремния, поэтому здесь приведена грубая оценка глубины проникновения, ясно показывающая стремительный рост этой величины с приближением к инфракрасному диапазону длин волн.

Генерируемые на большой глубине носители заряда (электроны или дырки), диффундируя к поверхности полупроводника, отклоняются от места входа в полупроводник порождающего их фотона, тем самым приводя к размытию сигналов изображения. Для предотвращения этого нежелательного эффекта приходится перед фоточувствительной матрицей ставить светофильтр, отрезающий инфракрасную часть спектра.

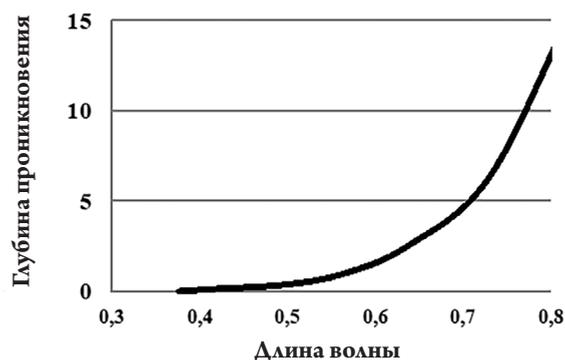


Рис. 1. Приблизительная оценка зависимости глубины проникновения фотонов в кремний от их длины волны в видимом диапазоне длин волн, мкм

При уменьшении размера пикселя ниже 5 мкм возникает необходимость отрезать не только инфракрасную, но и красную часть спектра, уменьшая тем самым чувствительность формирователя сигналов изображения в видимом диапазоне спектра. Еще острее данная проблема предстает в инфракрасном диапазоне, где глубина проникновения фотонов в кремний превышает 15 мкм.

С этим явлением столкнулись в 1993 г. сотрудники компании Samsung, разрабатывавшие промышленный робот для сборки интегральных схем. В качестве осветителя они планировали использовать светодиоды инфракрасного диапазона и обнаружили, что высокоразрешающая японская камера в этом диапазоне имела чувствительность на два порядка хуже чувствительности скромной российской камеры. За советом они обратились к автору данной статьи, который разъяснил им, что японская камера содержала светофильтр, отрезающий инфракрасную часть спектра, а российская камера при большом размере пикселя в таком фильтре не нуждалась.

В связи с этим ограничением на уменьшение размера пикселя фоточувствительной матрицы приходится искать альтернативные способы повышения разрешающей способности формирователей сигналов изображений (ФСИ) при сохранении размеров пикселя. Одним из таких способов может быть синтез изображения с использованием алгоритмов сверхразрешения [1; 12]. Это направление повышения качества изображений привлекает в последние годы большое внимание исследователей.

Широко применяемые в настоящее время матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС) с синхронным накоплением энергии движущихся изображений [2; 7] для наблюдения поверхности Земли из космоса [5; 8], называемые также матрицами с временной задержкой и накоплением (ВЗН) [10], способны обеспечить эффект сверхразрешения за счет суперпозиции сигналов изображений от разных секций матрицы [4]. Стоит заметить, что понятие «временная задержка и накопление» не отражает основную особенность работы этих матриц, а именно синхронизацию продвижения зарядов с движением изображения. Это особенно важно при формировании синтезированного потока цифровой информации, соответствующего суперпозиции сигналов от отдельных секций сложной матрицы.

На рисунке 2 показан фрагмент двухсекционной матрицы, обеспечивающей при синхронном с движением изображения переносе зарядов совмещение перекрестий столбцов и строк первой секции с центрами пикселей второй секции.

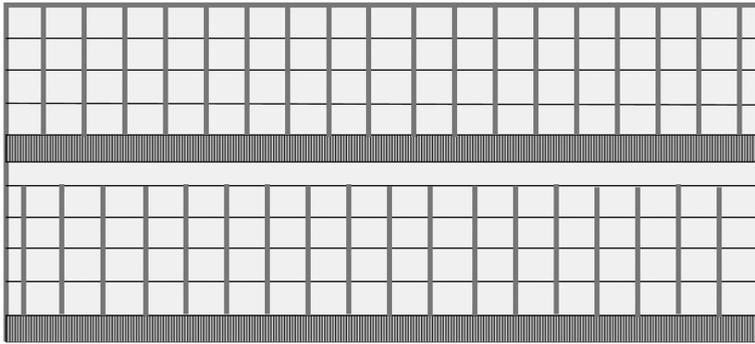


Рис. 2. Фрагмент двухсекционной матрицы с синхронным переносом зарядов со сдвигом на половину пикселя сигналов строк и столбцов, сформированных первой секцией, относительно выхода второй секции

Два выходных регистра такой матрицы выдают сдвинутые на половины периодов по строке и столбцу сигналы. Эти сигналы можно передать на наземный пункт в виде двух независимых потоков, а на Земле осуществить суперпозицию данных потоков в цифровом комплексе наземной обработки сигналов изображений [9].

В настоящей статье проводится компьютерное моделирование ФСИ отдельных секций двухсекционной матрицы, моделирование синтеза совмещенного изображения от двух секций и сравнение качества синтезированного изображения с качеством изображения, формируемого одиночной секцией.

Программа моделирования освещенности ПЗС позволяет варьировать угол наклона и ширину шпал миры. В качестве тестового используется синусоидальное распределение яркости штриховой миры при различных углах наклона шпал миры (рис. 3). Синусоидальный закон распределения яркости тестового сигнала выбран для обеспечения возможности сравнения результатов моделирования с аналитическими оценками средних величин функции передачи модуляции (ФПМ) [6]. Ввиду малости шага поля освещенности численные значения на рисунке 3 округлены до одного знака (0 или 1), поэтому не отражают плавного изменения освещенности.

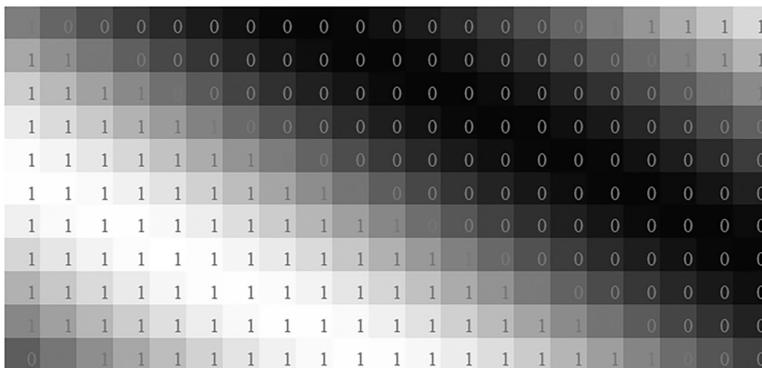


Рис. 3. Фрагмент поля распределения освещенности матрицы ПЗС для синусоидальной миры с наклоном шпал в 30° по отношению к строке и с шириной шпалы в 0,8 от размера пикселя. Шаг поля освещенности в 10 раз меньше размера пикселя

На рисунке 3 показан фрагмент одной строки матрицы ПЗС, состоящий из двух пикселей, освещенных через штриховую маску с углом наклона шпал в 30° относительно строк матрицы и с шириной шпал маски в 0,8 от размера пикселя. Заметим, что алиасинг катастрофически портит сигналы изображения, формируемые отдельными секциями при ширине шпал маски меньше размера пикселя [6].

Для повышения точности вычисления заряда, сгенерированного в отдельном пикселе, каждый пиксель разделен на 10×10 квадратов со своей собственной освещенностью. Центры пикселей двух секций сдвинуты на 5 шагов по вертикали и горизонтали. Этот сдвиг существенно снижает влияние алиасинга [Там же] на качество синтезированного изображения. Одна из целей статьи – оценить минимально допустимое отношение ширины шпалы к размеру пикселя для синтезированного изображения.

Программа компьютерного моделирования и анализа эффекта сверхразрешения в двухсекционной матрице ПЗС содержит две подпрограммы:

- Подпрограмма генерации распределения зарядов в одиночной секции или в двухсекционной матрице при различных углах наклона и ширины шпал маски.
- Подпрограмма анализа среднего и минимального локального значений ФПМ при заданных углах наклона и ширины шпал маски как для одиночной секции, так и для двухсекционной матрицы.

Моделирование распределения зарядов в матрице ПЗС

Синусоидальное распределение освещенности маски $I(x, y)$ по поверхности матрицы ПЗС с углом наклона α (в радианах) и отношением δ ширины шпалы Δ_m к размеру пикселя Δ_n имеет вид

$$I(x, y) = (1 + \sin((y \sin \alpha - x \cos \alpha) \pi / \delta)) / 2. \quad (1)$$

Задавая различные значения α и δ , получаем все возможные виды синусоидального распределения освещенности матрицы ПЗС. Как сказано во введении, поле яркости изображения шпал маски дается с шагами, в 10 раз меньшими размеров пикселя по вертикали и горизонтали. Это обеспечивает плавное распределение освещенности по поверхности каждого пикселя.

Дискретное распределение зарядов по пикселям $Z(i, j)$ получаем интегрированием распределения освещенности по площади каждого пикселя секции матрицы. На рисунке 4 показана картина двумерного распределения зарядов в одной секции при угле шпал маски в 45° и при их ширине, равной размеру пикселя.

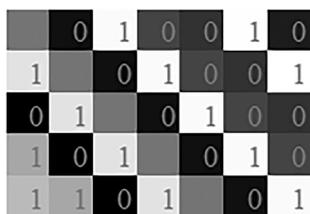


Рис. 4. Фрагмент поля распределения зарядов в матрице ПЗС при угле в 45° и при $\delta = 1$

Указанные в квадратиках значения не отражают плавного характера изменения зарядов пикселей из-за грубого округления, но это плавное изменение хорошо видно на рисунке 5, где показано распределение зарядов пикселей вдоль одного из столбцов.

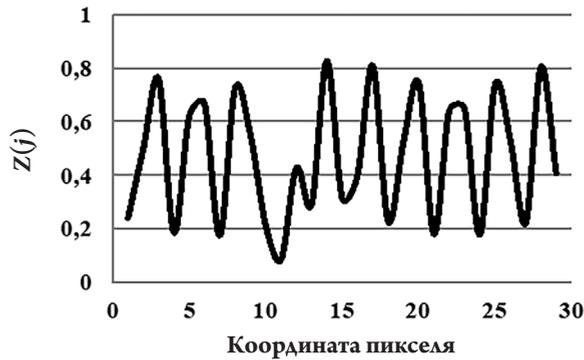


Рис. 5. Распределение зарядов вдоль одного из столбцов матрицы (см. рис. 4)

Рисунок 5 показывает, что при ширине шпалы миры, равной размеру пикселя, локальный контраст зарядового поля крайне неоднороден и в районе 12-й строки локальный контраст C_{loc} становится недопустимо малым. В этом проявляется алиасинг [6]. Под локальным контрастом понимаем отношение разности величин соседних максимума и минимума сигнала к их сумме: $C_{loc} = (Z_{max} - Z_{min}) / (Z_{max} + Z_{min})$.

Анализ функций передачи модуляции в матрицах ПЗС

Переносим вычисленные $Z(i, j)$ во фрагмент секции с выбранными числами пикселей в строке N_r и в столбце N_c . Выбранные нами числа $N_r = 7$ и $N_c = 29$ дают средние значения ФПМ с достаточной точностью, без перегрузки компьютера излишними вычислениями. Создаем ряд таблиц с размерностью $N_r \times N_c$ и заносим в них значения по формуле

$$A_{ijn} = \text{ЕСЛИ}(((y_j - 0,5) - (x_i - 0,5) / \text{tg}(\alpha) - Y_n)^2 < 0,25; 1; 0). \tag{2}$$

Эта формула расставляет единицы вдоль прямой линии, параллельной штрихам миры, сдвинутой по вертикали на значение Y_n . Меняя целочисленные значения Y_n от нуля до Y_{nmax} , получаем набор таблиц со сдвигом линии единиц. Ввиду дискретности матрицы эта линия получается ломаной. Суммируя значения A_{ijn} по горизонтали и затем по вертикали, получаем полное число ячеек таблицы, отмеченных значением «1».

Создаем второй набор таблиц значений B_{ijn} , соответствующих величинам зарядов в отмеченных значением «1» пикселях матрицы:

$$B_{ijn} = A_{ijn} Z(i, j). \tag{3}$$

Суммируя значения B_{ijn} по горизонтали и затем по вертикали, получаем полную сумму зарядов пикселей вдоль ломаной линии, отмеченной значением «1». Деля эту сумму на найденное число отмеченных ячеек, получаем значение среднего заряда Z_n вдоль линии с начальной координатой по вертикали, равной Y_n . Строим два вертикальных столбца для Y_n и Z_n . Зависимость $Z_n(Y_n)$ показана на рисунке 6 для угла наклона шпал в 30° и их ширины, равной размеру пикселя.

Рисунок 6 показывает, что при $\delta = 1$ в секции матрицы наблюдается большая неоднородность среднего заряда пикселя. Для качественного распознавания изображений шпал миры требуется, чтобы их локальный контраст превышал некое установленное значение.

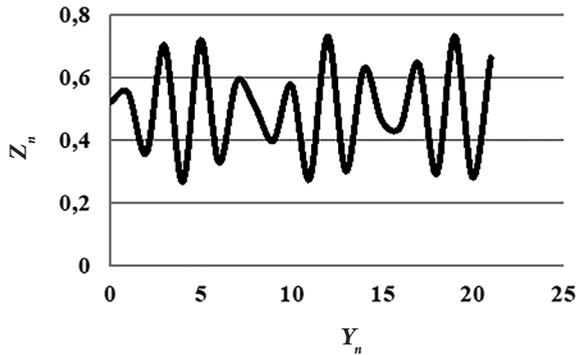


Рис. 6. Зависимость средней величины заряда пикселя Z_n вдоль прямой, параллельной направлению штрихов миры, от величины сдвига Y_n начала этой прямой по вертикали.

Угол наклона штрихов миры равен 30° , а ширина миры равна размеру пикселя

Для нахождения минимальных и средних значений локального контраста сначала отмечаем значения n , соответствующие локальным максимуму и минимуму Z_n :

$$I(Z_{max}) = \text{ЕСЛИ}(\text{И}(Z_n > Z_{n-1}; Z_n > Z_{n+1}); 1; 0), \quad (4)$$

$$I(Z_{min}) = \text{ЕСЛИ}(\text{И}(Z_n < Z_{n-1}; Z_n < Z_{n+1}); 1; 0). \quad (5)$$

Затем строим столбцы продолженных значений $Z_{max n}$ и $Z_{min n}$ по формулам

$$Z_{max n} = \text{ЕСЛИ}(I(Z_{max}) = 1; Z_n; Z_{max n-1}), \quad (6)$$

$$Z_{min n} = \text{ЕСЛИ}(I(Z_{min}) = 1; Z_n; Z_{min n-1}). \quad (7)$$

Продолженные значения $Z_{max n}$ и $Z_{min n}$ не ограничены локальными максимумами или минимумами, но продолжают до появления нового локального максимума или минимума (рис. 7).

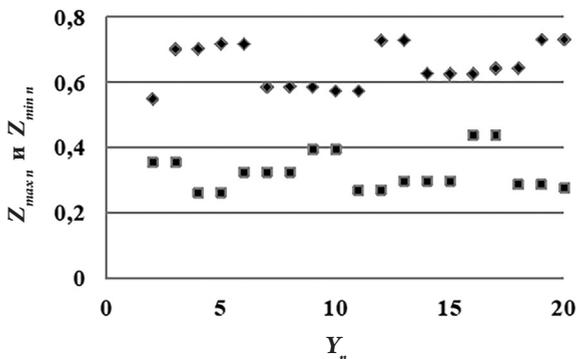


Рис. 7. Продолженные значения локальных максимумов (ромбы) и локальных минимумов (квадраты) при наклоне шпал в 30° и $\delta = 1$

ФПМ матрицы равна коэффициенту передачи контраста при использовании синусоидальной миры. Переход от просто локальных максимумов и минимумов к продолженным позволяет получить для одного значения Y_n оба значения $Z_{max n}$ и $Z_{min n}$, что обеспечивает вычисление локального контраста:

Седунов Б.И. Моделирование ПЗС-формирователя сигналов изображений...

$$C_{loc} = (Z_{max n} - Z_{min n}) / (Z_{max n} + Z_{min n}). \quad (8)$$

На рисунке 8 показаны изменения локального контраста C_{loc} с номером Y_n линии, параллельной шпалам мины.

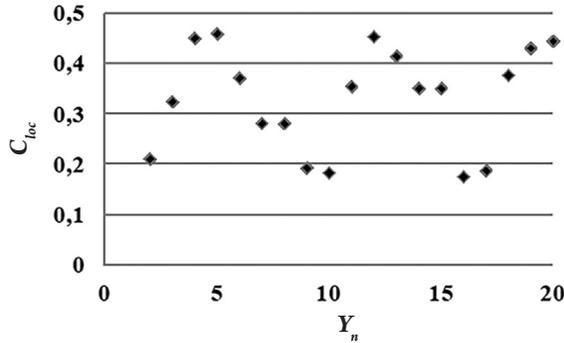


Рис. 8. Большая неоднородность локального контраста сигналов изображения при наклоне шпал синусоидальной мины в 30° и ширине шпал, равной размеру пикселя

Для качественного распознавания изображения важно иметь достаточно большую величину минимального контраста и малый разброс значений локального контраста. *Этому требованию соответствует критерий:* разность удвоенного минимального локального контраста и среднего значения контраста должна быть больше 0,2. Для проверки выполнимости данного критерия при фиксированных условиях моделирования α и δ вычисляем минимальное и среднее значения контраста сигнала изображения и на этой базе оцениваем значение критерия разрешения (рис. 9).

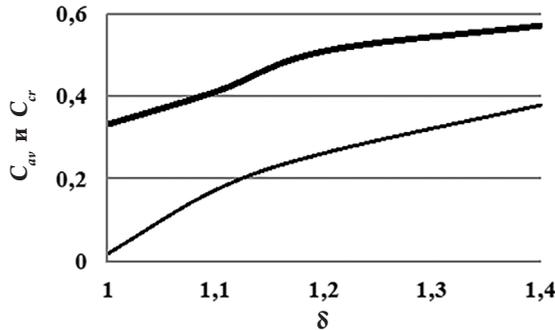


Рис. 9. Средний коэффициент передачи контраста C_{av} (толстая линия) и критерий качества передачи контраста C_{cr} (тонкая линия) в зависимости от относительной ширины шпала мины δ при наклоне шпал синусоидальной мины в 30°

Повторяя описанную процедуру для различных углов наклона шпал мины, найдем минимально допустимое значение δ , удовлетворяющее сформулированному ранее критерию. Для одиночной секции матрицы ПЗС это значение равно 1,12.

Анализ ФПМ синтезированной виртуальной матрицы

Суперпозиция зарядовых полей от двух секций матрицы ПЗС снижает вклад алиасинга в неоднородность локального контраста синтезированного зарядового поля.

При этом начальные координаты пикселей второй секции сдвинуты относительно начальных координат x_i и y_j пикселей первой секции на 0,5 по x и y .

Мы присваиваем вычисленные значения $Z(i, j)$ для перекрывающихся пикселей двух секций неперекрывающимся субпикселям в 2 раза меньшего размера, показанным на рисунке 10 в виде малых темных квадратов. Но число субпикселей в виртуальной матрице в 4 раза превышает число пикселей в одной секции. Поэтому такая виртуальная матрица имеет пробелы между субпикселями по вертикали и горизонтали.

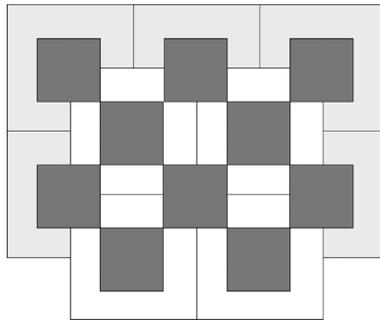


Рис. 10. Формирование виртуальной матрицы высокого разрешения из двух секций:

- 1) фрагмент первой секции из 6 пикселей с серым обрамлением;
- 2) фрагмент второй секции из 4 пикселей с белым обрамлением, совмещенной с первой секцией со сдвигом на половину размера пикселя по горизонтали и вертикали;
- 3) 10 темных субпикселей, которым присвоены величины зарядов $Z(i, j)$ тех пикселей, в центре которых они находятся;
- 4) белые субпиксели, которым присвоен заряд, равный среднему арифметическому от четырех ближайших к ним темных субпикселей

Итак, синтезированное распределение зарядов в виртуальной матрице со сверхразрешением имеет в 2 раза меньший шаг, нежели размер пикселя. Тем самым мы приходим к виртуальным субпикселям, которым приписываем вычисленные ранее значения зарядов $Z(i, j)$. А для промежуточных субпикселей мы приписываем средние значения от зарядов $Z(i, j)$ ближайших субпикселей по вертикали и горизонтали. Так как среднее значение меньше максимального значения и больше минимального значения усредняемых зарядов $Z(i, j)$, процедура усреднения не влияет на величину локального контраста распределения зарядов, но сглаживает результирующее поле зарядов.

На рисунке 11 показано синтезированное поле распределения зарядов при тех же условиях освещения двухсекционной матрицы, что и на рисунке 4, а на рисунке 12 показано распределение зарядов вдоль одного из столбцов виртуальной матрицы.

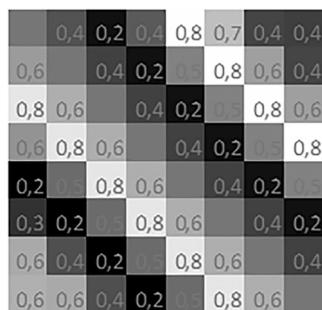


Рис. 11. Синтезированное поле зарядов в виртуальной матрице при $\alpha = 1$ и при $\delta = 1$

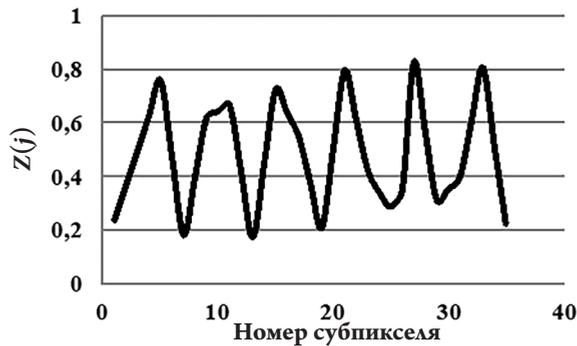


Рис. 12. Распределение зарядов вдоль одного из столбцов виртуальной матрицы (см. рис. 11)

Рисунок 12 показывает, что однородность локального контраста в виртуальной матрице существенно выше, чем в исходной секции при одинаковых условиях освещения матриц. Но сверхразрешение синтезированных виртуальных матриц можно оценить только в результате детального анализа распределения зарядовых полей.

Как показано в работе [6], среднее значение ФПМ матрицы ПЗС равно

$$C_{av} = (\sin(\pi / 2\delta) / (\pi / 2\delta))^2. \tag{9}$$

Синтезированная виртуальная матрица обеспечивает лучшее приближение сигнала изображения к синусоидальной форме, поэтому ее ФПМ прекрасно соответствует формуле (9) (рис. 13).



Рис. 13. Функция передачи модуляции матрицы ПЗС со сверхразрешением в зависимости от отношения ширины шпалы к размеру пикселя: сплошная линия – теория; маркеры – результат моделирования при отклонении шпал мира от строк матрицы на 15°

Для углов наклона шпал мира в 15 и 30° ФПМ почти одинакова (рис. 14), но при некоторых углах наблюдаются резонансные всплески средних значений ФПМ (рис. 15).

Рисунок 15 показывает, что среднее значение ФПМ почти не меняется в диапазоне углов наклона шпал мира по отношению к строкам матрицы ПЗС от 3 до 40°, что соответствует данным на рисунке 14. Но при 0 и 45° наблюдаются всплески, аналогичные максимумам функции рассеяния рентгеновского излучения на кристаллической решетке. Однако эти всплески не слишком меняют среднюю по углам величину ФПМ и не ухудшают ее соответствия формуле (9).

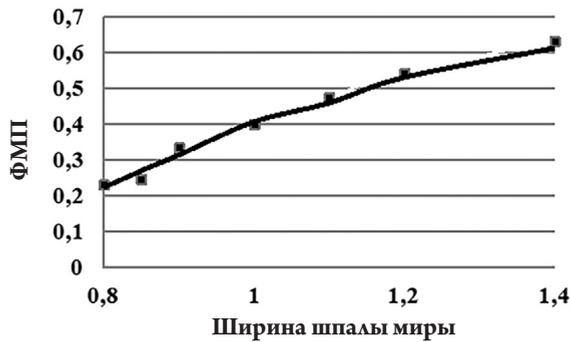


Рис. 14. Независимость ФМП от угла наклона шпал мира по отношению к строкам матрицы ПЗС: сплошная линия – угол равен 15° ; маркеры – угол равен 30°



Рис. 15. Резонансные всплески значений ФМП при ширине шпалы мира, равной 1,4 размера пикселя, и при углах наклона шпалы мира по отношению к строке матрицы, равных 0 и 45° : толстая линия – средние значения ФМП; тонкая линия – минимальные значения ФМП

Рисунок 15 также показывает, что в синтезированной матрице различие между средним и минимальным локальным коэффициентом передачи контраста не столь велико, как в одиночной секции матрицы, что выражается в малом отличии критерия разрешения от величины средней ФМП для синтезированной виртуальной матрицы (рис. 16).

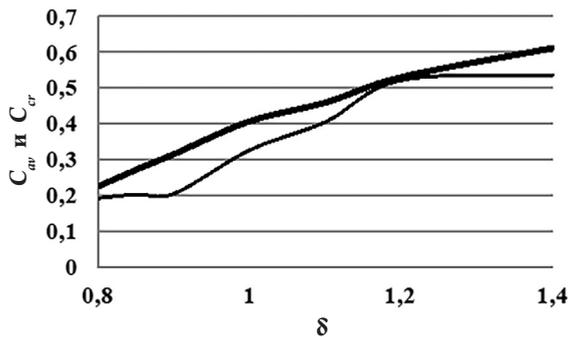


Рис. 16. Средний коэффициент передачи контраста $C_{ав}$ (толстая линия) и критерий качества передачи контраста $C_{ср}$ (тонкая линия) в зависимости от относительной ширины шпалы мира δ при наклоне шпал синусоидальной мира в 15°

Заключение

Таким образом, синтезированная виртуальная матрица с синхронным накоплением энергии движущегося изображения обеспечивает повышенное на 25% разрешение по сравнению с одиночной матрицей ПЗС.

Литература

1. Блажевич С.В., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. № 7, вып. 2. С. 9–13.
2. Гуськов Г.Я., Седунов Б.И., Петручук И.И., Возьмилов П.Н. Фотоприемник движущегося изображения: патент SU 587637.
3. Матрица фотоаппарата – основа основ // Foto-Osnova.ru. URL: <http://foto-osnova.ru/matrixa-fotoapparata-osnova-osnov.html> (дата обращения: 09.09.2019).
4. Седунов Б.И. Концепции развития космических электронных систем оперативного детального наблюдения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: конспекты лекций / Всероссийские открытые Армандовские чтения: молодежная школа. Муром: МИ ВГУ, 2019. С. 20–32.
5. Седунов Б.И. Микроэлектронная революция в наблюдении поверхности Земли из космоса // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 5–7 июня 2018 г.) / под ред. А.А. Романова. М.: Российские космические системы, 2018. С. 191–202.
6. Седунов Б.И. Моделирование алиасинга в ПЗС-формирователе сигналов изображений // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2017. № 3. С. 17–23.
7. Седунов Б.И. Принципы, заложенные в основу первой отечественной цифровой системы дистанционного зондирования Земли из космоса и цифровых формирователей сигналов изображений для космических телескопов // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: конспекты лекций / V Всероссийские открытые Армандовские чтения: молодежная школа. Муром: МИ ВГУ, 2015. С. 5–22.
8. Седунов Б.И. Проектирование сложной электронной системы на новых физических принципах // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2018. № 4. С. 108–118.
9. Седунов Б.И. Цифровая революция в наблюдении поверхности Земли из космоса // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молодежная школа. Муром: МИ ВГУ, 2017. С. 114–126.
10. Смит Дж. Е. История изобретения приборов с зарядовой связью // УФН. 2010. Т. 180. С. 1357–1362.
11. Фотоматрица // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/Фотоматрица> (дата обращения: 09.09.2019).
12. Zalevsky Z., Mendlovic D. Optical Superresolution. [S. l.]: Springer, 2003. 255 p.

Literatura

1. *Blazhevich S.V., Vintaev V.N., Ushakova N.N.* Sintez kosmicheskogo izobrazheniya s uluchshennoj razreshayushchej sposobnost'yu na osnove subpiksel'nogo skanirovaniya // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010. № 7, vyp. 2. S. 9–13.
2. *Gus'kov G.Ya., Sedunov B.I., Petruchuk I.I., Voz'milov P.N.* Fotopriemnik dvizhushchegosya izobrazheniya: patent SU 587637.
3. Matritsa fotoapparata – osnova osnov // *Foto-Osnova.ru*. URL: <http://foto-osnova.ru/matrica-fotoapparata-osnova-osnov.html> (data obrashcheniya: 09.09.2019).
4. *Sedunov B.I.* Kontseptsii razvitiya kosmicheskikh elektronnykh sistem operativnogo detal'nogo nablyudeniya // *Problemy distantsionnogo zondirovaniya, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln: konspekty lektzij / Vserossijskie otkrytye Armandovskie chteniya: molodezhnaya shkola*. Murom: MI VIGU, 2019. S. 20–32.
5. *Sedunov B.I.* Mikroelektronnaya revolyutsiya v nablyudenii poverkhnosti Zemli iz kosmosa // *Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnykh tekhnologij: sbornik trudov IX Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Moskva, 5–7 iyunya 2018 g.) / pod red. A.A. Romanova*. M.: Rossijskie kosmicheskie sistemy, 2018. S. 191–202.
6. *Sedunov B.I.* Modelirovanie aliasinga v PZS-formirovatele signalov izobrazhenij // *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie"*. 2017. № 3. S. 17–23.
7. *Sedunov B.I.* Printsipy, zalozhennyye v osnovu pervoy otechestvennoj tsifrovoj sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa i tsifrovyykh formirovatelej signalov izobrazhenij dlya kosmicheskikh teleskopov // *Problemy distantsionnogo zondirovaniya, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln: konspekty lektzij / V Vserossijskie otkrytye Armandovskie chteniya: molodezhnaya shkola*. Murom: MI VIGU, 2015. S. 5–22.
8. *Sedunov B.I.* Proektirovanie slozhnoj elektronnoj sistemy na novyykh fizicheskikh printsipakh // *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie"*. 2018. № 4. S. 108–118.
9. *Sedunov B.I.* Tsifrovaya revolyutsiya v nablyudenii poverkhnosti Zemli iz kosmosa // *Problemy distantsionnogo zondirovaniya, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln: konspekty lektzij / VII Vserossijskie Armandovskie chteniya: molodezhnaya shkola*. Murom: MI VIGU, 2017. S. 114–126.
10. *Smit Dzh. E.* Istoriya izobreteniya priborov s zaryadovoj svyaz'yu // *UFN*. 2010. T. 180. S. 1357–1362.
11. Fotomatrixa // *Vikipediya*. URL: <https://ru.wikipedia.org/Fotomatrixa> (data obrashcheniya: 09.09.2019).
12. *Zalevsky Z., Mendlovic D.* Optical Superresolution. [S. l.]: Springer, 2003. 255 p.