

УДК 004.932 + 53.088.6

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>Оригинальная статья
Original Paper

Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера

Г. С. Литвинович[✉], И. И. Бручковский

Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, Минск, 220045, Беларусь
[✉]E-mail: litvinovichgs@yandex.by

Аннотация. Для применения спектрометров в задачах дистанционного зондирования Земли исследователю необходимо выбирать режимы регистрации спектров, позволяющие добиться наивысшей точности спектральных измерений. При регистрации сигнала с борта авианосителей, обеспечивающих максимальный охват исследуемой территории, важно получить данные с максимальным отношением сигнал-шум за минимальное время, поскольку накопление выборки спектров для последующего усреднения невозможно. В работе представлены экспериментальные результаты определения компонентов шума (шума считывания; фотонного, электронного дробового и структурного шумов) для монохромной неохлаждаемой ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG (ПЗС – приборы с зарядовой связью) при различных условиях регистрации спектра: температуре детектора, времени экспозиции. Полученные зависимости компонентов шума позволяют оценить уровень шума для известных условий регистрации спектров. Предлагается алгоритм обработки данных ПЗС на основе адаптивного фильтра Винера с целью увеличения соотношения сигнал-шум путем использования априорной информации о статистических параметрах компонентов шума. Такой подход позволил увеличить отношение сигнал-шум спектров яркости небесной сферы на 4–9 дБ при регистрации сигнала на различных временах экспозиции. Практическое применение предлагаемого алгоритма уменьшило неопределенность расчета вегетационного индекса *NDVI* в 1,5 раза при регистрации спектров отражения растительности с борта самолета в надирной геометрии измерений.

Ключевые слова: линейка ПЗС, шум детектора, фотонный шум, шум считывания, электронный дробовый шум, фильтр Винера, температура детектора, вегетационный индекс

Для цитирования. Литвинович, Г. С. Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 72–83. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 04.09.2020
Подписана в печать | Accepted 16.11.2020
Опубликована | Published 26.03.2021

Algorithm for preliminary processing of charge coupled devices array data based on the adaptive Wiener filter

Hleb S. Litvinovich[✉], Ilya I. Bruchkouski

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems
of Belarusian State University,
st. Kurchatova, 7, Minsk, 220045, Belarus
✉E-mail: litvinovichgs@yandex.by*

Abstract. The researcher should choose the modes of recording spectra which allow to achieve the highest accuracy of spectral measurements in remote sensing systems. When registering a signal from aircraft which provide maximum coverage of the studied area, it is important to obtain a signal with the maximum signal-to-noise ratio in a minimum time, since the accumulation of spectra samples for averaging is impossible. The paper presents the experimental results of determining the noise components (readout noise, photon, electronic shot, pattern noise) for a monochrome uncooled CCD-line detector Toshiba TCD1304DG (CCD – charge-coupled devices) with various conditions of spectrum registration: detector temperature, exposition. Obtained dependences of the noise components make it possible to estimate the noise level for well-known conditions of spectra registration. The algorithm for processing CCD data based on an adaptive Wiener filter is proposed to increase the signal-to-noise ratio by using a priori information about the statistical parameters of the noise components. Such approach has allowed to increase the signal-to-noise ratio of sky spectral brightness by 4–9 dB for exposure times. The practical application of the algorithm has reduced the uncertainty in the vegetation index NDVI by 1.5 times when recording the reflection spectra of vegetation from the aircraft in the nadir measurement geometry.

Keywords: CCD-line detector, detector noise, photon noise, readout noise, electron shot noise, Wiener filter, detector temperature, vegetation index

For citation. Litvinovich H. S., Bruchkouski I. I. Algorithm for preliminary processing of charge coupled devices array data based on the adaptive Wiener filter. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 72–83 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Линейки ПЗС нашли широкое применение в качестве детектора для малогабаритных спектрометров. В то же время некоторые из задач, решаемых при помощи малогабаритных спектрометров, предъявляют повышенные требования к таким характеристикам детектора, как чувствительность и отношение сигнал-шум. Поэтому для проведения предварительной обработки спектров с целью увеличения соотношения сигнал-шум необходима информация о параметрах компонентов шума при заданных условиях регистрации полезного сигнала, что особенно актуально для неохлаждаемых детекторов ПЗС.

В литературе описываются методы определения параметров компонентов шума для различных типов детекторов [1–3], в том числе с учетом влияния температурных эффектов, так как количественная оценка характеристик компонентов шума для конкретного детектора ПЗС в составе спектрального прибора не только задает точность проводимых измерений, но и может предоставить информацию об оптимальных режимах работы спектрального прибора.

При проведении исследований применяется стандартная методика определения параметров компонентов шума [1] для монохромной неохлаждаемой ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG (URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html>), которая используется в составе малогабаритного спектрометра ССП-600Н [4, 5] в качестве детектора излучения. Спектрометр ССП-600Н предназначен для оперативного решения задач дистанционного зондирования природных объектов, в том числе в режиме полевых измерений.

Цель работы состоит в нахождении оптимальных режимов работы спектрометра ССП-600Н для увеличения соотношения сигнал-шум с учетом количественно определенных статистических характеристик компонентов шума ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG.

Методика определения компонентов шума. Рассматриваемая в данной работе ПЗС-линейка Toshiba TCD1304DG содержит 3648 рабочих и 13 конструктивно затемненных пикселей. Сигнал с линейки ПЗС считывается с частотой 250 кГц и оцифровывается с 12-битным разрешением таким образом, что может быть описан выражением [1]

$$N = I \cdot PRNU + D = I \cdot PRNU + SN_{ph}(I) + FPN(T, t) + SN_{dark}(T, t) + N_{read}(T), \quad (1)$$

где N – сигнал на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) электрической схемы детектора, принимающий значение от 0 до 4096 ед.;

I – освещенность пиксела, Вт/м²;

$PRNU$ – коэффициент чувствительности пиксела к излучению, $\frac{\text{ед. АЦП} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$;

D – суммарный сигнал от всех видов шумов, ед. АЦП;

T – температура детектора, °С;

t – время накопления заряда, экспозиция, с;

$SN_{ph}(I)$ – фотонный дробовый шум, ед. АЦП;

$FPN(T, t)$ – структурный шум, ед. АЦП;

$SN_{dark}(T, t)$ – электронный дробовый шум, ед. АЦП;

$N_{read}(T)$ – шум считывания, ед. АЦП.

Методику определения компонентов шума представим в виде двух блок-схем [1]: проведения измерений при наличии света, попадающего на детектор (рис. 1, а), и проведения измерений в темноте (рис. 1, б). За оценку величины шума принималось значение среднеквадратического отклонения (СКО) сигнала. Для вычисления СКО каждого вида шума с учетом температуры детектора выполнялись аналогичные шаги методики при другой температуре детектора, анализ полученных результатов проводился для 25 и 35 °С. Такие температуры были выбраны из-за отсутствия термокамеры, способной поддерживать температуру ниже комнатной и имеющей прозрачное окно для ввода оптического излучения внутрь. Поэтому минимальной температурой в исследовании стала комнатная температура 25 °С, тогда как температура 35 °С примерно соответствует температуре детектора спектрометра, находящегося в летнее время под воздействием прямых солнечных лучей на широтах Беларуси.

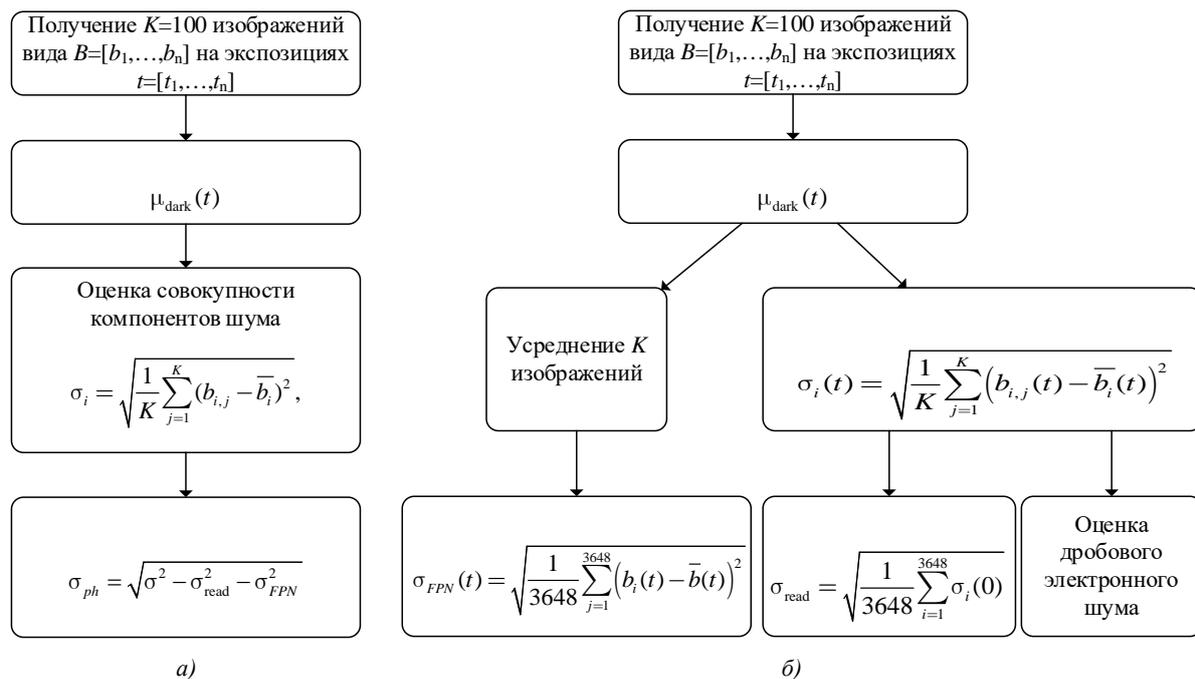


Рис. 1. Блок-схемы методики определения компонентов шума [1] при наличии (а) и отсутствии (б) света

Компоненты шума вычислялись с использованием выборки из $K = 100$ изображений для набора времен экспозиции из диапазона от 15 до 2000 мс, выходной сигнал детектора представлен в виде вектора $\vec{B} = [b_1, b_2, \dots, b_{3648}]$. В ранее проведенном исследовании [4] для этого типа детектора была показана эффективность выбора именно 100 изображений. Пример изображений для оценки компонентов шума показан на рис. 2.

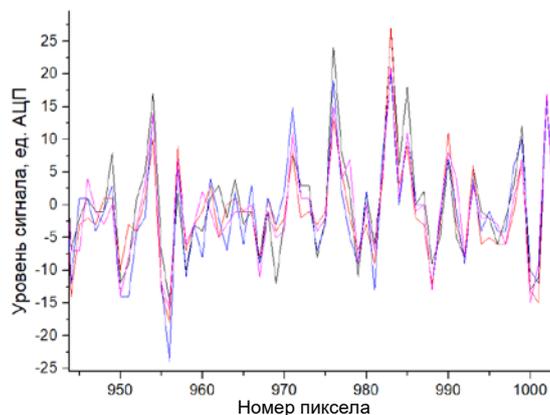


Рис. 2. Вид четырех фрагментов изображений, на основе которых проводился анализ компонентов шума

За оценку численного значения каждого вида шума (SN_{ph} , FPN , SN_{dark} , N_{read}) принимались два типа СКО:

– временное для SN_{ph} , SN_{dark} , N_{read} , т. е. СКО значений i -го пиксела для K измерений,

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (b_{i,j} - \bar{b}_i)^2}, \quad (2)$$

где $b_{i,j}$ – значение i -го пиксела для j -го измерения, \bar{b}_i – арифметическое среднее значение i -го пиксела по K измерениям;

– пространственное для FPN , т. е. СКО значений всех пикселов в линейке для одного измерения,

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} (b_i - \bar{b})^2}, \quad (3)$$

где b_i – значение i -го пиксела, \bar{b} – арифметическое среднее значение всех пикселов изображения.

Детектор имеет 13 конструктивно изолированных от света пикселов, сигнал с которых представляется в виде вектора $\vec{D} = [d_1, d_2, \dots, d_{13}]$. Это позволяет регистрировать темновой сигнал, т. е. аддитивный сигнал $\mu_{dark}(t)$, обусловленный тепловой генерацией электронов и наличием электронной подставки:

$$\mu_{dark}(t) = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} d_i(t). \quad (4)$$

Для всех измерений b_i , описанных в настоящей работе, производилась коррекция темнового сигнала $\mu_{dark}(t)$ по формуле

$$\tilde{b}_i = b_i - \mu_{dark}, \quad (5)$$

где \tilde{b}_i – скорректированное значение. Коэффициент чувствительности пиксела к излучению $PRNU$ определялся при помощи процедуры калибровки спектрометра по эталону спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) [6–8].

Результаты экспериментального определения компонентов шума. Структурный шум (FPN) вызван различием в чувствительности отдельных пикселей детектора и проявляется как шум определенного пространственного рисунка (см. рис. 2), поэтому был проведен эксперимент по определению амплитуды и установлению характеристик изменчивости пространственного рисунка. Для этого регистрировалась серия из $K=100$ изображений при отсутствии света с временем экспозиции от 15 до 2000 мс. Вместе с тем исследовалось влияние тепловых эффектов: эксперимент повторялся для двух температур детектора (25 и 35 °C).

При отсутствии освещенности ($I = 0$) выражение (1) принимает вид

$$N = FPN + SN_{\text{dark}}(T, t) + N_{\text{read}}(T). \quad (6)$$

Поскольку электронный шум $SN_{\text{dark}}(T, t)$ и шум считывания $N_{\text{read}}(T)$ подчиняются нормальному распределению и принимают случайное значение от измерения к измерению, усреднение выборки изображений на каждой экспозиции позволяет выделить на изображении постоянный рисунок, определяемый структурным шумом FPN . Зависимость СКО структурного шума FPN от времени экспозиции оценивалась по формуле (3) с учетом усредненных выборок изображений. Электронный дробовый шум $SN_{\text{dark}}(T, t)$ и шум считывания $N_{\text{read}}(T)$ определялись в зависимости от времени экспозиции усредненного по всем пикселям временного СКО согласно формуле (2). Результаты обработки экспериментальных данных показаны на рис. 3.

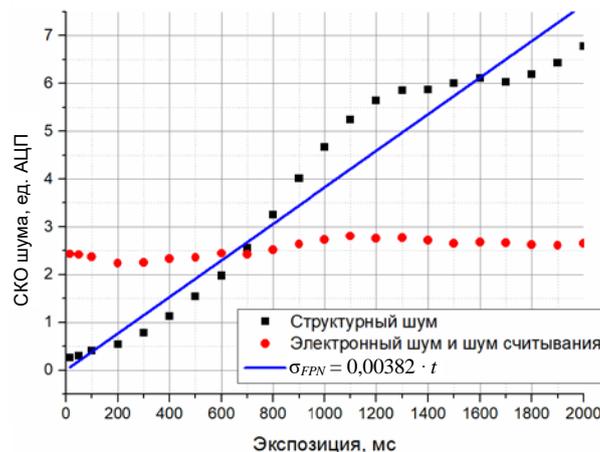


Рис. 3. Зависимость компонентов шума от времени экспозиции

Оценка СКО структурного шума для различного времени экспозиции может быть аппроксимирована линейной функцией

$$\sigma_{FPN}(t) = 0,00382 \cdot t, \quad (7)$$

где t – время экспозиции, мс.

Использование приближения (7) не оказывает существенного влияния на дальнейшие расчеты, так как расходитсся с экспериментальными данными на величину не более одного отсчета АЦП. На малых значениях экспозиции ($t < 260$ мс) структурным шумом можно пренебречь, так как его уровень меньше минимального значения разряда АЦП.

Так как шум считывания $N_{\text{read}}(T)$ обусловлен в том числе и особенностями электронной схемы, зависит от времени считывания и не зависит от времени экспозиции, он оценивался как сигнал, полученный с детектора при нулевой экспозиции. Поскольку обеспечить нулевое время экспозиции для реального детектора не представляется возможным, оценка СКО шума считывания $N_{\text{read}}(T)$ получалась при помощи аппроксимации зависимости СКО совокупности шума считывания и электронного шума (рис. 3) до нулевого времени экспозиции.

Как показано на рис. 3, график зависимости СКО совокупности электронного дробового шума и шума считывания является достаточно пологим, т. е. сумма СКО указанных компонентов шума ограничена шумом считывания, который вносит наибольший вклад, поэтому $\sigma_{\text{read}} \approx 2,55$. Следует отметить, что при $t > 700$ мс структурный шум начинает преобладать над шумом считывания.

Фотонный шум вызван неравномерным попаданием фотонов на пиксел детектора. Соответствующая вероятность описывается распределением Пуассона [9], согласно которому СКО фотонного шума пропорционально квадратному корню из числа сигнальных электронов:

$$\sigma_N \sim \sqrt{N}. \quad (8)$$

Для оценки величины фотонного шума регистрировались сигналы различной интенсивности в пределах динамического диапазона детектора на фиксированной экспозиции 200 мс, которая была выбрана из соображений небольшого вклада уже определенных компонентов шума и уровня сигнала, занимающего весь динамический диапазон детектора. СКО фотонного шума определялось с учетом рассчитанного по формуле (2) временного СКО шума σ по выражению

$$\sigma_{ph} = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_{\text{read}}^2 - \sigma_{FPN}^2}. \quad (9)$$

С использованием экспериментальных данных, представленных на рис. 4, зависимость величины фотонного шума $SN_{ph}(N)$ от уровня сигнала N рассчитывалась по формуле

$$\sigma_{ph}(N) = 0,07 \cdot \sqrt{N}. \quad (10)$$

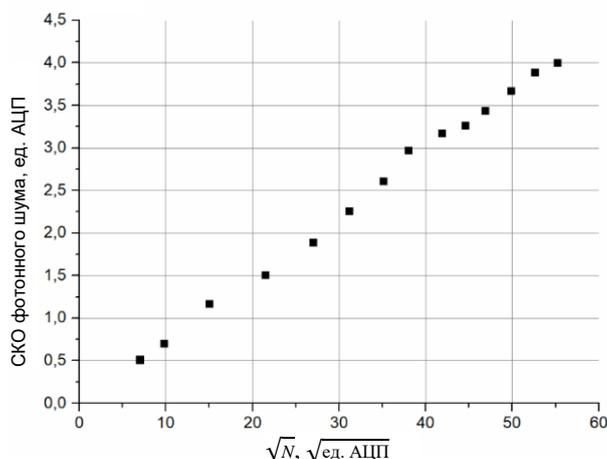


Рис. 4. Зависимость фотонного шума от уровня сигнала

Другими словами, при линейном увеличении уровня сигнала уровень фотонного шума и, следовательно, отношение сигнал-шум возрастают пропорционально \sqrt{N} . Поэтому при проведении измерений с целью минимизации вклада фотонного шума есть смысл регистрировать максимальные уровни сигнала в пределах области линейности детектора.

Для исследования влияния температуры на компоненты шума детектор был помещен в термостабилизированную камеру, где измерения проводились при температурах $(25 \pm 0,5)$ и $(35 \pm 0,5)$ °С. Результаты сравнительного анализа показаны на рис. 5, где в качестве уровня сигнала для фотонного шума взято типичное значение 1500 отсчетов АЦП.

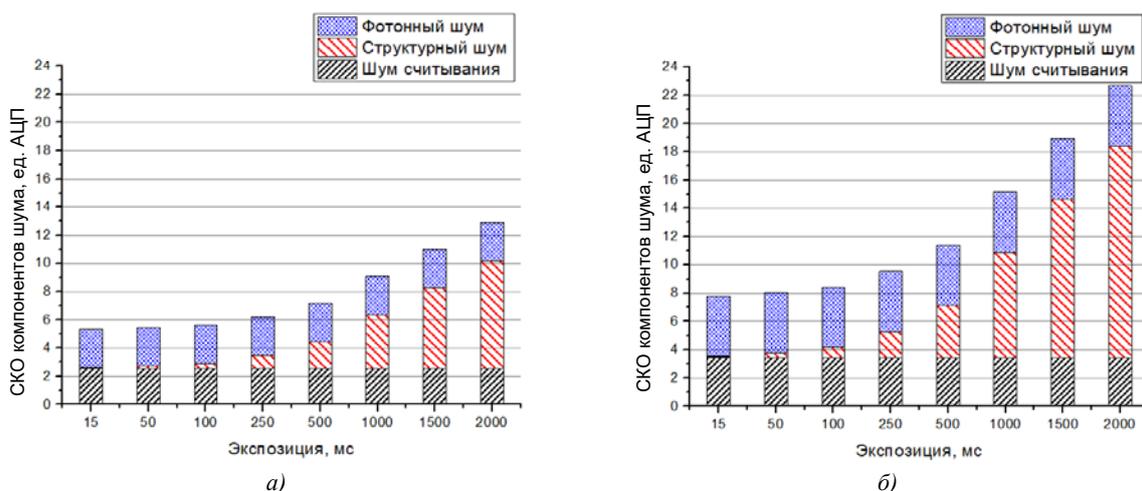


Рис. 5. СКО компонентов шума в итоговом сигнале: а) при 25 °С; б) при 35 °С

На временах экспозиции менее 100 мс наибольший вклад в результирующий шум вносят фотонный шум и шум считывания, которые эффективно устраняются путем усреднения нескольких измерений. На временах экспозиции более 100 мс структурный шум начинает преобладать над остальными компонентами шума и для его коррекции следует применять особые меры, например попиксельное вычитание сигнала, зарегистрированного при отсутствии света на той же экспозиции. В таблице представлены аналитические аппроксимации для различных компонентов шумового сигнала, полученные по экспериментальным данным для детектора Toshiba TCD1304DG согласно методике, изложенной в работе [1].

Величина компонентов шума для различных условий регистрации

Шум	25 °С	35 °С
Структурный	$\sigma_{FPN}(t) = 0,00382 \cdot t$	$\sigma_{FPN}(t) = 0,0075 \cdot t$
Считывания	$\sigma_{read} \approx 2,55$	$\sigma_{read} \approx 3,4$
Фотонный	$\sigma_{ph}(N) = 0,07 \cdot \sqrt{N}$	$\sigma_{ph}(N) = 0,11 \cdot \sqrt{N}$

При увеличении температуры детектора структурный шум становится более явным и при отсутствии термостабилизации детектора требует отдельного внимания при проведении измерений.

Предварительная обработка данных фильтром Винера. Для уменьшения амплитуды результирующего шума в регистрируемых спектрах в исследовании применялась одна из версий фильтра Винера [10], представляющего собой частный случай цифрового фильтра низких частот. Так как выполнение процедуры фильтрации методом скользящего среднего приводит к сдвигу изображения (что может иметь негативные последствия в задачах спектрометрии), то фильтр Винера в данном случае является предпочтительным, поскольку не имеет указанного недостатка.

Для корректного использования Фурье-фильтров низких частот с целью уменьшения амплитуды результирующего шума необходимы априорные знания о характеристиках фильтруемого сигнала, что требует подбора параметров фильтра в зависимости от режима измерений (экспозиции, интенсивности сигнала) и специфики решаемой задачи. Поэтому применение адаптивного фильтра Винера является наиболее универсальным решением для коррекции спектральных данных в случае детектора Toshiba TCD1304DG в связке со спектрометром ССП-600Н, так как применение фильтра основано только на измеренных статистических параметрах шумовых компонентов детектора. Значение интенсивности i -го пикселя в отфильтрованном изображении b'_i пересчитывалось:

$$b'_i = \mu_{i-4,i+4} + \frac{\sigma_{i-4,i+4}^2 - v^2}{\sigma_{i-4,i+4}^2} (b_i - \mu_{i-4,i+4}) =$$

$$= \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} + \frac{\left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 [b_{i-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k}] \right)^2 - v^2}{\left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 [b_{i-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k}] \right)^2} \left(b_i - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} \right), \quad (11)$$

где b_i – значение интенсивности i -го пиксела зашумленного изображения, μ – математическое среднее сигнала b_i в окне, σ – СКО сигнала b_i в окне, v – СКО шума в сигнале.

Величина v в случае априорных знаний об оценках СКО шумовых компонентов рассчитывалась следующим образом:

$$v = \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + \sigma_{ph}^2 + \sigma_{FPN}^2}, \quad (12)$$

где σ_{read} , σ_{ph} и σ_{FPN} – оценки СКО шумовых компонентов, полученные экспериментально.

В случае использования фильтра без априорных знаний об оценках СКО шумовых компонентов величина СКО шума в сигнале v находилась по формуле

$$v = \frac{1}{3648} \sum_{j=1}^{3648} \left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 [b_{j-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{j-k}] \right). \quad (13)$$

Для фильтрации применялось скользящее окно в девять пикселей с перекрытием в восемь пикселей, которое достаточно для оценки локальных параметров сигнала, но не расширяет спектральные линии. Так, в качестве значения СКО шума в сигнале v при использовании фильтра к спектральным данным без априорных знаний об оценках СКО шумовых компонентов применялось среднее значение σ по всем окнам в сигнале.

С целью контроля эффективности применения цифрового фильтра Винера регистрировались спектры яркости небесной сферы на временах экспозиции 50, 150, 500 и 2000 мс при температуре детектора 25 °С. В качестве меры качества сигнала использовалось среднее значение отношения сигнал-шум SNR по изображению спектра яркости небесной сферы:

$$SNR = \frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} SNR_i = \frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} \left(10 \cdot \log_{10} \frac{N_i^2}{\sigma^2} \right), \quad (14)$$

где SNR_i – отношение сигнал-шум i -го пиксела; N_i – значение сигнала в i -м пикселе, ед. АЦП; σ – СКО сигнала в пикселе, ед. АЦП.

За оценку σ для расчета отношения сигнал-шум принималось СКО сигнала, полученного попиксельным вычитанием двух последовательно зарегистрированных изображений спектра яркости небесной сферы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} \left((N_{1,i} - N_{0,i}) - \overline{(N_{1,i} - N_{0,i})} \right)^2}, \quad (15)$$

где $N_{0,i}$ и $N_{1,i}$ – значения i -го пиксела двух последовательно снятых изображений; $\overline{(N_{1,i} - N_{0,i})}$ – среднее арифметическое значений i -го пиксела двух последовательно зарегистрированных изображений.

Данный способ позволяет рассчитать действительное СКО сигнала для применяемой системы, поскольку результирующий шум в пикселе изображения может включать в себя другие виды шума, которые могут зависеть в том числе и от уровня рассеянного излучения

внутри спектрометра. Таким образом, по формуле (14) рассчитывались значения SNR для спектров яркости небесной сферы, зарегистрированных при различном времени экспозиции и подвергнутых предварительной обработке без фильтрации, фильтром Винера без априорных знаний о шуме и фильтром Винера с известной из эксперимента величиной шума. Рассчитанные значения SNR показаны на рис. 6.

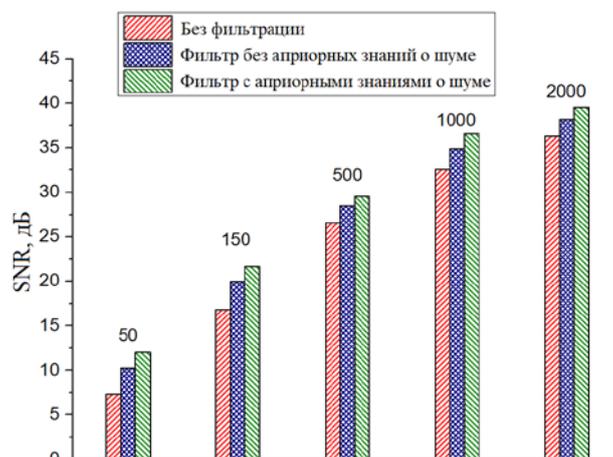


Рис. 6. Результаты оценки величины SNR спектра яркости небесной сферы для различного времени экспозиции, мс

Из диаграммы на рис. 6 видно, что наилучшие результаты достигнуты на малых временах экспозиции, где отношение сигнал-шум повысилось на 9 дБ. При регистрации очень слабых сигналов с увеличением времени экспозиции отношение сигнал-шум повышается на 4 дБ. Также стоит отметить, что использование априорных знаний о компонентах шума позволяет более точно подобрать параметры цифрового фильтра для коррекции сигнала, полученного при заданных условиях.

Экспериментальная проверка алгоритма. Для практической проверки описанной выше методики предварительной обработки спектральных данных проводился натурный эксперимент, в котором спектрометр ССП-600Н размещался на авиационной платформе и регистрировал спектры крон деревьев в надирной геометрии наблюдений с высоты около 100 м.

Выбранный спектр был получен при относительно большой экспозиции (861 мс) из-за низкой освещенности крон деревьев солнцем. На рис. 7 изображен характерный фрагмент спектра растительности, полученного согласно предлагаемой методике с использованием фильтра и без него. К исходному спектру был применен фильтр Винера с заранее определенными параметрами, после чего значения АЦП были пересчитаны в значения СПЭЯ.

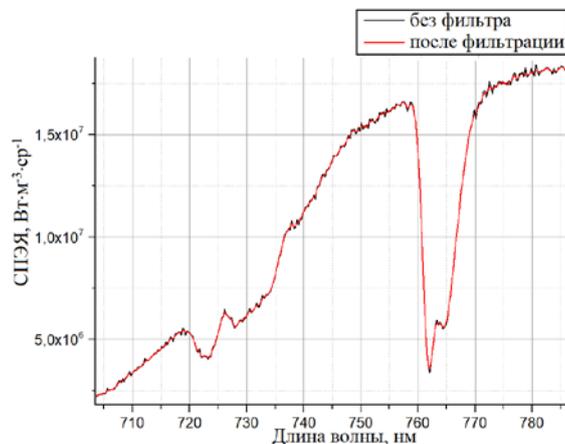


Рис. 7. Фрагмент спектра отражения растительности, полученный с авиационного носителя

На рис. 7 можно заметить, что применение фильтра приводит к сглаживанию шума в спектре, при этом сохраняются форма и положение узкой линии поглощения кислорода на длине волны 762 нм.

Так как проводимый натуральный эксперимент был посвящен методике обнаружения патологий вегетации хвойных лесных насаждений по данным многоуровневых оптических измерений, для оценки состояния растительного покрова использовался в том числе и индекс

$$NDVI = \frac{I(800) - I(670)}{I(800) + I(670)}, \quad (16)$$

где $I(800)$, $I(670)$ – коэффициенты спектральной яркости объекта при 800 и 670 нм соответственно.

За оценку неопределенности индекса $NDVI$ принималась величина

$$\sigma_{NDVI} = NDVI \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{800}^2}{I(800)} + \frac{\sigma_{670}^2}{I(670)}}, \quad (17)$$

где σ_{800} и σ_{670} – СКО сигнала, рассчитанное по формуле (2). Для расчета использовалось значение $K = 9$, достаточное для определения локальных характеристик сигнала. Значение индекса $NDVI$ для спектра без предварительной обработки составило $0,87 \pm 0,03$, в то время как значение индекса $NDVI$ по отфильтрованному спектру составило $0,87 \pm 0,02$.

Таким образом, использование априорных знаний о статистических параметрах компонентов шума для заданных условий регистрации изображения позволяет существенно улучшить отношение сигнал-шум на 4–9 дБ (или в 3–10 раз) по отношению к изображению без применения фильтра. Практическое применение фильтра позволило уменьшить неопределенность рассчитываемого вегетационного индекса $NDVI$ в 1,5 раза, что дало возможность улучшить качество последующей обработки спектральных данных для решения задачи классификации объектов методами оптического дистанционного зондирования.

Заключение. В работе представлен алгоритм предварительной обработки данных неохлаждаемого детектора на основе линейки ПЗС с возможностью контроля температуры. По результатам проведенных экспериментов установлены статистические параметры различных компонентов шума для линейки Toshiba TCD1304DG. Так, СКО шума считывания σ_{read} не зависит от времени экспозиции и оказывается равной 2,55 ед. АЦП при температуре 25 °С. СКО структурного шума σ_{FPN} возрастает при увеличении времени экспозиции, фотонный шум σ_{ph} линейно зависит от квадратного корня интенсивности сигнала согласно выражению (10). Все компоненты шума при увеличении температуры на 10 °С возрастают в 1,3–2 раза в зависимости от вида шума.

При необходимости регистрации слабых сигналов на длительных временах экспозиции имеет смысл проводить регистрацию сигнала, суммируя несколько изображений на временах экспозиции менее 100 мс. Такой подход позволяет уменьшить компоненты структурного шума σ_{FPN} до величины, меньшей шага оцифровки сигнала.

Применение алгоритма обработки на основе фильтра Винера, использующего априорные знания о статистических параметрах различных компонентов шума в полезном сигнале, дает возможность повысить отношение сигнал-шум на 4–9 дБ при регистрации сигнала на различных временах экспозиции без накопления выборки для последующего усреднения, что особенно актуально в случаях единичных измерений, например, при решении задач дистанционного мониторинга. Представленный алгоритм был опробован на спектральных данных натурального эксперимента с авиационной платформы в надириной геометрии наблюдений, что позволило уменьшить неопределенность расчета вегетационного индекса $NDVI$ в 1,5 раза.

Список использованных источников

1. A technique for evaluation of CCD video-camera noise / K. Irie [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2008. – Vol. 18, iss. 2. – P. 280–284.
2. A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras / K. Irie [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19, no. 4. – P. 1–5.

3. Матюхин, В. В. Модель шума фоточувствительной матрицы Dalsa CM42M / В. В. Матюхин, Д. Г. Паринов, Е. А. Татарина // Прикладная физика. – 2017. – № 6. – С. 60–67.
4. Литвинович, Г. С. Методика определения характеристик спектрального прибора для геофизических наблюдений / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, С. И. Бручковская // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : тез. докл. XV Всерос. откр. конф., Москва, 13–17 нояб. 2017 г. / Институт космических исследований Российской академии наук ; ред. : Л. М. Зеленый [и др.]. – М., 2017. – С. 139.
5. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой / С. И. Бручковская [и др.] // Журн. приклад. спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 4. – С. 620–627.
6. Энергетическая калибровка оптических съемочных систем дистанционного зондирования / И. М. Цикман [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 3(58). – С. 13–20.
7. Kacker, R. Guidelines for Radiometric Calibration of Electro-Optical Instruments for Remote Sensing / R. Kacker. – National Institute of Standards and Technology, 2015. – 131 p.
8. Ferrero, A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD / A. Ferrero, J. Campos, A. Pons // Metrologia. – 2006. – Vol. 43, no. 2. – P. 17–21.
9. Князев, М. Г. Расчет пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц KODAK KAI-1003M, KODAR KAI-1020, PHILIPS FTF3020M / М. Г. Князев, А. В. Бондаренко, И. В. Докучаев // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – № 3. – С. 49–56.
10. Jae, S. Lim. Two-Dimensional Signal and Image Processing / Lim Jae S. – Prentice Hall PTR, 1989. – 694 p.

References

1. Irie K., McKinnon A. E., Unsworth K., Woodhead I. M. A technique for evaluation of CCD video-camera noise. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, vol. 18, iss. 2, pp. 280–284. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2007.913972>.
2. Irie K., McKinnon A. E., Unsworth K., Woodhead I. M. A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras. *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19, no. 4, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/4/045207>.
3. Matyuhin V. V., Parinov D. G., Tatarina E. A. Model' shuma fotochuvstvitel'noj matricy Dalsa CM42M [Dalsa CM42M photosensitive matrix noise model]. *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2017, no. 6, pp. 60–67 (in Russian).
4. Litvinovich G. S., Bruchkovskij I. I., Bruchkovskaya S. I. Metodika opredeleniya harakteristik spektral'nogo pribora dlya geofizicheskikh nablyudenij [Technique for determining the characteristics of a spectral instrument for geophysical observations]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa : tezisy dokladov XV Vserossijskoj otkrytoj konferencii, Moskva, 13–17 nojabrja 2017 g. [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space: Abstracts of the XV All-Russian Open Conference, Moscow, 13–17 November 2017]*, Moscow, 2017, p. 139.
5. Bruchkovskaya S. I., Litvinovich G. S., Bruchkovskij I. I., Katkovskij L. V. Algoritm korrekcii difrakcii vtorigo poryadka v spektrometre s vognutoj difrakcionnoj reshetkoj [Algorithm of second-order diffraction correction in the spectrometer with a concave diffraction grating]. *Zhurnal Prikladnoji Spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2019, vol. 86, no. 4, pp. 620–627 (in Russian).
6. Cikman I. M., Belyaev Yu. V., Popkov A. P., Kakshinskij F. A. Energeticheskaya kalibrovka opticheskikh s'emochnyh sistem distancionnogo zondirovaniya [Energy calibration of optical imaging systems for remote sensing]. *Metrologiya i priborostroenie [Metrology and Instrumentation]*, 2012, no. 3(58), pp. 13–20 (in Russian).
7. Kacker R. *Guidelines for Radiometric Calibration of Electro-Optical Instruments for Remote Sensing*. National Institute of Standards and Technology, 2015, 131 p.
8. Ferrero A., Campos J., Pons A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD. *Metrologia*, 2006, vol. 43, no. 2, pp. 17–21.
9. Knyazev M. G., Bondarenko A. V., Dokuchaev I. V. Raschet porogovyh znachenij potoka izlucheniya i osveshchennosti dlya PZS matric KODAK KAI-1003M, KODAR KAI-1020, PHILIPS FTF3020M [Calculation of threshold values of radiation flux and illumination for CCD matrices KODAK KAI-1003M, KODAR KAI-1020, PHILIPS FTF3020M]. *Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]*, 2006, no. 3, pp. 49–56 (in Russian).
10. Lim Jae S. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Prentice Hall PTR, 1989, 694 p.

Информация об авторах

Литвинович Глеб Святославович, младший научный сотрудник, Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета.

E-mail: litvinovichgs@yandex.by

Бручковский Илья Игоревич, научный сотрудник, Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета.

E-mail: bruchkovsky2010@yandex.by

Information about the authors

Hleb S. Litvinovich, Junior Researcher, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

E-mail: litvinovichgs@yandex.by

Ilya I. Bruchkouski, Researcher, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

E-mail: bruchkovsky2010@yandex.by