

УДК 51-74, 53.088.23

Влияние низкочастотных шумов на точность измерения сигнала фотоприемных устройств второго и третьего поколений

А. Д. Деомидов, К. В. Козлов, А. В. Полесский, Н. А. Соломонова, Ю. А. Фирсенкова

Показано влияние низкочастотных шумов на точность измерения сигнала, получаемого с фотоприемных устройств второго и третьего поколений. В работе приведена методика определения величины сигнала и рассмотрены характерные для фотоприемных устройств второго и третьего поколений виды шумов и их спектры, и сделан вывод о том, что их предположительно спектр шума — «розовый». Показано, что в общем случае увеличение числа выборок не приводит к существенному увеличению точности определения величины сигнала. Проведено математическое моделирование влияния низкочастотных шумов на точность определения величины сигнала. Сделан вывод о том, что для повышения достоверности измерений сигнала с фотоприемных устройств, работающих при малом времени накопления, необходимо прореживание входных данных с целью увеличения времени измерения.

PACS: 02.30.Cj; 85.60.Gz, 84.37.+q

Ключевые слова: точность измерения, сигнал, низкочастотный шум, фотоприемное устройство.

Введение

Твердотельные многорядные и матричные (в том числе многодиапазонные и предназначенные для 3D-видения) фотоприемные устройства являются основной элементной базой для современных и перспективных оптико-электронных систем и комплексов. Финальным этапом изготовления является измерение фотоэлектрических параметров [1] готовых фотоприемных устройств.

Как правило, применяется следующая последовательность измерений — измерение спектральной характеристики, измерение фотоэлектрической площадки и взаимосвязи, измерение сигналов и шумов и расчет на их основе вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности, а для смотрящих фотоприемных устройств среднего и дальнего ИК-диапазонов дополнительно проводится измерение эквивалентной шуму разницы температур. При всех перечисленных измерениях основным исследуе-

мым параметром является величина сигнала — отклик на падающий световой поток, причем при расчете вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности измерение сигнала должно происходить с максимальной точностью.

Целью данной работы является исследование влияния низкочастотных шумов на точность измерения сигнала, получаемого с фотоприемных устройств второго и третьего поколений.

Исходные данные

При тестировании фотоприемных устройств второго и третьего поколений определение величины сигнала, впрочем, как и шума, производится для каждого элемента. Исходными материалами для расчетов являются большие массивы данных, имеющие вид $S(i, j, k)$, где i, j — номер элемента по горизонтали и вертикали, k — номер кадра [2].

Величина сигнала элемента определяется как среднее арифметическое выборки по кадрам:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (S_{ij}) . \quad (1)$$

Шум определяется как среднеквадратическое отклонение (СКО) сигнала:

$$N_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (S_{ij} - \bar{S}_{ij})^2 / K} . \quad (2)$$

Как правило, при измерении сигнала считается, что точность определения величины сигнала

Деомидов Александр Дмитриевич, инженер 1 кат.¹

Козлов Кирилл Владимирович, инженер 1 кат.¹

Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹.

Соломонова Нина Алексеевна, студент².

Фирсенкова Юлия Андреевна, студент².

¹АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

²МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2015 г.

i, j — элемента \bar{S}_{ij} определяется следующим соотношением [3]:

$$\sigma(\bar{S}_{ij}) = \frac{\sigma(S_{ij})}{\sqrt{K}}, \quad (3)$$

где $\sigma(S_{ij})$ — СКО сигнала при единичном измерении,
 $\sigma(\bar{S}_{ij})$ — СКО среднего арифметического значения величины сигнала при вычислении по K кадрам.

Формула (3) имеет одно строгое ограничение — она справедлива в случае усреднения многократных некоррелированных измерений [4]. При корреляции на каждом отдельно взятом интервале усреднения Δt_1 и Δt_2 получаются разные значения погрешности. В отличие от белого шума, погрешность среднего арифметического значения при увеличении количества измерений будет стремиться к некоторым значениям $S_1(\Delta t_1)$ и $S_2(\Delta t_2)$, отличных от нуля (см. рис. 1).

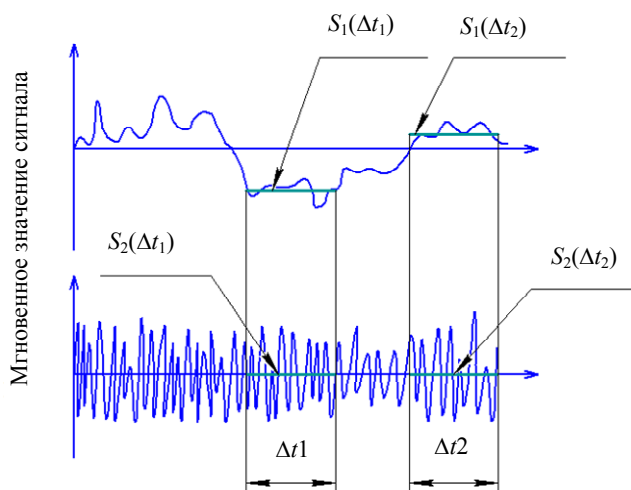


Рис. 1. Примеры сигналов с низкочастотным шумом S_1 и без него S_2

Отметим, что усреднение сигнала (1) не позволяет устранить систематические и динамические погрешности.

Наличие корреляции сигнала при многократных измерениях может быть обусловлено природой шума, присутствующего как в объекте измерения, так и в измерительном тракте.

Виды шумов фотоприемных устройств

Основными видами шумов фотоприемных устройств [5] являются:

1) Фотонный (радиационный) шум [6]. Он вызван флуктуациями числа фотонов, испускаемых источником и поглощаемых приемником,

а также тем, что приемник сам является источником шумов, т. к. обладает отличной от нуля температурой. Дисперсию флуктуации мощности излучения для полосы частот Δf описывают соответствующей формулой:

$$\Delta \bar{\Phi}^2 = \sqrt{8 \cdot \varepsilon_T \cdot k \cdot (T_\Phi^5 + T_{III}^5) \cdot \sigma_{CB} \cdot A_d \cdot \Delta f}, \quad (4)$$

где $\Delta \bar{\Phi}^2$ — дисперсия флуктуации мощности излучения; ε_T — коэффициент поглощения фоточувствительного слоя; k — постоянная Больцмана; T_Φ — температура фона; T_{III} — температура фоточувствительного слоя; σ_{CB} — постоянная Стефана-Больцмана; A_d — площадь фоточувствительного элемента.

Как видно из формулы (4), спектр фотонного шума — белый.

2) Генерационно-рекомбинационный шум, обусловленный случайностью процессов рождения и рекомбинации (и захвата на ловушки) носителей заряда [6]. Дисперсию флуктуации числа носителей заряда для генерационно-рекомбинационного шума в единичной полосе частот описывают формулой.

$$\Delta \bar{N}^2 = \frac{\tau_0^2 \cdot A_N}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau_0)^2}, \quad (5)$$

где $\Delta \bar{N}^2$ — дисперсия флуктуации числа носителей тока; A_N — величина, характеризующая мощность шума; τ_0 — время рекомбинации; f — частота.

Как видно из (5), данный шум является частотно зависимым и имеет «розовый» спектр.

3) Дробовый шум, вызванный дискретностью заряда электрона, наличием выделенного направления движения электронов и стохастичностью инжекции в нем [6]. Дисперсия флуктуации тока для дробового шума в единичной полосе частот описывается формулой (6)

$$\Delta \bar{i}^2 = 2 \cdot q_e \cdot I_0, \quad (6)$$

где $\Delta \bar{i}^2$ — дисперсия флуктуации тока; q_e — заряд электрона; I_0 — среднее значение фототока.

Как видно из формулы (6), спектр фотонного шума — белый.

4) Шум сброса (КТС-шум), обусловленный шумом Джонсона, приводящий к флуктуациям числа носителей заряда в емкости накопления [6]. Дисперсия флуктуации напряжения на емкости

накопления при наличии шума сброса определяется формулой:

$$\Delta \bar{u}^2 = \frac{k \cdot T}{C}, \quad (7)$$

где $\Delta \bar{u}^2$ — дисперсия флуктуации напряжения; k — постоянная Больцмана; T — температура шумящего элемента; C — емкость накопления.

Как видно из формулы (7), спектр фотонного шума — белый.

5) Избыточный шум (шум вида $1/f$ или фликкерный шум). Природа данного шума не известна, однако определено, что данный шум зависит от состояния поверхности фоточувствительного слоя и качества омических контактов [6]. Дисперсия флуктуации напряжения при наличии шума $1/f$ в единичной полосе частот определяется формулой:

$$\Delta \bar{u}^2 = \frac{A_{ш}}{f^\gamma}, \quad (8)$$

где $\Delta \bar{u}^2$ — дисперсия флуктуации напряжения; $A_{ш}$ — постоянная, зависящая от фотоприемного устройства; f — частота; γ — параметр формы спектра (определяется фотоприемным устройством).

Как видно из (8), данный шум является частотно зависимым и имеет «розовый» спектр.

6) Шум, вносимый электронной схемой считывания. Как правило, он является сложным шумом и зависит от реализации ячейки накопления, а также и от структуры дальнейшей обработки сигнала. В данной работе примем спектр этого шума белым.

7) Взрывной шум, вызываемый локальными обратимыми микропробоями, например, в областях, где присутствуют дефекты структуры. Чаще всего взрывной шум имеет характер дихотомического случайного процесса. Спектр данного шума — «розовый».

8) Геометрический шум, вызванный неравномерностью чувствительности элементов. В данной работе он не принципиален, поскольку речь идет об измерении сигнала с каждого элемента.

В результате рассмотрения известных шумов фотоприемных устройств можно сделать вывод о том, что реальный спектр шума фотоприемного устройства является смесью белого и «розового». Низкочастотная составляющая «розового»

шума приводит к появлению корреляции сигналов при измерении, вследствие чего величина сигнала, полученная путем усреднения отсчетов (1), будет иметь большую ошибку, чем определенная по формуле (3).

Влияние «розового шума» на точность измерения сигналов фотоприемных устройств

Пусть шум фотоприемного устройства является смесью «белого» шума со спектральной плотностью S_0 и избыточного шума со спектральной плотностью c/f , где c — константа, зависящая от измеряемого фотоприемного устройства, а f — частота.

В этом случае спектр шума можно представить в виде выражения (9), а сам вид спектра приведен на рис. 2:

$$S(f) = \begin{cases} \frac{c}{f} & 0 \leq f \leq f_{зп.} \\ S_0 & f > f_{зп.} \end{cases} \quad (9)$$

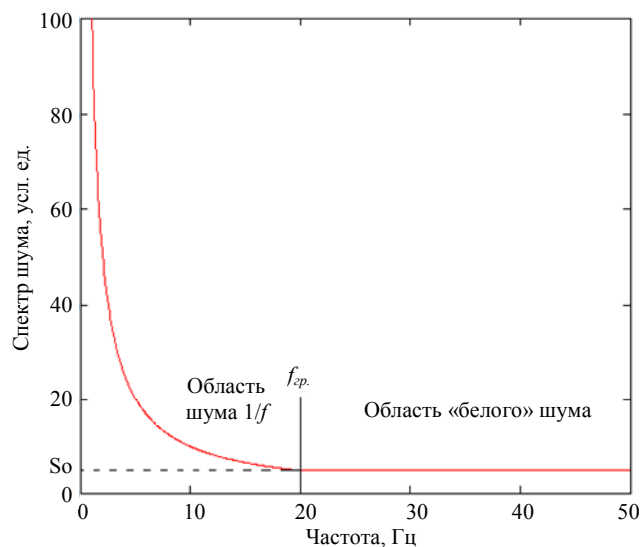


Рис. 2. Графический вид спектра, используемого при моделировании

Выражение (9) при интегрировании на бесконечном интервале частот расходится, однако низкочастотные компоненты указанного шума вычитаются при проведении измерений в процессе вычисления параметров. Поэтому их влиянием можно пренебречь, если выбрать нижнюю границу интегрирования не нулевой [7].

Рассмотрим процесс измерения величины сигнала. Пусть измерение сигнала выполняется с частотой F . При измерении производится считывание сигналов с N -кадров, в этом случае время измерения T равно $T = N/F$, а интервал между измерениями $\tau = 1/F$. Пусть измерения проводятся в

моменты времени $0, \tau, 2\cdot\tau, 3\cdot\tau \dots K\cdot\tau$. Тогда в результате измерения получается массив данных $x_{изм}$. Поскольку измерения через равные промежутки времени эквивалентны измерению в один момент времени при использовании линий задержки, то измеряемую величину сигнала можно записать в виде:

$$x_{cp}(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x_{изм}(t - K \cdot \tau). \quad (10)$$

Выражая функцию (10) через спектральную мощность с помощью преобразования Фурье, получим следующее выражение:

$$\tilde{X}_{cp}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x_{изм}(t - K \cdot \tau) \right) \cdot \exp(-j\omega t) dt. \quad (11)$$

Последовательно преобразуя выражение (11) и проведя замену переменной $(t - K \cdot \tau) \rightarrow \xi$, получим другую форму записи спектральной мощности:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{cp}(j\omega) &= \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x_{изм}(\xi) \cdot \exp(-j\omega\xi) d\xi \right) \cdot \exp(-j\omega k\tau) = \\ &= \tilde{X}(j\omega) \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \exp(-j\omega k\tau) = \tilde{X}(j\omega) \cdot \tilde{W}(j\omega) \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\tilde{W}(j\omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \exp(-j\omega k\tau). \quad (13)$$

Из выражения (12) следует, что в частотной области процесс усреднения представляет собой прохождение случайного процесса через усредняющий фильтр с передаточной характеристикой (13).

Вследствие симметрии Фурье изображений (12) относительно оси ординат $\tilde{X}_{cp}(-j\omega) = \tilde{X}(-j\omega) \cdot \tilde{W}(-j\omega)$, умножим левую и правую части (12) на это выражение и получим соотношение:

$$|\tilde{X}_{cp}(j\omega)|^2 = |\tilde{X}(j\omega)|^2 \cdot |\tilde{W}(j\omega)|^2. \quad (14)$$

Исходя из определения спектральной плотности мощности согласно выражению (14), а также для простоты полагая, что математическое ожидание сигнала равно нулю, можно получить следующее выражение:

$$\tilde{S}_{cp}(\omega) = |\tilde{W}(j\omega)|^2 \cdot \tilde{S}(\omega), \quad (15)$$

где $\tilde{S}_{cp}(\omega)$ — спектральная плотность мощности случайной составляющей сигнала после усреднения; $\tilde{S}(\omega)$ — спектральная плотность мощности случайной составляющей сигнала.

Рассмотрим передаточную функцию усредняющего фильтра (13), используя формулу геометрической прогрессии и формулы Эйлера:

$$\begin{aligned} \tilde{W}(j\omega) &= \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \exp(-j \cdot \omega \cdot k \cdot \tau) = \frac{1}{K} \cdot \frac{1 - \exp(-j \cdot \omega \cdot K \cdot \tau)}{1 - \exp(-j \cdot \omega \cdot \tau)} = \\ &= \frac{1}{K} \cdot \frac{1 - \exp(-j \cdot \omega \cdot K \cdot \tau)^{1/2} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot K \cdot \tau)^{1/2}}{1 - \exp(-j \cdot \omega \cdot \tau)^{1/2} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot \tau)^{1/2}} = \\ &= \frac{1}{K} \cdot \left(\frac{2j}{2j} \right) \cdot \frac{\left(\exp(-j \cdot \omega \cdot K \cdot \tau)^{1/2} - \exp(-j \cdot \omega \cdot K \cdot \tau)^{-1/2} \right) \exp(-j \cdot \omega \cdot K \cdot \tau)^{-1/2}}{\left(\exp(-j \cdot \omega \cdot \tau)^{1/2} - \exp(-j \cdot \omega \cdot \tau)^{-1/2} \right) \exp(-j \cdot \omega \cdot \tau)^{-1/2}} = \\ &= \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot K \cdot \tau\right)}{K \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \tau\right)} \exp\left(-\frac{1}{2} j \cdot \omega \cdot (K-1)\tau\right) \\ \tilde{W}(j\omega) &= \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot K \cdot \tau\right)}{K \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \tau\right)} \exp\left(-\frac{1}{2} j \cdot \omega \cdot (K-1)\tau\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение (16) представляет собой передаточную функцию цифрового sinc-фильтра [8]. Это означает, что усреднение K измерений через равные моменты времени τ эквивалентно цифровой фильтрации в прямоугольном окне шириной $(K \cdot \tau)$, в результате которой ослабляются спектральные составляющие погрешности измерений, расположенные выше граничной частоты фильтра.

Дисперсию усредненного сигнала можно найти, интегрируя спектральную плотность мощности погрешности (15) по всей полосе частот [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_{cp}^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{cp}(\omega) d\omega = 2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |W(\omega)|^2 S(\omega) d\omega = \\ &= 2 \int_0^{\infty} |W(f)|^2 S(f) df, \end{aligned} \quad (17)$$

где σ_{cp}^2 — квадрат СКО (дисперсия) сигнала; $S(f)$ — спектральная плотность мощности случайной составляющей сигнала; $W(f)$ — передаточная функция цифрового фильтра.

Полученное выражение (17) справедливо для вычисления погрешности измерения сигнала с любой спектральной плотностью. Подставляя в формулу (17) белый шум, можно получить формулу (3).

Подставляя в формулу (17) выражение (9), надо учесть несколько ограничений.

1) При $f \rightarrow 0$ значение спектральной мощности шума стремится к бесконечности, поэтому интеграл (17) расходится, однако нужно учитывать, что низкочастотные составляющие шумов будут подавлены при проведении калибровки. Следовательно, при интегрировании можно использовать нижнюю границу $f_H = 1/T$, где T — время измерения.

2) Поскольку многократные измерения являются процессом дискретизации шума, то, согласно теореме Котельникова, необходимо, чтобы частота отсчетов была не менее удвоенной верхней частоты сигнала, при этом спектр шума по частоте не ограничен. Указанная проблема может быть преодолена благодаря тому, что на высоких частотах присутствует только белый шум, который является некоррелированным. Поэтому при дискретизации белого шума получается также белый шум, а не какой-либо другой, полученный вследствие алиасного эффекта.

3) Спектр низкочастотного шума в общем случае из-за алиасного эффекта будет искажен и

представляет собой сумму сдвинутых друг относительно друга спектров исходного шума. Однако из-за выполнения условия $f_{cp} \ll f_{max}$, данный эффект не будет давать какой-либо существенный вклад в общий результат.

Итак, после подстановки (9) в (17) получится следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \sigma_{cp}^2 &= 2 \int_0^{\infty} |W(f)|^2 S(f) df = \\ &= 2 \int_{f_H}^{f_{cp}} \left(\frac{\sin(\pi \cdot f \cdot K \cdot \tau)}{K \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot \tau)} \right)^2 \frac{c}{f} df + \\ &+ 2 \int_{f_{cp}}^{f_{max}} \left(\frac{\sin(\pi \cdot f \cdot K \cdot \tau)}{K \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot \tau)} \right)^2 df. \end{aligned} \quad (18)$$

Для проведения дальнейшего анализа была создана специализированная программа для вычислений соотношения (18). В это выражение были подставлены данные, соответствующие измерению матричных фотоприемных устройств двух видов:

а) фотоприемное устройство на основе InSb с накоплением в ячейке (характерная полоса работы 4 и 8 МГц, время одного измерения принималось равным времени накопления 1 мс);

б) фотоприемное устройство на основе КРТ с накоплением в строке (характерная полоса работы 4 и 8 МГц, время одного измерения принималось равным 28 мкс).

При этом считалось, что в процессе измерения участвовали все накопленные кадры, т. е. не было прореживания входной последовательности с целью увеличения времени измерения. Рассматривалось 10, 100, 1 000, 10 000 и 100 000 измерений. Граничная частота принималась равной 10, 50, 200 и 400 Гц. Оценка проводилась по соотношению дисперсии в случае белого и «розового» шума.

При моделировании измерений фотоприемного устройства на основе InSb с временем накопления 1 мс наибольшие отклонения были получены при граничной частоте 400 Гц и полосе частот 4 МГц (см. табл. 1).

При моделировании измерений фотоприемного устройства на основе КРТ со временем накопления 28 мкс наибольшие отклонения были получены при граничной частоте 400 Гц и полосе частот 4 МГц (см. табл. 2).

Таблица 1

Данные по фотоприемному устройству на основе InSb

Время накопления, мс	Время измерения, сек	Граничная частота, Гц	Полоса частот, МГц	Число накопленных кадров	СКО при белом шуме, %	СКО при «розовом» шуме, %
1	0,01	400	4М	10	31,6	31,73
1	0,1	400	4М	100	10	10,284
1	1	400	4М	1000	3,16	3,697
1	10	400	4М	10000	1	1,401
1	100	400	4М	100000	0,316	0,336

Таблица 2

Данные по фотоприемному устройству на основе КРТ

Время накопления, мс	Время измерения, сек	Граничная частота, Гц	Полоса частот, МГц	Число накопленных кадров	СКО при белом шуме, %	СКО при «розовом» шуме, %
0,028	0,00028	400	4М	10	31,6	31,685
0,028	0,0028	400	4М	100	10	10,213
0,028	0,028	400	4М	1000	3,16	3,689
0,028	0,28	400	4М	10000	1	1,420
0,028	2,8	400	4М	100000	0,316	0,654

Заключение

В результате проведенных исследований было получено, что при наличии низкочастотного шума соотношение (3), определяющее зависимость СКО от количества измерений, нарушается. Наиболее сильное отклонение наблюдается в случае, когда граничная частота является высокой, а полоса пропускания — низкой. При этом условии спектральная плотность низкочастотного шума увеличивается и его влияние становится заметным.

Стоит отметить, что при измерении фотоприемников с малым временем накопления (десятки микросекунд — см. таблицу 2) накопление свыше 10 000 кадров незначительно уменьшает погрешность измерения сигнала. Анализ показал, что это вызвано слишком малым временем измерения. Для повышения достоверности измерений следует обрабатывать не каждый кадр, а один из 5 или 10 при сохранении общего числа обработанных кадров. Это приведет к увеличению времени измерения, впрочем, не столь значительному, но при этом можно будет избежать дополнительной систематической погрешности, обусловленной низкочастотными шумами.

Также стоит обратить внимание, что полученные в данной работе результаты базировались на предположении о форме спектра шума. Такое

допущение было сделано из-за того, что в литературных источниках не было найдено соответствующих данных. Поэтому для полноценных исследований влияния низкочастотных шумов на точность измерения сигнала в дальнейшем представляет интерес измерение реальных спектров шумов фотоприемных устройств.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.
2. Балиев Д. Л., Бедарева Е. А., Деомидов А. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 93.
3. Денисенко В. В. // Современные технологии автоматизации. 2009. № 4. С. 96.
4. Денисенко В. В. // Современные технологии автоматизации. 2010. № 1. С. 98.
5. Кузнецов П. А., Хромов С. С. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 12.
6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
7. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб. Питер.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.

Impact of the low-frequency noise on measurement accuracy of a signal for photodetectors of the second and third generations

A. D. Deomidov¹, K. V. Kozlov¹, A. V. Poleskiy¹, N. A. Solomonova²,
and Yu. A. Firsenkova²

¹Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

²Bauman Moscow State Technical University
5 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: orion@orion0ir.ru

Received July 25, 2015

In this paper, the influence of low-frequency noise on the measurement accuracy of the signal received from the photodetectors of the second and third generations were demonstrated. Method of calculation of the signal value and typical noises and their spectrum for photodetectors of the second and third generations was reported. According the review of noise types and their spectrum, it was shown that spectrum of photodetectors noise is «pink». In general, increasing the number of samples does not lead to an essential growing of the accuracy of determining the signal's value. Conclusion was made that increasing the integrity of measurements of photodetectors with short storage time is necessary to decimate input data in order to increase measurement time.

PACS: 02.30.Cj; 85.60.Gz, 84.37.+q

Keywords: measurement accuracy, low-frequency noise, photodetectors.

REFERENCES

1. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 38 (2014).
2. D. L. Baliev, E. A. Bedareva, A. D. Deomidov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 93 (2014)..
3. V. V. Denisenko, *Sovrem. Tekhnol. Avtomatiz.*, No. 4, 96 (2009).
4. V. V. Denisenko, *Sovrem. Tekhnol. Avtomatiz.*, No. 1, 98 (2010).
5. P. A. Kuznetsov and S. S. Khromov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 12 (2013).
6. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
7. A. B. Sergienko, *Digital Signal Processing* (Piter, SPb) [in Russian].
8. E. S. Venttsel', *Probability Theory* (Nauka, Moscow, 1969) [in Russian].

* * *