

ВЛИЯНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ И ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, Е.И. Жилин

В статье проведен анализ влияния стохастических операций по преобразованию сигнала в процессе фотометрирования на величину погрешности измерения сигнала. Приведены оценки погрешности, вносимые этими операциями. Показана целесообразность замены стохастических операций преобразования сигнала детерминированными операциями.

Современные системы фотометрических измерений находят широкое и разнообразное применение во многих областях человеческой деятельности, обеспечивая специалистов некоординатной информацией об объектах их наблюдения (изучения). Основными причинами столь широкого применения фотометрических систем являются: возможность проведения измерений с малыми погрешностями без оказания на объект разрушающего воздействия, большая дальность действия фотометрических систем при низких энергетических затратах и т.д.

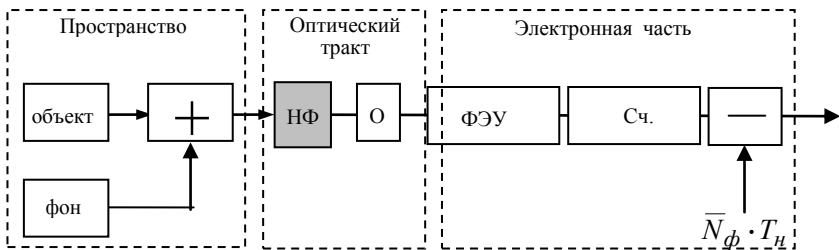


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема фотометра

На рис.1 приведена упрощенная функциональная схема фотометра [1]. Световой поток в апертурной плоскости фотометра можно представить как поток фотонов, распределенных во времени и пространстве по закону Пуассона с интенсивностью на входе $\bar{N}_c + \bar{N}_\phi$ (фотон/сек). При этом предполагается, что интенсивность фонового излучения \bar{N}_ϕ априори известна. Целью фотометрирования является измерение интенсивности сигнала от объекта (\bar{N}_c) с погрешностью измерения (δ) не выше заданной [2]. Для оценки потенциальной погрешности измерения \bar{N}_c ,

изначально заложенной в «энергетике» самого сигнала, введем условие об идеальной оптической и электронной части фотометра. В общем случае выражение для погрешности измерения \bar{N}_c имеет вид

$$\delta = \frac{\sqrt{D_c}}{\bar{N}_c \cdot T_H}, \quad (1)$$

где δ - погрешность измерения \bar{N}_c ; D_c - дисперсия потока; T_H - время накопления сигнала.

Исходя из вышеуказанных условий наблюдения, дисперсия сигнала соответственно равна

$$D_c(N_c \cdot T_H + N_\phi \cdot T_H - \bar{N}_\phi \cdot T_H) = \bar{N}_c \cdot T_H + \bar{N}_\phi \cdot T_H. \quad (2)$$

Тогда выражение (1) с учетом (2) приобретает вид

$$\delta = \frac{\sqrt{\bar{N}_c + \bar{N}_\phi}}{\bar{N}_c \cdot \sqrt{T_H}}. \quad (3)$$

Очевидно, что погрешность измерения \bar{N}_c на выходе фотометра будет не менее потенциальной погрешности δ . Проведем анализ влияния основных операций преобразования сигнала в процессе фотометрирования на увеличение погрешности измерений.

В оптическом тракте для согласования динамического диапазона сигнала с параметрами элементов фотометра наиболее часто используются нейтральные фильтры и диафрагмы с коэффициентом ослабления k . Где коэффициент ослабления выбирается исходя из условия

$$k = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{N}_c + \bar{N}_\phi < D_{\max}; \\ \frac{\bar{N}_c + \bar{N}_\phi}{D_{\max}}, & \text{если } \bar{N}_c + \bar{N}_\phi > D_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

где D_{\max} - верхняя граница динамического диапазона фотометра.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента ослабления от величины фонового излучения при $D_{\max} = 1 \cdot 10^6$, $\bar{N}_c = 1 \cdot 10^6$. Ослабление сигнала на этих элементах осуществляется случайным пропусканием каждого k -го фотона с вероятностью $p = k^{-1}$. Это приводит к непропорционально быстрому уменьшению интенсивности сигнала по сравнению с дисперсией суммарного потока [3, 4] и, как следствие, к росту погрешности фотометрических измерений в \sqrt{k} раз (в первом канале):

$$\delta_{\text{НФ}} = \frac{\sqrt{(\bar{N}_c + \bar{N}_\phi)/k}}{(\bar{N}_c/k) \cdot \sqrt{T_H}} = \delta \cdot \sqrt{k}, \quad (5)$$

где $\delta_{НФ}$ - погрешность измерения \bar{N}_c после ослабления сигнала на нейтральном фильтре.

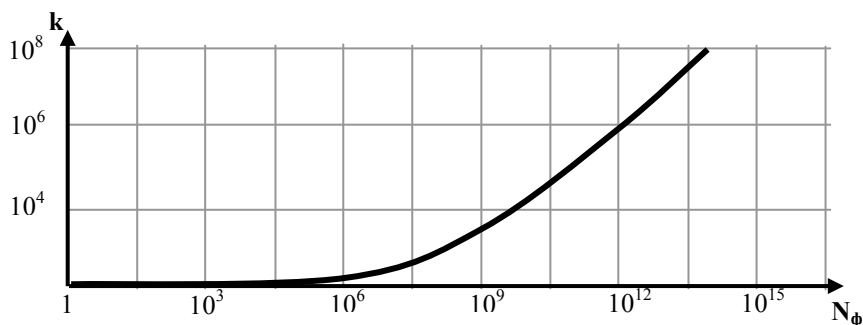


Рис.2. Зависимость коэффициента ослабления от величины фонового излучения

Преобразование потока фотонов в поток фотоэлектронов с последующим усилением последнего осуществляется в фотоэлектронном умножителе (ФЭУ). Фотоэлектронное преобразование происходит непосредственно на фотокатоде ФЭУ с коэффициентом квантовой эффективности q . Этот процесс сходен с процессом ослабления сигнала на нейтральном фильтре.

При этом поток случайным образом ослабляется в q^{-1} раз. Увеличение дисперсии суммарного потока фотоэлектронов также обусловлено наличием темнового излучения фотокатода. Все это приводит к очередному росту погрешности измерений при процессе фотометрирования

$$\delta_{ФЭУ} = \frac{\sqrt{\bar{n}_c + \bar{n}_\phi + \bar{n}_{\phi\text{ЭУ}}}}{\bar{n}_c \cdot \sqrt{G_n}} \quad (6)$$

при условии

$$\bar{n}_c = \frac{\bar{N}_c \cdot q}{k}; \quad \bar{n}_\phi = \frac{\bar{N}_\phi \cdot q}{k},$$

где $\delta_{ФЭУ}$ - погрешность измерения \bar{N}_c после фотоэлектронного преобразования; \bar{n}_c, \bar{n}_ϕ - интенсивность потока фотоэлектронов для фона и сигнала; $\bar{n}_{\phi\text{ЭУ}}$ - интенсивность темновых электронов фотокатода ФЭУ.

На практике проведение фотометрических измерений проходит в условиях априорной неопределенности, когда интенсивность фона неизвестна, поэтому наибольшее распространение получила схема двухканального фотометра. На рис.3 представлена функциональная схема двухканального фотометра с пространственным разделением каналов.

Выделение сигнальной составляющей осуществляется с помощью

вычитания постоянной составляющей шума ($\bar{n}_\Phi + \bar{n}_{\Phi_{ЭУ}}$) из смеси сигнал + шум ($\bar{n}_c + \bar{n}_\Phi + \bar{n}_{\Phi_{ЭУ}}$) [5]. В этом случае дисперсия сигнала равна

$$D_c((n_c + n_\Phi + n_{\Phi_{ЭУ}} - n_\Phi + n_{\Phi_{ЭУ}}) \cdot T_H) = (\bar{n}_c + 2 \cdot (\bar{n}_\Phi + \bar{n}_{\Phi_{ЭУ}})) \cdot T_H. \quad (7)$$

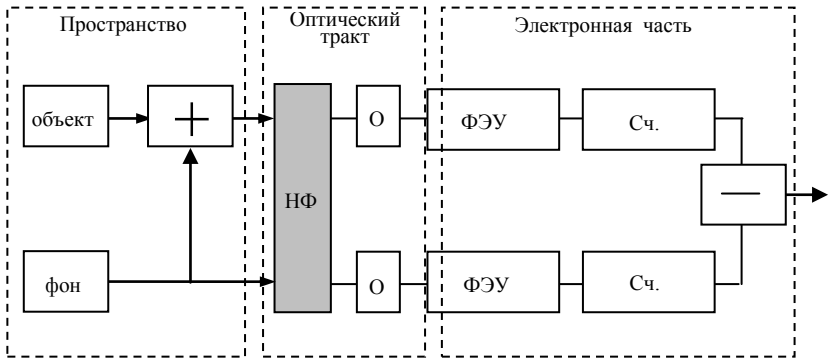


Рис. 3. Функциональная схема двухканального фотометра

Так как потоки первого и второго канала изначально являются статистически независимыми, то выражение для погрешности фотометрических измерений после вычитающего устройства имеет вид

$$\delta_{\text{фотометр.}} \equiv \delta_- = \frac{\sqrt{\bar{n}_c + 2 \cdot (\bar{n}_\Phi + \bar{n}_{\Phi_{ЭУ}})}}{\bar{n}_c \cdot \sqrt{T_H}}, \quad (8)$$

где δ_- - погрешность измерений \bar{N}_c после вычитающего устройства;

$\delta_{\text{фотометр.}}$ - погрешность фотометрических измерений.

Из (8) видно, операция вычитания вносит элемент неопределенности в разностный поток, что приводит, в свою очередь, к росту погрешности фотометрирования. На рис.4 представлены зависимости погрешности фотометрических измерений от интенсивности фона при значении темнового излучения фотокатода ($\bar{n}_{\Phi_{ЭУ}} = 30$, $q = 0.3$, $T_H = 1$ сек.).

Рассмотренные нами выше операции преобразования сигнала носят случайный (стохастический) характер. Применение данных операций в процедуре фотометрирования приводит к существенному увеличению (более трех порядков) погрешности измерений δ_- по сравнению с начальной (потенциальной) погрешностью δ . Проводя анализ вышеизложенного, можно заметить, что одной из мер по улучшению качества фотометрирования может являться уменьшение влияния случайных факторов на операции преобразования сигнала. Это может быть реализовано заменой стохастических операций на детерминированные. Беря во внимание проведенные авторами исследования по моделированию процесса

детерминированного ослабления сигнала, которые изложены в публикациях [6 - 9], представляется возможным сделать общие замечания по реализации детерминированной обработки сигнала.

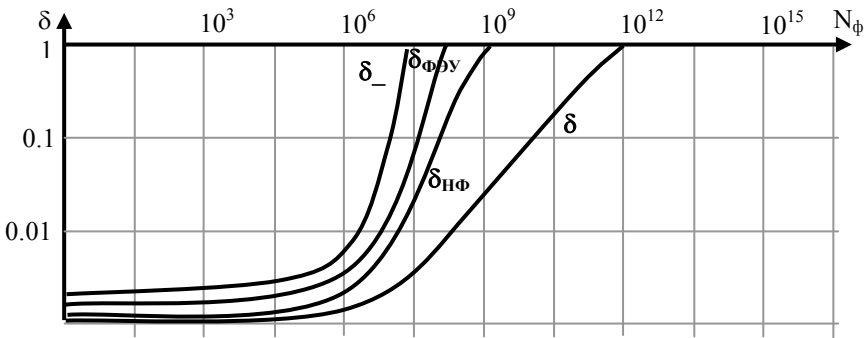


Рис.4. Зависимости погрешности фотометрических измерений от величины фонового излучения

Замена нейтрального фильтра в этом случае возможна на операцию детерминированного ослабления, суть которой сводится к пропуску только каждого k -го фотона и непропуску последующих $k-1$ фотонов. При этом ослабление интенсивности потока происходит, как и при стохастическом ослаблении, в k раз, а дисперсии - в k^2 раз. Это компенсирует влияние коэффициента ослабления на погрешность фотометрирования. В результате данной операции распределение исходного потока будет изменено на распределение Эрланга k -го порядка. Техническая реализация детерминированного ослабления будет зависеть от конкретных параметров элементов фотометра и вытекающей отсюда задачи согласования динамического диапазона сигнала с параметрами элементов фотометра.

Изменение статистики сигнала в результате детерминированного ослабления повлечет за собой и изменение алгоритма обнаружения, который должен быть синтезирован с учетом Эрланговского распределения сигнала и помехи, в условиях отсутствия априорных данных.

Выделение сигнальной составляющей из смеси «сигнал + шум» целесообразно проводить методом линейной фильтрации потока по времени t . Это позволит учитывать случайный характер флуктуаций сигнала и помехи. В целях уменьшения влияния случайных факторов на фотоэлектронное преобразование сигнала желательно производить выбор приемника излучения с большим коэффициентом квантовой эффективности и возможностью предварительного усиления сигнала непосредственно в приемнике.

Из приведенных расчетов и рассуждений можно сделать следующие выводы. Стандартная процедура фотометрирования содержит ряд операций над сигналом. Применение данных операций приводит к увеличению погрешности фотометрических измерений. Замена данных операций на такие

же по характеру воздействия на сигнал, но детерминированные по содержанию, позволят проводить фотометрические измерения без существенных потерь в точности измерений.

Авторами проведено моделирование на ЭВМ процесса детерминированного ослабления сигнала. Полученные результаты [6] позволяют говорить о возможности применения данного метода ослабления в системах фотометрических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелкова Т.А. Оптико - электронная система определения параметров движения и морфологических портретов спермиев. Автореф. дисс. канд. техн. наук / ХТУРЭ. – Харьков, 2000. – 20 с.

2. Москвитин С.В., Стрелков А.И. Теоретические основы оптической локации. – Харьков: ВИРТА, 1992. – 369 с.

3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М: Радио и связь, 1989. – 656 с.

4. Стрелков А.И., Стадник А.М., Лытюга А.П., Стрелкова Т.А. Сравнительный анализ вероятностного и детерминированного методов ослабления световых потоков // Радиотехника. – 1988. – Вып.108. – С. 25 - 29.

5. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. – М.: Наука, 1967. – 536 с.

6. Стрелков А.И., Жилин Е.И., Лытюга А.П., Стрелкова Т.А. Исследование возможности применения метода детерминированного ослабления сигнала в астрономических оптико-электронных системах // Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 2001. – Вып. 3 (13). – С. 160 -163.

7. Жилин Е.И., Лытюга А.П., Коротков В.В. Сравнительный анализ качественных характеристик оптико-электронных средств при их оценке по различным критериям // Оптоэлектронные информационно - энергетические технологии. – Винница: ВГТУ, 2001. – 234 с.

8. Жилин Е.И., Стрелкова Т.А., Евтушенко Я.Ю. Применение детерминированного ослабления оптического сигнала для уменьшения погрешности фотометрирования в исследовании динамики гемолиза эритроцитов // 5-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. научн. тр. Ч. 2. – Харьков: ХТУРЭ. – 2001. – 468 с.

9. Стрелкова Т.А., Жилин Е.И. Алгоритм обнаружения сигналов при их детерминированном ослаблении // Международная НТК «Теория и практика обработки сигналов»: Сб. научн. тр. – Туапсе. – 2001. – 520 с.

Поступила в редколлегию 10.09.2001