

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТЕЙШЕГО ФИЛЬТРА ПАРНОКОРРЕЛИРОВАННОГО ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ ФОТООТСЧЕТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

к.т.н. Т.А. Стрелкова, Е.И. Жилин, С.И. Калмыков
(представил д.т.н., проф. А.И. Стрелков)

Рассматривается возможность применения автоматического прибора биологической разведки для проведения точных измерений малых концентраций биологических примесей путем фотометрирования светового потока. Для уменьшения значения относительной погрешности измерения слабых световых потоков предложена схема построения простейшего обнаружителя парнокоррелированных импульсов фотоотсчетов.

В последние годы во всем мире наблюдается устойчивая тенденция к росту количества и масштабов различного рода чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. В этих условиях первостепенную важность приобретает вопрос мониторинга состояния потенциально опасных объектов, анализ степени их опасности, прогноз изменения уровня опасности во времени. Особое место в процессе мониторинга окружающей среды, в силу высокой опасности такого типа загрязнения, занимает контроль наличия биологических включений воздуха на предмет его бактериологического заражения. Оперативное и качественное решение задачи бактериологического контроля окружающей среды может быть обеспечено за счет использования специализированной аппаратуры контроля и анализа окружающей среды, установленной на бактериологически опасных объектах или вблизи них (предприятиях пищевого, медико-микробиологического профиля, полигонных свалках и т.п.) [1].

В настоящее время на вооружении войск РХБ защиты и подразделений МЧС находится автоматический прибор биологической разведки АСП (ГО71), принцип действия которого основан на явлении хемилюминесценции, возникающей при химической реакции биологических примесей анализируемого воздуха и индикаторного реактива [2]. Анализ содержания и концентрации биологических примесей в пробе воздуха проводится на основе фотометрических измерений светового потока, обусловленного хемилюминесцентным свечением биологических примесей. Регистрация светового потока производится посредством прямого фотодетектирования фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), работающим в режиме счета фотонов. При этом количество импульсов фотоотсчетов на выходе ФЭУ пропорцио-

нально интенсивности измеряемого светового потока. Превышение порога количеством фотоотсчетов за время накопления T_n вызывает срабатывание сигнализации, свидетельствующей о критической концентрации биологических примесей в анализируемом воздухе. Таким образом, обеспечивается индикаторный режим работы АСП [2].

Отсутствие режима непосредственного измерения концентрации биологических примесей в данном приборе, ограничивает возможности его применения для количественного анализа бактериологического загрязнения и прогноза эпидемиологической обстановки, при концентрациях биологических примесей как ниже, так и выше порогового уровня.

Анализ схемы построения прибора АСП позволяет сделать вывод о возможности расширения его функционального потенциала путем усовершенствования электронно-измерительной части с учетом алгоритма оценки интенсивности регистрируемого хемилюминесцентного излучения.

При регистрации и измерении интенсивности слабых световых потоков, соответствующих малым концентрациям биологических примесей, минимум относительной погрешности измерений будет сильно ограничиваться значением внутренних шумов ФЭУ, на фоне которых производится статистическая оценка интенсивности принимаемого излучения [3].

Для уменьшения относительной погрешности оценки среднего значения количества сигнальных (обусловленных воздействием светового потока на фотокатод ФЭУ) фотоотсчетов на интервале T_n , предлагается схема простейшего обнаружителя парнокоррелированных импульсов фотоотсчетов (рис. 1).

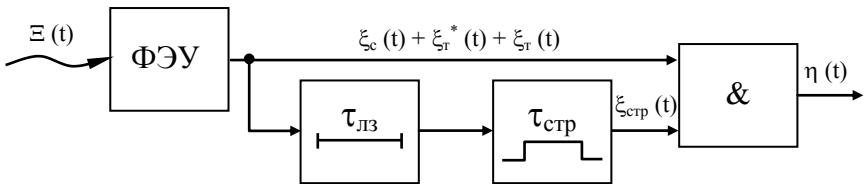


Рис. 1. Функциональная схема простейшего обнаружителя парнокоррелированного потока импульсов фотоотсчетов

В основу построения схемы положен факт наличия парных корреляций между сигнальными и инициированными ими темновыми импульсами фотоотсчетов [4], а также предположение об относительно большой вероятности P_0 появления инициированного импульса темнового фотоотсчета. Тогда вероятность его появления в интервале $t_i, t_i + \tau$ после формирования i -го импульса сигнального фотоотсчета на выходе ФЭУ равна

$$P = P_0 \int_{t_i}^{t_i + \tau} f_m^*(t) dt, \quad (1)$$

где P_0 – вероятность инициации импульса темнового фотоотсчета;

$f_m^*(t)$ – функция плотности распределения времени появления импульса темнового фотоотсчета; t_i – момент появления i -го импульса сигнального фотоотсчета на выходе ФЭУ.

Схема (рис. 1) предполагает подключение к выходу ФЭУ двух параллельных каналов, замкнутых на схеме сравнения «И». На первый вход схемы «И» поступает аддитивная смесь темновых $\xi_m(t)$, сигнальных $\xi_c(t)$ и инициированных ими темновых $\xi_m^*(t)$ импульсов фотоотсчетов длительностью τ_u и средним значением λT_n на интервале накопления. На второй вход схемы «И» подается поток стробовых импульсов длительностью τ_{cmp} . Импульсами запуска формирователя строба является случайный поток импульсов фотоотсчетов с выхода ФЭУ со сдвигом по времени на $\tau_{лз}$. При выполнении условий

$$\tau_u < \tau_{лз} \ll \tau_{cmp} < T_n \text{ и } \lambda^{-1} \gg \tau_{cmp} \quad (2)$$

вероятность попадания в строб инициированных темновых импульсов фотоотсчетов велика и на выходе схемы «И» формируется поток фотоотсчетов, среднее значение которых близко к потоку сигнальных импульсов.

Выбор длительности стробового импульса необходимо проводить с учетом вероятности попадания инициированного импульса темнового фотоотсчета в строб (рис. 2). Если принять, что вероятность появления

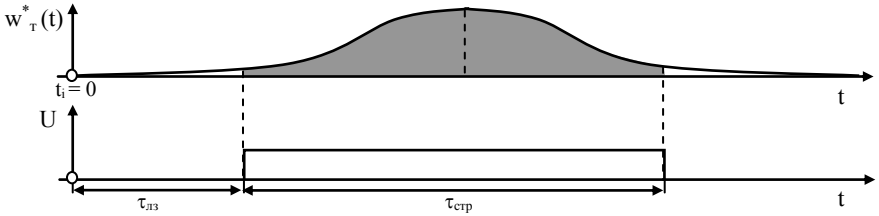


Рис. 2. Распределение вероятности появления инициированного темнового фотоэлектрона

темнового импульса подчинена рэлеевскому закону, то выражение (1) с учетом границ строба можно записать:

$$P(t_i + \tau_{лз} < t < t_i + \tau_{лз} + \tau_{cmp}) = P(\tau_{cmp}) = P_0 \int_{\tau_{лз}}^{\tau_{лз} + \tau_{cmp}} \frac{\tau}{\sigma_0^2} e^{-\frac{\tau^2}{2\sigma_0^2}} d\tau, \quad (3)$$

при $\tau > 0$

или используя функцию распределения вида $F(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma^2}\right)$:

$$P(\tau_{cmp}) = P_0 \left[F(\tau_{лз} + \tau_{cmp}) - F(\tau_{лз}) \right] = P_0 \left[\exp\left(-\frac{(\tau_{лз} + \tau_{cmp})^2}{2\sigma_0^2}\right) - \exp\left(-\frac{\tau_{лз}^2}{2\sigma_0^2}\right) \right], \quad (4)$$

где σ_0^2 – дисперсия времени появления инициированного темного фотоотсчета; $\tau_{лз}$ – время задержки случайного потока фотоотсчетов; $\tau_{стр}$ – длительность импульса строба.

На рис. 3 и 4 представлены временные последовательности потока фотонов на входе ФЭУ и импульсов фотоотсчетов формируемых ФЭУ, иллюстрирующих принцип работы простейшего обнаружителя парнокоррелированных импульсов фотоотсчетов.

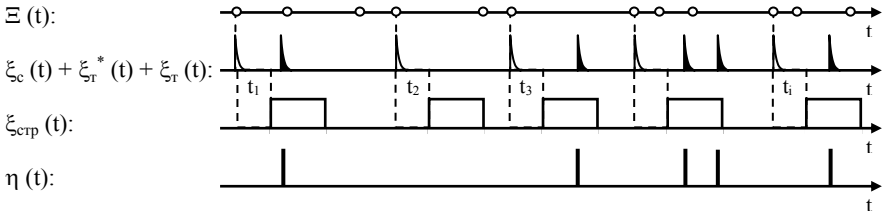


Рис. 3. Принцип обработки парнокоррелированного потока фотоотсчетов, при наличии сигнала (■ – темной; □ – сигнальный импульс фотоотсчета)

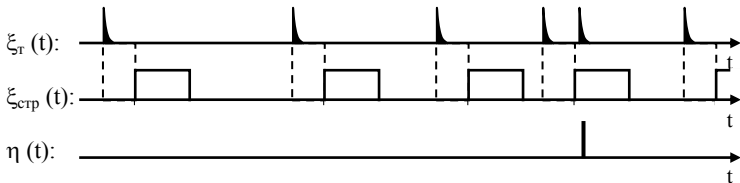


Рис. 4. Принцип обработки парнокоррелированного потока фотоотсчетов, при отсутствии сигнала

Необходимо отметить следующую особенность статистической оценки интенсивности потока сигнальных фотоотсчетов при применении предложенной схемы простейшего обнаружителя. Как известно из [5], обнаружение и оценка интенсивности потока фотоотсчетов, распределенного по закону Пуассона, производится путем их непосредственного подсчета с весовым коэффициентом. В процессе работы простейшего обнаружителя парнокоррелированных импульсов, путем стробирования, из суммарного потока $\xi_c(t) + \xi_m^*(t) + \xi_m(t)$ выделяется поток инициированных темных импульсов $\xi_m^*(t)$ (рис. 3). Таким образом, обнаружение и оценка полезного сигнала осуществляется путем наблюдения потока инициированных темных импульсов фотоотсчетов. В условии отсутствия полезного сигнала (рис. 4), принцип работы простейшего обнаружителя остается прежним, при этом вероятность появления импульсов на его выходе будет мала в силу выполнения условия (2).

Погрешность оценки интенсивности сигнального потока импульсов фотоотсчетов, при его обработке с учетом наличия парных корреляций, будет обусловлена следующими ситуациями:

- отсутствием инициированного темного импульса фотоотсчета

в интервале τ_{cmp} (рис. 3);

- наличием более одного импульса темнового (сигнального) фотоотсчета в интервале τ_{cmp} ;

- появлением иницированного темнового импульса фотоотсчета в интервале $t_i + \tau_{лз}$ или $\tau_{cmp} + \Delta t$;

- появлением одного и более темновых импульсов фотоотсчетов в интервале τ_{cmp} , при отсутствии сигнала (рис. 4).

Относительную погрешность оценки интенсивности потока сигнальных фотоотсчетов можно представить как величину обратную отношению с/ш, и для случая пуассоновского распределения случайного потока импульсов имеющую вид [6]:

$$\delta = \frac{1}{\varphi} = \frac{(\lambda_c + \lambda_m)^{0,5}}{\lambda_c T_n^{0,5}}, \quad (5)$$

где λ_c – интенсивность потока импульсов фотоотсчетов, обусловленных световым потоком; λ_m – интенсивность потока импульсов фотоотсчетов, обусловленных темновым излучением ФК ФЭУ; T_n – время накопления.

С учетом обработки сигналов в предлагаемой схеме простейшего обнаружителя парнокоррелированных импульсов фотоотсчетов запишем (5):

$$\delta = \frac{[\lambda_c P(\tau_{cmp}) + \lambda_m \tau_{cmp} \tau_m^{-1}]^{0,5}}{\lambda_c P(\tau_{cmp}) T_n^{0,5}}. \quad (6)$$

При подстановке (4):

$$\delta = \frac{\left\{ \lambda_c P_0 \left[\exp\left(-\frac{(\tau_{лз} + \tau_{cmp})^2}{2\sigma_o^2}\right) - \exp\left(-\frac{\tau_{лз}^2}{2\sigma_o^2}\right) \right] + \lambda_m k \right\}^{0,5}}{\lambda_c P_0 \left[\exp\left(-\frac{(\tau_{лз} + \tau_{cmp})^2}{2\sigma_o^2}\right) - \exp\left(-\frac{\tau_{лз}^2}{2\sigma_o^2}\right) \right] T_n^{0,5}}, \quad (7)$$

где $\tau_m = 1/\lambda_m$ – средний интервал между соседними импульсами темновых фотоотсчетов; $k = \tau_{cmp}/\tau_m$ – коэффициент пропуска импульсов темновых фотоотсчетов простейшим фильтром.

На рис. 5 представлены графики качественной зависимости величины коэффициента ослабления темновых импульсов фотоотсчетов (рис. 5, а) и относительной погрешности оценки δ (рис. 5, б) от соотношения времени накопления к длительности строба. Анализ данных зависимостей показал наличие явно выраженного минимума относительной погрешности соответствующего выбору оптимальной длительности импульса строба (рис. 5, а).

Наличие такого минимума точностной характеристики обусловлено увеличением вероятности попадания инициированного темнового импульса в интервал $\tau_{стр}$ и уменьшением значения k , по мере возрастания длительности строба. С другой стороны, при дальнейшем увеличении $\tau_{стр}$ наблюдается ухудшение точности измерения интенсивности светового потока, обусловленное попаданием в строб помимо инициированного темнового импульса, импульсов и другого происхождения (сигнальные, темновые).

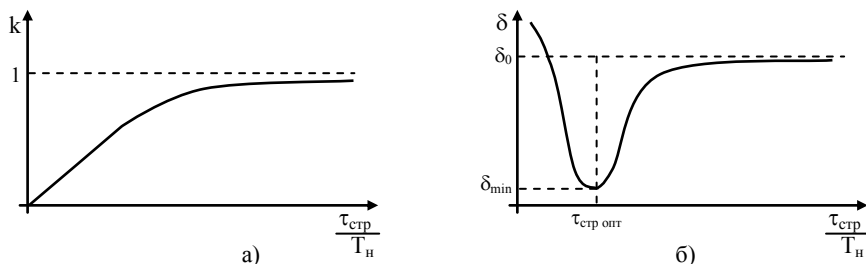


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления и относительной погрешности измерения от соотношения времени накопления к длительности строба

Таким образом, использование предлагаемой схемы простейшего обнаружителя парнокоррелированных импульсов фотоотсчетов, позволит за счет уменьшения относительной погрешности оценки интенсивности слабых световых потоков, использовать данный прибор для точного количественного анализа бактериологического загрязнения окружающей среды при концентрациях биологических примесей как выше, так и ниже критических.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амарин А.П., Воробьев А.А. *Статистические методы в микробиологических исследованиях.* – Л.: Медгиз, 1962. – 180 с.
2. *Автоматический сигнализатор для обнаружения аэрозолей специальных примесей АСП – АСП (ГО 71). ТО.*
3. Якушенко Ю.Г. и др. *Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах.* – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
4. Mandel L/ *Quantum effects in one-photon and two-photon interference // Rev. Mod. Phys.* – 1999. – Vol. 71, No 2. – P. 274 – 282.
5. Москвитин С.В., Стрелков А.И. *Теоретические основы оптической локации.* – Х.: ВИРТА, 1992. – 369 с.
6. Гальярди Р.М., Карп Ш. *Оптическая связь.* – М.: Связь, 1978. – 424 с.

Поступила 27.11.2002

СТРЕЛКОВА Татьяна Александровна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1992 году окончила радиофак ХГУ. Область научных интересов – цифровые методы обработки оптических сигналов, статистическая обработка оптических сигналов.

ЖИЛИН Евгений Игоревич, научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1997

году окончил ХВУ. Область научных интересов – статистическая обработка сигналов в астрономических оптико-электронных системах.

КАЛМЫКОВ Сергей Иванович, доцент ХВУ. В 1979 году окончил Харьковское ВВКНУ. Область научных интересов – оптическая локация, цифровые методы обработки оптических сигналов.
