

В.М. Дубягин

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ФЭУ В ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКОМ СКР-ЛИДАРЕ

Дается алгоритм выбора оптимального режима работы ФЭУ в газоаналитическом СКР-лидаре, обеспечивающий минимальную погрешность измерения концентрации газа. На конкретных примерах показано, как пользоваться этим алгоритмом при выборе температуры и напряжения питания ФЭУ.

Сигналы спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) очень слабы из-за малости сечений рассеяния и концентраций зондируемых газов [1]. Кроме того, действуют помехи — фон неба, лазерно-индуцированное свечение атмосферы [2], темновые шумы ФЭУ [3]. Естественно поэтому увеличивать квантовую эффективность и снижать темновой ток ФЭУ. Однако эти параметры взаимосвязаны и улучшение одного из них может приводить к ухудшению другого [3, 4]. В этом случае может существовать оптимум, зависящий от параметров ФЭУ, лидача и условий зондирования.

В данной статье предлагается оптимизация по непосредственному критерию качества: относительной среднеквадратической ошибке оценки концентрации газа. Некоторые вопросы оптимизации по косвенным критериям — пороговому потоку, информации, отношению сигнал/шум — рассмотрены ранее [15, 3, 2] и здесь не анализируются.

Опишем обычную [1, 2] схему лидача: два частотных приемных канала; 1-й настроен на СКР зондируемого газа, 2-й — на СКР азота; оба работают в счетнофотонном режиме. В 1-м канале помеха сравнима с сигналом и ограничена фоном неба и темновым током, чего можно добиться разумным сужением полосы приема и подбором спектральных приборов [1, 2, 6]. Во 2-м канале помеха пренебрежимо мала по сравнению с сигналом, уровень которого высок из-за высокой концентрации  $M_2$  азота. В каждом канале регистрация осуществляется с зондируемой дальности в стробе  $T$  и между актами в стробе  $T_{ш}$  [2].

Обычно [7] используется оценка концентрации газа вида

$$\hat{M}_1 = M_2 K \sum_{\mu=1}^N (n_{\mu 1} - \kappa n_{\mu 1}^m) / \sum_{\mu=1}^N (n_{\mu 2} - \kappa n_{\mu 2}^m), \quad (1)$$

где  $K$  — калибровочный коэффициент;  $\kappa = T/T_{ш}$ ;  $N$  — количество актов в сеансе;  $n_{\mu i}$  и  $n_{\mu i}^m$  ( $i = 1, 2$ ) — числа фотоотсчета в  $\mu$ -м акте,  $i$ -м канале, стробах  $T$  и  $T^m$ . Ошибка оценки (1) —

$$\delta(\hat{M}_1) \approx (NT)^{-1/2} [\xi_c \eta(U) + z \{\xi_{\phi} \eta(U) + \xi(U)\}]^{1/2} / \xi_c \eta(U), \quad (2)$$

где  $z = 1 + \kappa$ ;  $\xi_c$  и  $\xi_{\phi}$  — средние интенсивности потока фотонов сигнала и фона на входе ФЭУ 1-го канала;  $\eta$  — квантовая эффективность;  $\xi$  — интенсивность потока темновых фотоэлектронов;  $U$  — обобщенный параметр режима работы ФЭУ 1-го канала. В качестве  $U$  могут быть температура, напряжение питания, напряженность внешнего магнитного поля и т. д. [3]. Оптимальное значение  $U_{\text{опт}}$  соответствует минимуму выражения (2).

Рассмотрим два случая:

1.  $U$  — температура [8]. Пусть [3]

$$\eta(U) = a_1 U + b_1, \quad \xi(U) = c_1 U^2 \exp(-d_1/U)$$

(закон Ричардсона);  $a_3, b_1, c_1, d_1$  — коэффициенты. Тогда  $U_{\text{опт}}$  находится решением уравнения

$$z c_1 \exp(-d_1/U) [U(a_1 d_1 + 2b_1) + b_1 d_1] - a_1 (a_1 U + b_1) (\xi_c + z \xi_{\phi}) = 0. \quad (3)$$

При известных значениях  $\eta_1, \eta_2, \xi_1$  и  $\xi_2$  в точках  $U_1$  и  $U_2$  ( $U_1 < U_2$ ) имеем:

$$\begin{aligned} a_1 &= (\eta_2 - \eta_1) / (U_2 - U_1), \quad b_1 = \eta_1 - a_1 U_1, \\ d_1 &= [\ln(\xi_2/\xi_1) + 2 \ln(U_1/U_2)] / (U_1^{-1} - U_2^{-1}), \\ c_1 &= \xi_1 \exp(d_1/U_1) / U_1^2. \end{aligned}$$

Например, при  $T = T_{ш}$ ,  $\xi_c = 1,2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ ,  $\xi_{\phi} = 0,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ ,  $\eta_1 = 0,2$ ,  $\eta_2 = 0,25$ ,  $\xi_1 = 50 \text{ c}^{-1}$ ,  $\xi_2 = 200 \text{ c}^{-1}$ ,  $U_1 = 253 \text{ К}$ ,  $U_2 = 293 \text{ К}$  [3] получаем  $U_{\text{опт}} = 256,3 \text{ К}$ .

2.  $U$  — напряжение питания [9]. Пусть [3]

$$\eta(U) = a_2 \exp(b_2 U), \quad \xi(U) = c_2 U^2 \exp(-d_2/U);$$

$a_2, b_2, c_2, d_2$  — коэффициенты. Тогда  $U_{\text{опт}}$  находится решением уравнения

$$z c_2 \exp(-d_2/U) [2U(1 - b_2 U) + d_2] - a_2 b_2 \exp(b_2 U) (\xi_c + z \xi_{\phi}) = 0 \quad (4)$$

При известных  $\eta_1, \eta_2, \xi_1, \xi_2$  в точках  $U_1, U_2$  ( $U_1 < U_2$ ) имеем

$$b_2 = \ln(\eta_2/\eta_1)/(U_2 - U_1), \quad a_2 = \eta_1 \exp(-b_2 U_1);$$

$d_2$  аналогично  $d_1$ ;  $c_2$  аналогично  $c_1$  ( $c$   $d_2$  вместо  $d_1$ ).

Например, при  $T = T_{ш}$ ,  $\xi_c = 1,2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ,  $\xi_{\phi} = 0,6 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ,  $\eta_1 = 0,2$ ,  $\eta_2 = 0,25$ ,  $\xi_1 = 10 \text{ c}^{-1}$ ,  $\xi_2 = 10^4 \text{ c}^{-1}$ ,  $U_1 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ В}$ ,  $U_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ В}$  [3] получаем  $U_{\text{опт}} = 1621 \text{ В}$ .

Отметим, что выбор  $U_{\text{опт}}$  можно осуществлять и по критерию отношения интенсивностей сигнала к помехам, как в [10], где оптимальное напряжение ФЭУ-79 и ФЭУ-84 определялось по максимуму отношения скорости счета полезных импульсов к темновым. Однако при этом погрешность измерения концентрации газа может не достигать своего минимума.

Итак, предлагаемые критерий и алгоритм оптимизации работы ФЭУ позволяют улучшить точностные качества газоаналитического лидара, выбирать наиболее приемлемый тип и экземпляр ФЭУ и необходимый режим его работы.

Автор благодарен к.ф.-м.н. С.А. Даничкину за идею работы, д.ф.-м.н. Г.Н. Глазову за помощь в ней.

1. Лазерный контроль атмосферы /Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. Одноэлектронные фотоприемники /С.С. Ветохин, И.Р. Гулаков, А.Н. Перцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
4. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов /Под ред. Р.Дж. Киеса. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
5. Климов Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М.: Сов. радио, 1978. 264 с.
6. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности /Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. и др. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
7. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 312 с.
8. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Энергия, 1976. 343 с.
9. Анисимова И.И., Глуховский Б.М. Фотоэлектронные умножители. М.: Сов. радио, 1974.
10. Букин О.А., Столярчук С.Ю., Тяпкин В.А. //ПТЭ. 1982. № 5. С. 1144–1149.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
27 марта 1992 г.

#### V. M. Dubyagin. Optimization of a PMT Operation in a Raman-Lidar Gas Analyzer.

An algorithm for choosing an optimal mode of a PMT operation in a Raman-Lidar gas analyzer that provides for a minimum error of concentration measurements is proposed. It is shown in the paper for some concrete situations how to use this algorithm when choosing the temperature and voltage applied to the PMT.