

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ТУРБИДИМЕТРА

Н. Г. ДЖАВАДОВ¹, Ф. Г. АГАЕВ², Б. Р. ДЖАББАРЛЫ^{3*}¹Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан²Институт космических исследований природных ресурсов,
Баку, Азербайджан³Азербайджанский технический университет,
Баку, Азербайджан
cabbarli.bibixanim@mail.ru

Аннотация. Обсуждаются вопросы оптимизации оптоволоконного времяпролетного оптического турбидиметра и определяются условия его оптимального функционирования в обычном и распределенном вариантах реализации, где критерием оптимизации является чувствительность. Предложена методика оптимизации: для обычного случая получены выражения оптимальной связи между временем измерения на приемном оптоволокне светового сигнала, эмиттированного с передающего оптоволокна с начала момента запуска импульса, и расстоянием между передающими и приемными оптоволоконками; для распределенного варианта реализации турбидиметра определены условия экстремального режима работы. Методика может быть применена в перспективных системах контроля качества воды.

Ключевые слова: турбидиметр, оптоволокно, измерения, оптимизация, времяпролетный принцип

Ссылка для цитирования: Джавадов Н. Г., Агаев Ф. Г., Джаббарлы Б. Р. Методика оптимизации времяпролетного оптического турбидиметра // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 5. С. 423—429. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-423-429.

OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR A TIME-OF-FLIGHT OPTICAL TURBIDIMETER

N. H. Javadov¹, F. G. Agaev², B. R. Jabbarli^{3*}¹National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan²Space Research Institute of Natural Resources,
Baku, Azerbaijan³Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
cabbarli.bibixanim@mail.ru

Abstract. The issues of optimizing a fiber-optic time-of-flight optical turbidimeter are discussed and the conditions for its optimal operation with sensitivity being the optimization criterion, are determined for both conventional and distributed implementations. An optimization technique is proposed: for the usual case, expressions are obtained for the optimal relationship between the measurement time on the receiving fiber of the light signal emitted by the transmitting fiber, counted from the pulse start moment, and the distance between the transmitting and receiving fibers; for the distributed version of the implementation of the turbidimeter, the conditions for the extreme operation mode are determined. The technique can be applied in advanced water quality control systems.

Keywords: turbidimeter, optical fiber, measurements, optimization, time-of-flight principle

For citation: Javadov N. H., Agaev F. G., Jabbarli B. R. Optimization technique for a time-of-flight optical turbidimeter. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 5. P. 423—429 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-423-429.

Введение. Метод лабораторного анализа все еще является наиболее часто используемым методом анализа мутности воды [1]. Этот метод, однако, имеет такие недостатки, как трудоемкость, что объясняется необходимостью взятия проб и доставки их в лабораторию, а также вероятность изменения мутности воды в период доставки пробы и проведения лабораторного

анализа. Очевидно, что выполнение этих операций в режиме реального времени (онлайн) позволяет избежать указанных недостатков. Как показано в работе [2], наиболее распространенным среди онлайн методов является оптический метод анализа. Вместе с тем, согласно [3, 4], при высоких концентрациях взвешенных частиц в воде использование оптических методов не приводит к достаточно точным результатам.

В работе [5] впервые был предложен метод времяпролетного измерения мутности со счетом фотонов с использованием двух оптоволокон. Указанный метод был в дальнейшем развит в работах [6—12], где использован метод времякоррелированного счета фотонов при анализе мутности воды, содержащей частицы формазина в средней концентрации. В этих работах показано, что при малых концентрациях обеспечивается линейность результатов измерений. Развитию этого метода способствовало появление диодных лазеров и сверхбыстрых электронных приборов [13]. Результаты технической реализации времяпролетного метода со счетом фотонов приведены в [14]. Принцип функционирования указанного метода иллюстрируется на рис. 1 (длительность входного и выходного сигналов определяется на уровне 0,5 максимума).

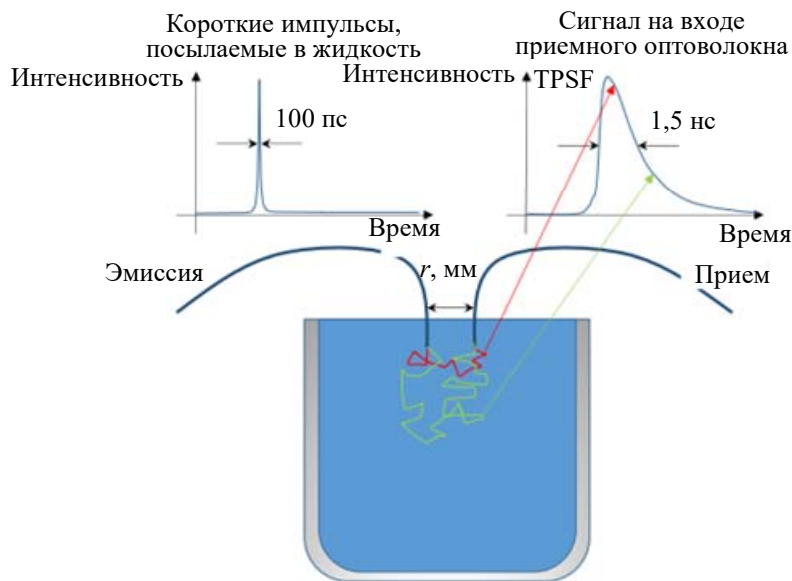


Рис. 1

Принцип работы времяпролетного турбидиметра заключается в следующем [14]. Короткие световые импульсы длительностью 100 пс запускаются в турбидную жидкостную среду посредством оптоволоконного передатчика, на расстоянии r от которого расположен оптоволоконный приемник. При достижении фотонов, запущенных передатчиком приемного оптоволоконна, осуществляется фиксация времени пролета фотона от передатчика к приемнику. Вследствие стохастического характера процесса время пролета фотонов может составлять несколько наносекунд. При этом количество фотонов N , принятых на оптоволоконном приемнике, является функцией времени t и расстояния r между оптоволоконнами:

$$N = (4\pi kt)^{-3/2} \cdot \exp\left(-\mu_a ct - \frac{r^2}{4kt}\right), \quad (1)$$

где k — коэффициент диффузии, определяемый как

$$k = \frac{c}{3(\mu_a + \mu'_s)}; \quad (2)$$

c — скорость света; μ_a — коэффициент абсорбции; μ'_s — коэффициент диффузии.

Регистрация времени прилета отдельных фотонов позволяет построить функцию временного распределения точек (TPSF) в виде гистограммы. При этом, согласно [14], существует определенная регрессионная связь между количеством принятых фотонов, формой кривой

TPSF и концентрацией взвешенных частиц. Согласно экспериментальным исследованиям [14], при $\lambda=650$ нм, частоте повтора 50 МГц и мощности импульсов 1 мВт, где в качестве приемника фотонов использовался лавинный диод id100-ММF50, а $r = 13,5$ мм, после нормализации функции TPSF путем отсечения сигнала отражения от самой среды и учета фотонов в пределах определенного временного интервала, в предположении о стандартной форме функции TPSF (рис. 2) было получено линейное регрессионное уравнение

$$N = a_T M + b_T, \quad (3)$$

где M — концентрация взвешенных частиц; a_T , b_T — регрессионные коэффициенты.

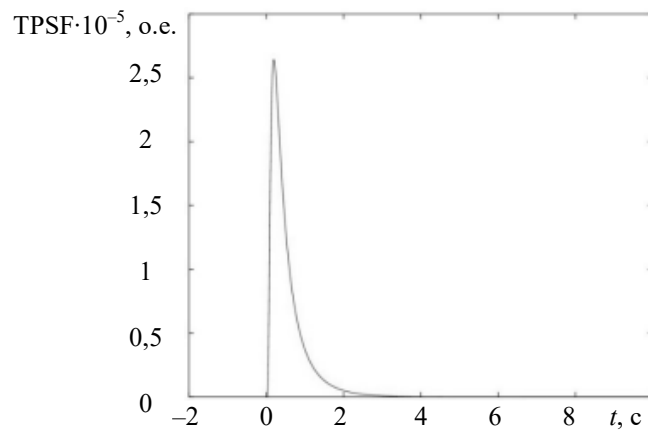


Рис. 2

Вместе с тем с учетом зависимости N от таких аргументов, как M , t и r , актуализируется целесообразность исследования вопросов оптимизации чувствительности времяпролетных оптоволоконных турбидиметров при различных режимах их реализации. В настоящей статье рассматривается возможность оптимизации чувствительности измерений с помощью указанного прибора в нераспределенной и распределенной конфигурациях исполнения.

Предлагаемый метод. Оптимизация времяпролетного турбидиметра, содержащего одну пару приемопередающих оптоволокон. Как следует из вышеизложенного, счету подлежат фотоны, приходящие в фиксированном интервале времени, и определение времени счета может быть автоматизировано. Наряду с этим расстояние между оптоволоконками может быть изменено с помощью механических или пьезомеханических шаговых двигателей.

Задачу оптимизации времяпролетного турбидиметра с одной парой оптоволокон сформулируем следующим образом. С учетом вышеизложенного, в общем случае, показатель N может быть представлен в качестве функции трех переменных: M , t и r , т.е.

$$N = f(t, r, M), \quad (4)$$

тогда комплексная чувствительность определяется как

$$dN = \frac{\delta N}{\delta t} dt + \frac{\delta N}{\delta r} dr + \frac{\delta N}{\delta M} dM. \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда $r = \text{const}$. Согласно (3) имеем

$$\frac{\delta N}{\delta M} = a_T, \quad (6)$$

следовательно, из (5) получим

$$dN = \frac{\delta N}{\delta t} dt + a_T dM \quad (7)$$

или

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\delta N}{\delta t} + a_T \frac{dM}{dt}. \quad (8)$$

Примем $\frac{dM}{dt} = \text{const}$, т.е. концентрация взвешенных частиц не изменяется во времени.

Тогда из (8) получим показатель чувствительности $\frac{dN}{dt}$. Таким образом, можно составить следующую задачу оптимизации: при условиях $r = \text{const}$, $\frac{dM}{dt} = 0$, $\frac{\delta N}{\delta M} = a_T$ необходимо вычислить такое значение t , при котором критерий оптимизации, каковым является $\frac{dN}{dt}$, достигает максимальной величины.

Для решения данной задачи используем метод анализа производных. Из (1) имеем

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{3}{2}(4\pi kt)^{-1} \cdot 4\pi k + \left(-\mu_a c + \frac{r^2}{4kt^2} \right),$$

откуда получаем

$$+\frac{3}{2t} = -\mu_a c + \frac{r^2}{4kt^2}. \quad (9)$$

Из (9) находим

$$3 = -2t\mu_a c + \frac{2r^2}{4kt^2},$$

откуда имеем

$$12kt = -8t^2\mu_a ck + 2r^2 \quad (10)$$

и из (10) окончательно получаем

$$t^2 + \frac{12t}{8\mu_a c} - \frac{2r^2}{8\mu_a ck} = 0. \quad (11)$$

Решение (11) дает

$$t = -\frac{3}{4\mu_a c} + \sqrt{\frac{9}{16\mu_a^2 c^2} + \frac{2r^2}{8\mu_a ck}}.$$

Проверка типа экстремума не проводится, так как эвристически очевидно, что данный экстремум является максимумом.

Оптимизация времяпролетной распределенной структуры турбидиметра, содержащего множество пар приемопередающих оптоволокон. Рассмотрим вариант контроля мутности водоканала, где основной поток воды распределяется на n каналов, в каждом из которых устанавливается пара приемопередающих оптоволокон. Структурная схема времяпролетного турбидиметра распределенной структуры приведена на рис. 3, где БУ — блок управления; УЗ. i — i -й узел турбидиметра; (1-1) — формирователь узкого светового импульса; (1-2) — приемник сигнала приемного оптоволокон; (1-3) — передающее оптоволокон; (1-4) — приемное оптоволокон.

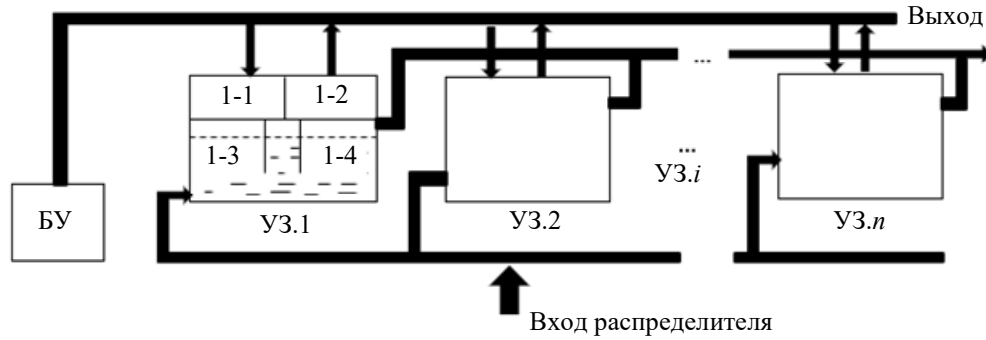


Рис. 3

С учетом (1) количество считанных фотонов в i -м узле турбидиметра определяется как

$$N_i = (4\pi kt_i)^{-3/2} \exp\left(-\mu_a ct_i - \frac{r_i^2}{4kt_i}\right). \quad (12)$$

Для упрощения записи примем следующие обозначения:

$$a_1 = 4\pi k; \quad a_2 = \mu_a c; \quad a_3 = 4k,$$

с учетом которых перепишем выражение (12) как

$$N_i = (a_1 t_i)^{-3/2} \exp\left(-a_2 t_i - \frac{r_i^2}{a_3 t_i}\right). \quad (13)$$

Суммируя (13) по всем i , получаем

$$\sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n (a_1 t_i)^{-3/2} \exp\left(-a_2 t_i - \frac{r_i^2}{a_3 t_i}\right).$$

Далее введем в рассмотрение функцию управления

$$t_i = \varphi(r_i). \quad (14)$$

Условно приняв $n \rightarrow \infty$, выражение (14) перепишем в непрерывной форме:

$$\int_0^{r_m} N(r) dr = \int_0^{r_m} (a_1 \varphi(r))^{-3/2} \exp\left(-a_2 \varphi(r) - \frac{r_i^2}{a_3 \varphi(r)}\right) dr. \quad (15)$$

Правая часть выражения (15) является целевым функционалом, подлежащим минимизации путем выбора оптимального вида функции $\varphi(r)$, т.е. $\varphi(r)_{\text{opt}}$. Физически, целевой функционал (15) определяет сумму всех фотонов, достигающих оптоволоконных приемников, количество которых равно n , где $n \rightarrow \infty$. Согласно правилам функционального анализа [15], для определения $\varphi(r)_{\text{opt}}$ следует вычислить производную интегранта целевого функционала относительно искомой функции. Минимизация целевой функции осуществляется в целях устранения избыточности в распределенной структуре.

Имеем

$$-\frac{3}{2} \varphi(r)^{-1} + \left(-a_2 + \frac{r^2}{a_3 \varphi^2(r)}\right) = 0,$$

откуда получаем

$$a_2 a_3 \varphi^2(r) + \frac{3}{2} a_3 \varphi(r) - r^2 = 0. \quad (16)$$

Решение (16) имеет вид

$$\varphi(r) = -\frac{3}{4a_2} \pm \sqrt{\frac{9}{16a_2^2} + \frac{r^2}{a_2 a_3}}.$$

Дальнейший анализ показывает, что при

$$\varphi(r) > \frac{4r^2}{3a_3}$$

достигается минимум целевого функционала, в противном случае появляется максимум.

Заключение. Проанализированы вопросы оптимизации известной времяпролетной конструкции турбидиметра в обычном и в распределенном вариантах реализации. Получены выражения оптимальной связи между временем измерения светового сигнала, эмитированного с передающего оптоволоконного кабеля с начала момента запуска импульса, и расстоянием между передающими и приемными оптоволоконными кабелями. Для нераспределенного варианта реализации турбидиметра задача оптимизации решена относительно максимума измерительного сигнала, для распределенного варианта определены условия экстремального режима работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McCarthy D. T., Zhang K., Westerlund C., Viklander M., Bertrand-Krjewski J. L., Fletcher T. D., Deletic A. Assessment of sampling strategies for estimation of site mean concentrations of stormwater pollutants // *Water Res.* 2018. N 129. P. 297—304.
2. Rai A. K., Kumar A. Continuous measurement of suspended sediment concentration. Technological advancement and future outlook // *Measurement.* 2015. N 76. P. 209—227.
3. Voichick N., Topping D. J., Griffiths R. E. Technical Note: False low turbidity readings during high suspended sediment concentrations // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2017.
4. Rymaszewicz A., O Sullivan J., Bruen M., Turner J., Lawler D., Cornoy E., Kelly-Quinn M. Measurement differences between turbidity instruments, and their implications for suspended sediment concentration and load calculations: A sensor intercomparison study // *J. Environ. Manag.* 2017. N 199. P. 99—108.
5. Shenoy M. R., Pal B. P., Gupta B. D. Design, Analysis and realization of a turbidity sensor based on collection of scattered light by a fiber-optic probe // *IEEE Sensors Journal.* 2012. N 12. P. 44—50.
6. Wang H., Yang Y., Huang Z., Gui H. Instrument for real-time measurement of low turbidity by using time-correlated single photon counting technique // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2015. N 64. P. 1075—1083.
7. Yang Y., Wang H., Cao Y., Gui H., Liu J., Lu L., Cao H., Yu T., You H. The design of rapid turbidity measurement system based on single photon detection techniques // *Opt. Laser Technol.* 2015. N 73. P. 44—49.
8. Kramer A., Paul T. A. Fiber-optic probes as sensors for diffuse backscattering presented at the optical sensors // *OSA Tech. Digest (Optical Society of America).* 2010. Paper SThD2.
9. Prerana, Shenoy M. R., Pal B. P., Gupta B. D. Design, analysis and realization of a turbidity sensor based on collection of scattered light by a fiber-optic probe // *IEEE Sensors Journal.* 2012. Vol. 12. N 1.
10. Prerana, Shenoy M. R., Pal B. P. Method to determine the optical properties of turbid media // *Appl. Opt.* 2008. Vol. 47. P. 3216—3220.
11. Karthik V., Rao S. S., Shenoy M. R., Prerana, Pal B. L. Determination of optical properties of a turbid medium using fiber optic transmission experiment // *Asian. J. Chem.* 2006. Vol. 18. P. 3344—3347.
12. Alvarenga I., Delgado F. S., Juca M. A., Silveria D. D., Coelho T. V. N., Bessa A. S. A novel experimental set-up for turbidity sensing based on plastic optical fibre // *Journal of Modern Optics.* 2017. Vol. 64, iss. 3. P. 214—217.
13. Carrara L., Fiergolski A. An optical interference suppression scheme for TCSPC flash lidar imagers // *Appl. Sci.* 2019. N 9. P. 2206.
14. Pallares A., Schmitt P., Uhring W. Comparison of time resolved optical turbidity measurements for water monitoring to standard real-time techniques // *Sensors.* 2021. N 21. P. 3136. DOI: 10.3390/s21093136.
15. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

- Сведения об авторах**
- Натиг Гаджи оглы Джавадов** — д-р техн. наук, профессор; Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджанской Республики; генеральный директор; E-mail: journal_anasa@yahoo.com
- Фахрaddin Гюлали оглы Агаев** — д-р техн. наук, профессор; Институт космических исследований природных ресурсов; директор; E-mail: director.tekti@mail.ru
- Бибиханым Равайт гызы Джаббарлы** — докторант; Азербайджанский технический университет, кафедра спец. технологий; E-mail: cabbarli.bibixanim@mail.ru

REFERENCES

1. McCarthy D.T., Zhang K., Westerlund C., Viklander M., Bertrand-Krjewski J.L., Fletcher T.D., Deletic A. *Water Res.*, 2018, no. 129, pp. 297–304.
2. Rai A.K., Kumar A. *Measurement*, 2015, no. 76, pp. 209–227.
3. Voichick N., Topping D.J., Griffiths R.E. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, October 2017, DOI:10.5194/hess-2017-528.
4. Rymaszewicz A., OSullivan J., Bruen M., Turner J., Lawler D., Cornoy E., Kelly-Quinn M. *J. Environ. Manag.*, 2017, no. 199, pp. 99–108.
5. Shenoy M.R., Pal B.P., Gupta B.D. *IEEE Sens. J.*, 2012, no. 12, pp. 44–50.
6. Wang H., Yang Y., Huang Z., Gui H. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2015, no. 64, pp. 1075–1083.
7. Yang Y., Wang H., Cao Y., Gui H., Liu J., Lu L., Cao H., Yu T., You H. *Opt. Laser Technol.*, 2015, no. 73, pp. 44–49.
8. Kramer A., Paul T.A. *OSA Tech. Digest (CD)*, Optical society of America, 2010, paper SThD2.
9. Prerana, Shenoy M.R., Pal B.P., Gupta B.D. *IEEE Sensors J.*, 2012, no. 1(12), January.
10. Prerana, Shenoy M.R., Pal B.P. *Appl. Opt.*, 2008, Vol. 47, pp. 3216–3220.
11. Karthik V., Rao S.S., Shenoy M.R., Prerana, Pal B.L. *Asian. J. Chem.*, 2006, vol. 18, pp. 3344–3347.
12. Alvarenga I., Delgado F.S., Juca M.A., Silveria D.D., Coelho T.V.N., Bessa A.S. *Journal of Modern Optics*, 2017, no. 3(64), pp. 214–217.
13. Carrara L., Fiergolski A. *Appl. Sci.*, 2019, no. 9, pp. 2206.
14. Pallares A., Schmitt P., Uhring W. *Sensors*, 2021, no. 21, pp. 3136, <https://doi.org/10.3390/s21093136>.
15. Elsgolts L.E. *Differentsial'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye* (Differential Equations and the Calculus of Variations), Moscow, 1974, 432 p. (in Russ.)

Data on authors

- Natig H. Javadov** — Dr. Sci., Professor; National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic; General Manager; E-mail: journal_anasa@yahoo.com
- Fakhraddin G. Agaev** — Dr. Sci., Professor; Space Research Institute of Natural Resources; Director; E-mail: director.tekti@mail.ru
- Bibikhanym R. Jabbarli** — Doctoral Student; Azerbaijan Technical University, Department of Special Technologies; E-mail: cabbarli.bibixanim@mail.ru

Received 06.10.2022; approved after reviewing 22.11.2022; accepted for publication 20.03.2023.