

УДК 543.275.08.021;621.391.2

Волоконно-оптическая система мониторинга счетчиков частиц

Титов А. А.¹, Гарипов В. К.^{1,*},

[*garvad11@gmail.com](mailto:garvad11@gmail.com)

Костромин М. А.¹

¹Московский технологический университет,
Москва, Россия

В настоящее время в связи с потеплением климата усиливается процесс опустынивания территорий, на который оказывает влияние ветровая эрозия почв и явление сальтации, при которой под действием ветра происходит поднятие частиц песка и почвы. Для исследования этого явления используются оптические счетчики частиц, определяющие их размеры и концентрацию. Однако, поскольку на сальтацию оказывает влияние рельеф местности, направление ветров, структура почвы, необходимо на исследуемой территории располагать несколько счетчиков, информацию с которых можно собирать в едином центре управления. Предложена волоконно-оптическая система, содержащая лазер, счетчики частиц, блоки фотоприемников, соединенные между собой оптическими волокнами, переключатель, аналого-цифровой преобразователь и компьютер. Оценены параметры системы. В результате проведенной работы была разработаны схемы волоконно-оптической системы и счетчика частиц. Выбраны параметры оптических волокон, рассчитана оптическая схема счетчика частиц, определен диапазон измерения размеров частиц и допустимое максимальное расстояние между счетчиками. Оценено быстродействие системы. Разработана методика расчета отношения сигнал-шум с учетом модуляционного шума и показано, что при определенных параметрах системы этим влиянием можно пренебречь. Таким образом, предложенная волоконно-оптическая система, позволяет обеспечить мониторинг счетчиков частиц, расположенных на значительных расстояниях.

Ключевые слова: лазер, счетчики частиц, блоки фотоприемников, оптические волокна, переключатель, аналого-цифровой преобразователь, компьютер

Введение

В настоящее время в связи с потеплением климата усиливается процесс опустынивания территорий, на который оказывает влияние ветровая эрозия почв и явление сальтации, при которой под действием ветра происходит поднятие частиц песка и почвы. Для исследования этого явления используются оптические счетчики частиц, определяющие их размеры и концентрацию [1]. Однако, поскольку на сальтацию оказывает влияние рельеф местности, направление ветров, структура почвы, необходимо на исследуемой территории располагать несколько счетчиков, информацию с которых можно собирать в едином цен-

тре управления. Использование известных электрических систем связи датчиков с компьютером затруднительно, поскольку в полевых условиях сложно подвести электропитание к каждому датчику. Кроме того, высокие температуры окружающей среды и запыленность накладывает жесткие требования на электронные блоки системы связи, что усложняет и удорожает систему. В связи с этим предлагается осуществлять мониторинг счетчиков частиц с помощью разработанной волоконно-оптической системы. Однако, в современных счетчиках частиц не предусмотрена их стыковка с оптическими волокнами. Поэтому нами разработан счетчик с учетом указанного требования. Использование оптических волокон для мониторинга позволит обеспечить широкую полосу пропускания, высокую помехозащищенность, малый вес и объем системы, сравнительно низкую стоимость [2, 6-11].

Постановка задачи и ее решение

Для создания волоконно-оптической системы мониторинга необходимо обеспечить с помощью оптических волокон подвод излучения ко всем счетчикам от одного лазера и подачи оптического сигнала от счетчиков на фотоприемники, расположенные в центре управления. В связи с этим была разработана структурная схема волоконно-оптической системы, которая приведена на рис. 1, а также оптическая схема счетчика, приведенная на рис. 2. Волоконно-оптическая система (рис.1) содержит лазер 1, последовательно соединенные через оптические волокна 3 счетчики 2 частиц, блоки 4 фотоприемников, каждый из которых содержит фотодиод и усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, переключатель 5, аналого-цифровой преобразователь 6, компьютер 7. Вход каждого счетчика 2, кроме первого счетчика, соединен с выходом 1 предыдущего счетчика, а выход 2 счетчика соединен с входом соответствующего блока 4 фотоприемников.

Рис.1. Структурная схема волоконно - оптической системы

Система работает следующим образом. Пучок от лазера 1 вводится в оптическое волокно 3 и поступает на вход счетчика 2. Свет от оптического волокна 13с помощью линз 8 и 9 фокусируется в измерительный объем, в который через трубку 10 подаются частицы. Измерительный объем находится в переднем фокусе линзы 11. Перед линзой 10 установлено оптическое волокно 14, которое собирает прямое излучение и подает его в следующий счетчик. Рассеянный на частицах свет собирается линзой 11 и параллельным пучком подается на линзу 12, которая проецирует пучок в оптическое волокно 15 и далее свет проходит по нему в блок 4 фотоприемников. Выходы блоков 4 фотоприемников соединены с входами переключателя 5.

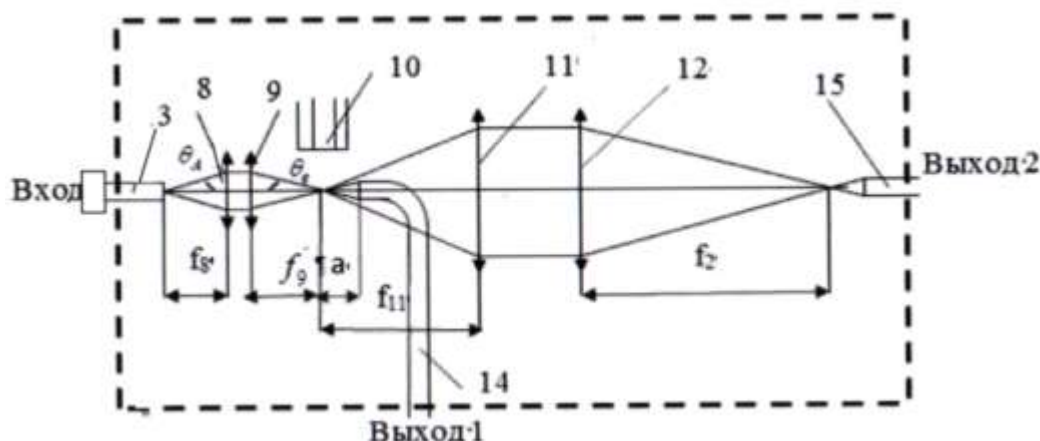


Рис.2. Оптическая схема счетчика частиц

По командам с компьютера 7 переключатель 5 подключает через аналого-цифровой преобразователь каждый из каналов измерения к компьютеру для обработки информации.

Следует отметить, что отличие оптической схемы счетчика 2 от известных счетчиков состоит в том, что ввод излучения в счетчик и вывод рассеянного на частицах излучения производится оптическими волокнами, а прямое излучение не задерживается световой ловушкой, а вводится в оптическое волокно и может быть использовано для освещения других счетчиков. Все это накладывает особенности на расчет оптической схемы счетчика.

Оценим параметры счетчика, а затем и всей системы при использовании предложенного метода. В счетчике частиц (рис. 2) необходимо определить размер пучка света в измерительном объеме, а также определить допустимые углы ввода света в оптические волокна. При расчете примем следующие допущения: оптическую систему будем рассматривать как идеальную и бесконечно тонкую; числовые апертуры оптических волокон одинаковы, углы выхода и входа света в оптическое волокно достаточно малы, поэтому примем $\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta$; под диаметром оптического волокна будем понимать диаметр его сердцевины.

Определим диаметр пучка излучения в измерительном объеме. Оптическое волокно 13 расположено в переднем фокусе линзы 8, поэтому линза 9 будет освещаться параллель-

ным пучком и фокусировать его в измерительный объем. Диаметр пучка излучения в фокусе можно определить исходя из теории дифракции [3]:

$$d_{из} = \frac{1,22 \lambda f'_9}{d}, \quad (1)$$

Здесь d - диаметр пучка, падающего на линзу 9;

λ - длина волны лазера;

f'_9 - фокусное расстояние линзы 9.

Расходимость излучения на выходе оптического волокна 13 определяется его числовой апертурой [3]. Тогда диаметр пучка излучения на линзе 8 можно найти по выражению:

$$d \approx 2 f_8 \sin \theta_A, \quad (2)$$

Здесь $\sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ - числовая апертура оптического волокна 13;

n_1 - показатель преломления сердцевины оптического волокна;

n_2 - показатель преломления оболочки оптического волокна;

f_8 - фокусное расстояние линзы 8.

С учетом (2), выражение (1) примет вид

$$d_{из} = \frac{0,61 \lambda f'_9}{f_8 \sin \theta_A} \quad (3)$$

При этом нужно учесть, что для распространения света по оптическому волокну 14 нужно обеспечить условие $\sin \theta_e \leq \sin \theta_A$. Используя выражение (3) и рис. 2 найдем угол θ_e :

$$\sin \theta_e \approx \frac{\sin \theta_A f_8}{f'_9}. \quad (4)$$

Определим расстояние a (рис. 2) с учетом (3) и (4):

$$a = \frac{(d_{14} - d_{из}) f'_9}{2 \sin \theta_A f_8}. \quad (5)$$

Здесь d_{14} - диаметр волокна 14.

Определим углы рассеяния света на крупных частицах, используя для этого теорию дифракции. Под крупными частицами понимают частицы, радиус которых превосходит длину волны излучения. Положим, что частица имеет сферическую форму. Тогда угол рассеяния света для первого максимума дифракции дается выражением [3]:

$$\sin \varphi_1 = \frac{1,62 \lambda}{d_q}. \quad (6)$$

Здесь λ - длина волны света;

d_q - диаметр частицы.

Из выражения (4) следует, что при изменении диаметра частицы угол рассеяния света будет меняться в широких пределах. Чтобы рассеянный свет от частиц попадал в линзу 11, а после линзы 12 вошел в оптическое волокно 15 необходимо выполнить условия:

$$\sin \frac{\varphi_{1\min}}{2} \approx \frac{0,81\lambda}{d_{q\max}} > \sin \theta_n; \sin \theta_{12} \leq \sin \theta_A. \quad (7)$$

Здесь $d_{q\max}$ - максимальный диаметр частицы;

$\sin \theta_n$ - апертура волокна с учетом оболочки;

$\sin \theta_{11}, \sin \theta_{12}$ - апертуры линз 11 и 12.

Определим теперь рассеянную на частице мощность излучения, поступающую на фотоприемник 4. Используя результаты работы [4], можно получить следующее выражения для мощности на фотоприемнике:

$$P_4 = \frac{P_o \tau_o e^{-\alpha_{\text{пог}} l} \sin^2(\theta_{11}) \eta d_q^2}{d_{из}^2}, \quad (8)$$

Здесь P_o - мощность излучения лазера;

τ_o - потери света в линзах счетчика частиц и в оптических волокнах, не связанных с длиной волокна (апертурные потери, френелевские потери, потери на границе сердечник-оболочка, потери в оптических разъемах);

τ_l - потери света в материале оптического волокна;

η - коэффициент дифракции света на частице.

$\alpha_{\text{пог}}$ - коэффициент поглощения света в волокне;

l - длина оптического волокна.

Следует отметить, что длина оптического волокна для каждого счетчика будет складываться из длин волокон, подводящих свет к счетчику, и из длины волокна, идущего от счетчика до фотоприемника.

Оценим параметры устройства, используя полученные выше выражения. Выберем тип оптических волокон. В настоящее время используются кварцевые и полимерные волокна. Кварцевые волокна обладают низкими потерями света и малой дисперсией, что позволяет использовать их для передачи информации с высокой скоростью и на большие расстояния. Однако потери в них сильно зависят от длины волны излучения.

Так если в первом окне прозрачности [2] (длина волн 0,6-0,8мкм) потери равны 2-3 дБ/км, то в диапазоне длин волн 1550-1620 нм они составляют 0,2-0,3 дБ/км. Диаметр сердцевины таких волокон составляет 5-60 мкм, а диаметр оболочки 125мкм. Полимерные волокна обладают значительно меньшей стоимостью, но имеют высокие потери света (порядка 200дБ/км) и диаметр волокна порядка 1мм. Учитывая высокие потери света в полимерных волокнах, выберем в качестве оптических волокон кварцевые волокна [2] с апертурой 0,2. Поскольку существующие счетчики частиц используют лазерный диод с длиной волны излучения 650нм и мощностью излучения 50мВт, то потери света в оптическом волокне составят около 3дБ/км. Определим параметры линз счетчика частиц. Зададимся

диаметром пучка в измерительном объеме порядка 10 мкм для измерения крупных частиц порядка нескольких микрометров. Используя указанные выше параметры из (3) получим

$$\frac{f_9'}{f_8} = 5. \text{ Для обеспечения полученного соотношения выберем линзы 8 и 9 диаметром 5мм и}$$

фокусными расстояниями 10мм и 50мм. Выберем волокно с диаметром сердцевины 60мкм и оболочки 125 мкм. Тогда из выражения (5) найдем расстояние, $a=625\text{мкм}$.

Определим теперь максимальный и минимальный размеры частиц, которые можно измерить данным методом. Поскольку при больших частицах углы дифракции света малы, то при определении максимального размера частицы в выражении (8) нужно учесть, что часть дифрагированного пучка будет перекрываться волокном 14. Определим эти потери, учитывая размеры волокна с его оболочкой. Тогда выражение (8) можно преобразовать к виду:

$$P_4^* \approx \frac{P_o \tau_o e^{-\alpha_{noc} l} \sin^2(\theta_{11}) \eta d_{ч\max}^2 (1 - \frac{d_o d_{ч\max}}{0,81\pi a \lambda})}{d_{из}^2}. \quad (9)$$

Здесь d_o - диаметр волокна с оболочкой.

Тогда полагая в (10) $(1 - \frac{d_o d_{ч\max}}{0,81\pi a \lambda}) = 0,1$ найдем отсюда при указанных выше параметрах $d_{ч\max} = 7,4\text{мкм}$.

При малых размерах частиц, когда углы рассеяния света много больше числовой апертуры оптического волокна, расчет можно вести по выражению (8). Минимальный размер частицы, который можно рассчитать по теории дифракции, можно найти из выражения (6) при выбранной длине волны 0,65 мкм и $\sin \varphi_1 = 1 - d_{ч\min} = 1\text{мкм}$. Тогда диапазон измерения составит 1-7,4 мкм. Он характерен для мелких частиц аэрозоля в ветровом потоке. Определим теперь токи на выходе фотоприемника в указанном диапазоне измерения. Для этого можно использовать выражения (8) и (9), умножив их на чувствительность фотоприемника.

В качестве фотоприемников выберем используемые в волоконно-оптических линиях связи фотодиоды, имеющие чувствительность 0,8А/Вт и темновой ток 1нА.

Учитывая, что данная система может быть использована для мониторинга счетчиков, расположенных на значительных расстояниях друг от друга, выберем длину волокон для самого удаленного счетчика порядка $l=2 \cdot 1,5\text{км}=3 \text{ км}$. Остальные параметры выберем согласно работе [4] соответственно $\sin \theta_{11}=0,4$, $\tau_o=0,5$. Апертуру линзы 12 выберем из условия (5) равной 0,2. Для первого максимума дифракции коэффициент дифракции равен 0,0175 [3].

Подставляя указанные выше параметры в (8) и (9), получим $I_{ч\max}=3600\text{нА}$, $I_{ч\min}=560\text{нА}$, что значительно превосходит темновой ток фотоприемника.

Однако нужно учесть, что пучок излучения на выходе каждого счетчика будет промодулирован составляющей, обусловленной рассеянием света на частицах, что может сказаться на величине шума на выходе фотоприемника. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Мощность излучения на первом выходе каждого счетчика будет равна:

$$P_i = P_{i-1} - P_{i-1}K_i, \quad i=1,2,3\ldots \quad (10)$$

Здесь P_{i-1} и P_i - мощности излучения на первом выходе соответственно предыдущего и последующего счетчиков;

K_i - коэффициент передачи i -го счетчика.

При этом будем рассматривать только амплитудные значения этого коэффициента, а в выражении (10) рассмотрим только второе слагаемое, так как оно определяет сигнал на фотоприемнике. Умножив второе слагаемое на чувствительность фотоприемника, найдем токи на выходах фотоприемников первых трех счетчиков:

$$I_1 = P_0 S K_1$$

$$I_2 = P_0 S (K_2 + K_1 K_2);$$

$$I_3 = P_0 S (K_3 + K_1 K_3 + K_2 K_3 + K_1 K_2 K_3) \quad (11)$$

Здесь S - чувствительность фотоприемника.

В выражении (11) первое слагаемое характеризует полезный сигнал, а остальные - шум. Найдем отношение сигнал-шум, взяв отношение первого слагаемого к остальным:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_3 = \frac{1}{K_1 + K_2 + K_1 K_2} \quad (12)$$

Ниже покажем, что $K_i \ll 1$ и зависит от размера частиц. Поэтому в выражениях сигнал-шум для разных счетчиков слагаемыми с произведениями коэффициентов можно пренебречь. Учитывая, что K_i - случайная величина, выражение сигнал-шум для любого i -го счетчика можно приближенно представить в следующем виде:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i \approx \frac{1}{\sqrt{\sum_1^i K_i^2}} \quad (13)$$

Используя выражения (8) и (9), найдем максимальные и минимальные значения коэффициентов передачи:

$$K_{\max} \approx \frac{\tau_o e^{-\alpha_{\text{noc}} l} \sin^2(\theta_{11}) \eta d_{\text{ч max}}^2 \left(1 - \frac{d_6 d_{\text{ч max}}}{0,81 \pi a \lambda}\right)}{d_{\text{из}}^2}, \quad (14)$$

$$K_{\min} = \frac{\tau_o e^{-\alpha_{\text{noc}} l} \sin^2(\theta_{11}) \eta d_{\text{ч}}^2}{d_{\text{из}}^2}. \quad (15)$$

Подставляя в (14) и (15) значения указанных выше параметров, получим $K_{\max} = 9 \cdot 10^{-5}$, $K_{\min} = 1,4 \cdot 10^{-5}$.

Рассчитаем отношение сигнал-шум по выражению (13), например, для десяти счетчиков. Положим, что максимальные и минимальные частицы поступают в счетчики с равной вероятностью. Тогда подставляя $K_{\max}$ и $K_{\min}$ в (13), получим $(\frac{S}{N})_{10} = 4908$. Такое отношение сигнал-шум говорит о том, влияние модуляционного шума незначительно.

Оценим быстродействие системы. Скорость движения частиц через измерительный объем обычно находится в пределах (0,1-10) м/с [4]. Тогда при выбранном диаметре сфокусированного пучка равным 10 мкм и максимальной скорости пролета частиц 10 м/с длительность импульса составит $T=10^{-6}$ с и соответственно ширина его спектра будет равна $f=1/T=1$ МГц. Для выбранного многомодового волокна диаметром 60 мкм коэффициент широкополосности равен 200 МГц · км [2], что позволяет обеспечить длину линии связи не менее 200 МГц · км / 1 МГц = 200 км.

Заключение

В результате проведенной работы были разработаны схемы волоконно-оптической системы и счетчика частиц.

Выбраны параметры оптических волокон, рассчитана оптическая схема счетчика частиц, определен диапазон измерения размеров частиц и допустимое максимальное расстояние между счетчиками. Оценено быстродействие системы.

Разработана методика расчета отношения сигнал-шум с учетом модуляционного шума и показано, что при определенных параметрах системы этим влиянием можно пренебречь.

Таким образом, предложенная волоконно-оптическая система, позволяет обеспечить мониторинг счетчиков частиц, расположенных на значительных расстояниях.

Список литературы

1. Горчаков Г.И., Титов А.А., Бунтов Д.В. Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Доклады Академии Наук. Геофизика. 2009. Т. 424, № 1. С. 102-106. DOI: [10.1134/S1028334X0901019X](https://doi.org/10.1134/S1028334X0901019X)
2. Родина О.В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство: учеб. пособие / под ред. О.В. Родиной. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 401 с.
3. Янг М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы: пер. с англ. М.: Мир, 2005. 541 с.
4. Титов А.А., Мирсаитов С.Ф. Измерение размеров и скорости частиц аэрозоля // Метрология. 2013. №1. С. 18-23.
5. Шуберт Е.Ф. Светодиоды: пер. с англ. / под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
6. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.

7. Джексон Р.Г. Новейшие датчики: пер. с англ. / под ред. В.В. Лучинина. М.: Техносфера, 2007. 384с. [Jackson R.G. Novel sensors and sensing. Institute of Physics publishing, Bristol and Philadelphia. 2004. 394 p.].
8. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000. 268 с.
9. Kaminow I.P., Tingye Li. Optical Fiber Telecommunications IV-A. In 2 vols. Vol. IV-A. SanDiego: AcademicPress, 2002. 876 p.
10. Иоргачёв Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Трендз, 2002. 282 с.
11. [Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы](#). М.: СОЛОН-Р, 2000. 237 с.
12. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. М.: Радио и связь, Горячая линия-Телеком, 2006. 96 с.
13. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика. Теория и практика: пер. с англ. М.: Кудиц-Образ, 2006. 320 с.
14. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник: пер. с англ. / под ред. Е.Л. Свинцова. М.: Техносфера, 2005. 527с. [Friden J. Handbook of modern sensors. Springer New York, 2004. 527 p. DOI: [10.1007/b97321](https://doi.org/10.1007/b97321)]
15. Трофимова Т.И. Основы физики. Волновая и квантовая оптика: учеб. пособие. М.: Кнорус, 2015. 215 с.
16. Чернин С.М. Многоходовые системы в оптике и спектроскопии. М.: Физматлит, 2010. 240 с.
17. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. М.: МАИ, 2012. 167 с.
18. Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 304 с.
19. Денисов А.Н. Проектирование волоконно-оптических линий связи. Интернет-издание, 2006. 75 с.
20. Белкин М.Е. Компоненты волоконно-оптических систем: учеб. пособие. М.: МГТУ МИРЭА, 2010. 112 с.
21. Семёнов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: ДМК Пресс, 2007. 632 с.
22. Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. М.: СОЛОН-Р, 2001. 237 с.
23. Фриман Р.Л. Волоконно-оптические системы связи: пер. с англ. / под ред. Н.Н. Слепова. М.: Техносфера, 2003. 590 с.

Fiber -Optic Monitoring System of Particle Counters

A.A. Titov¹, V.K. Garipov^{1,*},
M.A. Kostromin¹

[*garvad11@gmail.com](mailto:garvad11@gmail.com)

¹Moscow Technological University, Moscow, Russia

Keywords: laser, counters of particles, blocks of photodetectors, optical fibers, switch, analog-digital converter, computer

The article considers development of a fiber-optic system to monitor the counters of particles. Presently, optical counters of particles, which are often arranged at considerable distance from each other, are used to study the saltation phenomenon. For monitoring the counters, can be used electric communication lines.

However, it complicates and raises the price of system Therefore, we offered a fiber-optic system and the counter of particles, free from these shortcomings. The difference between the offered counter of particles and the known one is that the input of radiation to the counter and the output of radiation scattering on particles are made by the optical fibers, and direct radiation is entered the optical fiber rather than is delayed by a light trap and can be used for lighting the other counters thereby allowing to use their connection in series.

The work involved a choice of the quartz multimode optical fiber for communication, defining the optical fiber and lenses parameters of the counter of particles, and a selection of the radiation source and the photo-detector.

Using the theory of light diffraction on a particle, a measuring range of the particle sizes has been determined. The system speed has been estimated, and it has been shown that a range of communication can reach 200km.

It should be noted that modulation noise of counters of particles connected in series have the impact on the useful signal. To assess the extent of this influence we have developed a calculation procedure to illustrate that with ten counters connected in series this influence on the signal-to-noise ratio will be insignificant.

Thus, it has been shown that the offered fiber-optic system can be used for monitoring the counters of particles across the desertified territories.

References

1. Gorchakov G.I., Titov A.A., Buntov D.V. Parameters of the lower layer of saltation over desert territories. *Doklady Akademii Nauk*, 2009, vol. 424, no. 1, pp. 102-106. (English version of journal: *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 424, iss. 1, pp. 90-94. DOI: [10.1134/S1028334X0901019X](https://doi.org/10.1134/S1028334X0901019X)).
2. Rodina O.V. *Volokonno-opticheskie linii svyazi. Prakticheskoe rukovodstvo: ucheb. posobie* [Fiber-optical communication lines. Practical guide: tutorial]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2012. 401p. (in Russian).
3. Young M. *Optics and lasers: Including fiber optics and optical waveguides*. Springer-Verlag, 1986. (Russ. ed.: Young M. *Optika i lazery, vklyuchaya volokonnuyu optiku i opticheskie volnovody*. Moscow, Mir Publ., 2005. 541 p.).
4. Titov A.A., Mirsaitov S.F. Measuring of sizes and speeds of aerosol particles. *Metrologiya = Metrology*, 2013, no. 1, pp. 18-23. (in Russian).
5. Schubert E.F., Gessmann T., Kim J.K. *Light Emitting Diodes*. New York, John Wiley & Sons, 2001. (Russ. ed.: Schubert E.F.; Yunovich A.E., ed. *Svetodiody*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 496 p.).
6. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskie volokna dlya linii svyazi* [Optical fibers for lines of communication]. Moscow, LESARart Publ., 2003. 288p. (in Russian).
7. Jackson R.G. *Novel sensors and sensing*. Institute of Physics publishing, Bristol and Philadelphia. 2004. 394 p. (Russ. ed.: Jackson R.G. *Noveishie datchiki*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 384 p.).
8. Ubaidullaev R.R. *Volokonno-opticheskie seti* [Fiber-optical networks]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2000. 268p. (in Russian).
9. Kaminow I.P., Tingye Li. *Optical Fiber Telecommunications IV-A*. In 2 vols. Vol. IV-A. SanDiego, AcademicPress, 2002. 876 p.
10. Iorgachev D.V., Bondarenko O.V. *Volokonno-opticheskie kabeli i linii svyazi* [Fiber-optical cables and lines of communication]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2002. 282 p. (in Russian).
11. [Sklyarov O.K. *Sovremennye volokonno-opticheskie sistemy peredachi, apparatura i elementy*](#) [Modern fiber-optical systems of transmission, equipment and elements]. Moscow, SOLON-R Publ., 2000. 237 p. (in Russian).
12. Kotyuk A.F. *Datchiki v sovremennykh izmereniyakh* [Sensors in modern measurements]. Moscow, Radio i svyaz', Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2006. 96p. (in Russian).
13. Bailey D., Wright E. *Practical Fiber Optics*. Oxford, Newnes, 2003. 267 p. (Russ. ed.: Bailey D., Wright E. *Volokonnaya optika. Teoriya i praktika*. Moscow, Kudits-Obraz Publ., 2006. 320 p.).
14. Friden J. *Handbook of modern sensors*. Springer New York, 2004. 527 p. DOI: [10.1007/b97321](https://doi.org/10.1007/b97321) (Russ. ed.: Friden J. *Sovremennye datchiki. Spravochnik*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 527 p.).

15. Trofimova T.I. *Osnovy fiziki. Volnovaya i kvantovaya optika: ucheb. posobie* [Fundamentals of physics. Wave and quantum optics: tutorial]. Moscow, Knorus Publ., 2015. 215 p. (in Russian).
16. Chernin S.M. *Mnogokhodovye sistemy v optike i spektroskopii* [Multiple-pass systems in optics and spectroscopy]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 240 p. (in Russian).
17. Busurin V.I., Gorshkov B.G., Korobkov V.V. *Volokonno-opticheskie informatsionno-izmeritel'nye sistemy* [Fiber-optical information and measuring systems]. Moscow, MAI Publ., 2012. 167 p. (in Russian).
18. Tsukanov V.N., Yakovlev M.Ya. *Volokonno-opticheskaya tekhnika. Prakticheskoe rukovodstvo* [Fiber-optical technics. Practical guide]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2014. 304 p. (in Russian).
19. Denisov A.N. *Proektirovanie volokonno-opticheskikh linii svyazi* [Design of fiber-optical communication lines]. Internet-izdanie Publ., 2006. 75 p. (in Russian).
20. Belkin M.E. *Komponenty volokonno-opticheskikh sistem: ucheb. posobie* [Components of fiber-optical systems: tutorial]. Moscow, MGTU MIREA Publ., 2010. 112 p. (in Russian).
21. Semyonov A.B. *Volokonno-opticheskie podsistemy sovremennykh SKS* [Fiber-optical sub-systems of modern SCS]. Moscow, DMK Press Publ., 2007. 632 p. (in Russian).
22. Sklyarov O.K. *Sovremennye volokonno-opticheskie sistemy peredachi, apparatura i elementy* [Modern fiber-optical systems of transmission, equipment and elements]. Moscow, SOLON-R Publ., 2001. 237p. (in Russian).
23. Freeman R.L. *Fiber-Optical Systems for Telecommunications*. Wiley-Interscience, 2002. 416p. (Russ. ed.: Freeman R.L. *Volokonno-opticheskie sistemy svyazi*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003. 590 p.).