



# Снижение уровня ошибок при передаче высокочастотных оптических сигналов в условиях турбулентной атмосферы за счет использования статистики уровня приемного сигнала

М. Ю. Керносов, С. Н. Кузнецов, Б. И. Огнев, А. А. Паршин  
АО «Мостком», Рязань, Россия

Анализ распределения вероятности принимаемого сигнала в беспроводной оптической линии связи в различных условиях показывает существенную зависимость уровня ошибок в канале связи от уровня стабилизации мощности на приемнике. Существенное отличие статистики уровня принимаемого сигнала от известных распределений не позволяет использовать их для аппроксимации вероятностей больших отклонений уровня сигнала от среднего значения. Предложен алгоритм оценки оптимальности и корректировки уровня стабилизации приемной мощности на основе оценки статистики распределения. Согласно экспериментальным данным предложенный алгоритм существенно снижает уровень ошибок в атмосферном канале связи.

**Ключевые слова:** laser communication terminal, free-space optics, атмосферные оптические линии связи, беспроводные оптические коммуникации, стабилизация мощности на оптическом приёмнике, ошибки в беспроводном канале связи

# Reduction of the Level of Errors in the Transmission of High-Frequency Optical Signals in a Turbulent Atmosphere Due to the Use of Statistics of the Received Signal Level

M. Yu. Kernosov, S. N. Kuznetsov, B. I. Ognev, A. A. Parshin  
Mostcom JSC, Ryazan, Russia

Analysis of the distribution probability of the received signal in a wireless optical communication line under various conditions shows a significant dependence of the error level in the communication channel on the level of power stabilization at the receiver. The significant difference between the statistics of the received signal level and the known distributions does not allow using them to approximate the probabilities of large deviations of the signal level from the mean value. An algorithm for evaluating the optimality and adjusting the level of stabilization of the receiving power based on the distribution statistics is proposed. According to experimental data, the proposed algorithm significantly reduces the level of errors in the atmospheric communication channel.

**Keywords:** laser communication terminal, free-space optics, atmospheric optical communication lines, wireless optical communications, power stabilization at an optical receiver, errors in a wireless communication channel

Статья поступила: 10.07.2020  
Принята к публикации: 24.08.2020

Received on: 10.07.2020  
Accepted on: 24.08.2020



## ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие беспроводных оптических коммуникаций, обладающих определенными преимуществами по сравнению с другими беспроводными решениями, в частности, происходит в сторону увеличения скорости передачи данных [1, 2]. В последнее время особенно актуальными оптические беспроводные решения становятся в высокоскоростных коммуникациях низколетящих (LEO) космических аппаратов с Землей [3-5]. Рост скорости передачи данных однозначно связан со снижением динамического диапазона приемных устройств. С другой стороны, динамический диапазон приемника напрямую определяет уровень ошибок, вызванных турбулентностью атмосферы [6, 7]. В связи с этим оптимизация параметров приема-передающего канала становится особенно важной.

В данной работе исследование возможностей оптимизации проводилось с использованием оборудования беспроводной оптической связи Artolink, предназначенного для работы на скоростях 10 Гбит/с [8].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из перспективных направлений развития беспроводных оптических систем связи является построение беспроводного канала для прозрачного соединения высокоскоростных стыков пользовательского оборудования. Это позволяет легко масштабировать беспроводное оптическое решение в направлении увеличения скорости передачи [9, 10]. С другой стороны, уменьшение динамического диапазона приемника, сопутствующее увеличению скорости передачи (в основном со стороны нижней границы принимаемых мощностей – чувствительности), с учетом воздействия атмосферы требует выбора оптимального значения среднего уровня сигнала на приеме из атмосферы – точки стабилизации (ТС). Как правило, на скоростях передачи 10 Гбит/с приемник (на основе PIN диода) имеет динамический диапазон около 21 дБ (при чувствительности -18 дБм и мощности насыщения 3 дБм). С учетом возможного уровня колебаний приемного сигнала в атмосфере в диапазоне, сопоставимом с динамическим диапазоном приемника [11], выбор ТС определяет уровень цифровых ошибок в канале. Для обоснованного выбора ТС необходимо знать статистику значений принимаемой мощности ( $I_{пр}$ ) с тем, чтобы минимизировать количество событий выхода  $I_{пр}$  за пределы динамического диапазона приемника.

## INTRODUCTION

The active development of wireless optical communications, which have certain advantages over other wireless solutions, in particular, is towards an increase in the data transmission rate [1, 2]. Optical wireless solutions have recently become especially relevant in high-speed communications of low-flying (LEO) spacecraft with the Earth [3-5]. The increase in the data transfer rate is unambiguously associated with a decrease in the dynamic range of the receiving devices. On the other hand, the dynamic range of the receiver directly determines the level of errors caused by atmospheric turbulence [6, 7]. In this regard, the optimization of the parameters of the transmit/receive channel becomes especially important.

In this paper, the study of optimization possibilities was carried out using Artolink wireless optical communication equipment designed to operate at speeds of 10 Gbps [8].

## PROBLEM STATEMENT

One of the promising directions in the development of wireless optical communication systems is the creation of a wireless channel for transparent connection of high-speed interfaces of user equipment. This makes it easy to scale the wireless optical solution in the direction of increasing the transmission speed [9, 10]. On the other hand, a decrease in the dynamic range of the receiver, accompanying an increase in the transmission rate (mainly from the side of the lower boundary of the received powers – sensitivity), taking into account the influence of the atmosphere, requires the selection of the optimal value of the average signal level at the reception from the atmosphere, the stabilization point (SP). Typically, at 10 Gbps, the receiver (based on the PIN diode) has a dynamic range of about 21 dB (at a sensitivity of -18 dBm and a saturation power of 3 dBm). Taking into account the possible level of oscillations of the receiving signal in the atmosphere in a range comparable to the dynamic range of the receiver [11], the choice of the SP determines the level of digital errors in the channel. For a reasonable choice of the SP, it is necessary to know the statistics of the values of the received power ( $I_{in}$ ) in order to minimize the number of events when  $I_{in}$  goes beyond the dynamic range of the receiver.

## MODEL ASSESSMENT

At the first stage, a model assessment of the level of possible errors was carried out for various levels of signal instability and SP values. According to [12], the probability function of the receiving signal level when

## МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА

На первом этапе была проведена модельная оценка уровня возможных ошибок для различных уровней нестабильности сигнала и значений ТС. Согласно [12] функция вероятности уровня приемного сигнала при прохождении лазерного излучения через атмосферу близка к логнормальному закону. Поэтому для модельной оценки были проведены расчеты уровня возможных ошибок для логнормального распределения.

Плотность вероятности логнормального распределения уровня принимаемой мощности относительно среднего значения описывается выражением:

$$P(I_n) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_n \cdot I_n}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(I_n)}{2\sigma_n} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $I_n$  – принимаемая мощность излучения, нормированная на среднее значение;  $\sigma_n$  – среднеквадратичное отклонение принимаемой мощности излучения, отнесенное к ее среднему значению.

Величина  $\sigma_n$ , служащая мерой нестабильности приемного сигнала, определяется по формуле:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1 \dots N} \frac{(I_{\text{пп}i} - I_{\text{ср}})^2}{I_{\text{ср}}^2}}{N}}, \quad (2)$$

где  $i$  – порядковый номер измерения в выборке;  $I_{\text{пп}i}$  – значение принимаемой мощности в  $i$ -м измерении;  $I_{\text{ср}}$  – среднее значение принимаемой мощности;  $N$  – количество значений в выборке.

Уровень ошибок  $P_{\text{err}}$  определялся как сумма вероятностей ошибок из-за снижения уровня сигнала ниже уровня чувствительности и превышения уровня насыщения приемника согласно формуле:

$$P_{\text{err}} = P_{\text{Sens}} + P_{\text{Sat}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{Sens}}$  – вероятность событий с  $I_{\text{пп}}$  ниже уровня чувствительности приемника;  $P_{\text{Sat}}$  – вероятность событий с  $I_{\text{пп}}$  выше уровня насыщения приемника.

$P_{\text{Sens}}$  и  $P_{\text{Sat}}$  рассчитывались по следующим формулам:

$$P_{\text{Sens}} = \int_0^{I_{\text{min}}} P(I_n) \cdot dI_n, \quad (4)$$

$$P_{\text{Sat}} = \int_{I_{\text{max}}}^{\infty} P(I_n) \cdot dI_n, \quad (5)$$

the laser radiation passes through the atmosphere is close to the lognormal law. Therefore, for a model assessment, the level of possible errors was calculated for a lognormal distribution.

The probability density of the lognormal distribution of the received power level relative to the mean value is described by the expression:

$$P(I_n) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_n \cdot I_n}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(I_n)}{2\sigma_n} \right)^2}, \quad (1)$$

where  $I_n$  is the received radiation power, normalized to the average value;  $\sigma_n$  is the root-mean-square deviation of the received radiation power, referred to its average value.

The value  $\sigma_n$  serving as a measure of the instability of the receiving signal is determined by the formula:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1 \dots N} \frac{(I_{\text{in}i} - I_{\text{avg}})^2}{I_{\text{avg}}^2}}{N}}, \quad (2)$$

where  $i$  is the ordinal number of the measurement in the sample;  $I_{\text{in}i}$  is the value of the received power in the  $i$ -th dimension;  $I_{\text{avg}}$  the average value of the received power;  $N$  is the number of values in the sample.

The error level  $P_{\text{err}}$  was determined as the sum of the error probabilities due to a decrease in the signal level below the sensitivity level and an excess of the receiver saturation level according to the formula:

$$P_{\text{err}} = P_{\text{Sens}} + P_{\text{Sat}}, \quad (3)$$

where  $P_{\text{Sens}}$  is the probability of events with  $I_{\text{rec}}$  below the receiver sensitivity level;  $P_{\text{Sat}}$  the probability of events with  $I_{\text{rec}}$  above the saturation level of the receiver.

$P_{\text{Sens}}$  and  $P_{\text{Sat}}$  were calculated using the following formulas:

$$P_{\text{Sens}} = \int_0^{I_{\text{min}}} P(I_n) \cdot dI_n, \quad (4)$$

$$P_{\text{Sat}} = \int_{I_{\text{max}}}^{\infty} P(I_n) \cdot dI_n, \quad (5)$$

where  $I_{\text{min}}$  is the receiver sensitivity level;  $I_{\text{max}}$  is the receiver saturation power level.

The calculations were performed for the  $\sigma_n$  levels at which  $P_{\text{err}}$  takes values from  $10^{-16}$  to  $10^{-2}$ . The target range of  $P_{\text{err}}$  was reached at  $\sigma_n$  values from 0.1 to 0.5.

где  $I_{\min}$  – уровень чувствительности приемника;  $I_{\max}$  – уровень мощности насыщения приемника. Расчеты проводились для уровней  $\sigma_n$ , при которых  $P_{\text{err}}$  принимает значения от  $10^{-16}$  до  $10^{-2}$ . Заданный диапазон  $P_{\text{err}}$  достигался при значениях  $\sigma_n$  от 0,1 до 0,5.

С учетом того, что середина динамического диапазона приемника соответствует -6 дБм, ТС задавалась в диапазоне от -10 до -2 дБм, соответствующем уровням входного сигнала от 100 до 600 мкВт. Зависимости  $P_{\text{err}}$  от ТС для различных значений  $\sigma_n$  представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, модельная зависимость ТС имеет оптимальное значение с точки зрения минимизации потерь. Оптимальное значение ТС находится в районе -5 дБм, что отличается от средней точки динамического диапазона приемника -6 дБм. Уровень  $P_{\text{err}}$  для оптимальных значений ТС сильно зависит от уровня нестабильности сигнала, которая в основном определяется дистанцией и погодными условиями на трассе.

### СПОСОБ И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений использовался комплект оборудования Artolink M1-10GE, состоящий из двух терминалов, каждый из которых включает в себя оптический блок (ОБ) – приемопередатчик, блок интерфейсов (БИ) и соединительный кабель.

Программное обеспечение (ПО) оборудования позволяет менять значение ТС, которое автоматически поддерживается на приемнике каждого терминала путем регулировки выходной мощности оптического усилителя (ОУ) противоположного приемопередатчика с использованием служебного канала между терминалами. Значения  $I_{\text{пр}}$  с частотой 100 Гц записывались на компьютер, подключенный к стыку мониторинга состояния оборудования на БИ. Оптико-электронная схема приемо-передающего тракта приведена на рис. 2.

Основными факторами, вызывающими колебания уровня сигнала на приеме, согласно [13], являются турбулентность атмосферы и апертурное ограничение пучка в плоскости приема. Для анализа статистики  $I_{\text{пр}}$  были проведены следующие серии измерений:

- на дистанции 620 м в ночное и дневное время;
- на дистанции 620 м в ночное и дневное время с апертурным ограничением (диафрагмами 20 мм – из-за расходимости излучения это соответствует полностью раскрытым апертурам на расстоянии 3000 м) на одном тер-

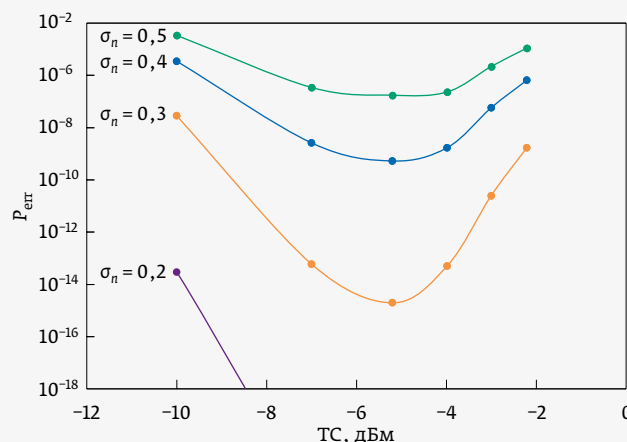


Рис. 1. Зависимости  $P_{\text{err}}$  от ТС для различных значений

Fig. 1. Dependences of  $P_{\text{err}}$  on SP for different values

Taking into account that the middle of the receiver's dynamic range corresponds to -6 дБм, the SP was set in the range from -10 to -2 дБм, corresponding to input signal levels from 100 to 600  $\mu\text{W}$ . The dependences of  $P_{\text{err}}$  on SP for various values are shown in Fig. 1.



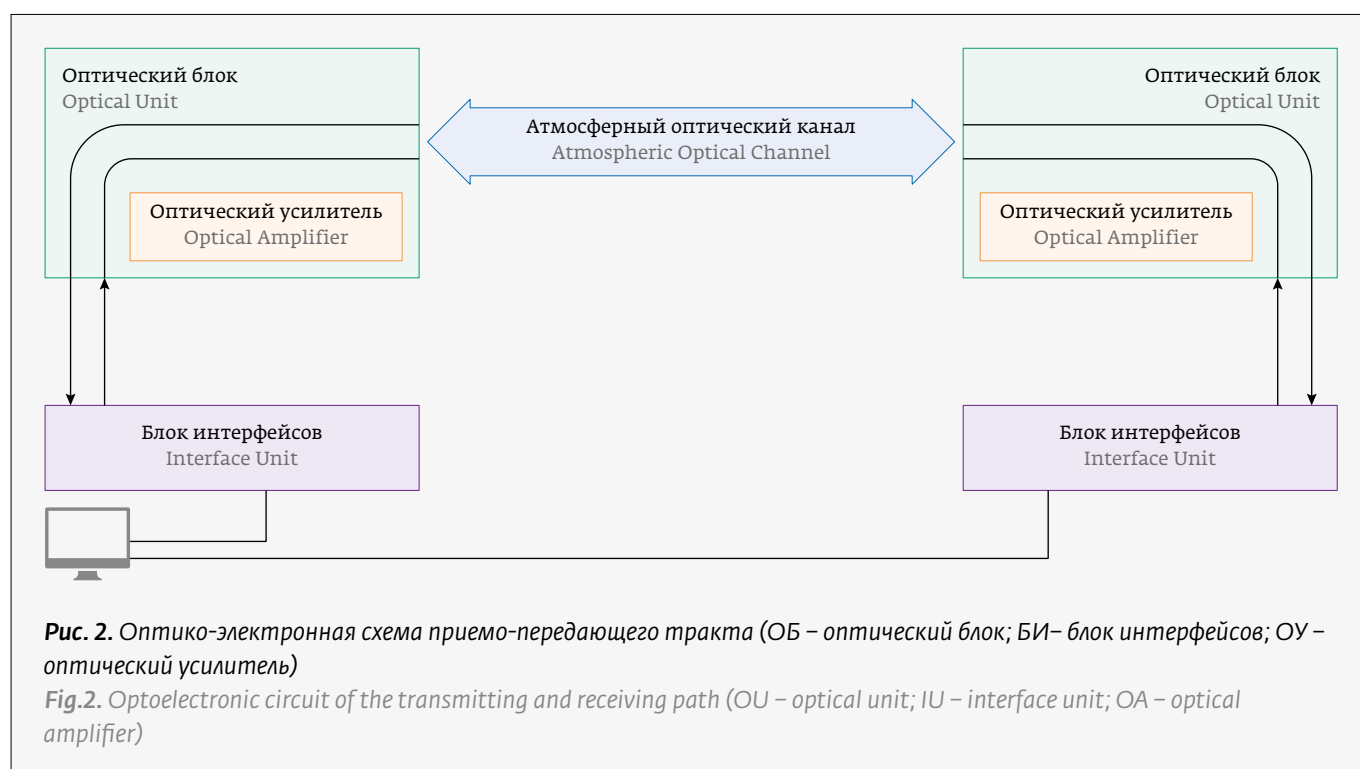
**For us, optical fiber is as pure as nature.**

**WE LOVE PURE RESULTS**  
Fishing but also the fiber draw process require concentration, time and reflection. The purity of nature as well as high quality telecom fiber technology are found here in Finland. Latest improvements result in 3000 m/min - speed and precision for your success.

rosendahlnextrom.com

KINIL GROUP

MADE IN EUROPE



минале, соответствующем дистанции около 3000 м;

- на дистанции 1600 м в дневное время;
- на дистанции 2800 м в дневное время.

Для того чтобы избежать влияния изменения погодных условий за время измерений, запись каждого сеанса проводилась в течение 10 минут, что позволяло фиксировать около 130 000 значений  $I_{пр}$ .

Следует отметить, что во время всех сеансов измерений работали подсистемы оборудования: автонаведение; подстройка направления связи на максимум принимаемого сигнала на каждом приеме-передатчике; стабилизация уровня принимаемого сигнала путем подстройки мощности оптического усилителя. Таким образом, измерения проводились в условиях полнофункциональной работы оборудования, что, собственно, и было необходимо, так как целью работы являлся анализ и оптимизация рабочего варианта оборудования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 3 представлена динамика изменения  $I_{пр}$  в мкВт для ТС 350 мкВт на дистанциях 620, 1600 и 2800 м. Как видно, глубина провалов значений  $I_{пр}$  относительно ТС растет с увеличением дистанции и достигает 10 дБ на 2800 м. Кроме того, наблюдаются выбросы  $I_{пр}$  и в сторону увеличения ее значений.

As seen from Fig. 1, the model dependence of the SP has an optimal value from the point of view of minimizing losses. The optimal SP value is in the region of -5 dBm, which differs from the midpoint of the receiver dynamic range of -6 dBm. The  $P_{err}$  level for optimal SP values is highly dependent on the level of signal instability, which is mainly determined by the distance and weather conditions on the track.

## METHOD AND CONDITIONS OF MEASUREMENT

For measurements, a set of Artolink M1-10GE equipment was used, consisting of two terminals, each of which includes an optical unit (OU) – a transceiver, an interface unit (IU) and a connecting cable.

The software of the equipment allows to change the SP value, which is automatically maintained at the receiver of each terminal by adjusting the output power of the optical amplifier (OA) of the opposite transceiver using the service channel between the terminals. The  $I_{in}$  values with a frequency of 100 Hz were recorded on a computer connected to the interface for monitoring the state of the equipment on the IU.

The optoelectronic diagram of the transmitting and receiving path is shown in Fig. 2.

According to [13], the main factors causing fluctuations in the signal level at the reception are atmospheric turbulence and aperture limitation of

Для определения фактической зависимости уровня ошибок в канале передачи от значения ТС на дистанции 2800 м были проведены измерения зависимости уровня битовой ошибки (BER) в канале связи от значения ТС. Результаты измерений приведены на рис. 4. Явно, что ТС явно имеет оптимальное значение, с точки зрения минимизации потерь. Кроме того, изменение ТС всего на 50 мкВт приводит к изменению BER на порядок, что говорит об актуальности задачи оптимизации ТС.

Выбор оптимального значения ТС зависит от характера статистики распределения значений  $I_{пр}$ , вид которой, согласно [14], существенно влияет на уровень BER.

Для количественной оценки характера статистики распределения значений  $I_n$  по всем выборкам значений  $I_n$ , полученным в сериях измерений, были рассчитаны значения величины нормированного среднеквадратичного отклонения  $\sigma_n$  и коэффициенты асимметрии ( $K_a$ ) распределения выборки. Расчет величины  $\sigma_n$  проводился по формуле (2). Для вычисления  $K_a$  была использована следующая формула:

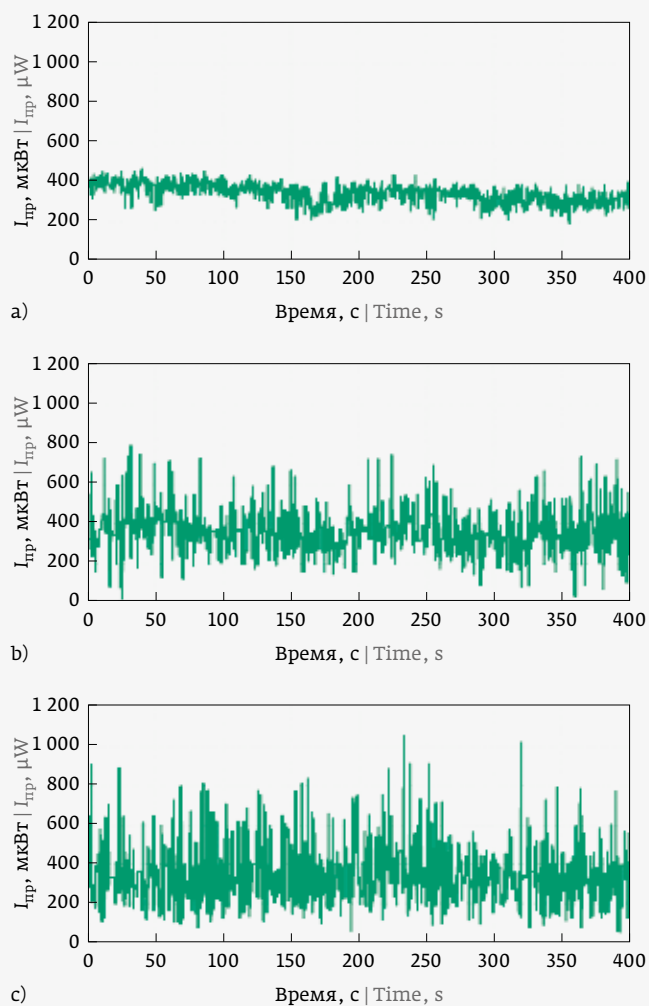
$$K_a = \frac{\sum_{i=1..N} (I_{прi} - I_{ср})^2}{N \cdot \sigma_n^3}. \quad (6)$$

Результаты расчетов параметров статистики для различных условий приведены в таблице. Их результаты показывают следующее:

- нестабильность приемного сигнала существенно зависит от турбулентности атмосферы, увеличиваясь в утреннее время и снижаясь в ночное время;
- $\sigma_n$  возрастает с увеличением дистанции, что, как было показано в [9], в основном определяется ростом апертурного ограничения приемного пучка;
- $K_a$  во всех сериях измерений отличен от нуля и иногда меняет знак при переходе от линейной шкалы  $I_{пр}$  к логарифмической.

Ненулевые значения  $K_a$  и смена знака говорят о промежуточном характере функции плотности распределения  $I_n$ . Так, при малом воздействии турбулентности атмосферы и апертурного ограничения распределение ближе к нормальному, при усилении указанных воздействий – к логнормальному.

Таким образом, результаты измерений показали: качественная аппроксимация реального распределения вероятностей известными



**Рис. 3.** Динамика  $I_{пр}$  на дистанциях: а) 620 м, б) 1600 м; в) 2800 м

**Fig. 3.** Dynamics of  $I_{пр}$  at distances: а) 620 m, б) 1600 m; в) 2800 m

the beam in the receiving plane. To analyze the statistics of  $I_{rec}$ , the following series of measurements were carried out:

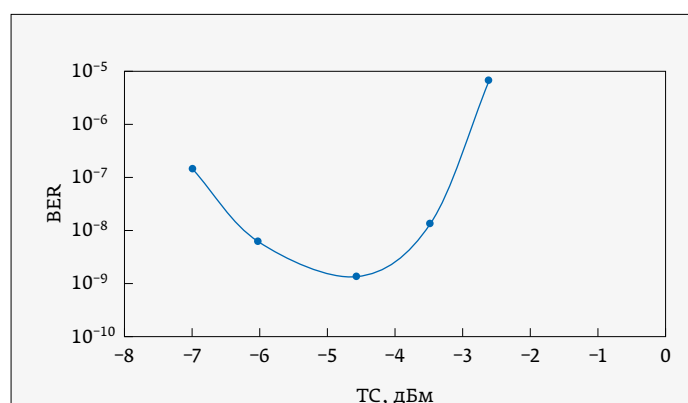
- at a distance of 620 m at night and in the daytime;
- at a distance of 620 m at night and in the daytime with aperture limitation (20 mm diaphragms – due to radiation divergence, this corresponds to fully opened apertures at a distance of 3,000 m) at one terminal corresponding to a distance of about 3,000 m;
- at a distance of 1,600 m in the daytime;
- at a distance of 2,800 m in the daytime.

In order to avoid the influence of changes in weather conditions during the measurements, each session was recorded for 10 minutes, which made it

Параметры  $\sigma_n$  и  $K_a$  для выборок значений  $I_{пр}$ , полученных в ходе измерений  
 $\sigma_n$  and  $C_a$  parameters for samples of  $I_{in}$  values obtained during measurements

Терминал Terminal	Условия   Conditions		$\sigma_n$	$K_a$   $C_a$
	Дистанция, м Distance, m	Время Time		
1	620	День   Day	0,082	-0,19
		Ночь   Night	0,093	0,6
2		День   Day	0,117	-0,38
		Ночь   Night	0,115	0,037
1	620 диафрагма 20 мм	День   Day	0,36	0,27
		Ночь   Night	0,15	0,05
2	620	День   Day	0,11	0,15
		Ночь   Night	0,06	-0,55
1	1 600	День   Day	0,24	0,48
2			0,25	0,74
1			0,39	1,01
2			0,35	1

видами распределений не представляется возможной. Кроме того, следует учитывать тот факт, что в оценке ошибок канала связи основную роль играют интегралы периферийных частей функции вероятности. В связи с этим, для решения задачи оптимизации ТС потребовалась методика оценки периферийных частей распределения, которая в оборудовании должна работать в режиме реального времени.



**Рис. 4.** Зависимость BER в канале связи от ТС на дистанции 2 800 м

**Fig.4.** Dependence of BER level in the communication channel from the SP at a distance of 2,800 m

possible to record about 130,000  $I_{in}$  values.

It should be noted that during all measurement sessions the following subsystems of the equipment worked: autotracking; adjustment of the direction of communication to the maximum of the received signal on each transceiver; stabilization of the received signal level by adjusting the power of the optical amplifier. Thus, the measurements were carried out under the conditions of fully functional operation of the equipment, which, in fact, was necessary, since the purpose of the work was to analyze and optimize the working version of the equipment.

## MEASUREMENT RESULTS

“Fig. 3 shows the  $I_{in}$  values dynamics in  $\mu W$  for a SP of 350  $\mu W$  at distances of 620, 1,600 and 2,800 m.

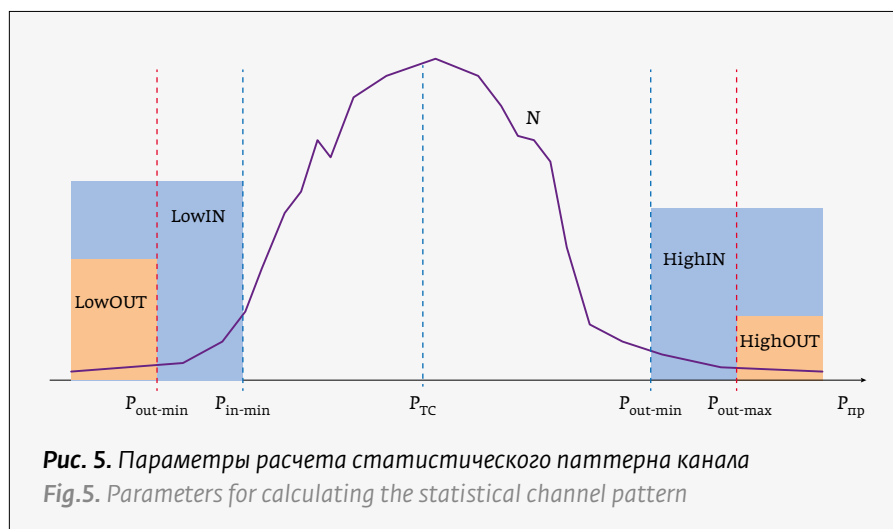
As it can be seen, the depth of the falls of the values of  $I_{in}$  relative to the SP grows with an increase in the distance and reaches 10 dB at 2,800 m towards increasing its values.

To determine the actual dependence of the error level in the transmission channel on the SP value at a distance of 2,800 m, measurements were made of the dependence of the bit error level (BER) in the communication channel on the SP value. The measurement results are shown in Fig. 4.

It is clear that the SP clearly has an optimal value in terms of minimizing losses. In addition, a change in SP by only 50  $\mu W$  leads to a change in BER level by an order of magnitude, which indicates the relevance of the SP optimization problem.

The choice of the optimal SP value depends on the nature of the distribution statistics of  $I_{in}$  values, the form of which, according to [14], significantly affects the BER level.

To quantify the nature of the statistics of the distribution of  $I_{in}$  values for all samples of  $I_{in}$  values obtained in the series of measurements, the values of the normalized root-mean square deviation  $\sigma_n$  and the asymmetry coefficient ( $C_a$ ) of the distribution of the sample were calculated. The calculation of the  $\sigma_n$  value was carried out according to the formula (2). The following formula was used to calculate  $C_a$ :



$$C_a = \frac{\sum_{i=1..N} (I_{in_i} - I_{avg})^3}{N \cdot \sigma_n^3}. \quad (6)$$

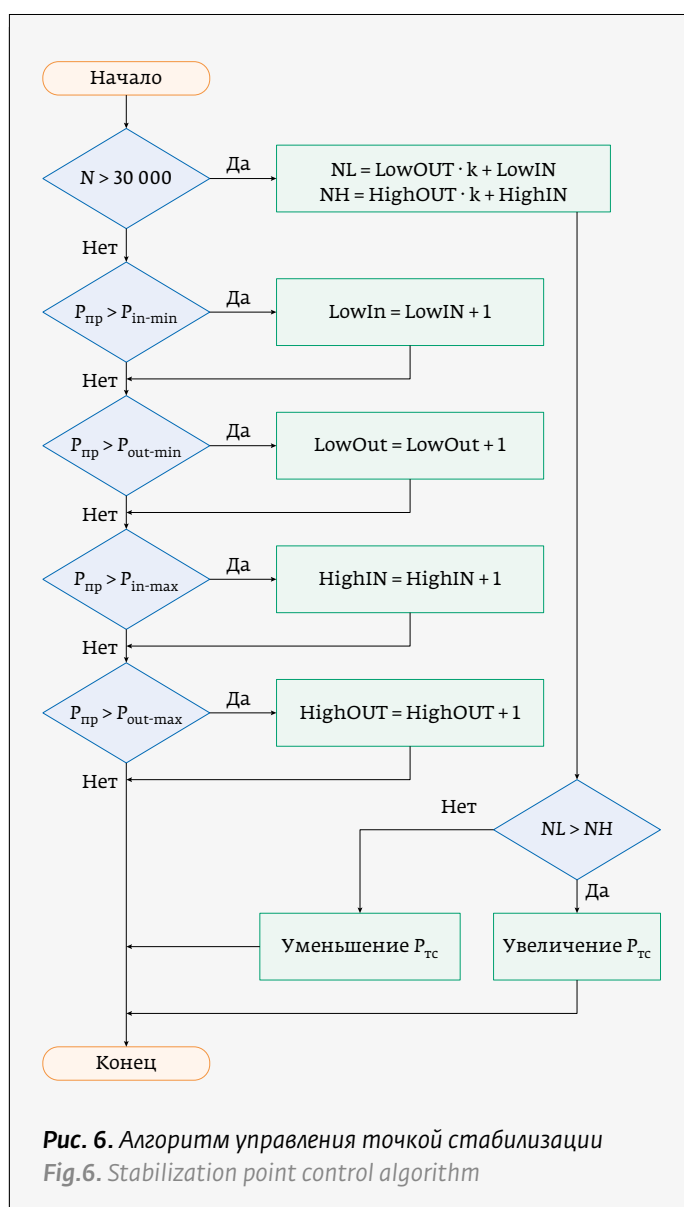
The results of calculating the parameters of statistics for various conditions are shown in the table. Their results show the following:

- the instability of the receiving signal significantly depends on the turbulence of the atmosphere, increasing in the morning and decreasing at night;

Было предложено решение, позволяющее оценить периферийные части указанной функции, поскольку уровень ошибок полностью определяется долей событий выхода  $I_{pp}$  за пределы динамического диапазона приемника. Таким образом, подстройка ТС должна минимизировать количество указанных случаев. В связи с тем, что частота измерения  $I_{pp}$  в оборудовании составляет 100 Гц на уровне ошибок  $10^{-9}$ , для гарантированной регистрации выхода за границы динамического диапазона потребуется  $10^7$  с, что соответствует периоду около 2800 часов.

Для получения разумного периода подстройки ТС достаточно определить статистику достижения  $I_{pp}$  на определенном удалении от границ динамического диапазона. Однако, ввиду их удаленности от границ динамического диапазона для учета формы «хвостов» функции вероятности (ФВ), необходимо учесть их форму. Для этого был предложен способ оценки периферийных частей ФВ на основе «статистического паттерна» канала – экспериментально определяемого статистического образа краев вероятностного распределения  $I_{pp}$ . Для расчета паттерна использовались 4 параметра. Они представляют собой доли измерений со значениями  $I_{pp}$ , лежащими соответственно ниже и выше определенных границ (отстоящих на определенном расстоянии от границ динамического диапазона приемника). На рис. 5 представлен пример экспериментального распределения количества измерений в зависимости от  $I_{pp}$ , а также границы расчета значений  $I_{pp}$  для определения статистического паттерна канала.

В качестве нижних границ LowOUT и LowIN были выбраны значения  $P_{in}$ , превышающие



чувствительность приемника на 3 и 6 дБ (в 2 и в 4 раза) соответственно. В качестве верхних границ HighOUT и HighIN –  $I_{пр}$ , меньшие мощности насыщения приемника на 3 и 6 дБ соответственно.

Для проверки предложенного метода подстройки ТС был реализован алгоритм изменения ТС в зависимости от результата анализа статистического паттерна, полученного за 1 минуту работы оборудования.

Статистика собирается за  $N=30\,000$  измерений приемной мощности с использованием следующих счетчиков:

- LowIN – счетчик измерений мощности меньше внутренней границы минимума;
- LowOUT – счетчик измерений мощности меньше внешней границы минимума;
- HighIN – счетчик измерений мощности больше внутренней границы максимума;
- HighOUT – счетчик измерений мощности больше внешней границы максимума.

По результатам сбора статистики рассчитываются следующие параметры:

- $N_L$  – результат статистики минимальной мощности.
- $N_H$  – результат статистики максимальной мощности.
- $P_{ТС}$  – значение точки стабилизации принимаемой мощности.

Алгоритм управления ТС представлен на рис. 6. После сбора статистики проводится анализ статистического паттерна, который заключается в сравнении сумм количеств событий  $N_L$  и  $N_H$ , определенных в соответствии с выражениями:

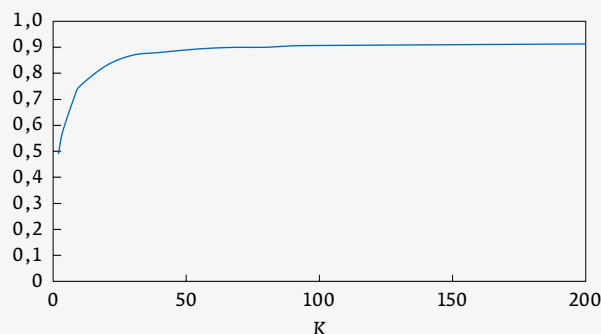
- $\sigma_n$  increases with increasing distance, which, as shown in [9], is mainly determined by an increase in the aperture limitation of the receiving beam;
- $C_a$  in all series of measurements is nonzero and sometimes changes sign when going from a linear scale  $I_{in}$  to a logarithmic one.

Nonzero values of  $C_a$  and a change in sign indicate an intermediate character of the distribution density function  $I_n$ . Thus, with a small effect of atmospheric turbulence and aperture limitation, the distribution is closer to normal, and to lognormal with an increase in these effects.

Thus, the measurement results showed that a qualitative approximation of the real probability distribution by known types of distributions is not possible. In addition, one should take into account the fact that the integrals of the peripheral parts of the probability function play the main role in estimating the errors of the communication channel. In this regard, to solve the problem of optimization of the SP, a methods for assessing the peripheral parts of the distribution was required, which in the equipment should work in real time.

A solution was proposed that makes it possible to evaluate the peripheral parts of the specified function, since the error level is completely determined by the fraction of events of  $I_{rec}$  going beyond the receiver's dynamic range. Thus, SP tuning should minimize the number of these cases. Due to the fact that the measurement frequency of  $I_{in}$  in the equipment is 100 Hz, at an error level of  $10^{-9}$ , it will take  $10^7$  s to ensure that the dynamic range is exceeded, which corresponds to a period of about 2,800 hours.

To obtain a reasonable tuning period for the SP, it is sufficient to determine the statistics of achieving  $I_{in}$  at a certain distance from the boundaries of the dynamic range. However, due to their remoteness from the boundaries of the dynamic range, to take into account the shape of the "tails" of the probability function (PF), it is necessary to take into account their shape. For this, a method was proposed for assessing the peripheral parts of the PF based on the "statistical pattern" of the channel – an experimentally determined statistical image of the edges of the probability distribution  $I_{in}$ . To calculate the pattern, 4 parameters were used. They represent fractions of measurements with  $I_{in}$  values lying below and above certain boundaries, respectively (located at a certain distance from the boundaries of the receiver's dynamic range). Fig. 5 shows an example of the experimental distribution of the number of mea-



**Рис. 7.** Зависимость коэффициента корреляции между весом статистического паттерна и  $P_{err}$  от  $k$

*Fig. 7. Dependence of the correlation coefficient between the weight of the statistical pattern and  $P_{err}$  on  $k$*



$$N_L = \text{LowOUT} \cdot k + \text{LowIN},$$

$$N_H = \text{HighOUT} \cdot k + \text{HighIN},$$

где  $k$  – коэффициент увеличения периферийных сумм (отстоящих на 3 дБ от границ динамического диапазона приемника).

В случае  $N_L > N_H$  значение ТС увеличивается, при обратном соотношении – уменьшается. Таким образом, в ходе работы предложенного алгоритма ТС стремится к значению, при котором для существующих условий (погода, дистанция) достижение нижней и верхней границы динамического диапазона приемника равновероятно.

Коэффициент  $k$  необходим для повышения чувствительности алгоритма к наиболее критичным (более близким значениям  $I_{пр}$  к границе динамического диапазона приемника) событиям. Для обоснованного выбора значения  $k$  были рассчитаны зависимости коэффициента корреляции между весом статистического паттерна  $N_L + N_H$  и ранее полученной модельной оценкой  $P_{err}$  для логнормального распределения, на всем заданном выше поле значений ТС и  $\sigma_n$ .

Зависимость коэффициента корреляции от значения  $k$  приведена на рис. 7. Анализ рис. 7 показывает, что достаточно хорошая (0,9) корреляция веса паттерна с  $P_{err}$  достигается при  $k=100$ . Это значение мы использовали в дальнейшем при проверке работоспособности алгоритма.

Для оценки работоспособности алгоритма подстройки ТС были проведены «стрессовые» измерения на дистанции 620 м с диафрагмами 20 мм, установленными на один из терминалов, чтобы обеспечить уровень нестабильности приемного сигнала достаточный для фиксации ошибок. На обоих терминалах в двух сериях измерений были заданы начальные значения ТС, близкие верхней (1000 мкВт) и нижней (10 мкВт) границы динамического диапазона приемника. На рис. 8 представлена динамика изменения ТС на двух терминалах линии 620 м, а также уровня потерь (количество утраченных пакетов в минуту) в канале связи. Видно, что предложенный алгоритм динамической подстройки ТС полностью работоспособен и обеспечивает выход к оптимальным (с точки зрения минимизации потерь в канале связи) значениям ТС.

Довольно длительное (десятки минут) время подстройки ТС объясняется тем, что стартовое

измерения  $N$  depending on  $I_{in}$ , as well as the boundaries for calculating the  $I_{in}$  values to determine the statistical pattern of the channel.

As the lower boundaries of LowOUT and LowIN, the Pin values were chosen, which exceeded the receiver sensitivity by 3 and 6 dB (2 and 4 times), respectively. As the upper boundaries of HighOUT and HighIN –  $I_{in}$ , lower saturation powers of the receiver by 3 and 6 dB, respectively.

To test the proposed method for adjusting the SP, an algorithm for changing the SP was implemented depending on the result of the analysis of the statistical pattern obtained in 1 minute of equipment operation.

Statistics are collected for  $N = 30,000$  receive power measurements using the following counters:

- LowIN – power meter is less than the inner minimum limit;
- LowOUT – power meter is less than the outer minimum limit;
- HighIN – power measurement counter is greater than the internal maximum limit;
- HighOUT – the power meter is greater than the outer maximum limit.

Based on the results of collecting statistics, the following parameters are calculated:

- $N_L$  is the result of the minimum power statistics.
- $N_H$  is the result of the maximum power statistics.
- $P_{SP}$  is the value of the stabilization point of the received power.

The SP control algorithm is shown in Fig. 6.

After collecting statistics, an analysis of the statistical pattern is carried out, which consists in comparing the sums of the numbers of  $N_L$  and  $N_H$  events, determined in accordance with the expressions:

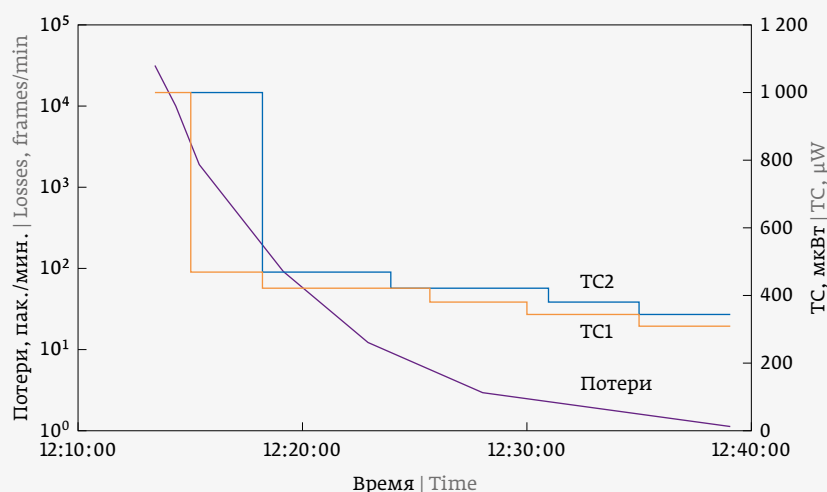
$$N_L = \text{LowOUT} \cdot k + \text{LowIN},$$

$$N_H = \text{HighOUT} \cdot k + \text{HighIN},$$

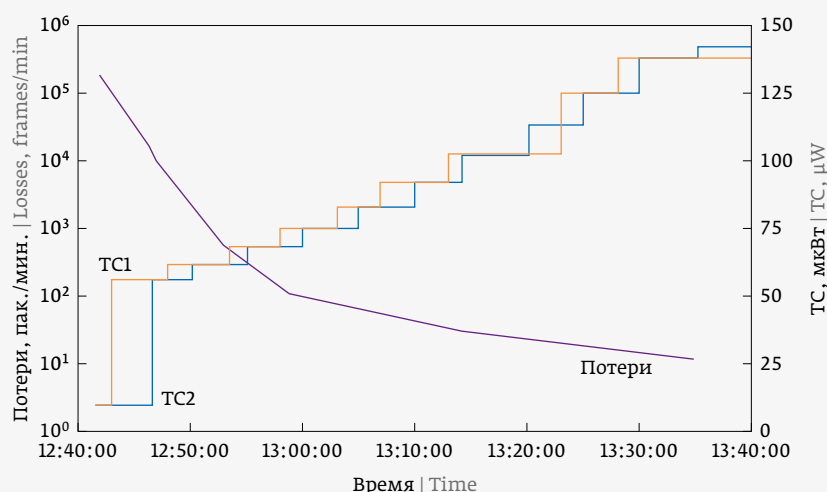
where  $k$  is the coefficient of increase of peripheral sums (spaced by 3 dB from the boundaries of the dynamic range of the receiver).

In the case of  $N_L > N_H$ , the SP value increases, with the opposite ratio, it decreases. Thus, in the course of the proposed algorithm, the SP tends to a value at which, for the existing conditions (weather, distance), reaching the lower and upper boundaries of the receiver's dynamic range is equally probable.

The coefficient  $k$  is necessary to increase the sensitivity of the algorithm to the most critical (closer  $I_{rec}$



а)



б)

**Рис. 8.** Динамика изменения ТС на терминалах линии 620 м, а также уровня потерь при заданном начальном значении ТС: а) высоком значении; б) низком значении

**Fig. 8.** Dynamics of changes in the SP at the terminals of the 620 m line, as well as the level of losses at a given initial value of the SP: a) high value; b) low value

значение ТС задавалось максимально удаленным от середины динамического диапазона приемника. При реализации алгоритма использовалось стартовое значение ТС, равное середине динамического диапазона приемника, что обеспечивает значительно более быструю подстройку ТС.

После определения работоспособности алгоритма было проведено долгосрочное (в течение трех суток) тестирование его работы на дистан-

values to the border of the receiver dynamic range) events. For a reasonable choice of the value of  $k$ , the dependences of the correlation coefficient between the weight of the statistical pattern  $N_L + N_H$  and the previously obtained model estimate  $P_{err}$  for the lognormal distribution were calculated, over the entire field of values of SP and specified above.

The dependence of the correlation coefficient on the value of  $k$  is shown in Fig. 7.

Analysis of Fig. 7 shows that a fairly good (0.9) correlation of the pattern weight with  $P_{err}$  is achieved at  $k=100$ . This value was used in the future when checking the performance of the algorithm.

To assess the performance of the SP tuning algorithm, "stress" measurements were carried out at a distance of 620 m with 20mm diaphragms installed on one of the terminals to ensure the level of instability of the receiving signal sufficient for fixing errors. On both terminals, in two series of measurements, the initial SP values were set, close to the upper (1,000  $\mu$ W) and lower (10  $\mu$ W) boundaries of the receiver's dynamic range. Fig. 8 shows the dynamics of changes in the SP at two terminals of the 620 m line, as well as the level of losses (the number of lost packets per minute) in the communication channel.

It can be seen that the proposed algorithm for dynamic adjustment of the SP is fully operational and

provides access to the optimal (in terms of minimizing losses in the communication channel) SP values.

The rather long (tens of minutes) time for tuning the SP is explained by the fact that the starting value of the SP was set as far as possible from the middle of the receiver's dynamic range. When implementing the algorithm, the starting value of the SP was used, equal to the middle of the dynamic range of the receiver, which provides a much faster adjustment of the SP.

ции 620 м. Данное тестирование показало существенное снижение ошибок по сравнению с работой канала связи с фиксированным значением ТС. Так, если за сутки ошибка в среднем составляла  $5 \cdot 10^{-10}$ , то при использовании предложенного алгоритма ошибка снизилась до  $9 \cdot 10^{-11}$ .

## ВЫВОДЫ

Проведен статистический анализ распределения значений параметров канала беспроводной оптической связи. Он выявил существенную зависимость параметров канала от дистанции и условий работы (состояния атмосферы). Результаты анализа также показали несоответствие распределения вероятности уровня принимаемого сигнала известным распределениям.

Предложен способ динамической подстройки точки стабилизации мощности на приемнике на основе статистического паттерна канала, адекватно описывающего периферийные части функции вероятности сигнала на приемнике. Апробация алгоритма показала его эффективность, выразившуюся в существенном снижении уровня ошибок в канале связи. Применение алгоритма позволит повысить достоверность передаваемых данных как при использовании в наземных горизонтальных каналах, так и в фотонных системах космического приборостроения для обмена информацией на линиях «Космический аппарат – Земля» [15]. По результатам работы получен патент на способ регулировки уровня сигнала на приемнике терминала оптической беспроводной связи [16].

After determining the operability of the algorithm, a long-term (within three days) testing of its operation at a distance of 620 m was carried out. This testing showed a significant decrease in errors in comparison with the operation of a communication channel with a fixed value of the SP. So, if the error averaged  $5 \cdot 10^{-10}$  per day, then when using the proposed algorithm, the error decreased to  $9 \cdot 10^{-11}$ .

## CONCLUSIONS

A statistical analysis of the distribution of the values of the parameters of the wireless optical communication channel is carried out. He revealed a significant dependence of the channel parameters on the distance and operating conditions (state of the atmosphere). The analysis results also showed a discrepancy between the probability distribution of the received signal level and the known distributions.

A method is proposed for dynamically adjusting the power stabilization point at the receiver based on a statistical channel pattern that adequately describes the peripheral parts of the signal probability function at the receiver. Approbation of the algorithm has shown its effectiveness, which is expressed in a significant reduction in the level of errors in the communication channel. The use of the algorithm will improve the reliability of the transmitted data both when used in ground-based horizontal channels and in photonic systems of space instrumentation for information exchange on the lines “Spacecraft – Earth” [15]. Based on the results of the work, a patent was obtained for a method for adjusting the signal level at the receiver of an optical wireless communication terminal [16].

	<p><b>Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники</b></p>		<p><b>Разработка и изготовление тонкопленочных изделий</b></p>	
	<p><b>Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»</b></p>		<p><b>Разработка технологий формирования тонких пленок</b></p>	
	<p><b>Програмное обеспечение и автоматизация</b></p>		<p><b>Оптические элементы</b></p>	
<p><b>Изготовление технологических устройств</b></p>		<p><b>Напылительный сервис</b></p>		
<p>ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845</p>		<p><b>Сложные и уникальные покрытия</b></p> <a href="http://www.izovac.com">www.izovac.com</a> <a href="http://www.izovac-coatings.com">www.izovac-coatings.com</a>		



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uysal M. Optical Wireless Communications. Springer. 2016. DOI 10.1007/978-3-319-30201-0
2. Djordjevic I. B. Advanced Optical and Wireless Communications Systems. Springer. 2017. DOI 10.1007/978-3-319-63151-6
3. First high capacity space-to-ground laser communications system for the new European external ISS Platform Bartolomeo. [Интернет-ресурс]. [Дата обращения: 12 февраля 2019] URL: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/03/first-high-capacity-space-to-ground-laser-communications-system-.html>
4. Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) [Интернет-ресурс]. [Дата обращения: 12 февраля 2019] URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/861.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/861.html)
5. NASA Laser Communication Payload Undergoing Integration and Testing. [Интернет-ресурс]. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-laser-communication-payload-undergoing-integration-and-testing>
6. Andrews L. C., Phillips R. L., Hopen C. Y. Laser Beam Scintillation with Applications. SPIE Press. 2001. DOI: 10.1117/3.412858
7. Majumdar A. K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel. J. Opt. Fiber. Commun. Rep. 2005; 2(4): 345–396. DOI: 10.1007/s10297-005-0054-0
8. 10 Gbits ARTOLINK model [Интернет-ресурс]. [Дата обращения: 12 февраля 2019]; URL: [http://artolink.com/page/products/free\\_space\\_optics\\_Artolink\\_10Gbps](http://artolink.com/page/products/free_space_optics_Artolink_10Gbps)
9. Боев А. А., Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н., Огнев Б. И., Паршин А. А. Беспроводной канал передачи информации со скоростью 40 Гбит/с. Вестник РГРТУ. 62(4). 2017; 44–48. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48
10. Kuznetsov S. N., Ognev B. I., Poljakov S. Y., Yurko S. V. Wireless communications at 10Gbps [Интернет-ресурс]. SPIE. Апрель 2014. [Дата обращения: 12 февраля 2019]; URL: <http://spie.org/x108306.xml>
11. Кузнецов С. Н., Поляков С. Ю., Oussama Alali, Bahaa Hashem. Беспроводный канал 10 Гбит/с: ключевые особенности и результаты тестирования. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании». – Рязань. 2013; 83–93.
12. Арсеньян Т. И., Зотов А. М., Короленко П. В., Маганова М. С., Макаров В. Г. Интегральные распределения флуктуаций лазерного излучения в условиях перемежаемости атмосферной турбулентности. Оптика атмосферы и океана. 2001; 14(8).
13. Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н., Огнев Б. И., Поляков С. Ю., Широбаккин С. Е. Анализ эффективности конструктивных решений оборудования высокоскоростной оптической беспроводной связи с учетом воздействия турбулентной атмосферы. Сборник трудов XXV Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте». – Новороссийск. 2017; 182–184.
14. Воронцов М. А., Дудоров В. В., Зырянова М. О. и др. Частота появления ошибочных битов в системах беспроводной оптической связи с частично когерентным передающим пучком. Оптика атмосферы и океана. 2012; 25(11): 936–940. DOI: 10.1134/S1024856013030159.
15. Пономарев А. К., Романов А. А., Тюлин А. Е. Фотонные технологии в космическом приборостроении. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016; 3(2): 4–23. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2016.2.4.
16. Патент RU2688664. Способ регулировки уровня сигнала на приемнике терминала оптической беспроводной связи / Паршин А. А., Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н., Огнев Б. И. URL: <https://findpatent.rupatent/2682688664.html>

## REFERENCES

1. Uysal M. Optical Wireless Communications. Springer. 2016. DOI 10.1007/978-3-319-30201-0
2. Djordjevic I. B. Advanced Optical and Wireless Communications Systems. Springer. 2017. DOI 10.1007/978-3-319-63151-6
3. First high capacity space-to-ground laser communications system for the new European external ISS Platform Bartolomeo [Internet]. [cited 12 Feb 2019]; URL: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/03/first-high-capacity-space-to-ground-laser-communications-system-.html>
4. Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS). [Internet]. [cited 12 Feb 2019]; URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/861.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/861.html)
5. NASA Laser Communication Payload Undergoing Integration and Testing [Internet]. [cited 12 Feb 2019]; URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-laser-communication-payload-undergoing-integration-and-testing>
6. Andrews L. C., Phillips R. L., Hopen C. Y. Laser Beam Scintillation with Applications. SPIE Press. 2001. DOI: 10.1117/3.412858
7. Majumdar A. K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel. J. Opt. Fiber. Commun. Rep. 2005; 2(4): 345–396. DOI: 10.1007/s10297-005-0054-0
8. 10 Gbit/s ARTOLINK model [Internet]. [cited 12 Feb 2019]; URL: [http://artolink.com/page/products/free\\_space\\_optics\\_Artolink\\_10Gbps](http://artolink.com/page/products/free_space_optics_Artolink_10Gbps)
9. Boev A. A., Kernosov M. Y., Kuznetsov S. N., Ognev B. I., Parshin A. A. The wireless communication channel with data rate 40 Gbps. Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. 62(4). 2017; 44–48. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48
10. Kuznetsov S. N., Ognev B. I., Poljakov S. Y., Yurko S. V. Wireless communications at 10Gb/s [Internet]. SPIE. Apr 2014. [cited 12 Feb 2019]; URL: <http://spie.org/x108306.xml>
11. Kuznetsov S. N., Polyakov S. Y., Oussama Alali, Bahaa Hashem. Besprovodnyy kanal 10 Gbit/s: klyuchevye osobennosti i rezul'taty testirovaniya. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Innovacii v nauke, proizvodstve i obrazovanii". – Ryazan. 2013; 83–93.
12. Arsenyan T. I., Zotov A. M., Korolenko P. V., Maganova M. S., Makarov V. G. Integral'nye raspredeleniya fluktuacij lazernogo izlucheniya v usloviyah pere-mezhamestnosti atmosfornoj turbulentnosti. Atmospheric and Oceanic Optics. 2001; 14(8): 677–680.
13. Kernosov M. Y., Kuznetsov S. N., Ognev B. I., Polyakov S. Y., Shirobakkin S. E. Analiz effektivnosti konstruktivnykh reshenij oborudovaniya vysokoskorostnoj opticheskoy besprovodnoj svyazi s uchetoм vozdеjstviya turbulentnoj atmosfery. Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoj Konferencii "Lazerno-informacionnye tekhnologii v medicine, biologii, geoekologii i transporte". – Novorossiysk. 2017; 182–184.
14. Vorontsov M. A., Dudorov V. V., Zyryanova M. O. et al. Chastota povayleniya oshibochnykh bitov v sistemah besprovodnoj opticheskoy svyazi s chastichno kogerentnym peredayushchim puchkom. Atmospheric and Oceanic Optics. 2012; 25(11): 936–940. DOI: 10.1134/S1024856013030159.
15. Ponomarev A. K., Romanov A. A., Tyulin A. E. Fotonnye tekhnologii v kosmicheskom priborostroenii. Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy. 2016; 3(2): 4–23. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2016.2.4.
16. Patent RU2688664. Sposob regulirovki urovnya signala na priemnike terminala opticheskoy besprovodnoj svyazi / Parshin A. A., Kernosov M. Y., Kuznetsov S. N., Ognev B. I. URL: <https://findpatent.ru/patent/268/2688664.html>

## ABOUT AUTHORS

Kernosov M., [info@mostcom.ru](mailto:info@mostcom.ru), JSC "Mostcom", Ryazan, Russia.  
Kuznetsov S., [ksn@mostcom.ru](mailto:ksn@mostcom.ru), JSC "Mostcom", Ryazan, Russia.  
Parshin A., [info@mostcom.ru](mailto:info@mostcom.ru), JSC "Mostcom", Ryazan, Russia.  
Ognev B., [develop@mostcom.ru](mailto:develop@mostcom.ru), JSC "Mostcom", Ryazan, Russia.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflicts of interest.

## CONTRIBUTION OF THE TEAM MEMBERS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors. Mathematical model, algorithm, software: Kuznetsov S. N., Parshin A. A. Layout preparation: Kernosov M. Yu., Ognev B. I. Experiments: Kernosov M. Yu., Kuznetsov S. N., Ognev B. I. Development and research was carried out at the expense of JSC Mostcom's own funds.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Керносов Максим Юрьевич, [info@mostcom.ru](mailto:info@mostcom.ru), АО «Мостком», Рязань, Россия  
Кузнецов Сергей Николаевич, [ksn@mostcom.ru](mailto:ksn@mostcom.ru), АО «Мостком», Рязань, Россия  
Паршин Антон Алексеевич, [info@mostcom.ru](mailto:info@mostcom.ru), АО «Мостком», Рязань, Россия  
Огнев Борис Игоревич, [develop@mostcom.ru](mailto:develop@mostcom.ru), АО «Мостком», Рязань, Россия

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива. Математическая модель, алгоритм, ПО: Кузнецов С. Н., Паршин А. А. Подготовка макета: Керносов М. Ю., Огнев Б. И. Эксперименты: Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н., Огнев Б. И. Разработка и исследования выполнена за счет собственных средств АО «Мостком».

**20–22 октября 2020**

Москва, КВЦ «Сокольники»



Единственная  
в России выставка  
вакуумной техники  
и криогенного  
оборудования



Вакуумное  
оборудование

Криогенное  
оборудование

Оборудование  
для нанесения  
функциональных  
покрытий



**ПОДРОБНЕЕ О ВЫСТАВКЕ**  
[vacuumtechexpo.com](http://vacuumtechexpo.com)

Организатор



Международная  
Выставочная  
Компания

+ 7 (495) 252 11 07  
[vacuumtechexpo@mvk.ru](mailto:vacuumtechexpo@mvk.ru)

При поддержке

