

## AVAILABILITY OF FSO SYSTEM IN THE PRESENCE OF RANDOM JITTER IN THE INITIAL LASER BEAM DIRECTION

### НАДЕЖДНОСТ НА РАБОТА НА FSO СИСТЕМА ПРИ НАЛИЧИЕТО НА СЛУЧАЙНИ ОТКЛОНЕНИЯ НА ЛАЗЕРНИЯ ЛЪЧ ОТ ПЪРВОНАЧАЛНАТА МУ ПОСОКА НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕ

**Yordan Kovachev**

Department of Telecommunications, Technical University of Sofia, No. 8 Kl. Ohridski Blvd,  
Sofia, Bulgaria, e-mail: dakatapz@gmail.com

**Йордан Ковачев**

Факултет по Телекомуникации, Технически университет – София, бул. Климент  
Охридски No. 8, София, България, e-mail: dakatapz@gmail.com

**Keywords:** random jitter, availability, optimal system parameters, reliability

*Abstract – This paper studies the availability of FSO (free-space optics) systems in the presence of random misalignments between the laser radiation direction and the center of the receiving antenna. It utilizes a statistical model of the atmospheric visibility and a statistical model of the optical beam jitter. The simulations are performed for different conditions. The availability of a two systems is compared, one uses optimal beam divergence angle and the other uses constant beam divergence angle for all initial conditions. Results can be used either to analyze the availability of a commercial FSO system mounted in a given geographic region, or to calculate the optimal system parameters given some initial condition (such as output power of the laser diod or the link distance) so that the system will perform reliably.*

*Резюме – В работата се изследва надеждността на работа на FSO (free-space optics) система в присъствието на случайни отклонения на лазерния лъч от основната му посока. За целта се използват статистически модели на метеорологичната дължина на видимост и на случайните отклонения на лъча. Симулациите са извършени при различни първоначални условия. Анализирани са случаите на система използваща оптимален ъгъл на разходимост на лазерния лъч и такава използваща константен ъгъл на разходимост за всички начални условия. Получените резултати могат да се използват за повишаване на надеждността на работа на FSO система за конкретен район с известни метеорологични условия, или за пресмятане на оптималните параметри на FSO (при избран източник на оптично лъчение и зададена дължина на трасето) така че системата да работи максимално надеждно.*

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Навлизането на безжичните оптични комуникационни системи, като начин за предоставяне на телекомуникационни услуги, налага внедряването на

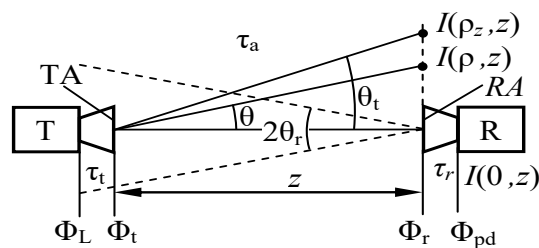
технологии за увеличаване на капацитета на канала на тези системи и методи за подобряване на тяхната надеждност на работа [1, 2].

Известно е, че FSO (free-space optical) системите се влияят силно от прозрачността на атмосферата  $S_M$  по комуникационното трасе и от случайните отклонения на лазерния лъч от първоначалната му посока на разпространение  $\Delta\rho$  [3 - 5]. Т.е. прекаленото намаляване на  $S_M$  в канала за връзка или голямото отдалечаване на лазерния сноп от първоначалната ос на разпространение могат да доведат до недопустимо повишаване на вероятността за битова грешка (BER) или отказ за работа на системата.

В настоящата работа ще бъде изследвана надеждността на работа на FSO система работеща с подобрени параметри, които гарантират зададена максимална BER и позволяват определено отклонение на лазерния лъч  $\Delta\rho$ . Показано е влиянието на различни параметри на канала за връзка, като дължина на трасето и атмосферни условия, върху надеждността на работа на системата. Извършени са симулации с използването на източници на оптично лъчение с различна мощност.

## 2. ОПИСАНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Фигура 1. показва основните параметри на една оптична безжична комуникационна система.



Фигура 1. Основни параметри на безжичната оптична комуникационна система

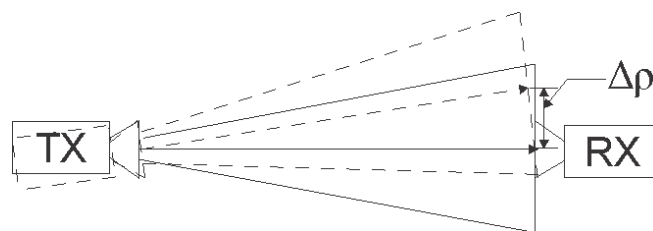
Във фигурата  $\Phi_L$  е оптичната мощност излъчена от лазерния диод,  $\Phi_t$  е мощността излъчена от предавателната апертура,  $\tau_t$  и  $\tau_r$  са оптичните загуби съответно в предавателната и приемната антена. Оптичната мощност достигнала до приемната апертура е  $\Phi_r$ , а  $\Phi_{pd}$  е оптичната мощност достигнала до фотодетектора. Ъгълът на разходимост на оптичния сноп е отбелязан с  $\theta_t$ . Интензитета на оптичния лъч по протежение на оста  $z$  е  $I(0, z)$ ;  $z$  е разстоянието между предавателната и приемната апертура. Интензитета в равнината на приемната апертура е  $I(\rho, z)$ , като  $\rho$  е радиуса на сечението в равнината на приемната апертура.

При проектирането на FSO система, нейните параметри, като ъгъл на разходимост, мощност на оптичния източник, дължина на трасето, радиус на приемната апертура, се пресмятат за избрана прозрачност на атмосферния канал (най-често се вземат предвид тежки атмосферни условия, т.е. ниска стойност на  $S_M$ ). Енергийното оразмеряване се прави така, че периферията на Гаусовия лазерен сноп (на разстояние  $\rho_{max}$  от центъра на приемната апертура [2]) да осигури достатъчна оптична мощност в апертурата на фотодетектора  $\Phi_{pd}$ ,

за да може системата да работи с вероятност за цифрова грешка по-малка или равна на максимално допустимата за предоставяната комуникационна услуга (например  $BER \leq 10^{-8}$ ).

На фиг. 1 е илюстриран идеалният случай, при който няма отклонения на лазерното лъчение от оста  $z$ . В този случай единственият фактор, влияещ на надеждната работа на системата, е атмосферната прозрачност в канала за връзка, т.е. при падане под една критична стойност на  $S_M$ , според която са подбрани параметрите на FSO, тя ще работи с неудовлетворителни стойности на BER, или ще спре да работи напълно.

На практика различни фактори, като турбулентна атмосфера, нестабилност на фундамента, неточно насочени антени, и други допринасят за случайните отклонения на гаусовия лазерен сноп от първоначалната му посока на разпространение.



Фигура 2 Схема на FSO, показваща отклоненията на лазерния лъч от първоначалната му посока на разпространение

В този случай комуникационната система ще работи надеждно, ако  $S_M$  е по-голяма или равна на гореспоменатата критична стойност. Също така случайните отклонения не трябва да превишават максимално допустимото отклонение на лазерния лъч  $\rho_{max}$  определено от ъгъла на разходимост на оптичния сноп необходим за осигуряване на минималната енергия във входа на фотодетектора, при която системата ще работи надеждно (с избрана максимално допустима BER).

Комерсиално разпространените FSO системи използват силно колимиран оптичен сноп и са проектирани така, че да имат голям запас от оптична енергия в равнината на приемната апертура. В това изследване се използва алгоритъм за преразпределение на оптичната мощност в равнината на приемника, чрез увеличаване на ъгъла на разходимост [5]. По този начин се увеличава радиусът на оптичния сноп в равнината на приемника и показаните на фигура 2 отклонения се компенсират. Ъгълът на разходимост се подбира така, че интензитета на оптичното лъчение в равнината на приемната апертура не пада под минималния интензитет необходим за осигуряване на BER. Така подбраният ъгъл  $\theta_t$  се нарича оптимален.

Фокусът на настоящата работа е да покаже надеждността на работа на система използваща оптимална стойност на ъгъла на разходимост при различни атмосферни условия и наличие на случайни отклонения  $\Delta\rho$  и да я сравни с надеждността на работа на FSO използваща фиксиран ъгъл на разходимост при същите условия.

### 3. ТЕОРИЯ

За да може да се пресметне оптималният радиус на оптичното лъчение в равнината на приемната апертура, съответно и оптималният ъгъл на разходимост на лъчението, първо трябва да се пресметне необходимата минимална оптична мощност в апертурата на фотодетектора  $\Phi_{pd}$  [5]:

$$\Phi_{pd} = \frac{1}{2} \left[ \frac{SNR^2 C_1 e^-}{R_1} + \left( \left( -\frac{SNR^2 C_1 e^-}{R_1} \right)^2 + \frac{4SNR^2 C_1 \left( \frac{2k_B T A}{R_1 R_{Fb}} + e^- \Phi_B \right)}{R_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (1)$$

където  $R_1$  е интегралната чувствителност на фотодиода,  $C_1$  е капацитетът на канала. Константата на приемната апертура е означена с  $A$ , а  $R_{Fb}$  е стойността на резистора в обратната връзка на предусилвателя в приемника. Фоновото лъчение е отбелязано с  $\Phi_B$ .

Необходимото отношение сигнал/шум, за осигуряване на избраната BER може да бъде изчислено с използването на формулата

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{SNR}{2\sqrt{2}} \right) \quad (2)$$

Мощността на лазерното лъчение в приемната апертура е:

$$\Phi_r = \frac{\tau_t \tau_a}{2} \frac{1 - \exp \left[ -\frac{R_r^2}{\rho_z^2} \right]}{1 - \exp(-2)} \Phi_L \quad (3)$$

Работата на системата с BER по-малка или равна на пресметната чрез (2) се гарантира, ако  $\tau_r \Phi_r \geq \Phi_{pd}$ .

В съответствие с теорията за разпространение на Гаусов лазерен сноп в атмосферата, максимално допустимото отклонение на лъча от първоначалната му посока на разпространение  $\rho_{max}$ , гарантиращо приемането на минималната мощност  $\Phi_{pd}$  от фотодетектора, необходима постигането на избраната вероятност за цифрова грешка може да се изчисли с израза

$$\rho_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_z \sqrt{\ln \frac{2 \cdot \tau_t \cdot \tau_a \cdot \Phi_L}{\pi \cdot \rho_z^2 \cdot (1 - e^{-2}) I_{min}}}, \quad (4)$$

където  $I_{min}$  е минималната стойност на интензитета на оптичното лъчение в приемната апертура, гарантиращ  $\Phi_{pd}$  и съответно BER, се изчислява с:

$$I_{min} = \frac{\Phi_{pd} \Big|_{SNR=const}}{\pi \cdot \tau_r \cdot R_r^2} \quad (5)$$

Стойността на оптималния радиус на лазерния сноп, съответстващ на изчислените с (1) и (4) параметри на системата е:

$$\rho_z \equiv \rho_{z,opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_t \cdot \tau_a \cdot \Phi_L}{\pi \cdot e \cdot I_{min}}}, \quad e = 2,7183 \quad (6)$$

Съответстващият оптимален ъгъл на разходимост на оптичното лъчение се пресмята чрез израза:

$$\theta_{z,\text{opt}} = \frac{\rho_{z,\text{opt}}}{z}, \quad (7)$$

където  $z$  е дължината на трасето на комуникационната система.

Моделът за пресмятане на надеждността на работа на системата е същият като описания в [3, 4].

Вероятността  $P(S_M \geq x)$  се апроксимира с полинома:

$$P(S_M \geq S_{M,\text{min}}) = 0.0000006 x^4 - 0.00001 x^3 - 0.0007 x^2 - 0.0053 x + 0.9991, \quad (8)$$

$S_{M,\text{min}} \equiv x$ . Изразът представлява апроксимация на осреднените данни взети от [1].

Случайните отмествания на лазерния лъч имат нормално разпределение [4]:

$$f(\Delta\rho) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\rho}} \exp\left(-\frac{\Delta\rho^2}{\sigma_{\Delta\rho}^2}\right) \quad (9)$$

Съгласно изложението направено в 2, системата ще работи стабилно, ако отместванията са в интервала  $\rho_{\text{max}} \leq \Delta\rho \leq \rho_{\text{max}}$  и същевременно  $S_M \geq S_{M,\text{min}}$ , което съответства на:

$$\text{Availability} = 2(F(\rho_{\text{max}}) - F(0))P(S_M \geq S_{M,\text{min}}) \quad (10)$$

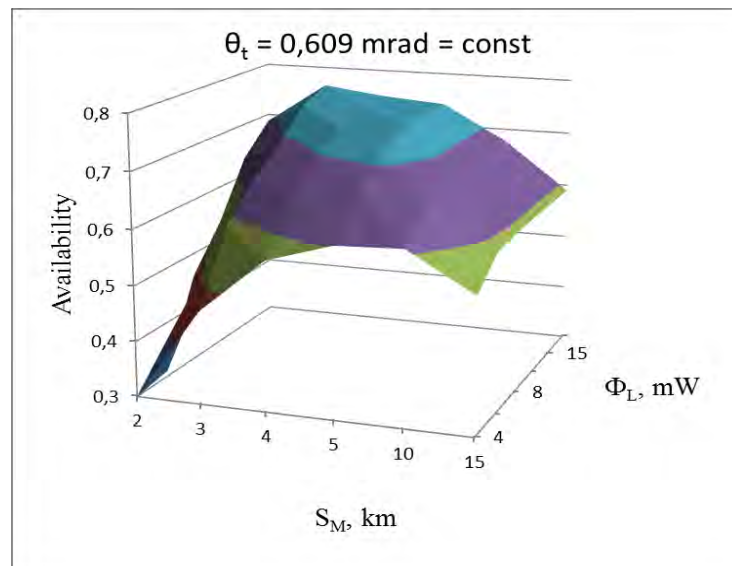
С  $F(\cdot)$  е означена CDF на Гаусовото разпределение на  $\Delta\rho$ .

#### 4. ЧИСЛЕНИ СИМУЛАЦИИ

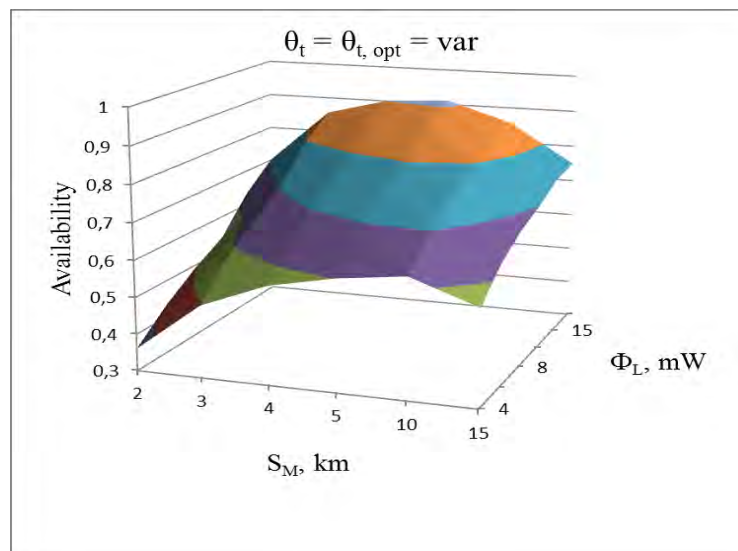
Симулациите са направени, използвайки следните параметри типични за безжичните оптичните безжични комуникационни системи:

капацитет на канала  $C_1 = 1$  Gbps; квантова ефективност на фотодетектора  $\eta(\lambda_0) = 0,7$ ;  $SNR = 11,2$  (отговаря на  $BER = 10^{-8}$ ); дължина на вълната  $\lambda_0 = 1,55$   $\mu\text{m}$ ;  $T = 300$  K;  $A = 5$ ;  $R_{\text{FB}} = 1$  k $\Omega$ ;  $\tau_r = \tau_t = 0,85$ ;  $R_r = 5,5$  см; лентата на пропускане на интерфейсия филтър преди фотодетектора  $\Delta\lambda_F = 10$  nm; спектралнат яркост на фоновото лъчение  $L_{\lambda B} = 10^{-2}$  W/m<sup>2</sup>.sr.Ang.

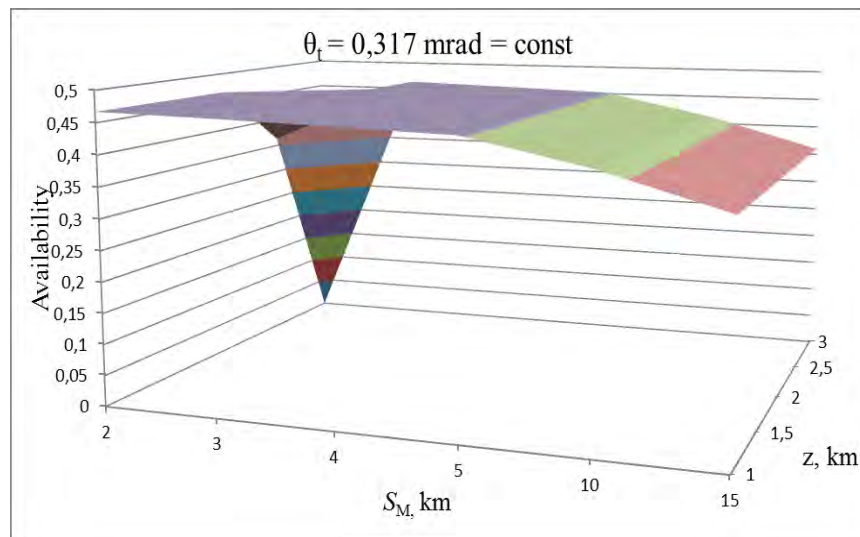
За определяне на основните параметри на системата като максимално допустимото отклонение на лазерното лъчение от първоначалната му посока  $\rho_{\text{max}}$ , радиусът на оптичното лъчение в приемната апертура  $\rho_z$  и ъгълът на разходимост на оптичния сноп  $\theta_t$  се използват съответно изразите (4), (6) и (7). Надеждността на работа се пресмята с (10), като се използват предварително пресметнатите  $\theta_t$ ,  $\rho_z$  и  $\rho_{\text{max}}$ .



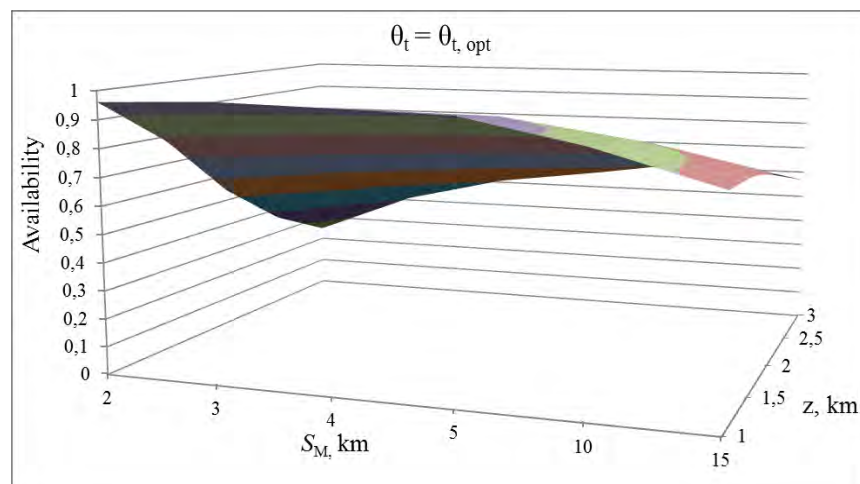
Фигура 3 Надеждност на работа на FSO, използваща фиксиран ъгъл на разходимост,  $z = 2\text{km}$ ,  $S_M = \text{var}$ ,  $\Phi_L = \text{var}$



Фигура 4 Надеждност на работа на FSO, използваща оптимален ъгъл на разходимост,  $z = 2\text{km}$ ,  $S_M = \text{var}$ ,  $\Phi_L = \text{var}$



Фигура 5 Надеждност на работа на FSO, използваща фиксиран ъгъл на разходимост,  $z = \text{var}$ ,  $S_M = \text{var}$ ,  $\Phi_L = 10 \text{ mW}$



Фигура 6 Надеждност на работа на FSO, използваща оптимален ъгъл на разходимост,  $z = \text{var}$ ,  $S_M = \text{var}$ ,  $\Phi_L = 10 \text{ mW}$

Фигури 4 до 6 показват как се променя надеждността на работа на оптична безжична комуникационна система използваща фиксиран ъгъл на разходимост на оптичното лъчение и такава използваща оптимален ъгъл на разходимост. Представени са резултатите при различни стойности на параметрите на канала за връзка  $S_M$  и  $z$ . Използвани са източници на лазерно лъчение с различна мощност.

Всички симулации показват физически оправдания резултат, че при влошаване на атмосферните условия (ниска  $S_M$ ), увеличаване на дължината на трасето или използване на маломощен лазер надеждността на работа на системата намалява. Това се дължи на факта, че е необходимо да се работи с малък ъгъл на разходимост, за да бъде осигурена необходимата оптична енергия в равнината на приемната апертура. Използването на малък ъгъл  $\theta_t$  от своя страна намалява значително допустимите отклонения на лазерния лъч от

началната му посока на разпространение. В тези случаи надеждността на работа на системата намалява поради по-честата поява на прекалено големи отмествания на оптичното лъчение от първоначалното му направление.

И при двете сравнения, фигура 3 с фигура 4 и фигура 5 с фигура 6, се вижда, че надеждността на работа значително нараства, ако се използва оптимален ъгъл на разходимост. Подобренението е в интервала [10, 20] %.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата бяха представени числени симулации на надеждността на работа на FSO система използваща фиксиран и вариращ (оптимален) ъгъл на разходимост на оптичното лъчение, като се отчита фактът, че съществуват случайни ъглови отклонения на направлението на лазерния лъч. Резултатите са представени графично. Симулациите са извършени при различни начални условия. Резултатите показват, че използването на оптимален ъгъл на разходимост значително увеличава надеждността на системата.

Извършените числени симулации могат да се използват за правилното енергийно оразмеряване на една FSO система. Имайки данни за атмосферните условия в даден регион и знаейки разпределението на случайните отмествания на лазерния лъч от началната му посока, системата може да се проектира така, че да работи максимално надеждно. Получените резултати и представеният математически апарат могат да се използват и за обратната задача, да се анализира надеждността на работа на готова FSO система, като се имат предвид случайните отклонения на оптичния сноп от първоначалната му посока на разпространение и метеорологичните данни в дадения регион.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Isaak Kim, Eric Korevaar, "Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems", *Proc. SPIE 4530, Optical Wireless Communications IV*, November 27, 2001.
- [2] Mario Toyoshima, Takashi Jono, Keizo Nakagawa and Akio Yamamoto, "Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems", *Optical Society of America*, vol 19, No 3, March 2002.
- [3] Tsvetan Mitsev, Yordan Kovachev, "Availability of MFSO Using Optimal System Parameters", *Microwave and Radio Electronics Week (MAREW)*, Pardubice, Czech Republic, 2015.
- [4] Yordan Kovachev, Tsvetan Mitsev, " FSO Availability Depending on the Meteorological Conditions", *9<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA)*, Sofia, Bulgaria, vol. 1, pp. 19-23, Oct. 16-18, 2014.
- [5] Tsvetan Mitsev, Kalin Dimitrov, Hristo Ivanov, Nikolay Kolev, "Optimum divergence of laser radiation in FSO", *INTERNATIONAL CONFERENCE on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA)*, Athens, Greece, 2012.
- [6] Roberto Ramirez-Iniguez, Sevia M. Idrus and Ziran Sun, *Optical-Wireless Communications*, CRC Press, 2008.
- [7] William Mendenhall, "Introduction to Probability and Statistics", *PWS-KENT Publ*, Massachusetts, Boston, 1987.