

УДК 621.371.3

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ ДЛЯ КАНАЛОВ С АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

М. Б. ЭЛЬ МАШАД, А. Х. ТОИМА

*Университет аль-Азхар,
Египет, Каир, Насер-Сити*

Аннотация. Беспроводная оптическая связь считается высокоскоростной технологией следующего поколения. Она продемонстрировала способность передавать данные быстрее, чем любая другая современная технология беспроводной связи. Эта технология привлекает внимание как средство реализации надежных открытых систем с высокой производительностью, которые не могут быть реализованы средствами традиционной волоконно-оптической технологии. Данная технология появилась недавно как средство эффективного решения задач по удовлетворению требований о расширенной полосе пропускания и высокой скорости передачи для новых систем беспроводной связи. Однако, хотя система оптической связи в свободном пространстве FSO (free space optics) имеет много привлекательных особенностей, она обладает посредственными рабочими характеристиками для длинных линий передачи вследствие эффектов ухудшения характеристик, обусловленных затуханием, которое вызвано турбулентностью атмосферы. При наличии такого типа ухудшений рабочих характеристик принятый сигнал имеет случайные флуктуации интенсивности, которые повышают битовый коэффициент ошибок BER (bit error-rate) в ситуациях, где сложные метеоусловия могут оказывать вредное влияние на рабочие характеристики, что может приводить к неудовлетворительной готовности системы. Беспроводная оптическая процедура ММО, в которой пространственные размеры используются для улучшения надежности и спектральной эффективности каналов «точка–точка», обеспечивает перспективный подход к ослаблению эффектов турбулентности благодаря ее большим возможностям по улучшению рабочих характеристик.

В данной статье проведено исследование наземной атмосферной системы связи FSO, работающей под воздействием сильной атмосферной турбулентности. Кроме того, в работе используется технология ММО с линейным суммированием сигналов равной мощности EGC (equal gain combining) для повышения скорости передачи предлагаемой системы. Воздействия атмосферной турбулентности моделируются с помощью канала с логарифмическим нормальным распределением и учитываются геометрические потери. При использовании линейного кодирования без возвращения к нулю NRZ (non-return-to-zero) выполнено проектирование высокочувствительного приемника FSO с использованием лавинного фотодетектора APD (avalanche photodetector) или PIN-детектора и проведено его моделирование для получения наилучших рабочих характеристик системы. Преимущество достигается при использовании фильтров Бесселя и Гаусса. Установлено, что APD приемник при использовании фильтра Гаусса пригоден для линий дальней связи с коэффициентом усиления APD, равным 3. Кроме того, выбор усиления APD является критически важным для производительности системы. Оптимальное значение коэффициента усиления APD, необходимое для достижения наилучшей производительности системы, снижается при увеличении размеров системы ММО. В работе также обсуждаются достижимые улучшения производительности системы, включая уровни мощности принятого сигнала, BER и добротность. Полученные результаты показывают, что система с оптимальным усилителем на стороне передатчика обеспечивает оптимальные рабочие характеристики. Кроме того, эффективность системы улучшается при большинстве метеоусловий за счет использования усилительной системы 2×2 ММО-FSO с добавочным (booster) усилителем.

DOI: [10.20535/S0021347018040015](https://doi.org/10.20535/S0021347018040015)

© М. Б. Эль Машад, А. Х. Тоима, 2018

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ghassemlooy, Z.; Popoola, W.; Rajbhandari, S. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2017.
2. Das, S.; Henniger, H.; Epple, B.; Moore, C. I.; Rabinovich, W.; Sova, R.; Young, D. "Requirements and challenges for tactical free-space lasercomm," *Proc. of IEEE Military Communications Conf.*, 16–19 Nov. 2008, San Diego, CA, USA. IEEE, 2008, p. 1-10. DOI: [10.1109/MILCOM.2008.4753049](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2008.4753049).
3. Aladeloba, A. O.; Phillips, A. J.; Woolfson, M. S. "Performance evaluation of optically preamplified digital pulse position modulation turbulent free-space optical communication systems," *IET Optoelectronics*, Vol. 6, No. 1, p. 66-74, 2012. DOI: [10.1049/iet-opt.2011.0029](https://doi.org/10.1049/iet-opt.2011.0029).
4. Uysal, M.; Li, J.; Yu, M. "Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 5, No. 6, pp. 1229-1233, 2006. DOI: [10.1109/TWC.2006.1638639](https://doi.org/10.1109/TWC.2006.1638639).
5. El-Mashade, Mohamed B.; Aly, Moustafa H.; Toeima, Ahmed H. "Performance evaluation of FSO system with MIMO technique in different operating environments," *Phys. Sci. Int. J.*, Vol. 7, No. 1, p. 33-48, 2015. DOI: [10.9734/PSIJ/2015/17212](https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/17212).
6. Yang, G.; Khalighi, M.-A.; Bourennane, S.; Ghassemlooy, Z. "Approximation to the sum of two correlated gamma-gamma variates and its applications in free-space optical communications," *IEEE Wireless*

Commun. Lett., Vol. 1, No. 6, p. 621-624, 2012. DOI: [10.1109/WCL.2012.091312.120469](https://doi.org/10.1109/WCL.2012.091312.120469).

7. Abaza, M.; Mesleh, R.; Mansour, A.; Aggoune, el-Hadi. "Performance analysis of MISO multi-hop FSO links over log-normal channels with fog and beam divergence attenuations," *Optics Commun.*, Vol. 334, p. 247-252, 2015. DOI: [10.1016/j.optcom.2014.08.050](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.08.050).

8. Abbas, G.; Ahmed, E.; Aziz, W.; Saleem, S.; ul Islam, Q. "Performance enhancement of multi-input multi-output (MIMO) system with diversity," *Int. J. Multidisciplinary Sci. Eng.*, Vol. 3, No. 5, p. 8-12, 2012.

9. Mesleh, R.; Mehmood, R.; Elgala, H.; Haas, H. "Indoor MIMO optical wireless communication using spatial modulation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Communications, ICC'10*, 23-27 May 2010, Cape Town, South Africa. IEEE, 2010, p. 1-5. DOI: [10.1109/ICC.2010.5502062](https://doi.org/10.1109/ICC.2010.5502062).

10. El_Mashade, Mohamed B.; Toeima, Ahmed H.; Aly, Moustafa H. "Receiver optimization of FSO system with MIMO technique over log-normal channels," *Optoelectron. Adv. Mat.*, Vol. 10, No. 7-8, p. 497-502, 2016. URI: <https://oam-rc.inoe.ro/index.php?option=magazine&op=view&idu=2857&catid=97>.

11. Shaban, H.; El Aziz, S. D. A.; Aly, M. H. "Probability of error performance of free space optical systems in severe atmospheric turbulence channels," *Proc. of 10th Mediterranean Microwave Symp., MMS'2010*, 25-27 Aug. 2010, Guzelyurt, Cyprus. IEEE, 2010, pp. 355-359. DOI: [10.1109/MMW.2010.5605154](https://doi.org/10.1109/MMW.2010.5605154).

12. Singh, C.; John, J.; Singh, Y. N.; Tripathi, K. K. "A review of indoor optical wireless systems," *IETE Tech. Rev.*, Vol. 19, No. 1-2, pp. 3-17, 2002. DOI: [10.1080/02564602.2002.11417006](https://doi.org/10.1080/02564602.2002.11417006).

13. Kiasaleh, K. "Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 53, No. 9, p. 1455-1461, 2005. DOI: [10.1109/TCOMM.2005.855009](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2005.855009).

14. Yan, J.; Zheng, Z.; Hu, W.; Xu, A. "Improved performance of M-ary PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence due to forward error correction," *Proc. of 10th Int. Conf. on Communication Technology*, 27-30 Nov. 2006, Guilin, China. IEEE, 2006, p. 1-4. DOI: [10.1109/ICCT.2006.341961](https://doi.org/10.1109/ICCT.2006.341961).

15. Hiranovic, Steve. *Wireless Optical Communication Systems*. New York, NY: Springer, 2004.

16. Manor, H.; Arnon, S. "Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength," *Appl. Opt.*, Vol. 42, No. 21, p. 4285-4294, 2003. DOI: [10.1364/AO.42.004285](https://doi.org/10.1364/AO.42.004285).

17. Liu, X. "Free-space optics optimization models for building sway and atmospheric interference using variable wavelength," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 57, No. 2, p. 492-498, 2009. DOI: [10.1109/TCOMM.2009.02.070089](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2009.02.070089).

18. Mohammed, Nazmi A.; El-Wakeel, Amr S.; Malekmohammadi, Amin; Aly, Moustafa H. "Performance evaluation of FSO link under NRZ-RZ line codes, different weather conditions and receiver types in the presence of pointing errors," *Open Electrical Electronic Eng. J.*, Vol. 6, p. 28-35, 2012. DOI: [10.2174/1874129001206010028](https://doi.org/10.2174/1874129001206010028).

19. Tang, X.; Rajbhandari, S.; Popoola, W. O.; Ghassemlooy, Z.; Leitgeb, E.; Muhammad, S. S.; Kandus, G. "Performance of BPSK subcarrier intensity modulation free-space optical communications using a log-normal atmospheric turbulence model," *Proc. of Symp. on Photonics and Optoelectronic, SOPO*, 19-21 Jun. 2010, Chengdu, China. IEEE, 2010, p. 1-4. DOI: [10.1109/SOPO.2010.5504014](https://doi.org/10.1109/SOPO.2010.5504014).

20. El Mashade, Mohamed B.; Toeima, Ahmed H.; Aly, Moustafa H. "Regenerated spatial diversity performance of wireless optical communication over strong turbulent atmospheric channel," *J. Appl. Physical Sci. Int.*, Vol. 5, No. 1, 2016. URI: <http://www.ikpress.org/abstract/4677>.

21. Baedke, M. L. "Performance analysis of multipulse PPM on MIMO free-space optical channels," Ph.D dissertation, School of Engineering and Applied Science. University of Virginia, Virginia, USA, 2004.

22. Sadia; Majumder, S. "Performance analysis of a MIMO FSO system in presence of pointing error," *Proc. of 2011 Int. Conf. on Computer Communication and Management, ICCCM 2011*, 2-4 May 2011, Sydney, Australia. Sydney, 2011. ISBN 978-1-84626.

Поступила в редакцию 31.12.2016

После переработки 08.02.2018