УДК 621.372

О.Р. КУЗИЧКИН, Г.С. ВАСИЛЬЕВ, Д.И. СУРЖИК
O.R. KUZICHKIN, G.S. VASILYEV, D.I. SURZHIK

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УФ СВЯЗИ НА БАЗЕ СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ

ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF THE UV COMMUNICATION SYSTEM BASED ON LED MATRICES

Рассчитана мощность излучения оптического передатчика, необходимая для обеспечения связи при различных значениях дальности, а также азимутального отклонения передатчика и приемника. Полученные соотношения позволяют определять энергетические характеристики системы УФ связи в различных условиях функционирования (при изменении состояния канала, режима передачи, поворотах или перемещениях узлов связи).

Ключевые слова: ультрафиолетовая связь; УФ-С, NLOS; самоорганизующаяся сеть

The optical transmitter radiation power required for communication at various range values, as well as the azimuthal deviation of the transmitter and receiver, is calculated. The obtained relations allow us to determine the energy characteristics of the UV communication system under various operating conditions (when the channel state changes, the transmission mode changes, turns or movements of communication nodes occur).

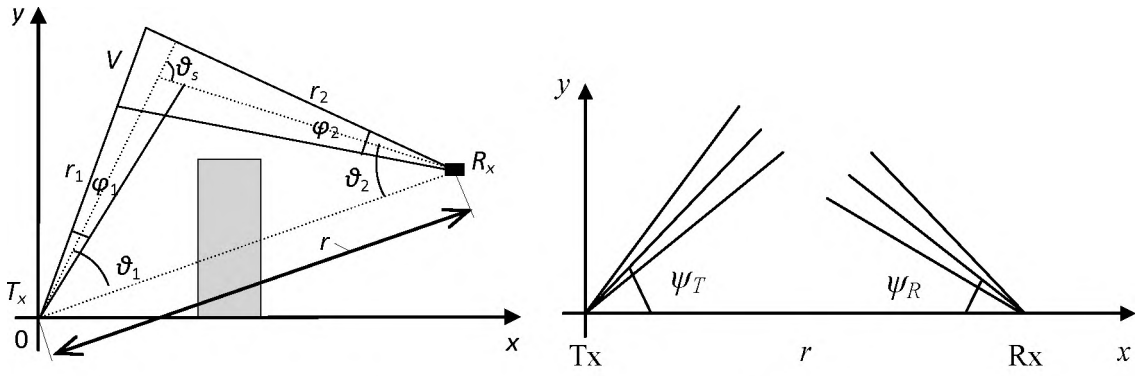
Keywords: UV communication; UV-C; NLOS; ad-hoc network

Введение

Системы ультрафиолетовой (УФ) связи находят применение в условиях, когда радиосвязь оказывается неэффективной или невозможной (наличие высоких препятствий в условиях плотной городской застройки или сложного рельефа местности, высокий уровень внешнего электромагнитного фона, действие средств радиоэлектронной борьбы, разрушение существующей инфраструктуры систем связи в результате чрезвычайной ситуации). Системы связи солнечно-слепого ультрафиолетового диапазона UV-C от 200 до 280 нм обеспечивают возможность связи при отсутствии прямой видимости (non line-of-sight, NLOS) за счет сильного рассеяния УФ излучения в атмосфере [1]. Для обеспечения энергетических характеристик системы УФ связи, требуемой для связи на дистанциях более 1 км, многие исследователи используют УФ лазеры на стороне оптического передатчика. Применение лазеров в мобильных системах связи, в частности в мобильных самоорганизующихся сетях на базе УФ канала [2], затруднительно, т.к. лазеры требуют громоздкой системы накачки. Поэтому вместо лазеров на стороне оптического передатчика более перспективно использовать в мобильных устройствах светодиоды и светодиодные матрицы УФ-С диапазона излучения [3]. Для применения компонентов в реальных системах связи необходимо выполнить анализ энергетических характеристик системы на основе свойств УФ канала.

Основная часть

Геометрия NLOS UV канала связи показана на рис. 1. На рисунке 1а показана вертикальная проекция канала и обозначено следующее: Tx - передатчик, Rx - приемник (располагаемые в общем случае на разной высоте), r - расстояние между Tx и Rx, $в_1 р$ и $\wedge_{1,2}$ - угол места и ширина диаграммы направленности, индекс 1 относится к передатчику, индекс 2 - к приемнику, e_s - угол рассеяния, V - общий объем диаграмм направленности Tx и Rx, r_{12} - расстояние от Tx и Rx до центра области V, серый прямоугольник обозначает препятствие. Для анализа производительности сети с различной пространственной ориентацией узлов необходимо также учитывать азимуты передатчика и приемника как показано на рисунке 1б.



а) б)

Рисунок 1 - Вертикальная (а) и горизонтальная (б) проекция УФ канала в режиме NLOS

Энергетические характеристики модуляции on-of keying без возврата к нулю (NRZ OOK) определяются выражением [4]:

$$BER_{nrz\text{-}OOK}(SNR) = \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{242}\cdot\frac{\Gamma\ 1}{4nR}}\right) \quad (1)$$

Отношение сигнал-шум (SNR) УФ канала определяется как отношение числа продетектированных сигнальных фотонов *Nd* к числу шумовых фотонов $N_{„}$.

$$SNR = N, / N^{\wedge}, \quad (2)$$

где $N = N /Loss = PT/(hcR \blacksquare Loss)$. Здесь обозначено *Pm*- мощность излучения передатчика, *nf* - коэффициент передачи солнечно-слепого фильтра, *Щг* - квантовая эффективность детектора (приемника), $щ_г$ - количество принятых фотонов, *2* - длина волны излучения, *Loss* - потери в канале, *R* - битрейт, $h = 6{,}626^{\wedge}10^{-34}$ Дж^с - постоянная Планка, $c = 3^{\wedge}10^8$ м/с - скорость света в вакууме.

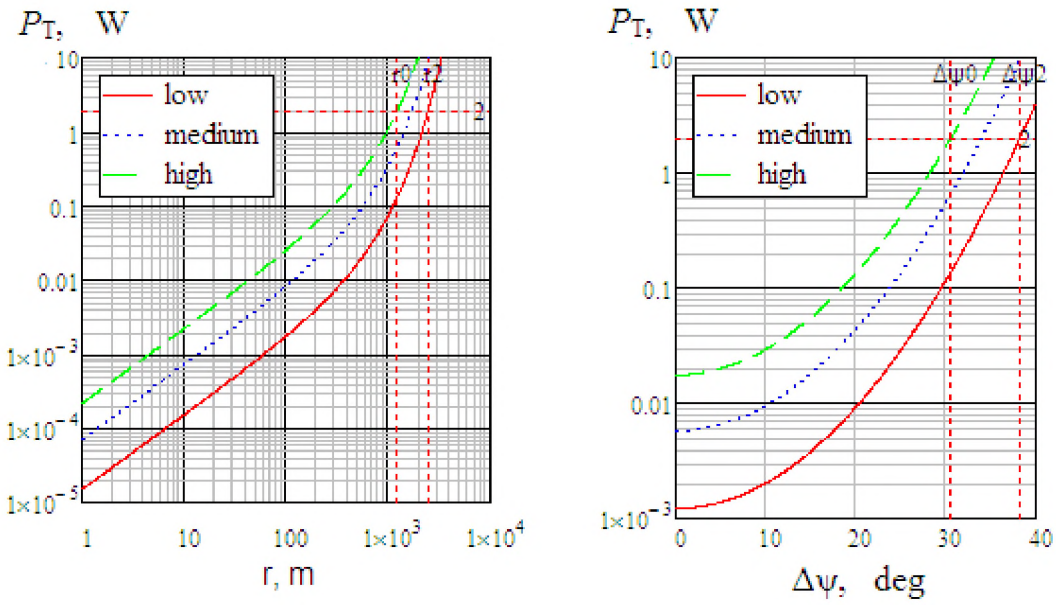
Результаты измерений показали, что в худшем случае при направлении фотоприемника на солнце в ясную погоду частота детектирования шумовых фотонов составляет около 15 000 Гц (при использовании качественного солнечно-слепого фильтра и фотоэлектронного умножителя с апертурой 1,92 см^2) [5]. Типичные частоты детектирования шумовых фотонов при малом, среднем и высоком уровнях шума составляют около 1000; 5000; 15000 Гц соответственно [5].

При перемещении узлов сети или изменении характеристик УФ канала необходимо адаптивное изменение мощности передатчика в зависимости от конкретных условий. Согласно (2), мощность излучения, достаточная для достижения заданной величины *SNR*, определяется выражением:

$$P_T(r,в1,в2,^1,^2) = \frac{SNR \blacksquare N \blacksquare hcR \blacksquare Loss(r,^^)}{} \quad (3)$$

Энергетические характеристики системы УФ связи, рассчитанные по выражению (3), показаны на рис. 2. Моделирование величины потерь в УФ канале выполнено на базе метода Монте-Карло.

Были приняты следующие значения параметров УФ канала: дальность связи *г* =100 м, углы возвышения передатчика и приемника $в_1 = 30^0$ и $в_2 = 30^0$, ширины диаграмм направленности передатчика и приемника $ф_1 = 10^0$ и $ф_2 = 30^0$, длина волны излучения *2* = 260 нм, коэффициенты рассеяния и поглощения для ясной погоды, площадь апертуры приемника $A_г$ = 1,92 см^2). Также принято *SNR* = 10 дБ, *R* = 100 кбит/с.



а б

Рисунок 2 - Энергетические характеристики системы УФ связи при различных уровнях шума: а) от дальности *г;* б) от азимутального отклонения А^ = |^ | +|

Максимальная мощность УФ-С светодиодов составляет 130 мВт (SMD 6060 UVC LED High-Power) против 1 Вт для УФ-С лазеров. Для повышения мощности излучения целесообразно использовать матрицы светодиодов с излучаемой мощностью до 2 Вт (FLS 6060 UVC SMD LED 5x5 Array). Согласно рисунку 2а, при $P_{Tma}x$ = 2 Вт и выбранных характеристиках канала и режима передачи предельная дальность составляет 1 250 м, 1 720 м и 2 490 м при высоком, среднем и низком уровнях шума соответственно. Согласно рис. 2б, при P_{Tmax} = 2 Вт связь на дальности *г* =100 м обеспечивается при азимутальном отклонении не более 30^0, 34^0 и 38^0 при высоком, среднем и низком уровнях шума соответственно.

Проведенные исследования позволяют определять энергетические характеристики системы УФ связи в различных условиях функционирования (при изменении состояния канала, режима передачи, поворотах или перемещениях узлов связи).

Благодарности

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-2159.2020.8 «Моделирование и экспериментальное исследование беспроводной мобильной самоорганизующейся сети ультрафиолетовой связи».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu Z. and Sadler B. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art IEEE Commun. Mag.4667-73, 2009.

2. Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Kuzichkin O.R., Kurilov I.A., Lazarev S.A. Modeling and Analysis of the Characteristics of Ultraviolet Channels under Different Conditions of Radiation Propagation for the Organization of Wireless AD-HOC Network // JARDCS - Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems - 2018. 07-Special Issue, pp. 1853-1859. http: //j ardcs .org/abstract.php?archiveid=5147.

3. Guo Q, He N, He Z. Research on the channel performances and transmission in UV-LED scatter communications [J]. Study On Optical Com-munications, 2013 (3): 64-66.

4. Elganimi T.Y. Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems: Analytical Study. International Journal of Computer Applications, 2013, 79(11). pp. 22-27.

5. Chen G., F. Abou-Galala, Z. Xu, and B. M. Sadler, “Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links,” Optics Express, 2008, vol. 16, no. 19. - pp. 15059-15068.

Кузичкин Олег Рудольфович
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Д.т.н., профессор, профессор кафедры информационных и робототехнических систем
E-mail: Kuzichkin@bsu.edu.ru

Васильев Глеб Сергеевич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
К.т.н., с.н.с. инжинирингового центра
Тел.: 8(915) 751-66-47
E-mail: vasilievgleb@yandex.ru

Суржик Дмитрий Игоревич
Владимирский государственный университет, г. Владимир
К.т.н., доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах»
E-mail: arzerum@mail.ru