

# Энергоэффективное управление мощностью оптического излучения в беспроводной связи через видимый свет<sup>1</sup>

И. ДИН<sup>1</sup>, Х. КИМ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Инчхонский национальный университет, Инчхон, Республика Корея

<sup>2</sup> Электротехнический факультет Корейского института передовых технологий (KAIST), Тэджон, Республика Корея

E-mail: Irfan07@kaist.ac.kr

## Аннотация

Два основных назначения систем беспроводной связи через видимый свет (*Visible Light Communication, VLC*) – управление освещением (светорегулирование) и связь. Эти функции выполнимы одновременно, что снижает полное энергопотребление систем *VLC*. В статье формулируется задача оптимизации, решение которой позволяет минимизировать энергопотребление светодиодных ламп, входящих в состав систем *VLC*, и одновременно удовлетворять требованиям потребителей как к освещению, так и к связи. Эффективность предложенного решения оценивалась путём компьютерного моделирования, которое показало его способность снижать энергопотребление систем *VLC* на 30% по сравнению с традиционными решениями.

**Ключевые слова:** мощность оптического излучения, энергопотребление, широтно-импульсная модуляция, управление освещением.

## 1. Введение

Вид связи, в котором в качестве передатчика применяется источник видимого света, известен как *VLC*. Видимая область спектра охватывает длины волн от 380 до 780 нм, что соответствует частотному диапазону примерно 384–789 ТГц [1]. Этот диапазон практически безграничен, охватывая полосу частот шириной порядка 400 ТГц [2]. Видимая область спектра в последнее время привлекает повышенное внимание в плане её использования для высокоскоростной *VLC* в помещениях.

Светодиоды (СД) считаются источниками света очень важными для экономии электроэнергии, расходуемой на внутреннее освещение [3]. Благодаря своей безынерционности СД могут использоваться в средствах связи в качестве передатчика, свет которого модулируется информационными сигналами. Так как *VLC* объединяет в себе передачу данных и светорегулирование, то *VLC* с использованием СД привлекла большое внимание и заняла достойную нишу в беспроводной связи.

Светорегулирование, являющееся важной особенностью современных систем освещения, обеспечивается главным образом широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) или изменением глубины модуляции под воздействием входного управляющего сигнала. Был предложен целый ряд разных вариантов модуляции для управления освещением и передачи данных с помощью СД [4–6]. Было также предложено [7] совместить функции светорегулирования и передачи данных в *VLC*, в которой пере-

дача данных обеспечивается фазово-импульсной модуляцией поднесущей, а светорегулирование осуществляется посредством ШИМ или изменения глубины модуляции. В нашей предшествующей работе [8] мы оптимизировали параметры фазово-импульсной модуляции для минимизации энергопотребления системы *VLC* при одновременном удовлетворении требований потребителей как к освещению, так и к связи.

Данная работа посвящена системам *VLC* с ШИМ для светорегулирования и связи. При этом основное внимание уделяется оптимизации принимаемой мощности оптического излучения (МОИ) и освещённости, позволяющей снижать энергопотребление систем *VLC*, одновременно удовлетворяя требования потребителей к освещению и к связи. Задача оптимизации касается определения оптимальных значений ширины входных ШИМ-сигналов с учётом ограничений по светорегулированию и связи.

## 2. Модель системы

В данной работе *VLC* рассматривалась применительно к помещениям (рис. 1). Принималось, что  $L$  идентичных СД-ламп равномерно распределены по потолку помещения и что пол разделён на  $J$  одинаковых квадратных клеток (или «рабочих зон»). Считалось, что СД-лампы, входящие в систему *VLC*, могут использоваться для обеспечения связи, то есть работать как передатчики этой системы, и что приёмные устройства со стороны пользователей содержат фотодиоды. И для простоты линия связи, рабо-

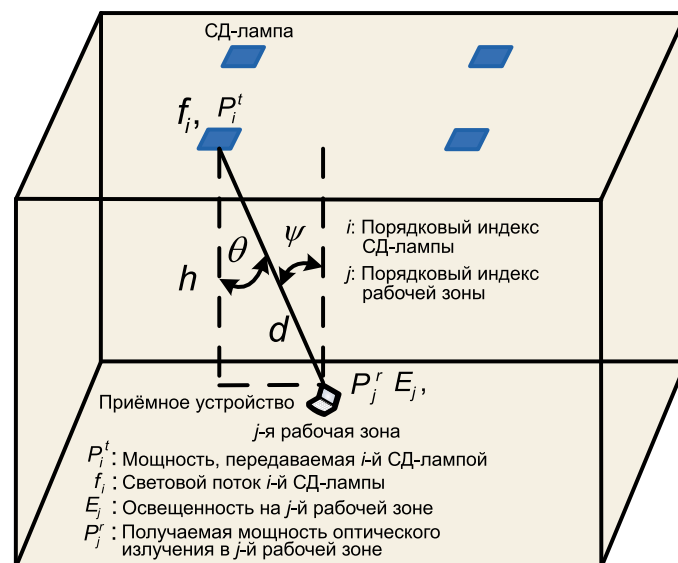


Рис. 1. Модель системы *VLC* для помещений

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

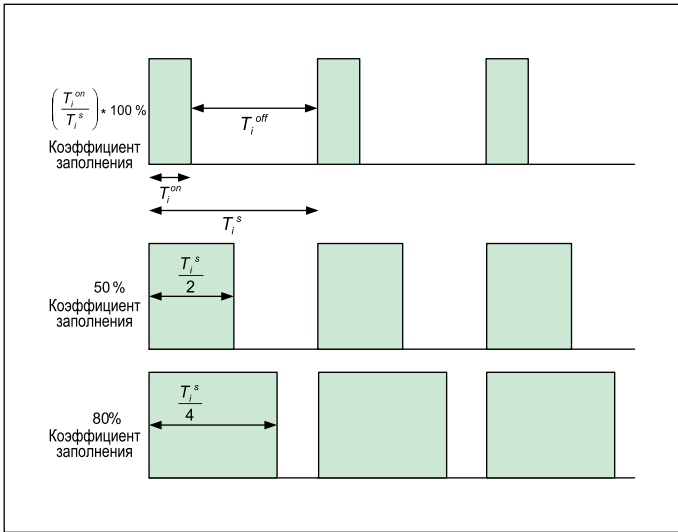


Рис. 2. Формы ШИМ-сигналов с разными коэффициентами заполнения

тающая в пределах прямой видимости, считалась общей и для связи, и для светорегулирования.

## 2.1. Модуляция

Мы считаем, что обеспечиваемая ШИМ амплитудная манипуляция (*On Off Keying, OOK*) предназначена для передачи данных и управления светом. *OOK* – это простейший вид модуляции, в рамках которой двоичным единице и нулю соответствуют наличие или отсутствие несущей волны на заданном отрезке времени. Средняя мощность принимаемого фотодиодом оптического сигнала  $P_r$  прямо пропорциональна его амплитуде  $A$ :  $P_r = A/(2 \cdot R)$ , где  $R$  – чувствительность фотоприёмника. При скорости передачи данных передатчика с *OOK*, равной  $R_b$ , будет передаваться за секунду  $R_b$  прямоугольных импульсов длительностью  $1/R_b$ . Интенсивность импульса, соответствующего бинарной единице, равна  $2 \cdot P$ , а бинарному нулю соответствует нулевая интенсивность импульса, то есть отсутствие импульса.

Для оценки работы системы передачи данных ключевым параметром является коэффициент битовых ошибок *BER*, который можно определить как отношение количества битовых ошибок к общему количеству переданных битов. Для обеспечения приемлемой вероятности ошибок *BER* должен быть меньше  $10^{-6}$  [9]. В случае *OOK* *BER* можно рассчитывать по формуле

$$BER_{ook} = Q \left( \sqrt{\frac{2R^2 P_r^2}{N_o R_b}} \right), \quad (7)$$

где  $N_o$  – спектральная плотность распределения мощности гауссовского дробового шума. Дробовой шум представляет собой совокупность шума, обусловленного искусственным освещением со спектральной плотностью распределения мощности  $N_i$  и дробового шума, обусловленного естественным освещением, со спектральной плотностью распределения мощности  $N_s$  [10]. Величину  $N_o$  можно рассчитывать по формуле

$$N_o = N_i + N_s = q \cdot (I_{bi} + I_{bs}),$$

где  $q$  – заряд электрона, а  $I_{bi}$  и  $I_{bs}$  – фототоки, обусловленные искусственным и естественным освещением соответственно.

*BER* зависит от принимаемой мощности, а так как все прочие входящие в уравнение (1) параметры являются константами, то средняя мощность оптического излучения, требующаяся для обеспечения заданного значения *BER* ( $P_{req}$ ), в случае *OOK* можно рассчитывать по формуле

$$P_{req} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{N_o R_b}{2}} Q^{-1}(BER).$$

Форма ШИМ-сигнала показана на рис. 2. Период символа  $T_i^s$  разделён на два подпериода  $T_i^{on}$  и  $T_i^{off}$ , где индекс  $i$  обозначает сигнал соответствующего СД. Подпериоду  $T_i^{on}$  соответствует наличие сигнала, и в этом подпериоде происходит передача сигнала, имеющего амплитуду  $k$ . Подпериоду  $T_i^{off}$  соответствует отсутствие сигнала, то есть в этом подпериоде сигнал не передаётся. Ширина подпериода  $T_i^{on}$  пропорциональна передаваемой мощности оптического излучения и силе света СД. Изменяя ширину подпериода  $T_i^{on}$  можно получить требуемый коэффициент заполнения (рис. 2).

## 2.2. Освещение

Количество света, излучаемого СД, определяется его световым потоком  $f$ , который описывается выражением

$$f = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot f_e(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где  $K_m$  – максимальная спектральная световая эффективность излучения,  $V(\lambda)$  – относительная спектральная световая эффективность излучения,  $f_e(\lambda)$  – спектральная плотность потока излучения [6]. Сила света  $I$ , представляющая собой световой поток, излучаемый в единице телесного угла  $\Omega$ , рассчитывается по формуле

$$I = df/d\Omega.$$

Применительно к ШИМ-сигналу излучаемый световой поток равен

$$f_i = N_i \cdot f_{max},$$

где  $N_i$  – отношение подпериода, в котором имеется сигнал, к периоду символа ( $N_i = T_i^{on} / T_i^s$ ),  $f_i$  – световой поток  $i$ -го СД, а  $f_{max}$  – максимальное значение светового потока, который может быть получен в случае ШИМ-сигнала с  $T_i^{on} = T_i^s$ .

При проектировании системы освещения интерес представляет значение освещённости  $e$ , измеряемое в люксах и определяемое приходящимся на единицу поверхности световым потоком [5]:

$$e = I(\theta) / r^2,$$

где  $I(\theta)$  – сила света источника света в направлении  $\theta$ ,  $r$  – расстояние между источником света и рассматриваемой

точкой. Для косинусного распределения излучения источника света, горизонтальную освещённость в точке  $j$ , находящейся на расстоянии  $r$  метров от источника света, можно рассчитать по формуле

$$e_j = \frac{I_0 \cos^m(\theta) \cos(\psi)}{r^2}, \quad (2)$$

где  $I_0$  – максимальное значение силы света, описываемое формулой

$$I_0 = I(0) = (m+1)f / (2\pi),$$

$\Psi$  и  $\theta$  – углы падения и излучения соответственно [11],  $m$  – порядок косинусного распределения, определяемый половиной угла, соответствующего уровню 0,5 силы света СД:

$$m = \frac{\ln 2}{\ln \cos(hpa)},$$

где  $hpa$  – угол, соответствующий половине максимальной силы света СД (например, при  $hpa = 60^\circ$   $m = 1$ ). Подставив  $I_0$  в уравнение (2), получаем следующее выражение для расчёта освещённости в точке  $j$ , создаваемой  $i$ -й СД-лампой:

$$e_{ij} = \frac{f_i(m+1) \cos^m(\theta) \cos(\psi)}{2\pi r^2}. \quad (3)$$

Полная освещённость, создаваемая  $L$  СД-лампами в точке  $j$ , может быть определена посредством суммирования освещённостей, создаваемой отдельными СД-лампами:

$$E_j = \sum_{i=1}^L e_{ij}. \quad (4)$$

### 2.3. Передача данных

Мощность передаваемого СД оптического излучения определяется интегрированием потока энергии по всем направлениям:

$$P_t = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \int_0^{2\pi} f_e \cdot d\theta d\lambda,$$

где  $\lambda_{max}$  и  $\lambda_{min}$  определяются кривой спектральной чувствительности фотодиода [5].

Мощность, передаваемая СД в случае входного ШИМ-сигнала, рассчитывается по формуле

$$P_i^t = N_i \cdot P_{max}^t,$$

где  $P_i^t$  – мощность, передаваемая  $i$ -й СД-лампой,  $P_{max}^t$  – максимальное значение МОИ, которое может быть получено в случае ШИМ-управляющего сигнала с  $T_i^{on} = T_i^s$ .

Если рассматривать прямой свет, то есть свет в пределах прямой видимости, то часть МОИ  $i$ -й СД-ламп  $P_i^t$ , попадающая на приёмник (фотодиод), расположенный в точке  $j$  выражается как

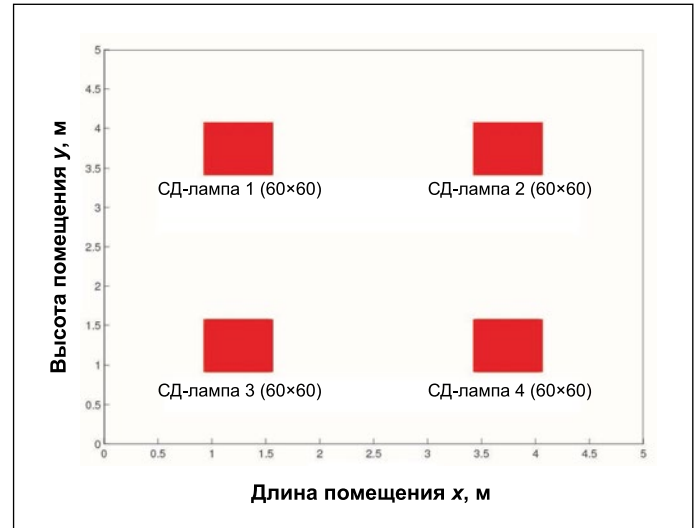


Рис. 3. Расположение СД-ламп

$$P_{ij}^r = H(0) P_i^t,$$

где  $H(0)$  – коэффициент усиления канала по постоянному току, выражаемый как [12]

$$H(0) = \begin{cases} \frac{A(m+1)}{2\pi r^2} \cos^m(\theta) \cos(\psi) g(\psi) T_s(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}$$

где  $A_r$  – эффективная площадь приёмника,  $g(\Psi)$  и  $T_s(\Psi)$  – коэффициент усиления оптического концентратора и коэффициент пропускания оптического фильтра соответственно.  $g(\Psi)$  описывается выражением

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}$$

где  $n$  – показатель преломления. Принимаемая в точке  $j$  МОИ  $i$ -й СД-ламп рассчитывается по формуле

$$P_{ij}^r = P_i^t \frac{A_r(m+1)}{2\pi r^2} \cos^m(\theta) \cos(\psi) g(\psi) T_s(\psi), \quad (5)$$

где  $A_r$  – эффективная площадь приёмника. Полная принимаемая в точке  $j$  МОИ  $L$  светильников с СД может быть определена посредством суммирования принимаемых в этой точке мощностей оптического излучения отдельных СД-ламп:

$$P_j^r = \sum_{i=1}^L P_{ij}^r. \quad (6)$$

### 3. Постановка задачи

Целью предлагаемого решения является минимизация полного энергопотребления при условии удовлетворения

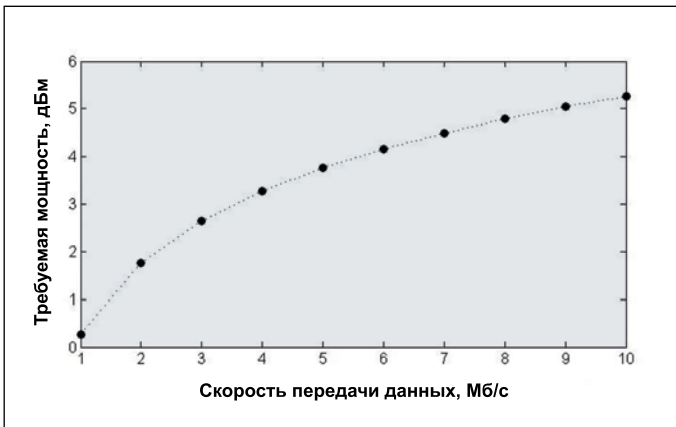


Рис. 4. Зависимость требуемой мощности от скорости передачи данных при  $BER = 10^{-6}$

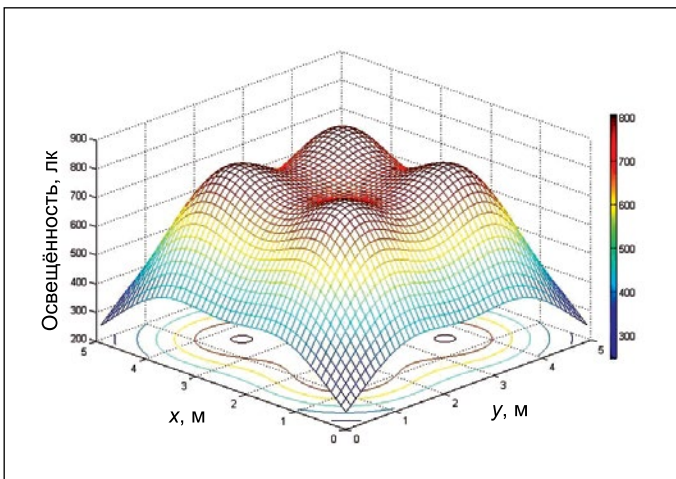


Рис. 5. Распределение освещённости

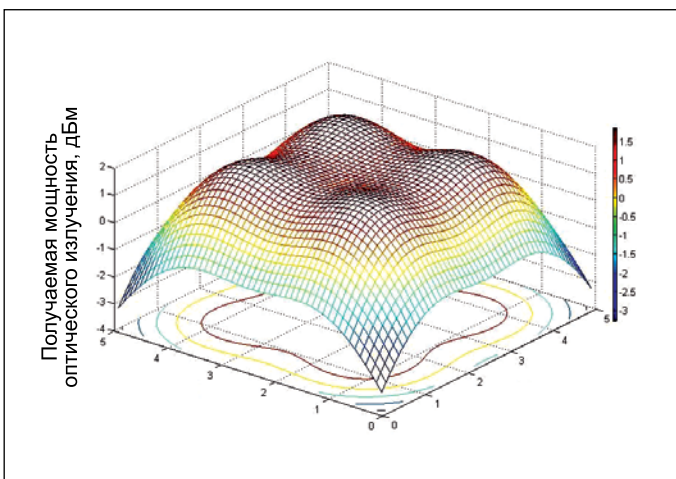


Рис. 6. Распределение получаемой мощности оптического излучения

требований потребителей как к освещению, так и к связи. Считая энергопотребление пропорциональным продолжительности подпериода наличия ШИМ-сигнала, цели можно достичь минимизацией  $N_i$ , то есть минимизацией  $T_i^{on}$ . Задача состоит в нахождении оптимального значения  $T_i^{on}$ , которое обеспечивало бы удовлетворение требований как к освещению, так и к передаче данных. Задача оптимизации может быть сформулирована как

$$\min_{N_i} \sum_i^L f_i \quad (7)$$

при условии, что

$$P_j^r \geq P_{req} \text{ при всех } j, \quad (8)$$

$$E_j \geq E_{req} \text{ при всех } j, \quad (9)$$

$$0 \leq T_i^{on} \leq T_i^s, \quad (10)$$

где  $P_{req}$  и  $E_{req}$  – требуемые значения принимаемой МОИ и освещённости соответственно. Целевая функция описывается выражением (7), которое призвано минимизировать полный световой поток всех СД-ламп и тем самым, минимизировать полное энергопотребление системы. Накладываемые ограничения соответствуют выражениями (8)–(10). Ограничения (8) и (9), обеспечивают выполнение требований к минимально допустимым значениям принимаемой МОИ и освещённости. Ограничение на  $T_i^{on}$  (10) определяет собой возможности по светорегулированию и накладывает ограничения на МОИ, передаваемую СД-источником света.

#### 4. Оценка работы системы

Оценка работы предложенного варианта VLC производилась с помощью моделирования применительно к помещению, показанному на рис. 1. Были рассмотрены четыре СД-лампы, позволяющие осуществлять VLC, которые были установлены на высоте 3 м над уровнем пола. Считалось, что каждая лампа содержала  $60 \times 60$  СД, расположенных на расстоянии 1 см друг от друга. Осевая сила света СД считалась равной 0,73 кд, а угол излучения (*semi-angle at half-power*) – равным  $60^\circ$ . Расположение СД-ламп на потолке помещения показано на рис. 3, а в таблице приведены типичные параметры, которые использовались при моделировании.

На рис. 4 при  $BER = 10^{-6}$  приведено сравнение требуемой МОИ в случае входного ШИМ-сигнала при изменении скорости передачи данных от 1 до 10 Мб/с. Можно заметить, что при заданном значении  $BER$  требуемая МОИ с ростом скорости передачи данных растёт.

Принимаемая МОИ и освещённость на поверхности стола высотой 0,85 м в каждой из рабочих зон рассчитывались по уравнениям (5)–(6) и (3)–(4) соответственно. На рис. 5 приведено распределение освещённости на уровне поверхности стола. Можно заметить, что освещённость во всём помещении превышает требуемую, то есть 400 лк, за исключением углов, где уровень освещённости оказался несколько меньше 400 лк. Однако площадь угловых участков очень мала, и потребители обычно в них не располагаются.

На рис. 6 приведено распределение МОИ, обусловленное прямым излучением СД-ламп. В работе [13] было получено минимальное значение МОИ, равное  $-2,8$  дБ, которое считается минимальным требованием к получаемой МОИ. Минимальный уровень МОИ обеспечивается во всех точках рассматриваемого помещения.

Из рис. 5 и 6 следует, что достаточные значения освещённости и МОИ обеспечены во всём помещении, то есть требования к освещению и связи удовлетворены



Параметры системы

Параметр	Значение
Размеры помещения, м	5 × 5 × 3
Количество СД-ламп, шт.	4
Высота поверхности стола, м	0,85
Количество СД в лампе	3600 (60 × 60)
Расстояние между СД, см	1
Мощность одного СД, мВт	20
Осевая сила света, кд	0,73
Угол излучения на уровне 0,5, град.	60
Чувствительность фотодиода	0,4
Диаметр приёмной поверхности фотодиода, см	1
Поле зрения приёмника, град.	120
Показатель преломления концентратора	1,5

в нём целиком. Сравнение уровней энергопотребления в случае предложенного варианта решения и в случае традиционной решения, с использованием ШИМ-сигнала с 50%-ным фиксированным коэффициентом заполнения, показало, что предложенный вариант решения приводит к снижению энергопотребления системы на 32%.

Данное исследование финансировалось Министерством образования Республики Корея через Корейский национальный исследовательский фонд. Часть полученных результатов была представлена на 28-й Международной технической конференции по схемам/системам, компьютерам и связи («ITC–CSCC2013»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Christian, P.* Visible Light Communication // Seminar Kommunikations standards in der Medizintechnik. URL: [http://www-old.itm.uni-luebeck.de/teaching/ss10/sem\\_kim/ausarbeitungen/2010-06-29%20Pohlmann.%20Visible%20Light%20Communication.pdf?lang=en](http://www-old.itm.uni-luebeck.de/teaching/ss10/sem_kim/ausarbeitungen/2010-06-29%20Pohlmann.%20Visible%20Light%20Communication.pdf?lang=en).
2. URL: <http://www.lificonsortium.org/>.
3. *Babanova, J.B., Lunchev, V.A.* Energy Saving Capabilities when using Control Systems for Interior Illumination // Light & Engineering. – 2012. – Vol. 20, No. 1. – P. 58–65.
4. *Wu, Z., Chau, J., Little, T.* Modeling and Designing of a New Indoor Free Space Visible Light Communication System / 16<sup>th</sup> European Conf. on Networks and Optical Communications (NOC), IEEE. – 2011. – P. 72–75.
5. *Jang, H.J., Choi, J.H., Ghassemlooy, Z., Lee, C.G.* PWM-based PPM Format for Dimming control in visible light communication / 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP). – 2012. – P. 1–5.
6. *Lee, K., Park, H.* Modulations for Visible light Communications with Dimming Control // IEEE Photonics Technology Letters. – 2011. – Vol. 23. – P. 1136–1138.
7. *Sugiyama, H., Haruyama, S., Nakagawa, M.* Brightness Control Methods for Illumination and Visible-Light Communication Systems / Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07), 2007.

8. *Din, I., Kim, H.* Energy-Efficient Brightness Control and Data Transmission for Visible Light Communication // IEEE Photonics Technology Letters. – 2014. – Vol. 26, No. 8.

9. *Ascenso, J.* e-Business and Telecommunication Networks. – Springer, 2006.

10. *Liu Yuan-jian, Shi Qin-jian, Ma Xue, Zhang Ye-rong.* Simulation and Analysis of Indoor Visible Light Propagation Characteristics Based on the Method of SBR/Image // Int. Journal of Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. ID905916.

11. *Grubor, J., Jamett, O.C.G., Walewski, J.W., Randel, S., Langer, K.D.* High-Speed Wireless Indoor Communication via Visible Light. – ITG Bachbericht, 2007.

12. *Kahn, J.M., Barry, J.R.* Wireless infrared communication / Proc. of the IEEE, IEEE. – 1997. – Feb. – P. 265–298.

13. *Komine, T., Nakagawa, M.* Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2004. – February. – P. 100–107.



**Ирфануд Дин (Irfanud Din)**, Ph.D. Доцент  
Университета Инха, Ташкент, Узбекистан



**Хун Ким (Hoon Kim)**, Ph.D. Доцент  
факультета электронной техники  
Инчонского национального университета.  
Член Корейского института связи,  
Института инженеров по электротехнике  
и радиоэлектронике (США), Института  
инженеров по электронике, информатике  
и связи (Япония)