

УДК 004.057.4
ББК 32.973

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГИБРИДНОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОЙ И РАДИО ТЕХНОЛОГИЙ

Вишнеvский В. М.¹, Семенова О. В.²

(ЗАО Научно-производственное объединение «Информационные и сетевые технологии», Москва)

Шаров С. Ю.³

(Московский физико-технический институт, Москва)

Рассматривается математическая модель высокоскоростной гибридной системы связи на базе лазерной и радио технологий. Передача мультимедийной информации осуществляется по двум линиям связи, работающим в режиме горячего резервирования: лазерной линии и радиолнии миллиметрового диапазона радиоволн. Приводятся условия эргодичности марковского процесса, адекватно описывающего функционирование системы, и характеристики гибридного канала связи.

Ключевые слова: лазерный атмосферный канал, радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн, математическое и имитационное моделирование, условия эргодичности стохастического процесса.

1. Введение

Технология атмосферных оптических линий связи (АОЛС), или FSO-Free Space Optics, получила широкое распространение

¹ Владимир Миронович Вишнеvский, доктор технических наук, профессор (vishn@inbox.ru).

² Ольга Валерьевна Семенова, кандидат физико-математических наук, (olgasmv@gmail.com).

³ Станислав Юрьевич Шаров, аспирант (sharov.stanislav@gmail.com).

в последнее время. Указанная технология основывается на передаче данных модулированным излучением в инфракрасной (или видимой) части спектра через атмосферу и их последующим детектированием оптическим фотоприемным устройством. При этом в качестве излучателя обычно используются инфракрасные лазеры класса 1 или 1М (к лазерам 1-го класса относятся полностью безопасные лазеры, выходное коллимированное излучение которых не представляет опасности при облучении глаз и кожи); для низкоскоростных коммуникаций на небольшие расстояния могут использоваться светодиоды. В качестве приемника используются лавинные или кремниевые фотодиоды.

К основным преимуществам атмосферных оптических линий связи относятся:

- высокая пропускная способность и качество цифровой связи. Современные FSO-решения могут обеспечить скорость передачи цифровых потоков до 10 Гбит/с при показателе битовых ошибок 10^{-12} , что в настоящее время невозможно достичь при использовании любых других беспроводных технологий;

- отсутствует необходимость получения разрешения на использование частотного диапазона. FSO-системы используют инфракрасный диапазон электромагнитного спектра далеко за границей 400 ГГц (определенной как верхняя граница для радиочастотного регулирования на территории РФ), поэтому никаких лицензий и специальных разрешений не требуется;

- высокая защищенность канала от несанкционированного доступа и скрытность. Ни одна беспроводная технология передачи не может предложить такую конфиденциальность связи, как лазерная. Перехватить сигнал можно, только установив сканеры-приемники непосредственно в узкий луч от передатчиков. Реальная сложность выполнения этого требования делает перехват практически невозможным. Отсутствие ярко выраженных внешних признаков (в основном, это электромагнитное излучение) позволяет скрыть не только передаваемую информацию, но и сам факт информационного обмена. Поэтому лазерные системы часто применяются для разнообразных приложений, где требуется высокая конфиденциальность передачи

данных, включая финансовые, медицинские и военные организации;

- высокий уровень помехоустойчивости и помехозащищенности, поскольку FSO-оборудование невосприимчиво к радиопомехам и само их не создает;

- возможность установить лазерную атмосферную линию там, где затруднительно проложить проводную линию связи; например, в плотной городской застройке, через железную дорогу или автомагистраль, через природные преграды (реки, озера, горную местность и т.д.);

- скорость и простота развертывания FSO-сети.

Благодаря своим преимуществам АОЛС-технология позволяет решать проблемы «последней мили», развивать городские сети передачи данных и голоса, осуществлять подключение домашних сетей или офисов к сети Интернет, а также организовывать резервные каналы связи или расширять существующие каналы при высокой степени защищенности. Кроме того, технология используется для коммуникаций между космическими аппаратами.

Наряду с основными преимуществами беспроводных оптических систем известны и их главные недостатки:

- зависимость доступности канала связи от погодных условий;

- необходимость обеспечения прямой видимости между излучателем и приемником;

- ограниченная дальность связи.

Неблагоприятные погодные условия, такие как дождь, снег, туман (а также песчаная пыль, городской смог и различные виды аэрозолей), могут значительно ухудшить видимость и таким образом снизить эффективный диапазон работы лазерных атмосферных линий связи. Так, затухание сигнала в оптическом канале при сильном тумане может достигать до критических 50-100 дБ/км [1, 8]. Поэтому, чтобы достичь операторских (или хотя бы близких к ним) значений надежности FSO-канала связи, необходимо прибегать к использованию гибридных решений.

Гибридное радио-оптическое оборудование основывается на использовании резервного радиоканала (беспроводный ка-

нал, функционирующий под управлением протокола IEEE 802.11n [3] и/или радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн – E-диапазона 81-86 ГГц, 71-76 ГГц [5]) в связке с оптическим каналом. Основное достоинство такого решения в том, что это высокоскоростные беспроводные системы операторского класса, надежно функционирующие в любых погодных условиях.

В связи с возросшим интересом к гибридным системам в последние годы появилось немало работ, исследующих их характеристики [2, 11, 12]. Так в [12] исследуется выбор оптимального алгоритма переключения между основным и резервным каналом. Часть работ, например [14], исследует, какой режим работы гибридной системы будет наиболее эффективным в той или иной ситуации. Однако в большинстве статей авторы не приводят комплексного исследования всех характеристик, зачастую ограничиваясь лишь оценкой надежности гибридного канала.

Заметим, что большинство работ, исследующих модели гибридного канала, связаны главным образом с имитационным моделированием [6, 7, 10, 11, 13, 16]. Среди работ, посвященных построению математических моделей и их анализу, отметим [13], однако и здесь авторы ограничиваются лишь нахождением вероятности нарушения связи в оптическом канале. Впервые комплексное математическое исследование гибридной системы связи, включающей атмосферную оптическую линию связи и резервный радиоканал IEEE 802.11n (холодный резерв), приведено в [4, 15]. В настоящей работе, являющейся продолжением этих исследований, приводится анализ гибридной системы с высокоскоростным резервным каналом миллиметрового диапазона радиоволн, функционирующем в горячем резерве.

В разделе 2 приводится математическая модель рассматриваемой гибридной системы. В 3-м разделе исследуется марковский процесс, описывающий состояния системы и условия его эргодичности. В 4-ом разделе приводится алгоритм вычисления стационарных вероятностей состояний марковского процесса. В 5-ом – характеристики производительности гибридной системы и численные результаты.

2. Математическая модель гибридной системы связи с параллельным использованием радиоканала миллиметрового диапазона радиоволн

Адекватной моделью рассматриваемой гибридной системы является система массового обслуживания с двумя неоднородными приборами, обладающими различными скоростями обслуживания.

Предполагается, что поток заявок (пакетов) в систему является простейшим с параметром λ . Система имеет два обслуживающих прибора, времена обслуживания на которых имеют экспоненциальное распределение с параметрами μ_1 и μ_2 , соответственно. Предполагается также, что второй прибор является абсолютно надежным, а работа первого прибора (оптического канала) представляет собой чередующиеся промежутки доступности и недоступности канала. Эти периоды описываются абсолютно непрерывными случайными величинами ζ_1 и ζ_2 , соответственно. Случайная величина ζ_k имеет плотность гиперэкспоненциального распределения второго порядка

$$F_k(t) = p_k \gamma_k^{(1)} e^{-\gamma_k^{(1)} t} + (1 - p_k) \gamma_k^{(2)} e^{-\gamma_k^{(2)} t},$$

представляющего собой взвесь двух плотностей экспоненциальных распределений с параметрами $\gamma_k^{(1)}$ и $\gamma_k^{(2)}$, которые могут быть определены с помощью подхода, описанного в [4], $0 < p_k < 1$, $k = 1, 2$.

Если в течение времени обслуживания заявки на первом приборе (передачи пакета по оптическому каналу) канал становится недоступным, то обслуживание заявки прерывается, и она помещается на второй прибор, если он свободен, или становится во главе очереди и будет обслужена первой, когда второй прибор освободится, либо когда первый прибор станет доступным (в зависимости от того, какое из двух событий произойдет раньше).

3. Марковский процесс, описывающий состояния системы, и условия эргодичности

Рассмотрим случайный процесс

$$X(t) = (i(t), c_1(t), c_2(t)), t \geq 0,$$

где $i(t)$ – число заявок в системе в момент времени t , $c_1(t)$ и $c_2(t)$ – состояния приборов: $c_k(t) = 0$, когда прибор свободен; $c_k(t) = 1$, когда прибор занят; $c_1(t) = *$, когда прибор отключен (заметим, что это состояние имеет место лишь для первого прибора).

Случайный процесс $X(t)$, $t \geq 0$, является марковским и описывает состояния системы в произвольный момент времени.

Инфинитезимальный генератор процесса $X(t)$, $t \geq 0$, имеет следующую блочную структуру:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_0 & A_0 & O & O & O & \dots \\ B_0 & Q_1 & A_1 & O & O & \dots \\ O & B_1 & \bar{Q} & A & O & \dots \\ O & O & B & Q & A & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix},$$

где

$$Q_0 = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma_1) & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -(\lambda + \gamma_2) \end{pmatrix},$$

$$\bar{Q} = \begin{pmatrix} -(\lambda + \mu_1 + \mu_2 + \gamma_1) & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -(\lambda + \mu_2 + \gamma_2) \end{pmatrix},$$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} -(\lambda + \mu_1 + \gamma_1) & 0 & \gamma_1 \\ 0 & -(\lambda + \mu_2 + \gamma_1) & \gamma_1 \\ 0 & \gamma_2 & -(\lambda + \mu_2 + \gamma_2) \end{pmatrix},$$

$$B_0 = \begin{pmatrix} \mu_1 & 0 \\ \mu_2 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{pmatrix}, B_1 = \begin{pmatrix} \mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \mu_1 + \mu_2 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{pmatrix},$$

$$A_0 = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}, A_1 = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix},$$

$$\gamma_r = p_r \gamma_r^{(1)} + (1 - p_r) \gamma_r^{(2)}, r = 1, 2.$$

На основании результатов [9] критерием эргодичности марковского процесса $X(t), t \geq 0$, является выполнение неравенства

$$(1) \quad \bar{\pi} A \bar{e} < \bar{\pi} B \bar{e},$$

где $\bar{e} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, а $\bar{\pi}$ вектор-строка стационарных вероятностей

случайного процесса с инфинитезимальным генератором, определяемым матрицей

$$A + \bar{Q} + B = \begin{pmatrix} -\gamma_1 & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -\gamma_2 \end{pmatrix}.$$

Вектор $\bar{\pi}$ определяется как решение системы уравнений $\bar{\pi}(A + \bar{Q} + B) = \bar{0}, \bar{\pi}\bar{e} = 1$ и имеет вид

$$\bar{\pi} = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \right).$$

Таким образом, критерий эргодичности (1) принимает следующий вид:

$$(2) \quad \frac{\lambda(\gamma_1 + \gamma_2)}{\mu_1 + \mu_2} < \gamma_2 + \frac{\gamma_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2}.$$

4. Стационарное распределение марковского процесса, описывающего состояния системы

Предположим, что условие (2) выполнено, и система функционирует в стационарном режиме. Введем стационарные вероятности марковского процесса $X(t), t \geq 0$,

$$\pi_{xy}(i) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{i(t) = i, c_1(t) = x, c_2(t) = y\}, i \geq 0, x, y \in \{0, 1\},$$

$$\phi_y(i) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{i(t) = i, c_1(t) =, c_2(t) = y\}, i \geq 0, y \in \{0, 1\}.$$

Стационарные вероятности удовлетворяют следующей системе уравнений равновесия:

$$\begin{aligned} \pi_{00}(0)(\lambda + \gamma_1) &= \phi_0(0)\gamma_2 + \pi_{10}(0)\mu_1 + \pi_{01}(0)\mu_2, \\ \pi_{10}(0)(\lambda + \mu_1 + \gamma_1) &= \pi_{00}(0)\lambda + \pi_{11}(0)\mu_2, \\ \pi_{01}(0)(\lambda + \mu_2 + \gamma_1) &= \phi_1(0)\gamma_2 + \pi_{11}(0)\mu_1, \\ \pi_{11}(i)(\lambda + \mu_1 + \mu_2 + \gamma_1) &= \pi_{11}(i-1)\lambda I_{\{i>0\}} + \phi_1(i+1)\gamma_2 + \\ &+ \pi_{11}(i+1)(\mu_1 + \mu_2) + (\pi_{10}(0) + \pi_{01}(0))\lambda I_{\{i=0\}}, \quad i \geq 0, \\ \phi_0(0)(\lambda + \gamma_2) &= \phi_1(0)\mu_2 + \pi_{00}(0)\gamma_1, \\ \phi_1(i)(\lambda + \mu_2 + \gamma_2) &= \pi_{11}(i-1)\gamma_1 I_{\{i>0\}} + \phi_1(i-1)\lambda I_{\{i>0\}} + \\ &+ \phi_1(i+1)\mu_2 + \phi_0(0)\lambda I_{\{i=0\}} + (\pi_{10}(0) + \pi_{01}(0))\gamma_1 I_{\{i=0\}}, \quad i \geq 1. \end{aligned}$$

Введем векторы стационарных вероятностей

$$\begin{aligned} \bar{\pi}_0 &= (\pi_{00}(0), \phi_0(0)), \quad \bar{\pi}_1 = (\pi_{10}(0), \pi_{01}(0), \phi_1(0)), \\ \bar{\pi}_2 &= (\pi_{11}(0), \phi_1(1)), \dots, \bar{\pi}_i = (\pi_{11}(i-2), \phi_1(i-1)), \quad i \geq 2, \end{aligned}$$

где нижний индекс означает общее число заявок в системе (включая заявки на приборах).

Перепишем уравнения равновесия в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} \bar{\pi}_0 \bar{Q}_0 &= \bar{\pi}_1 B_0, \\ (3) \quad \bar{\pi}_1 \bar{Q}_1 &= \bar{\pi}_0 A_0 + \bar{\pi}_2 B_1, \\ \bar{\pi}_2 \bar{Q} &= \bar{\pi}_1 A_1 + \bar{\pi}_3 B, \\ \bar{\pi}_i \bar{Q} &= \bar{\pi}_{i-1} A + \bar{\pi}_{i+1} B, \quad i \geq 3. \end{aligned}$$

Предположим, что $\bar{\pi}_i = \bar{\pi}_0 F_i$, $i \geq 1$, тогда из равенств (3) следует, что матрицы F_i , $i \geq 0$ могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{aligned} F_0 &= E_2, \quad F_1 = A_0(-Q_1 - A_1 G_1)^{-1}, \quad F_2 = F_1 A_1(-\bar{Q} - AG)^{-1}, \\ F_i &= F_{i-1} A(-\bar{Q} - AG)^{-1}, \quad i \geq 3, \end{aligned}$$

где E_2 – единичная матрица размера 2, матрицы G_0 и G_1 определяются как

$$G_1 = (-\bar{Q} - AG)^{-1} B_1, \quad G_0 = (-Q_1 - A_1 G_1)^{-1} B_0,$$

а матрица G находится как минимальное неотрицательное решение матричного уравнения:

$$(4) B + \bar{Q}G + AG^2 = O.$$

Матричное уравнение (4) может быть решено с помощью итерационной схемы

$$G^{(0)} = E_2,$$

$$G^{(k)} = -\bar{Q}^{-1} \left(A(G^{(k-1)})^2 + B \right), k \geq 1,$$

а матрица G определяется как предел $G = \lim_{k \rightarrow \infty} G^{(k-1)}$.

5. Характеристики производительности системы и численные результаты

Вычислив стационарное распределение вероятностей состояний системы, можно найти следующие характеристики производительности:

1. Доля использования первого прибора (по отношению к общему числу обслуженных заявок)

$$P_1 = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\pi_{10}(i) + \pi_{11}(i) \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \right) \frac{1}{1 - \pi_{00}(0)}.$$

2. Доля использования второго прибора

$$P_2 = 1 - P_1.$$

3. Среднее число заявок, обслуженных i -м прибором

$$N_i = \lambda P_i, i = 1, 2.$$

4. Среднее число заявок в очереди

$$L_q = \sum_{i=1}^{\infty} i \left(\pi_{11}(i) + \pi_{01}(i) + \pi_{10}(i) + \phi_1(i) + \phi_0(i) \right).$$

5. Среднее число заявок в системе

$$L = \sum_{i=1}^{\infty} i \bar{\pi}_i \bar{e}.$$

6. Среднее время ожидания в системе (вычисляется по формуле Литтла)

$$W = \frac{L_q}{\lambda}.$$

Численные результаты представлены на рис. 1 и 2.

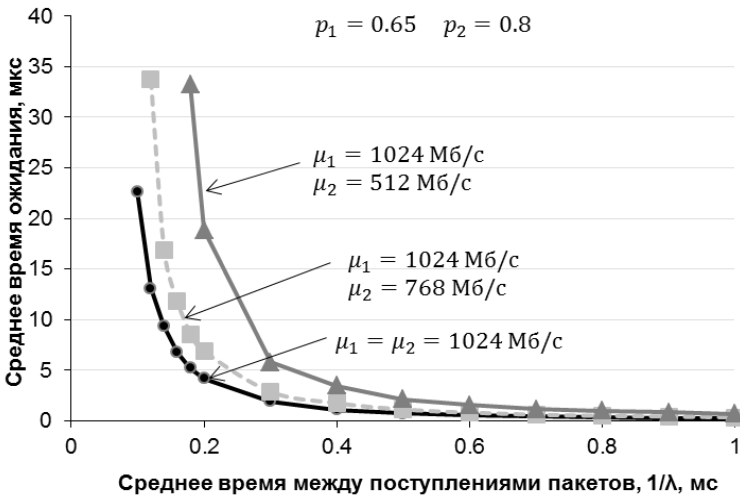


Рис. 1. Зависимость среднего времени ожидания в очереди от интенсивности входящего потока

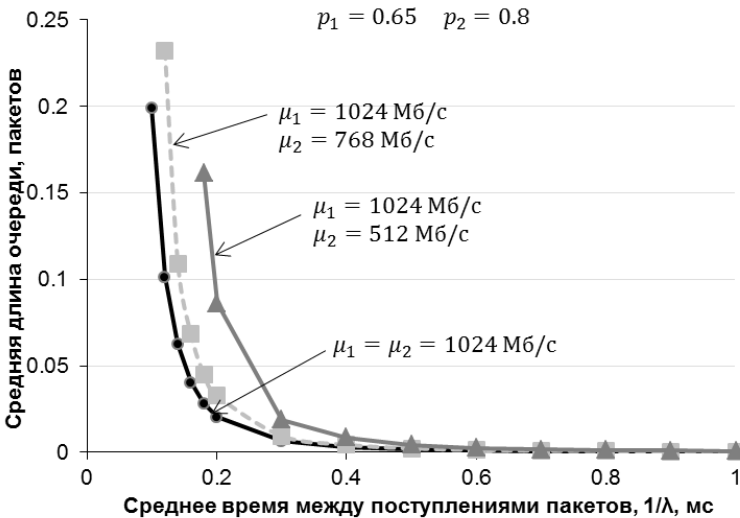


Рис. 2. Зависимость средней длины очереди от интенсивности входящего потока

6. Заключение

В работе проведено комплексное математическое исследование беспроводной гибридной системы связи, включающей лазерный атмосферный канал и резервный радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн. Показано, что адекватной моделью гибридного канала является система массового обслуживания с двумя обслуживающими приборами, обладающими разными скоростями обслуживания. Исследован стохастический процесс, описывающий состояния системы и условия его эргодичности. Разработан алгоритм вычисления стационарных вероятностей состояний марковского процесса и характеристик производительности гибридной системы.

Литература

1. ВИШНЕВСКИЙ В.М. *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. – М.: Техносфера, – 2003.
2. ВИШНЕВСКИЙ В.М. и др. *Гибридное оборудование на базе радио- и лазерной технологий // Первая миля*. – 2007. – № 1. – С. 26–30.
3. ВИШНЕВСКИЙ В.М., ПОРТНОЙ С.Л., ШАХНОВИЧ И.В. *Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G*. // – М: Техносфера, – 2010.
4. ВИШНЕВСКИЙ В.М., СЕМЕНОВА О.В. *Об одной модели оценки производительности широкополосного гибридного канала связи на основе лазерной и радиотехнологий // Проблемы информатики*. – 2010. – №2 (6). – С. 43–58.
5. ВИШНЕВСКИЙ В.М., ШАХНОВИЧ И.В., ФРОЛОВ С.А. *Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне радиоволн // Электроника*. – 2011. – № 1. – С. 90–98.
6. АКБУЛУТ А., ГОКХАН Н., АРИ Ф. *Design, availability and reliability analysis on an experimental outdoor FSO/RF communication system // International conference ICTON*, – 2005. – P. 403–406.
7. DERENICK J., THORNE C., SPLETZER J. *On the deployment of a hybrid free-space optic/radio frequency (FSO/RF) mobile*

- ad-hoc networks* // Conference proceeding, Intelligent Robots and Systems. – 2005. – P. 3990–3996.
8. FLECKER B., GEBHART M., LEITGEB E., SHEIKH MUHAMMAD S., CHLESTIL C. *Results of attenuation measurements for Optical Wireless Channel under dense fog conditions regarding different wavelengths* // Proc. Of SPIE. – 2006. – V. 6306. – P. 1–11.
 9. FRICKER C., JAIBI R. *Monotonicity and stability of periodic polling models* // Queuing Systems. – 1994. – V. 15. – P. 211–238.
 10. LETZEPIS N., NGUYEN K.D., GUILLEN I FABREGAS A., COWLEY W.G. *Outage analysis of the hybrid free-space optical and radio-frequency channel* // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2009. – V. 27. – P. 1709–1719.
 11. NADEEM F., GEBHART M., LEITGEB E., KOGLER W., AWAN M. S., KHAN M. S., KANDUS G. *Simulations and analysis of bandwidth efficient switch-over between FSO and mmW links* // IEEE SoftCOM, Split-Dubrovnik, Croatia, 25-27 September 2008. – P. 356–351.
 12. NADEEM F., GEIGER B., LEITGEB E., AWAN M.S., KANDUS G. *Evaluation of switch-over algorithms for hybrid FSO-WLAN systems* // Wireless VITAE, – 2009. – P. 565–570.
 13. NADEEM F., LEITGEB E., KVICERA V., GRABNER M., AWAN M.S., KANDUS G. *Simulation and analysis of FSO/RF switch over for different atmospheric effects* // International Conference ConTEL. – 2009. – P. 39–43.
 14. SANA H., ERKAN S., AHMED S., ALI M.A. *Design and Performance of Hybrid FSO/RF architecture for Next Generation Broadband Access Networks* // Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6390.
 15. VISHNEVSKIY V., SEMENOVA O. *Queuing System with Alternating Service Rates for Free Space Optics-Radio Hybrid Channel* // Proc.of. MACOM. – 2010.
 16. WANG D., ABOUZEID A.A. *Throughput of hybrid radio-frequency and free-spaceoptical (RF/FSO) multi-hop networks* // Information Theory and Applications Workshop, USA. – 2007. – P. 1–8.

MODELING AND ANALYSIS OF HYBRID CHANNEL BASED ON FSO AND RF TECHNOLOGIES

Vladimir Vishnevskiy, ZAO Research & Development Company “Information and Networking Technologies”, Moscow, Doctor of Science, professor (vishn@inbox.ru).

Olga Semenova, ZAO Research & Development Company “Information and Networking Technologies”, Moscow, Master of Science (olgasmnv@gmail.com).

Stanislav Sharov, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, postgraduate student (sharov.stanislav@gmail.com).

Abstract: We consider a mathematical model of a high-throughput hybrid communication system based on free-space optical (FSO) and radio-frequency (RF) technologies. Transmission of multimedia information is carried out via two communication lines working in a hot redundancy mode: a FSO channel and a millimeter radio waves channel. We also derive an ergodicity condition of the Markov process modeling the system operation and calculate required characteristics of a hybrid communication channel.

Keywords: free-space optical (FSO), millimeter radio waves channel (MMW), mathematical and simulation modeling, ergodicity condition of a stochastic process.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.С. Манделем*