УДК 621.372

Г.С. ВАСИЛЬЕВ, О.Р. КУЗИЧКИН, Д.И. СУРЖИК, М.Д. БАКНИН
G.S. VASILYEV, OR. KUZICHKIN, D.I. SURZHIK, M.D. BAKNIN

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ БЕСПРОВОДНОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ

ALGORITHM FOR MODELING THE CHARACTERISTICS OF UV COMMUNICATION CHANNELS OF A WIRELESS AD-HOC NETWORK

Перспективным и малоизученным направлением является построение мобильных самоорганизующихся сетей (Mobile Ad-Hoc Network, MANET) с УФ каналом связи для применения на военных и других ответственных и опасных объектах. Системы беспроводной оптической связи в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне привлекают интерес благодаря уникальной возможности обеспечения связи при отсутствии прямой видимости между передатчиком и приемником (режим non-line-of-sight, NLOS) за счет свойств рассеяния УФ излучения, что существенно расширяет возможности использования сетей MANET. Для создания сетей УФ связи с высокими тактико-техническими параметрами требуется разработка эффективных алгоритмов моделирования таких систем. Разработанный алгоритм на базе метода Монте-Карло объединяет достоинства известных аналитических и численных методов моделирования УФ каналов, позволяя при расчете учитывать углы места и азимуты приемников и передатчиков, влияние препятствия, выбирать комбинации с различным числом передатчиков и приемников УФ излучения.

Ключевые слова: беспроводная ультрафиолетовая связь, мобильная самоорганизующаяся сеть, MANET, MIMO, метод Монте-Карло.

A promising and little-studied direction is the construction of mobile ad-hoc networks (Mobile Ad-Hoc Network, MANET) with a UV communication channel for use in military and other responsible and dangerous facilities. Wireless optical communication systems in the ultraviolet (UV) range attract interest due to the unique ability to provide communication in the absence of direct visibility between the transmitter and receiver (non-line-of-sight mode, NLOS) due to the properties of UV radiation scattering, which significantly expands the possibilities of using MANET. To create UV communication networks with high tactical and technical parameters, it is necessary to develop effective algorithms for modeling such systems. The developed algorithm based on the Monte Carlo method combines the advantages of known analytical and numerical methods for modeling UV channels, allowing the calculation to take into account the location angles and azimuths of receivers and transmitters, the influence of obstacles, and choose combinations with a different number of transmitters and receivers of UV radiation.

Keywords: wireless UV communication, Mobile Ad-Hoc Network, MANET, MIMO, Monte Carlo method.

Введение

Системы беспроводной оптической связи в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне привлекают интерес благодаря уникальной возможности обеспечения связи при отсутствии прямой видимости между передатчиком и приемником (режим non-line-of-sight, NLOS) за счет свойств рассеяния УФ излучения [1, 2]. Отдельным направлением является построение мобильных самоорганизующихся сетей (Mobile Ad-Hoc Network, MANET) с УФ каналом связи для применения на военных и других ответственных и опасных объектах [3, 4].

Создание средств УФ связи с высокими тактико-техническими характеристиками требует разработки и применения алгоритмов моделирования таких систем. Задача моделирования представляет высокую трудность из-за сложного характера рассеяния в УФ канале связи, обусловленного сильным влиянием большого количества факторов: погодных условий, геометрического расположения и характеристик направленности передающего и приемного узлов и пр. Большое число научных работ посвящено разработке и анализу как аналитических [6, 7], так и численных моделей УФ каналов на базе метода статистических испытаний Монте-Карло [8, 9].

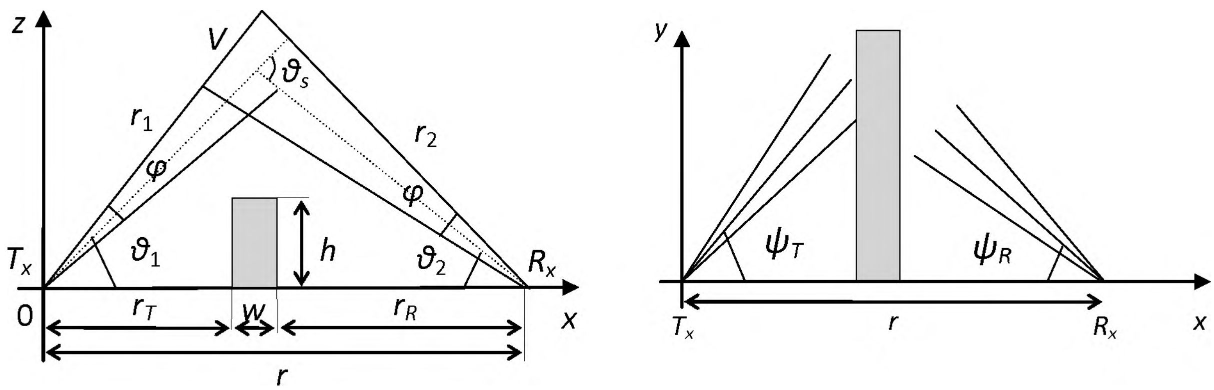
Следует отметить недостатки известных аналитических и численных способов моделирования УФ каналов связи, особенно существенные в контексте сетей MANET:

- большинство известных аналитических моделей не учитывают их азимуты (повороты), что необходимо учитывать при перемещениях и поворотах узлов связи (некопланарная геометрия канала);
- аналитический подход учитывает изменение азимутов, однако использует модель однократного рассеяния и обладает недопустимой погрешностью моделирования, когда вклад многократных рассеяний существенен;
- расчет моделей УФ каналов численным методом Монте-Карло требует больших вычислительных затрат, при этом возможности снижения вычислительных затрат в известных авторам работах не рассматриваются;
- известные аналитические и численные модели УФ каналов ориентированы на анализ системы связи с одним передатчиком и одним приемником (одноканальный режим, single input, single output, SISO), и не позволяют выбирать комбинации с различным числом передатчиков и приемников (многоканальный режим, multiple input, multiple output, MIMO);
- известные модели УФ каналов (кроме [10]) не учитывают влияние препятствий (зданий или естественных неровностей рельефа);
- большинство исследователей рассматривают идеализированную прямоугольную форму диаграмм направленности (ДН) передатчика и приемника, в то время как большинство светодиодов и фотодиодов УФ диапазона обладают косинусоидальной ДН.

Целью работы является разработка и анализ быстродействующего алгоритма моделирования характеристик беспроводных ультрафиолетовых каналов связи для расчета беспроводной самоорганизующейся сети.

Алгоритм моделирования характеристик беспроводных ультрафиолетовых каналов связи

Рассматриваемая геометрия канала UV NLOS показана на рисунке 1. На рисунке обозначено: Tx - передатчик, Rx - приемник, *r* - расстояние между Tx и Rx, 0_{12} и $\wedge_{12}$ - угол места и ширина ДН, 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, '^t ,r - азимуты передатчика и приемника, *w* и *h* - ширина и высота препятствия, $r_{T,R}$ - расстояние от препятствия до передатчика и приемника.



а) б)

Рисунок 1 - Геометрия канала UV NLOS: а) вертикальная проекция канала; б) горизонтальная проекция канала

Исходными параметрами модели, используемыми для инициализации алгоритма, являются: погодные условия, задающие модель рассеяния в соответствии с используемой базой моделей рассеяния; параметры моделей ДН массива передатчиков и массива приемников; параметры модели рельефа.

Вероятность рассеяния фотона в заданном направлении определяется фазовой (угловой) функцией рассеяния. Фазовая функция является взвешенной суммой фазовых функций молекулярного рассеяния Рэлея (Rayleigh) и аэрозольного рассеяния Ми (Mie) [5]:

$$P\{\wedge) = \frac{k^R}{k_S}\{\wedge) + \frac{k^M}{k_S}\{\wedge),$$

где p = cos - косинус угла рассеяния, $k_s = k\wedge + k\wedge$ - суммарный коэффициент рассеяния. Две фазовые функции соответствуют обобщенной модели Рэлея и обобщенной функции Henyey-Greenstein, соответственно,

$$P''(я) = \blacksquare \frac{з[1 + 3/ + (1 - y)u\wedge]}{16\wedge(1 + 2y)},$$

$$P'''(P) = \frac{1 - g^2}{4ж} \frac{1}{i^1 + g^2 - 2gpj\wedge} + f \frac{0.5(зр'' - 1)}{(1 + g'')^{л3/2}}$$

где y, g, f - параметры модели рассеяния.

При этом моделируются следующие параметры распространения излучения:

1. Начальные направления полета фотонов.

Отклонение от центрального луча ДН передатчика ширины ϕ_T задается выражениями

$$U \quad ж \quad \arcsin[\mathbf{rand}(1, M)],\ \wedge„„=2\wedge\ \mathbf{rand}(1),$$

где **rand**(1, *M)* - функция, генерирующая вектор длины *M* независимых случайных чисел с равномерным распределением между 0 и 1. Данные соотношения задают

косунусоидальную форму ДН $f^{(cos)}(U) = <$ $\frac{ж}{2}\cos ж\, U$, U е [0,], $(Pm$ 0, U ^ [0 ,] .

Проекции начальных отклонений полета фотонов на координатные оси рассчитываются по формулам = cos^„„ ◦ sin**0**„„, = sin^„„ ◦ sin**0**„„, = cos**0**„„, символ ◦ обозначает покомпонентное произведение (произведение Адамара). Для моделирования начальных траекторий фотонов, излучаемых передатчиками с различными углами места *вт* и азимутами *^m*, выполняется преобразование координат, описываемое произведением двух матриц поворота в трехмерном пространстве:

$$' = \quad Mт,\ Mт = M \wedge \backslash\text{--}\overset{ж}{вт}\ I\text{-}M,\ \{\wedge m),$$

где матрицы вращения вокруг осей *y* и z

$$M,(a) = \begin{pmatrix} \cos a & 0 & \sin a \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a & 0 & \cos a \end{pmatrix},\quad M,(a) = \begin{pmatrix} \cos a & -\sin a & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

При наличии более одного передатчика (режим MIMO или MISO - multiple input, single output) дополнительная дискретная случайная величина с равномерным распределением задает номер передатчика, который испускает каждый конкретный фотон.

Преобразование координат для приемников с различными углами места *Or* и азимутами описывается аналогичными выражениями.

2. Среднее расстояние между точками рассеяния фотонов (средний свободный пробег фотонов)

$$As = -\frac{In}{\kappa_s}$$

^(s) - случайный вектор длины М, элементы которого равномерно распределены между 0 и 1;

- тензор новых координат точек рассеяния r,+i = (x,+i y,+i z,+i)

Лн =z,+^>As,

где *i*, *i+1* - номера текущей и новой точки рассеяния, $r_0 = r_T = (x_T\ y_T\ z_T)$ - тензор координат массива передатчиков;

3. Новые направления полета фотонов после рассеяния.

Массив углов полета каждого фотона по отношению к текущим направлениям 0 вычисляется на основе соотношения

cos 0

= *2ж j P{^)d/л*, ^(“) - случайный вектор длины М, элементы которого

-1

равномерно распределены между 0 и 1, независимый от вектора ^(s). Текущие проекции отклонений полета фотонов на координатные оси вычисляются на основе выражений:

Цx i+1 . sin^ / V1-)' ∘ (**Ц**x' ∘ *Ц-Z* ∘ cos^i - **Ц**y' ∘ sin^i) + **Ц**x' ∘ cos**0**i ,

Цy i+1 . sin^ / V1- (^z)' ■ ∘ (Цy' ∘ *Ц^* ∘ cos^i + Цx' ∘ sin^i) + Цy' ∘ cos0i ,

Цг' + 1 = - sin0$_i$ ∘ cos^' 1- *(iJ^^ y + Ц^* ∘ cos0$_i$.

4. Потери энергии фотонов с расстоянием

p2, = exp (- κ*a И* - |);

где $r_R = (x_R\ y_R\ z_R)$ - тензор координат массива приемников;

5. Вектор вероятностей выживания (survival probability) фотонов с учетом потерь энергии

Юy =(1-p1y)°exp(-A:д|гy-ry_i|)oro,_i, pp-= j/’(co8 0)^П, П, - вектор телесных

углов угол видимости апертуры приемника из точек рассеяния r′ = (x′ y′ z');

6. Вектор вероятностей прибытия (arrival probability) фотонов в приемник после '-го рассеяния

P/ = °P1/ °P2/ ° obstacle(r,, r_R).

При наличии многих приемников (режим MIMO или SIMO - single input, single output) результирующее поле зрения вычисляется суммированием значений FOV, рассчитанных для отдельных приемников.

В отличие от алгоритма [10], при расчете вероятности прибытия (arrival probability) фотонов в приемник с учетом его поля зрения и апертуры дополнительно учитывается влияние препятствия функцией obstacle(r_i, r_R). Функция проверяет условие огибания препятствия каждым фотоном массива и определяется как obstacle( ) = condl • cond2, cond1=/1* /1* $u_l > u_T$, cond2= 6_2 >/1* 6_R,

где ^ = arctg Z Zгр /) +Cy Ym) и 62 = arctg z - z R углы возвышения точек рассеяния фотонов с координатами (x,y,z) относительно передатчика Tx и приемника Rx соответственно.

Результаты моделирования

В результате моделирования получены зависимости потерь от параметров геометрии канала (рисунок 2), время моделирования составило около 35 с при количестве фотонов M=100000. Были приняты следующие значения параметров УФ канала: дальность связи *r* =100 м, углы возвышения передатчика и приемника *в* $=30^0$ и $в_2 = 50^0$, ширины ДН передатчика и приемника *ф* $=17^0$ и $ф_2 = 30^0$, длина волны излучения >1=260 нм, коэффициенты рассеяния и поглощения для ясной погоды, площадь апертуры приемника ^_r=1,77 см².

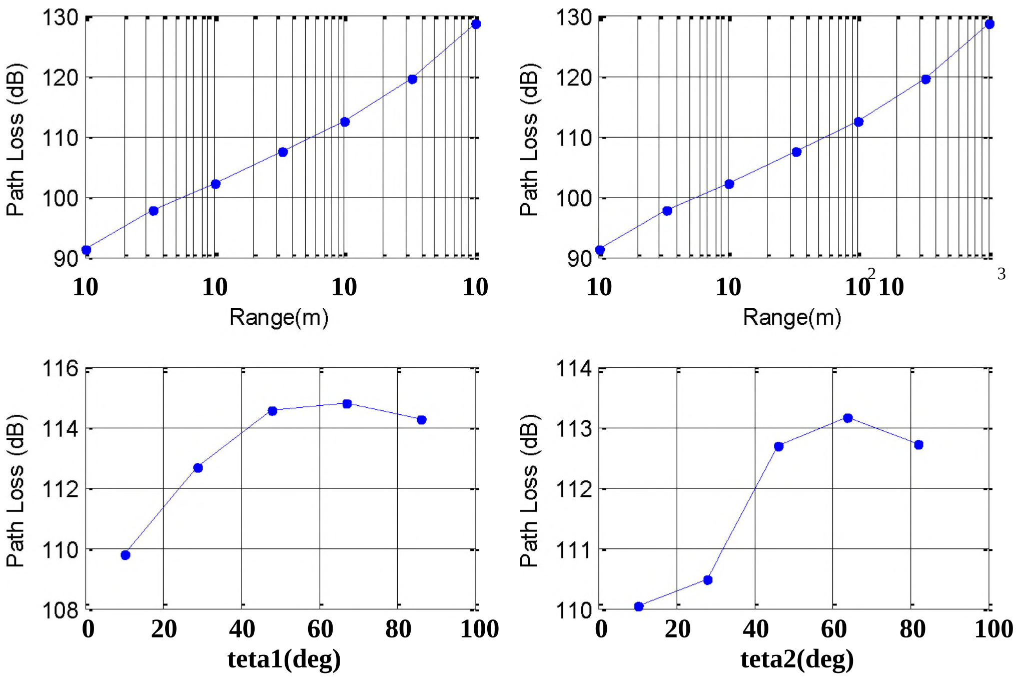


Рисунок 2 - Зависимости потерь от параметров геометрии канала

Заключение

Выполнена разработка быстродействующего алгоритма моделирования характеристик беспроводных ультрафиолетовых каналов связи: затухания, импульсной характеристшси, полосы частот. Разработанный алгоритм на базе метода Монте-Карло объединяет достоинства известных аналитических и численных методов моделирования УФ каналов, позволяя при расчете учитывать у^глы места и азимуты приемников и передатчиков, влияние препятствия, выбирать ком^Зинации с различнымчислом передатчиков и приемш^ков УФ излучения. Высокое б)1з1сл'р5одействие алгоритма достигнуто благодаря параллельному моделг^рованию распространения отдельных фотонов (вместо последовательного моделирования в цикле, как в известных алгоритмах).

Благодарности

Работа выполнена по гранту Президента РФ МК-2159.2020.8 «Моделирование и экспериментальное исследование беспроводной мобильной самоорганизующейся *сети ультрафиолетовой связи». Теория подготовлена в рамках государственного задание РФ 2020-0029 «Разработка теоретических основ построения информационно-аналитического обеспечения телекоммуникационных систем геоэкологического мониторинга природных ресурсов в сельском хозяйстве».*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu Z. and Sadler B.M., «Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art», IEEE Commun. Mag., vol. 46, no. 5, pp. 67-73, May 2008.
2. Arnon S. and Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network, J. Opt. Soc. Am. A 26530-9, 2009.
3. Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Lazarev S.A. Numerical and Analytical Modeling of Wireless UV Communication Channels for the Organization of Wireless Ad-Hoc Network // IJCSNS - International Journal of Computer Science and Network Security - 2018. - Vol. 18, No. 8, pp. 98-104. Доступ: http://paper.ricsns.org/07_book/201808/20180815.pdf (open access).
4. 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. Доступ: http: //j ardcs .org/abstract.php?archiveid=5147.
5. Xu Z., H. Ding, B.M. Sadler, and Chen G., «Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links» Optics Letters, vol. 33, no. 16, pp. 1860-1862, Aug. 2008.
6. Hou W., Liu C., Lu F., Kang J., Mao Z., Li B. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter path loss model. - Phonon Network Communications, Oct 05, 2017. - DOI 10.1007/s11107-017-0737-5.
7. Ding H., Chen G., Majumdar A., Sadler B. and Xu Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication IEEE J. Sel. Areas Commun. 271535-44, 2009.
8. Drost R.J., Moore T.J. and Sadler B.M. UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions, J. Opt. Soc. Am.A28686-95, 2011.
9. Elshimy M.A. Communications Through Non-Line-of-Sight Solar-Blind Ultraviolet Scattering Channels, Ph. d. thesis, McMaster University, 2015.
10. Zhang H., Yin H., Jia H., Yang J. and Chang S. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links, Opt. Express1921216-26, 2011.

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

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

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

Бакнин Максим Дмитриевич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Аспирант, институт инженерных и цифровых технологий
E-mail: m.baknin@yandex.ru