

Построение имитационной модели обслуживания неподвижных пользователей в зоне действия базовой станции на БПЛА со спиральной траекторией движения

И. С. Меньшов*, Е. Г. Медведева*[†], Ю. В. Гайдамака*[†]

** Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей
Российский университет дружбы народов
Ул. Миклуто-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия*

*[†] Федеральный научный центр "Информатика и управление" РАН
ул. Вавилова, д.44 корп.2, Москва, 119333, Россия*

Email: 1032212347@rudn.ru, medvedeva-eg@rudn.ru, gaydamaka-yuv@rudn.ru

В настоящее время всё чаще приветствуются гибкие решения в развертывании беспроводных сетей в местах отсутствия связи с целью обеспечения возможности передавать пакеты данных с минимальной задержкой. Одним из таких решений являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные функциями наземных базовых станций. В данной работе представлен алгоритм имитационной модели, с помощью которой возможно эмулировать обслуживание неподвижных пользователей в зоне действия базовых станций, перемещающихся по спиральной траектории над рассматриваемой зоной покрытия. Построенная модель позволяет проводить измерения для расчета таких вероятностно-временных характеристик, как время замирания сигнала, вероятность покрытия пользователя, вероятность покрытия зоны обслуживания и другие.

Ключевые слова: беспроводные сети, имитационная модель, беспилотный летательный аппарат, вероятность покрытия пользователя, время затухания сигнала, стохастическая геометрия.

1. Введение

Статическое развертывание беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) демонстрирует низкую эффективность для неподвижных или перемещающихся с небольшой скоростью пользователей. Поэтому рассмотрение сети, основанной на подвижных дронах, имеет более выгодное практическое значение. Во-первых, в литературе обычно утверждается, что движущиеся БПЛА превосходят стационарные по энергопотреблению [1]. Минимизация движения БПЛА, собирающих данные, для получения оптимальной траектории рассматривалась в [2]. Основой для данной статьи послужила публикация [3], в которой рассматривались сети движущихся по спиральной траектории беспилотных базовых станций, проводился анализ геометрии траекторий движения и показана перспектива проектирования траекторий движения.

2. Построение имитационной модели

За основу уравнения движения БПЛА по спиральной траектории взято уравнение спирали Архимеда параметрическом виде:

$$\begin{cases} x^d(\beta) = \frac{\alpha}{2\pi} \beta \cos \beta + b \\ y^d(\beta) = \frac{\alpha}{2\pi} \beta \sin \beta + b \end{cases}$$

где α – расстояние между витками спирали, b – смещение спирали и $0 \leq \beta \leq k\pi$.

При дальнейшем построении модели движения БПЛА необходимо модернизировать данное уравнение физическими свойствами БПЛА с функциями БС, а также учесть границы местности, в которых будет происходить моделирование. Для модернизации исходного уравнения нам понадобятся следующие параметры дрона с функциями базовой станции и местности:

- r_d , радиус области покрытия базовой станции на БПЛА [м]
- Ω , зона обслуживания БПЛА (квадрат со стороной w) [км]

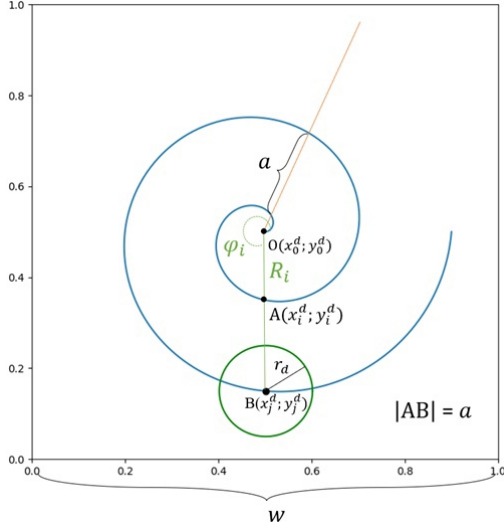


Рис. 1. Графическое представление движения БПЛА по спиральной траектории с помощью построенной модели

Пусть T – время моделирования T [с], разбитое на такты длины δ , $0 \leq \delta \leq T$, $T = k\delta$, причем i -ый такт - это интервал $[t_i, t_{i+1}) = [i\delta, (i+1)\delta)$, где $i = \overline{0, k-1}$. Для того, чтобы траектория движения БПЛА не вышла за область моделирования Ω , найдем на последнем витке радиус спирали с шагом $a = 0,5 \lfloor \frac{w}{r_d} \rfloor$ в момент t_k :

$$R_k = \frac{w}{2} - r_d. \quad (1)$$

Также необходимо знать v_{spir}^d скорость движения БПЛА [м/с]. Для этого воспользуемся следующей формулой:

$$v_{spir}^d = \frac{L}{T}, \quad (2)$$

где $L = \int_0^{\phi_k} \sqrt{x^d(\phi)'^2 + y^d(\phi)'^2} d\phi = \frac{\alpha}{2} \int_0^{\phi_k} \sqrt{1 + \phi^2} d\phi$ – длина всей спиральной траектории, а $\phi_k = \pi \frac{w-2r_d}{\alpha}$.

Для того, чтобы найти точку $(x_i^d; y_i^d)$ расположения БПЛА в момент t_i в начале такта i при движении по спиральной траектории, нужно найти угол отклонения БПЛА ϕ_i ($i = \overline{1, k-1}$, $\phi_0 = 0$) от оси Ox в момент t_i . Так как известно, что за каждый такт времени БПЛА проходит расстояние равное скорости дрона v_{spir}^d , а

также что дрон меняет угол с ϕ_i на ϕ_{i+1} , то справедливо составить следующее уравнение:

$$v_{spir}^d = \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} \sqrt{(x^d(\beta))'^2 + (y^d(\beta))'^2} d\beta. \quad (3)$$

Преобразовав, получим следующее равенство:

$$v_d \frac{4\pi}{\alpha} + \ln(\sqrt{\phi_i^2 + 1} + \phi_i) + \phi_i \sqrt{\phi_i^2 + 1} = \ln(\sqrt{\phi_{i+1}^2 + 1} + \phi_{i+1}) + \phi_{i+1} \sqrt{\phi_{i+1}^2 + 1} \quad (4)$$

и из него уже находим угол ϕ_{i+1} , используя алгоритмы численных методов.

Также для задания уравнения движения необходимо задать координаты $(x_0^d; y_0^d)$ стартовой позиции БПЛА - центра области моделирования:

$$O = (x_0^d; y_0^d) = \left(\frac{w}{2}; \frac{w}{2}\right). \quad (5)$$

Теперь возможно задать уравнение движения БПЛА по спиральной траектории. Координаты $(x_i^d(\phi_i); y_i^d(\phi_i))$ БПЛА в начале такта i , $i = \overline{0, k-1}$ имеют вид:

$$\begin{cases} x_i^d(\phi_i) = x_0^d + \frac{\alpha \phi_i}{2\pi} \cos \phi_i \\ y_i^d(\phi_i) = y_0^d + \frac{\alpha \phi_i}{2\pi} \sin \phi_i. \end{cases} \quad (6)$$

При построении имитационной модели следует учитывать патрулирование пользователей, а именно вероятность наличия прямой видимости между БС на БПЛА и координатами расположения пользователей на поверхности. Для этого используется функция-индикатор между пользователем n с координатами $(x^n, y^n) \in \Omega$ и БПЛА на i -м такте:

$$I(x^n, y^n, x_i^d, y_i^d) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sqrt{(x_i^d - x^n)^2 + (y_i^d - y^n)^2} < r_d \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (7)$$

Полная реализация имитационной модели обслуживания неподвижных пользователей в зоне действия БС на БПЛА будет включать использование уравнений (1) – (7).

3. Реализация имитационной модели

Модель (1) – (7) позволяет находить следующие вероятностно временные характеристики:

- вероятность покрытия пользователя n на такте $[t_i, t_{i+1})$ в течение времени моделирования $T = k\delta$:

$$p_{cov,i}(n) = I(x^n, y^n, x_i^d, y_i^d), n = \overline{1, N}, i = \overline{0, k-1};$$

- время (в тактах) нахождения пользователя n ($n = \overline{1, N}$) в зоне прямой видимости БПЛА в течение времени моделирования T :

$$t(n) = \sum_{i=0, \dots, k-1} p_{cov,i}(n), n = \overline{1, N};$$

- вероятность покрытия пользователя n в течение времени моделирования:

$$p_{cov}(n) = \frac{1}{T}t(n);$$

- вероятность покрытия зоны обслуживания на такте $[t_i, t_{i+1})$ - доля пользователей, находящихся в зоне прямой видимости БПЛА на такте $[t_i, t_{i+1})$:

$$P_{cov,i}(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1, \dots, N} p_{cov,i}(n), i = \overline{0, k-1}.$$

Ниже представлены результаты реализации имитационной модели (Рис. 2) и некоторые найденные вероятностно временные характеристики (Рис. 3):

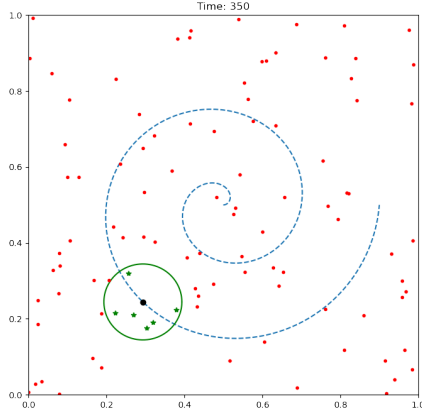


Рис. 2. Траектория движения БПЛА (пунктирная линия) над зоной обслуживания $\Omega = 1 \text{ км}^2$ с заданным числом пользователей (все точки внутри квадратной области моделирования) $N = 100$. БПЛА перемещается со скоростью $v_{spir}^d = 5 \text{ м/с}$, образуя линию прямой видимости с пользователями (звезды) внутри зоны покрытия - окружности со сплошным контуром, при $T = 515 \text{ с}$

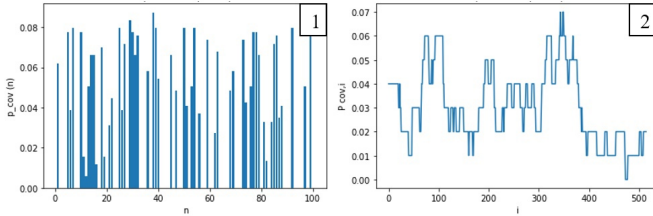


Рис. 3. (1) $p_{cov}(n)$; (2) $P_{cov,i}(n)$

4. Заключение

В статье рассматривается построение имитационной модели обслуживания неподвижных пользователей в зоне действия базовой станции на беспилотном летательном аппарате, движущемся по спиральной траектории. Основной целью работы была разработка математической модели патрулирования БПЛА по спиральной траектории. В ходе работы были поставлены задачи дальнейших исследований, а именно: модели на случай подвижных пользователей.

Благодарности

Публикация выполнена за счет гранта Российского научного фонда №22-29-00694, <https://rscf.ru/project/22-29-00694/>.

Литература

1. Y. Zeng and R. Zhang, "Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, Jun. 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7888557>.
2. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7574–7589, Nov. 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8038869>.
3. Saeede Enayat, Hamid Saeedi, Hossein Pishro-Nik, Halim Yanikomeroglu "Moving Aerial Base Station Networks: A Stochastic Geometry Analysis and Design Perspective"// *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, VOL. 18, NO. June 6, 2019 <https://ieeexplore.ieee.org/document/8681266>.

UDC 0000

Construction of a simulation model for servicing stationary users in the coverage area of a base station on a UAV with a spiral motion trajectory

I. Menshov*, E. Medvedeva*[†], Yu. Gaydamaka*[†]

** Department of Applied Computer Science and Probability Theory
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str. 6, Moscow, 117198, Russia*

*[†] Federal Research Center "Computer Science and Control"
of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS)
44-2 Vavilov St, Moscow, 119333, Russia*

Email: 1032212347@rudn.ru, medvedeva-eg@rudn.ru, gaydamaka-yuv@rudn.ru

The search for more and more flexible solutions in the deployment of wireless networks in places where there is no connection, in order to provide the ability to transmit small data packets, is one of the most important tasks. One of the solutions to this problem is unmanned aerial vehicles (UAVs), also known as drones, equipped with some functions of ground base stations (BS). In this article, a simulation model algorithm is presented that can be used to service stationary users in the BS coverage area on UAVs moving along a spiral path.

Key words and phrases: wireless networks, simulation model, unmanned aerial vehicle, user coverage probability, signal attenuation time, stochastic geometry.