

УДК 629.7.014-519.07:656.7.021.5

О. К. ПОГУДИНА, И. В. ВАЙЛЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТРАФИКОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Предметом изучения в статье являются процессы оценки пропускной способности воздушного пространства при управлении трафиком движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Целью является повышение качества управления движением летательных аппаратов с учетом избегания конфликтов с участием трех и более БПЛА. Задачи: разработать математическую модель карты вероятностного трафика, а также формализовать модель построения случайного геометрического графа для оценки предполагаемых конфликтов и столкновений БПЛА; реализовать алгоритмы построения заданных моделей для автоматизации оценки пропускной способности воздушного пространства. Используемыми моделями являются: модель интенсивности заявок пуассоновского процесса для построения карты вероятностного трафика, модель построения случайного геометрического графа, для расчета количества возможных конфликтов с участием БПЛА. Получены следующие результаты. Создана формализованная модель карты расположения БПЛА с учётом: заданного региона с указанной плотностью населения и предполагаемым количеством операций в течении указанного промежутка времени. Данная модель использована при построении случайного геометрического графа, в котором, с учетом минимального расстояния, возможного для сближения двух БПЛА проведена оценка вероятности конфликтов и столкновений. Модель является основой для получения алгоритма оценки факторов, ограничивающих емкость воздушного пространства, в результате появления трудно разрешимых конфликтов. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: усовершенствована модель случайного геометрического графа путем формализации расположения вершин. Вершины, с учетом закона пуассоновского процесса, размещают в ячейках заданного региона. Это позволяет получить объективную картину расположения БПЛА в городском воздушном пространстве. Получили дальнейшее развитие двумерные модели карты вероятностного трафика (голландская модель «Метрополис», модель Cal) за счет формализации первоначального размещения БПЛА с учетом закона пуассоновского процесса. Это поможет определить технические требования для обеспечения бесперебойной работы малых беспилотных летательных аппаратов в городском воздушном пространстве*

**Ключевые слова:** *малый беспилотный летательный аппарат, воздушное пространство, управление беспилотным трафиком, карта вероятностного трафика, случайный геометрический граф*

**Введение**

Увеличение количества малых беспилотных летательных аппаратов (мБПЛА) ставит задачу управления беспилотным трафиком (UTM - Unmanned Traffic Management). Основной задачей UTM является оценка пропускной способности: сколько мБПЛА можно безопасно разместить с возможностью успешного управления в заданном воздушном пространстве (ВП). Вопрос можно изучать с учетом:

- факторов, ограничивающих емкость ВП, например, появление трудно разрешимых конфликтов (если их вероятность высока, то определение мер управления ими),
- чрезмерного шума мБПЛА,
- помех связи мБПЛА с оператором (с учетом

требований кибербезопасности, т.к. протоколы шифрования требуют большей пропускной способности).

Оценка пропускной способности ВП UTM основана на моделях и методах управления авиационным трафиком [1 - 3], которые в основном занимаются планированием рейсов от аэропорта до аэропорта. Отличием модели UTM является наличие большего количества летательных аппаратов и эксплуатирующих их лиц, разнообразие полетных заданий и способность взлета и посадки на неподготовленных площадках. Ограничением модели UTM является рассмотрение зон разрешенного движения для БПЛА и ограничение по высоте над уровнем земли (150 метров) [4]. Для определения зон, разрешенных для полета, а также оценки текущего трафика используются различные информационные

подсистемы [5]. Например на сайте Федеральной авиационной администрации США [5] доступны карты с указанием зон, разрешенных к полету, указаны зоны с ограничениями высоты полета, а также есть возможность пройти регистрацию и получить лицензию для полетов в электронном виде.

Для создания такой подсистемы в Украине необходимо оценить вероятностный трафик, собрать информацию о зонах, запрещенных к полету.

Концепция разрабатываемой модели карты вероятностного трафика мБПЛА (LiU), основана на следующих работах:

– голландская модель «Метрополис» [6] – вероятностная модель, где воздушные суда распределены равномерно в заданном ВП. В общем случае, направление полета мБПЛА равномерно распределяется в заданной окружности ВП (при этом считается, что мБПЛА летают на одной высоте, т.е. модель двумерна). Позволяет получить вероятность конфликтов;

– модель Cal [7] – усовершенствует предыдущую модель, в части выбора конечных точек рейсов. Они отбираются на основе плотности населения. При этом каждый рейс мБПЛА - это линия, соединяющая начальную и конечную точки, поднятая на заданную высоту h.

Целью данной работы является повышение качества УТМ за счет рационального выбора пропускной способности заданного ВП, ограниченная таким количеством мБПЛА, при котором их безопасность уменьшается за счет появления конфликтов с участием трех и более мБПЛА.

Для достижения цели были использованы методы моделирования с использованием модели пуассоновского процесса для задания интенсивности движения БПЛА, модель построения и оценки случайного геометрического графа.

## 1. Построение карты расположения мБПЛА

Для построения карты исследуемого ВП для мБПЛА необходимы следующие входные данные:

- регион интереса R;
- плотность населения  $D(g)$ , заданная для каждой точки  $g \in R$ ;
- продолжительность наблюдения T ( $T = 12$  ч, т. е. трафик за один день),
- ожидаемое число N операций БПЛА в течение T (параметр N изменяется во время экспериментов).

Рассматривая предельно малые высоты ВП предположим, что спрос на ВП генерируется по модели Cal: время начала полета из любой точки  $a \in R$

формируется по закону пуассоновского процесса, согласно которому интенсивность пропорциональна плотности населения в данной точке:

$$\lambda_s(a) = \frac{N}{T} \frac{D(a)}{\int_R DdA}.$$

Случайным образом выбран пункт b, являющийся конечной точкой полета. Исходя из заданной плотности населения, вероятность того, что полет заканчивается в точке  $b \in R$ , равна

$$p(b) = \frac{D(b)}{\int_R DdA}.$$

Разрабатываемая модель вычисляет поточечное распределение трафика. Интенсивность появления мБПЛА, летящего от a до b, в точке  $g \in ab$  по закону пуассоновского процесса равна

$$\lambda_{ab} = \lambda_s(a) p(b) = \frac{N}{T} \frac{D(a)D(b)}{\left(\int_R DdA\right)^2}.$$

Интегрирование по всем парам вылета-назначения, позволяет определить интенсивности появления мБПЛА в любой точке g

$$\begin{aligned} \lambda(g) &= \int_{ab \ni g} \lambda_{ab} dAdB = \\ &= \frac{1}{\left(\int_R DdA\right)^2} \frac{N}{T} \int_{ab \ni g} D(a)D(b) dAdB, \end{aligned}$$

где  $ab \ni g = \{(a, b) \in R^2 : g \in ab\}$  - множество конечных точек всех сегментов, содержащих g

Для создания имитационной модели заданную выше модель необходимо представить дискретно: на R закрепляем сетку L и плотность населения  $D(g)$  задаем для каждой ячейки сетки  $g \in L$ . Время начала полетов из любой ячейки сетки  $a \in L$  формирует пуассоновский процесс, интенсивность которого

$$\lambda_s(a) = \frac{N}{T} \frac{D(a)}{\sum_{x \in L} D(x)}$$

пропорциональна плотности населения в ячейке, а целевая ячейка полета b выбирается случайным образом на основе плотности той же вероятности

$$p(b) = \frac{D(b)}{\sum_{x \in L} D(x)}.$$

Прямолинейный путь БПЛА между ячейками a и b представлен последовательностью ячеек сетки, через которые проходит БПЛА (рис. 1). Предположим, что БПЛА проводит одно и то же время  $t = l/V$  в каждой ячейке пути, где l - длина стороны ячейки, V - скорость БПЛА. Будем считать, что  $l = 150$  м и  $V = 25$  м/с, следовательно,  $t = 6$ с.

Аналогично непрерывному случаю для любой ячейки  $g \in ab$  БПЛА, летящие от  $a$  до  $b$ , попадают в ячейку  $g$  в соответствии с процессом Пуассона с

$$\text{интенсивностью } \lambda_{ab} = \lambda_s(a)p(b) = \frac{N}{T} \frac{D(a)D(b)}{\sum_{x \in L} D(x)} .$$

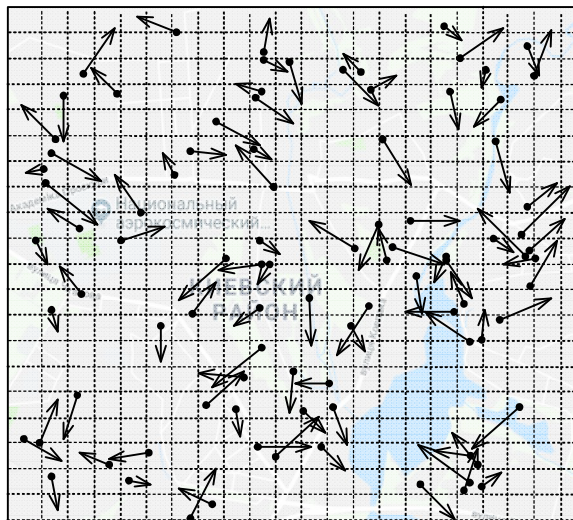


Рис. 1. Карта расположения мБПЛА

Суммируя все пары вылета-назначения, получим, что в целом БПЛА находится в произвольной ячейке  $g$  отрезка  $a-b$  с интенсивностью

$$\lambda(g) = \sum_{ab \ni g} \lambda_{ab} = \frac{1}{(\sum_{x \in L} D(x))^2} \frac{N}{T} \sum_{ab \ni g} D(a)D(b),$$

где  $ab \ni g = \{(a, b) \in L^2 : g \in ab\}$  множество конечных точек всех сегментов, содержащих  $g$ .

Назовём график функции

$$m(g) = \sum_{ab \ni g} D(a)D(b)$$

картой БПЛА, на которой показана вероятность появления БПЛА в разных ячейках. После вычисления карты, движение БПЛА можно получить путём выборки из карты.

В целом количество БПЛА  $n(g)$ , которые можно увидеть одновременно в ячейке  $g$  в течение времени  $t$ , рассчитывается так:

$$\overline{\lambda(g)} = \lambda(g)t = \frac{t}{T(\sum_{x \in L} D(X))^2} Nm(g).$$

В проведенных экспериментах значения  $t$  и  $T$  не изменяются. Поэтому, чтобы упростить формулы, нормируем плотность, чтобы

$$\frac{t}{T(\sum_{x \in L} D(X))^2} = 1,$$

следовательно,

$$\overline{\lambda(g)} = Nm(g). \tag{1}$$

## 2. Оценка конфликтов БПЛА с использованием модели случайного геометрического графа

Модель построения случайного геометрического графа (RGG - Random geometric graphs) будет использована для моделирования количества конфликтов и столкновений БПЛА (в рамках заданного объема трафика). RGG называют граф  $G(S, R)$ , с множеством вершин  $S$ , который получается в результате размещения на плоскости случайным образом  $n$  вершин, при этом две вершины соединяются ребром, если евклидово расстояние между ними не больше  $R$ . Дано число  $k > 0$ , где  $p_k(S, R)$  обозначает вероятность того, что  $G(S, R)$  обладает связностью размером не менее  $k$ :

- $p_1(S, R) = 1$ , поскольку любая вершина является связной компонентой размера 1,
- $p_2(S, R)$  - вероятность того, что  $G(S, R)$  имеет ребро,
- $p_n(S, R)$  - вероятность того, что граф связан,
- $p_k(S, R) = 0$  при  $k > n$  (поскольку  $G(S, R)$  имеет только  $n$  вершин).

Предположим, что  $R$  представляет собой конфликтное событие (два БПЛА на расстоянии  $R$  конфликтуют или, при малом  $R$ , столкнулись). Тогда для  $n$  случайным образом распределенных БПЛА, существование в  $G(n, r)$  подсети с размером связности  $k$  означает конфликт  $k$  БПЛА. При малых размерах подсети ( $k = 2$ ) конфликт может быть разрешен с помощью простых правил (например, маневр вправо). Для  $k > 2$ , конфликт может означать событие нарушения безопасности, а  $p_k(S, R)$  - его вероятность.

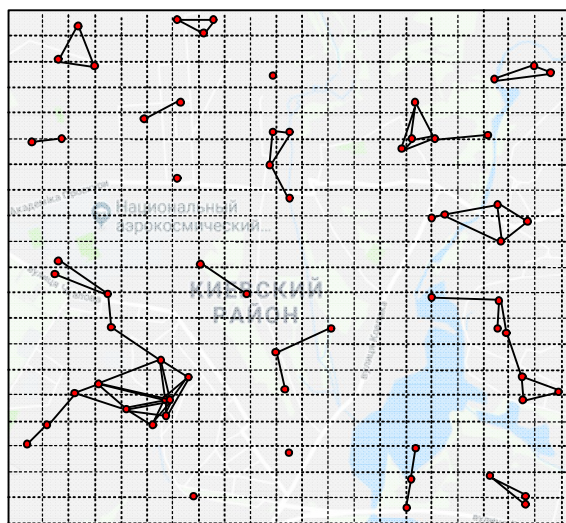


Рис. 2. Случайный геометрический граф

Параметр R представляет собой технические возможности БПЛА – качество связи, точность навигации, качество работы автопилота и т. д. Поэтому для практической реализации модели RGG в системе UTM необходимо найти такое расстояние R, которое обеспечит низкую вероятность  $p_k(S, R)$ . При этом указать какими техническими характеристиками БПЛА это расстояние может быть обеспечено.

Рассмотрим задачу оценки  $p_k(N, R)$  - вероятности наблюдения связного компонента размером не менее k в ежедневном трафике интенсивности N. На рис. 3 показан график моделирования вероятности  $p_3(N, R)$  для  $N = \overline{10, 200000}$ ,  $R = \overline{5, 300}$  м.

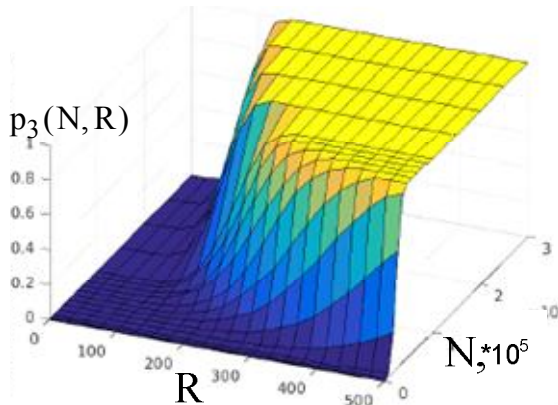


Рис. 3. График моделирования вероятности  $p_3(N, R)$

Вычислим количество конфликтов в RGG (связанных компонентах) для двух БПЛА ( $k = 2$ ). Общее ожидаемое количество таких конфликтов является суммой конфликтов по всем парам пикселей:

$$C = \sum_{g, g' \in L^2} C(g, g') + \sum_{g \in L} C(g), \quad (2)$$

где  $C(g, g')$  - ожидаемое количество ребер между узлами (БПЛА) в ячейках  $g$  и  $g'$ , а  $C(g)$  - ожидаемое число ребер между БПЛА в ячейке  $g$ .

Оценка  $C(g, g')$  может быть затруднена, так как зависит от точного местоположения БПЛА внутри ячеек  $g$  и  $g'$  (рис. 4, а). Например,  $r$  и  $l$  могут находиться в следующих взаимоотношениях друг с другом:

– если  $r \gg l$  (рис. 4, б), то данное ребро может быть проигнорировано, так как  $C(g, g') = 0$  всякий раз, когда ячейки  $g$  и  $g'$  располагаются «дальше, чем  $r$ » друг от друга и:

$$C(g, g') = \frac{1}{2} \sum_{n, n'} n \cdot n' \Pr\{n(g) = n\} \Pr\{n(g') = n'\},$$

для ячеек  $g$  и  $g'$ , расположенных «ближе, чем  $r$ ». При  $r = 500$  м и  $l = 150$  м – данное событие не возникает, так как не соблюдается условие  $r \gg l$ ;

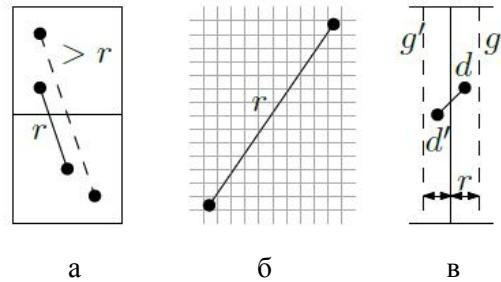


Рис. 4. Виды рёбер в графе между узлами, расположенными в разных ячейках

– если  $r \sim l$ , можно уменьшить сетку, чтобы новый размер ячейки был  $l' \ll r$ , но расчеты на уточненной сетке могут занять слишком много времени,

– если  $r \ll l$ , то ребра между БПЛА могут существовать только между соседними ячейками  $g$  и  $g'$ . Более того, вероятность такого ребра низкая (рис. 4, в), так как каждый БПЛА должен попасть в полосу ширины  $r$  вблизи границы ячейки (что происходит с вероятностью  $(r/l) / l^2 = r/l$ ). Кроме того, расстояние между БПЛА, которые находятся возле границы ячейки, должно быть меньше  $r$  (что дает дополнительный вероятностный коэффициент  $r/l$ ).

В целом, вероятность появления ребра между ячейками равна  $(r/l)^3$  (например, для  $r = 5$  м,  $l = 150$  м, это около  $10^{-4}$ ) и, следовательно, суммой рёбер между ячейками в (2) можно пренебречь.

Таким образом, рассмотрим сумму ребер внутри ячеек в формуле (2) для получения ожидаемого количества конфликтов. Для  $n$  БПЛА в заданный момент ожидаемое количество ребер в ячейке  $g$  равно  $\frac{1}{2} n(n-1) \frac{\pi r^2}{l^2}$ . Так как время движения БПЛА в ячейке равно  $t$ , общее количество ребер:

$$C(n) = \frac{1}{2} n(n-1) \frac{\pi r}{l}. \quad (3)$$

Ранее рассматривалось, что число БПЛА в ячейке  $g$  ( $n(g)$ ) согласно закону распределения Пуассона равно  $Nm(g)$  (1). Таким образом, ожидаемое число ребер в ячейке  $g$  равно:

$$C(g) = \sum_n C(n) \Pr\{n(g) = n\} = \frac{\pi r}{2l} \sum_n n(n-1) \Pr\{n(g) = n\} =$$

$$= \frac{\pi r}{2l} (E[n^2(g)] - E[n(g)]) = \frac{\pi r N^2 m^2(g)}{2l},$$

где  $E[n(g)] = \text{Var}[n(g)] = Nm(g)$ .

При суммировании  $C(g)$  по всей сетке в течение всего времени моделирования (используем сумму дискретных моментов  $T/t$ ), получаем ожидаемое число конфликтов (например, в течение дня)

$$C_d = \frac{\pi r N^2 T}{2lt} \sum_{g \in L} m^2(g),$$

Предположим, что при  $r = 5 \text{ m}$  происходит столкновение БПЛА. Из карты БПЛА вычислим среднюю продолжительность полета:

$$\tau = \frac{1}{V |L| (|L| - 1) \left( \sum_g D(g) \right)^2} * \sum_{a,b \in L^2} |ab| D(a)D(b) \approx 2000 \text{ с},$$

где  $|L|$  - общее количество ячеек.

Если рассмотреть ожидаемое количество лётных часов  $H = N\tau$ , то можно убедиться, что данный показатель будет линейно расти, при этом число столкновений  $C_d$  будет расти квадратично. Например, для  $N=2457$ , ожидаемое число конфликтов будет равно  $C_d = 0,001$ . Таким образом, можно определить приемлемое значение интенсивности движения, при котором требуются меры УТМ.

### Заключение

На сегодняшний момент использование мБПЛА в ВП Украины активно обсуждается авиационным сообществом. Обговаривается концепция порядка использования ВП, определен временный порядок использования (ВПИ) ВП БПЛА [8]. Наиболее спорными вопросами являются следующие:

- принятие ограничений, связанных с высотой полета мБПЛА без регистрации в государственной авиационной службе. В документе ВПИ ВП БПЛА указано ограничение высоты полета в 50 м, хотя в большинстве стран существует ограничение - 150 м;

- документ ВПИ ВП БПЛА указывает ряд ограничений в зонах полета, которые касаются не только границ государства и аэропортов, но и других объектов инфраструктуры (дорог, железнодорожных путей и т.д.),

- существует мнение о необходимости ранжировать использование мБПЛА по зонам риска

(например, при использовании в малонаселённых районах и в областных центрах),

Полученная модель может быть использована для решения третьей задачи – выделения зон риска, с учетом интенсивности движения в различных населенных пунктах. При этом необходимо будет модифицировать карту мБПЛА с учетом утверждённых зон полета.

В данной статье разработан метод оценки пропускной способности воздушного пространства при управлении трафиком движения беспилотных летательных аппаратов, рассмотрены примеры расчетов показателя ожидаемого числа конфликтов мБПЛА, интенсивности их движения с учетом заданной плотности населения.

Для построения модели были использованы: модель интенсивности заявок пуассоновского процесса, модель построения случайного геометрического графа, а также инструментальное средство MATLAB для отображения результатов исследования и проведения расчетов.

В результате получен график значений вероятности конфликтов мБПЛА с учетом ожидаемого их количества, а также расстояния, допустимого для сближения с другими летательными аппаратами.

### Литература

1. Скалько, Я. И. *Совершенствование системы управления воздушным движением [Текст] / Я. И. Скалько // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 4 (21). – С. 139-142.*
2. Kageyama, Kota. *ATC Procedures Modeling for Capacity Estimation of Japanese Airspace [Electronic resource] / Kota Kageyama // AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum, 08 May 2017 – P. 1-10. – Access mode: <https://doi.org/10.2514/6.2017-0805>. – 31.05.2018.*
3. *Разработка модели потока воздушных объектов в районе аэропорта для системы управления воздушным движением [Текст] / Ю. А. Данилов, Д. Н. Обидин, А. А. Тимочко, П. Г. Бердник // Системы управления, навигации та зв'язку. – 2016. – Вип. 2 (38). – С. 14-20.*
4. *Flight Test Evaluation of an Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Concept for Multiple Beyond-Visual-Line-of-Sight Operations [Electronic resource] / M. Johnson, J. Jung, J. Rios, J. Mercer, J. Homola, Th. Prevot, D. Mulfinger, P. Kopardekar // Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. – 2017. – P. 1-10. – Access mode: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170011344.pdf>. – 31.05.2018.*
5. *Visualize it: See FAA UAS Data on a Map [Electronic resource]. – Access mode: <http://faa.maps.arcgis.com>. – 31.05.2018.*

6. *Metropolis: Relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities [Electronic resource] / E. Sunil, J. Hoekstra, J. Ellerbroek, F. Bussink, D. Nieuwenhuisen, A. Vidosavljevic, S. Kern // 11th USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar, Lisbon (Portugal), 23-26 June, 2015. – P. 1-10. – Access mode: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A1019a338-5f69-409a-a06c-c8346cd343e>. – 31.05.2018.*

7. Sedov, L. *Sampling-based capacity estimation for unmanned traffic management [Electronic resource] / L. Sedov, V. Polishchuk, V. Bulusu // Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017 IEEE/AIAA 36th. – IEEE, 2017. – P. 1-10. – Access mode: <http://weber.itn.liu.se/~valpo40/pages/liu.pdf>. – 31.05.2018.*

8. Тимчасовий порядок використання повітряного простору України [Електронний ресурс]: постановова Державної авіаційної служби України від 31 травня 2018 р. – Режим доступу: <https://avia.gov.ua/dlya-zabezpechennya-bezpeky-polotiv-do-derzhavnoyi-reyestratsiyi-pravyl-vykorystannya-povitryanogo-prostoru-ukrayiny-proponuyemo-vykorystovuvaty-v-roboti-tymchasovyy-poryadok-vykorystannya-povitryanog/>. – 31.05.2018.

## References

1. Skal'ko, Ja. I. Sovershenstvovanie sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniem [Improving the air unmanned traffic management]. *Radioelektronika i informatika* – Kharkiv, 2008, no. 4(21), pp. 139-142.

2. Kageyama, Kota. ATC Procedures Modeling for Capacity Estimation of Japanese Airspace. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, AIAA SciTech Forum, 08 May 2017, pp. 1-10. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0805>

3. Danilov, Ju. A., Obidin, D. N., Timochko, A. A., Berdnik, P. G. Razrabotka modeli potoka vozdushnyh obektov v rajone ajeroporta dlja sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniem [Development of a

model for the flow of air facilities in the airport area for an air unmanned traffic management]. *Sistemi upravlinnja, navigacii ta zv'jazku*, Poltava, PNTU Publ., 2016, no. 2 (38), pp. 14-20.

4. Johnson, M., Jung, J., Rios, J., Mercer, J., Homola, J., Prevot, Th., Mulfinger, D., Kopardekar, P. Flight Test Evaluation of an Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Concept for Multiple Beyond-Visual-Line-of-Sight Operations. *Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, 2017, pp. 1-10. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170011344.pdf> (accessed 31.05.2018).

5. *Visualize it: See FAA UAS Data on a Map*. Available at: <http://faa.maps.arcgis.com> (accessed 31.05.2018).

6. Sunil, E., Hoekstra, J., Ellerbroek, J., Bussink, F., Nieuwenhuisen, D., Vidosavljevic, A., Kern, S. *Metropolis: Relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities. 11th USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar*, Lisbon (Portugal), 23-26 June, 2015, pp. 1-10. Available at: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A1019a338-5f69-409a-a06c-c8346cd343e> (accessed 31.05.2018).

7. Sedov, L., Polishchuk, V., Bulusu, V. Sampling-based capacity estimation for unmanned traffic management. *36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017*, pp. 1-10. Available at: <http://weber.itn.liu.se/~valpo40/pages/liu.pdf> (accessed 31.05.2018).

8. Тимчасовий порядок використання повітряного простору України [Temporary use of airspace of Ukraine]. *Постанова Державної авіаційної служби України*, 31.05.2018. Available at: <https://avia.gov.ua/dlya-zabezpechennya-bezpeky-polotiv-do-derzhavnoyi-reyestratsiyi-pravyl-vykorystannya-povitryanogo-prostoru-ukrayiny-proponuyemo-vykorystovuvaty-v-roboti-tymchasovyy-poryadok-vykorystannya-povitryanog/> (accessed 31.05.2018).

*Поступила в редакцію 1.06.2018, рассмотрена на редколлегии 19.06.2018*

## АЛГОРИТМ ОЦІНКИ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПРИ УПРАВЛІННІ ТРАФІКОМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*О. К. Погудіна, І. В. Вайленко*

Предметом вивчення в статті є процеси оцінки пропускної здатності повітряного простору при управлінні трафіком безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Метою є підвищення якості управління рухом літальних апаратів з урахуванням уникнення конфліктів з участю трьох та більше БПЛА. Завдання: розробляти математичну модель карти ймовірного трафіку, а також формалізувати модель побудови випадкового геометричного графа для оцінки передбачуваних конфліктів та зіткнень БПЛА; реалізувати алгоритми побудови заданих моделей для автоматизації оцінки пропускної спроможності повітряного простору. Використаними моделями є: модель інтенсивності заявок пуассонового процесу для побудови карти ймовірного трафіку, моделі побудови випадкового геометричного графу, для розрахунку кількості можливих конфліктів з участю БПЛА. Отримані наступні результати. Створена формалізована модель розташування карти БПЛА з урахуванням: заданого регіону з зазначеною щільністю населення та передбачуваною кількістю операцій протягом вказаного проміжку часу. Дана модель використовується при побудові випадкового геометричного графа, в якому, з урахуванням мінімальної відстані, можливої для зближення двох БПЛА, проведено оцінку

ймовірності конфліктів та зіткнень. Модель є основою для отримання алгоритму оцінки факторів, що обмежують ємність повітряного простору, внаслідок виникнення конфліктів, що складно вирішуються. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: Удосконалено модель випадкового геометричного графа шляхом формалізації розміщення вершин. Вершини, з урахуванням закону пуассонового процесу, розміщуються в ланках заданого регіону. Це дозволяє отримати об'єктивну картину розташування БПЛА в міському повітряному просторі. Отримано подальший розвиток двовірних моделей карти вірогідного трафіку (моделі "Metropolis", Cal) за рахунок формалізації первинного розміщення БПЛА з урахуванням закону пуассонового процесу. Це допоможе визначити технічні вимоги до забезпечення безперебійної роботи малих безпілотних літальних апаратів в міському повітряному просторі

**Ключові слова:** малий безпілотний літальний апарат, повітряний простір, керування безпілотним трафіком, карта ймовірного трафіку, випадковий геометричний граф

## ALGORITHM OF LEADING CAPACITY ASSESSMENTS FOR UNMANNED TRAFFIC MANAGEMENT

*O. K. Pohudina, I. V. Vailenko*

The subject of the study in the article is the processes of assessing the airship throughput in controlling the unmanned aerial vehicles (UAV) traffic management. The goal is to improve the quality of air traffic control, taking into account the avoidance of conflicts involving three or more UAV. Problems: to develop a mathematical model of the probabilistic traffic map, as well as to formalize the construction of a random geometric graph model for the estimation of alleged UAVs conflicts and collisions; To implement algorithms given models construction for airship throughput automation. The models used: Poisson process whose intensity model is used for building a probabilistic traffic map, random geometric graph model is used for calculate the number of possible conflicts involving the UAV. The following results are obtained. A formalized model of the UAV location map has been created taking into account: the given region with the specified population density and the expected number of operations during the specified time interval. This model was used in the construction of a random geometric graph, in which, taking into account the minimum distance possible for the approximation of two UAVs, an estimation of the probability of conflicts and collisions was conducted. The model is the basis for obtaining an algorithm for estimating the factors limiting the capacity of the airspace, as a result of the occurrence of difficult solvable conflicts. The scientific novelty of the obtained results is as follows: The random geometric graph model is improved by formalizing the position of the vertices. The vertices, taking into account the law of the Poisson process, are placed in the cells of a given region. This allows us to obtain an objective picture of the location of the UAV in the city's airspace. Two-dimensional models of probabilistic traffic maps (Dutch model "Metropolis", model Cal) have been further developed, due to the formalization of the initial UAV placement, taking into account the law of the Poisson process. This will help to determine the technical requirements for ensuring uninterrupted operation of small unmanned aerial vehicles in the urban airspace

**Keywords:** small unmanned aerial vehicle, airspace, unmanned traffic control, probabilistic traffic map, random geometric graph

**Погудина Ольга Константиновна** – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий проектирования, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: ok.pogudina@gmail.com.

**Вайленко Ирина Васильевна** – аспирант, ассистент кафедры информационных технологий проектирования, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vailenko.iv@gmail.com.

**Pohudina Olha Kostantinivna** – PhD, Assistant Professor of Dept. Information Technology Design, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: ok.pogudina@gmail.com.

**Vailenko Iryna Vasilevna** – PhD student, assistant of Dept. Information Technology Design, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: vailenko.iv@gmail.com.