А.А. Кочкаров

**Современная инженерия малых
беспилотных летательных аппаратов
и особенности их сетевого
взаимодействия**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Кочкаров А.А. Современная инженерия малых беспилотных летательных аппаратов и особенности их сетевого взаимодействия // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 1-й Международной конференции (8-9 февраля 2018 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2018. — С. 113-121. — URL: <http://keldysh.ru/future/2018/17.pdf>
doi:[10.20948/future-2018-17](https://doi.org/10.20948/future-2018-17)

Современная инженерия малых беспилотных летательных аппаратов и особенности их сетевого взаимодействия

А.А. Кочкаров

Акционерное общество «РТИ»

Аннотация. Изложены перспективы применения малых беспилотных летательных аппаратов. Описаны особенности их взаимодействия в группах для решения задачи мониторинга. Сформулирована постановка оптимизационной задачи на динамическом графе, являющемся моделью сетевой топологии группы.

Ключевые слова: самоорганизация, групповое управление, малые беспилотные летательные аппараты, динамические графы, сетевое взаимодействие.

Среди последних достижений инженерной науки, получивших широкое распространение, следует выделить беспроводные технологии, миниатюризацию элементно-компонентной базы, высококачественное индивидуальное производство мелкосерийных или уникальных изделий. Сочетание этих трех технологий предоставляет возможность конструирования и изготовления уникальных по своим характеристикам сложных инженерных изделий [1].

К таким изделиям можно отнести малые и сверхмалые беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Во многом в их разработке воплощаются современные достижения инженерной науки.

Поскольку окончательно признанной профессиональным сообществом классификации БПЛА не существует, к сверхмалым можно относить образцы весом до 2 кг, а к малым – до 10 кг. Оба класса БПЛА предполагают одноразовое и многоразовое использование.

Для изготовления сверхмалых БПЛА, как правило, используются самые передовые технологии производства микрокомпонент, поэтому их стоимость достаточно высока, а их применение имеет специальный характер. Некоторые представители этого класса фактически получены миниатюризацией более тяжелых БПЛА вертолетного и планерного типа. Но уже существуют прототипы сверхмалых БПЛА, при конструировании которых были применены новые типы двигателей и корпусов. Некоторые из них используют в своей конструкции бионические принципы

(Ornithopters). Они напоминают полеты птиц и насекомых: «робот-пчела» (Robobee) (см. рис. 1, [2]), «робот-стрекоза» (TechJectDragonfly) (см. рис. 2, [3]), «робот-колибри» (см. рис. 3, [4]) и др.

Рис. 1. «Робот-пчела»

Рис. 2. «Робот-стрекоза»

Также для задач пространственного мониторинга, особенно если иметь в виду труднодоступные местности, целесообразно применение сверхмалых БПЛА принципиально иной конструкторской компоновки. Примерами таких сверхмалых БПЛА являются прототипы «Polyplane» и

4. Транспортные проекты нового поколения

«Samara» (рис. 4, [5]), созданные исследователями из Квинслендского университета (Австралия).

Рис. 3. «Робот-колибри»

Рис. 4. «Polyplane» и «Samara»

Оба прототипа, по замыслу конструкторов, предназначены для сбора информации об окружающей среде (давление атмосферы, температура, влажность, и т.п.) установленными на них сенсорами. Polyplane, напоминающий по форме бумажный самолет, изготавливается из биоразлагаемого материала на основе целлюлозы. На листе этого материала печатаются цепи, устанавливаются сенсоры, микроконтроллеры и элевоны. Polyplane, сброшенный с более крупного аппарата, может, планируя, максимально приблизиться к заданной точке. Прототип «Samara», по форме и по динамике движения напоминающий кленовое

семя, неуправляем. Его конструкция более традиционна, она состоит из жёсткой печатной платы и прикреплённого к ней гибкого «крыла», выполняющего также и функцию антенны. Инженерные решения, использованные при изготовлении прототипов «Polyplane» и «Samara», и их конструкторская компоновка фактически формируют новый класс сверхмалых БПЛА одноразового применения, характеризующийся в том числе и низкой стоимостью изготовления.

Для сверхмалых БПЛА постепенно определяется их область применения для решения задач армии. Так, малый БПЛА CICADA (см. рис. 5, [6]) одноразового применения без двигателя в состоянии спускаться с высоты 17 км и приземляться в заданных местах с точностью до 3 м. Такие БПЛА, образуя беспроводную разведывательную сеть, могут покрывать значительные площади.

Рис. 5. БПЛА CICADA

Рис. 6. Black Hornet Nano

4. Транспортные проекты нового поколения

Примером многоразового сверхмалого БПЛА, нашедшего применение в локальных разведывательных операциях вооруженных сил Великобритании, является Black Hornet Nano (см. рис. 6, [7]) – БПЛА вертолетного типа весом около 20 г.

Все перечисленные сверхмалые БПЛА решают задачи мониторинга в самом широком его понимании. Современные малые БПЛА уже активно применяются для решения боевых задач мониторинга, разведки, и целеуказания [8-10]. Также развивается идеология использования малых ударных БПЛА.

Принято считать, что наличие в арсенале многих стран ядерного оружия и гарантированность взаимного уничтожения практически исключает вероятность конфликта с его полномасштабным применением. Косвенным свидетельством этого является широкий перечень локальных конфликтов в различных регионах мира.

Конфликты последних десятилетий показали эффективность применения средних и тяжелых ударных БПЛА вооруженными силами многих стран. За последние годы существенно изменилась ситуация с возможностью применения в боевых действиях и роботизированных систем других типов, включая наземные, подводные и др. Следует отметить, что уже созданы малые ударные БПЛА [11-13] для применения в боевых операциях. Использование групп таких ударных БПЛА может оказаться достаточно эффективным и в конфликтах в городских условиях. Эффективность таких групп ударных БПЛА будет измеряться их потерями в соотношении к единице военной техники и живой силе.

Ключевой составляющей в создании групп малых автономных ударных беспилотных систем являются алгоритмы взаимодействия между абонентами – алгоритмы самоорганизации [14-15]. Преимущество таких алгоритмов, как правило, заключается в возможности наделения отдельно взятого абонента наиболее «простым» аппаратным и программным обеспечением, но при сохранении возможности решения сложных задач (например, распознавания и уничтожения самоподрывом живой силы и техники противника) в результате коллективного взаимодействия. При этом сами алгоритмы самоорганизации не привязаны к их аппаратному носителю (абоненту-БПЛА). Т.е. идеология разработки таких алгоритмов применима для любых типов групп подвижных робототехнических систем.

Особое место в их разработке, с инженерной точки зрения, занимают вопросы сетевой топологии подвижных групп роботизированных систем (в том числе и БПЛА) и ее динамики.

Обеспечение качественной связи в таких сетях – чрезвычайно актуальная задача. Ее решение повысит связность и скорость передачи информации между подвижными абонентами (БПЛА и элементами других робототехнических систем), сократит затраты на наземный сегмент сети за счет маршрутизации и ретрансляции между подвижными узлами.

Трудоемкость этой задачи растет с увеличением количества абонентов в сети. При этом очевиден тот факт, что наибольшей эффективности работы систем можно добиться при помощи скоординированных действий абонентов сети. В последнее десятилетие в трудах зарубежных и отечественных теоретиков все чаще можно встретить разработки в областях, связанных с совершенно новой концепцией организации действий [15]. Вместе с тем подавляющая часть существующих алгоритмов сетевого взаимодействия имеет очень ограниченную область приложения, по сути, представляя собой конкретные инженерные решения [16].

В качестве теоретической (концептуальной) основы для моделирования взаимодействия абонентов в сетевых системах с динамической структурой связей может выступить зарождающаяся динамическая теория графов, основным объектом которой является динамический граф [17].

Идеология и методы динамической теории графов особенно полезны при конструировании командно-информационного взаимодействия подвижных абонентов (в том числе и носителей сенсоров) в сетевых системах. Сетевые системы следует понимать как технические системы, в основе функционирования которых лежат сети. В этом смысле сетевые системы – больше инженерное понятие, чем строгое математическое [18]. Несомненно, к сетевым системам с динамической структурой связей (топологией) следует отнести и современные пространственно-распределенные системы мониторинга, и информационно-разведывательные системы.

Как показывает практика, инженерные решения в области обеспечения связи между подвижными объектами с точки зрения качества и эффективности наделены рядом функциональных требований. В значительной степени они связаны с ограниченностью энергетических ресурсов. К таким требованиям относятся и расстояние между абонентами в сети, и количество абонентов-ретрансляторов при передаче информации между абонентами, и количество каналов связи отдельного абонента с другими.

В качестве модели топологии сетевой системы с подвижными абонентами, к которым можно отнести и информационно-разведывательные системы, рассмотрим динамический граф $G_l = (V, E_l)$ [17], каждая вершина $v \in V$ которого соответствует абоненту в сети, а ребро $e \in E_l$ – каналу связи между абонентами. Для начала будем рассматривать фиксированное число абонентов $|V|$ в сети. В свою очередь, динамический граф $G_l = (V, E_l)$ представляет последовательность графов $G_1, G_2, \dots, G_l, \dots, G_L, \dots$, переход между которыми определяется одновременным изменением степеней вершин графа G_l , в текущий момент

4. Транспортные проекты нового поколения

времени l . Все графы в траектории $G_1, G_2, \dots, G_l, \dots, G_L, \dots$ будем считать связными.

В соответствии с перечисленными выше требованиями каждый переход в траектории должен проводиться с учетом следующих критериев векторно-целевой функции $F(G_l) = (F_1(G_l), F_2(G_l))$:

$$F_1(G_l) = d(G_l) \rightarrow \min ,$$

где $d(G_l)$ – диаметр графа G_l ; (1)

$$F_2(G_l) = \deg G_l \rightarrow \min ,$$

где $\deg G_l$ – максимальная степень вершины графа G_l .

Критерий $F_1(G_l)$ соответствует требованию уменьшения агентов-ретрансляторов при передаче информации в сети, а критерий $F_2(G_l)$ соответствует требованию уменьшения количества каналов связи отдельно взятого абонента с другими абонентами сети.

Критерии $F_1(G_l)$ и $F_2(G_l)$, очевидно, являются взаимно противоположными критериями, поскольку улучшение одного из них при переходе к следующему графу в траектории $G_1, G_2, \dots, G_l, \dots, G_L, \dots$ будет приводить к ухудшению другого. Поэтому решение двукритериальной оптимизационной задачи (1) разумно свести к решению однокритериальной, заменив один из критериев ограничением. Поскольку критерий $F_2(G_l)$ ориентирован на оптимизацию количества одновременно задействованных каналов связи отдельно взятого абонента в сети, то целесообразно заменить это требование ограничением максимально возможного количества используемых каналов для связи в сети, т.е.

$$F_1(G_l) = d(G_l) \rightarrow \min , \text{ при } F_2(G_l) = \deg G_l \leq M , \quad (2)$$

где M – максимально возможное количество используемых каналов для связи в сети для каждого абонента.

Построение множества графов $\{G_l\}$, являющихся решением задачи (2), для современной теории графов во многом можно оценить как тривиальное. Но переход между графами $G_1, G_2, \dots, G_l, \dots, G_L, \dots$ с учетом условий задачи (2) (или в более сложной формулировке задачи (3)), т.е. согласованное изменение степеней вершин графа $G_l = (V, E_l)$, иначе – количества одновременно задействованных каналов связи каждого абонента в сети, – задача более сложная и не являющаяся предметом настоящей работы.

Резюмируя, отметим, что современные сетевые системы отличаются высокой автономностью на уровне отдельного абонента и децентрализацией на различных уровнях иерархии сети или всей сети в целом. Поэтому формирование механизмов (по сути – алгоритмов) взаимодействия абонентов в сети – чрезвычайно актуальная проблема.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 16-01-00342 а и 16-29-04268 офи_м.

Литература

1. Малинецкий Г.Г., Кочкаров А.А. Будущее российского оружия и междисциплинарные подходы // Интеллект и технологии. – 2014. – № 1(7). – С. 48-51.
2. Ma K.Y., Chirarattananon P., Fuller S.B., Wood R.J. Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot // SCIENCE, Vol. 340, 2013. – pp. 603-607.
3. Quick D. TechJect's Dragonfly micro UAV flies like a bird and hovers like an insect.
URL: <http://www.gizmag.com/techject-dragonfly-microuav/24900/>
4. Ackerman E. DARPA Concludes Nano Air Vehicle Program, We Wonder What's Next.
URL: <http://spectrum.ieee.org/autaton/robotics/military-robots/darpa-concludes-nano-air-vehicle-program-we-wonder-whats-next>
5. Парамонов В. Polyplane и Samara: Одноразовые БПЛА для сбора данных.
URL: <http://compulenta.computerra.ru/tehnika/robotics/10007974/>
6. US Military's New Swarm of Mini-Drones.
URL: <http://www.defensenews.com/story/defense/international/americas/2015/05/17/cicadas-us-militarys-new-swarm-mini-drones/27494981/>
7. Miniature surveillance helicopters help protect front line troops.
URL: <https://www.gov.uk/government/news/miniature-surveillance-helicopters-help-protect-front-line-troops>
8. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – М.: Техносфера, 2015. – 312 с.
9. Линник С. Боевое применение беспилотных летательных аппаратов.
URL: <http://topwar.ru/27536-boevoe-primenenie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov.html>
10. Технологии беспилотных летательных аппаратов: применение в военных конфликтах будущего // Наука за рубежом. Ежемесячное обозрение. – 2012. – № 12. – 14 с.
URL: http://www.issras.ru/global_science_review/Nauka_zh_rubejom_n12.pdf
11. Rapaport A. Loitering UAVs are Precision-Guided Missiles.
URL: <http://www.israeldefense.co.il/en/content/loitering-uavs-are-precision-guided-missiles>
12. LOCUST: Autonomous, swarming UAVs fly into the future.
URL: <http://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR.aspx>

4. *Транспортные проекты нового поколения*

13. *Михалев А.* Осторожные убийцы

URL: <http://lenta.ru/articles/2011/09/08/uav/>

14. *Кочкаров А.А.* Моделирование структурно-динамических процессов в сетевых системах мониторинга // *Антенны*. – 2013. – № 1. – С. 164-168.

15. *Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Прокофьев А.В.* Самоорганизующиеся сети. – СПб.: Издательство «Любавич», 2011. – 310 с.

16. *Шевцов В.А., Бородин В.В., Крылов М.А.* Построение совмещенной сети сотовой связи и самоорганизующейся сети с динамической структурой // *Труды МАИ*. – 2016, Выпуск № 85. – 12с.

17. *Kochkarov A.A., Kochkarov R.A., Malinetskii G.G.* Issues of Dynamic Graph Theory // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Vol. 55, № 9, 2015, pp. 1590–1596.

18. *Кочкаров А.А.* Структурная динамика: свойства и количественные характеристики предфрактальных графов. – М.: Вега-Инфо, 2012. – 120 с.