

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭРОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ «HALE» ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ»

Макаров А.Е.¹, Варламов А.А.²

¹Макаров Анатолий Евгеньевич - старший архитектор программного обеспечения,
DigitalIQ, Феникс, штат Аризона;

²Варламов Александр Александрович - старший архитектор решений,
LI9 INC, Роли, Северная Каролина,
Соединенные Штаты Америки

Аннотация: рассмотрены современные подходы по оптимизации конструктивных параметров стратосферных беспилотных летательных аппаратов дальнего радиуса действия. Проведена классификация базовых задач, которые необходимо решить для эффективного внедрения данных аппаратов в качестве узлов сети «Интернет транспортных средств». На базе уравнений для подъемной силы, аэродинамического сопротивления, тяги и момента тангажа, как основы для дифференциальных уравнений состояния, построена математическая модель полета аппарата в автоматическом режиме. В модели учтена зависимость уровня солнечного облучения в соответствии с географическим положением аппарата и расположением фотоэлементов. Задача оптимизации режима функционирования летательного аппарата, таким образом, была сведена к математической задаче нахождения максимума для целевой функции показателя эффективности накопления и потребления энергии.

Ключевые слова: аэронавигационные системы, «Интернет транспортных средств», беспилотный летательный аппарат, HALE, солнечные элементы, аэродинамические параметры, целевые функции.

Введение

Экспоненциальный рост пропускающей способности информационных сетей, массовое внедрение мобильных аппаратно-программных платформ с широкой полосой сетевого доступа, а также развитие облачных вычислений (Cloud Computing, CC) привели к появлению парадигмы «Интернета всего» (Internet of Everything, IoE), одной из концепций которого является «Интернет транспортных средств» (Internet of Vehicles, IoV). **Актуализация исследований** в данной области в значительной степени связана с мировыми трендами глобализации и автоматизации контроля над транспортными средствами, а так же программы «Устойчивого развития» (Sustainable Development). Подразумевается, что развитие IoV позволит существенно повысить безопасность дорожного движения, снизить расход топлива, а соответственно уровень экономических затрат и выбросов, а также оптимизировать логистические схемы транспортных перевозок.

В рамках концепции IoV каждое транспортное средство рассматривается как информационный узел глобальной сети Интернет, что особенно актуально в рамках расширения покрытия на географическом уровне и организации серверов граничных вычислений (Edge Computing, EC). Базовая схема IoV включает в себя уровни (i) пользовательского интерфейса; (ii) сбора данных; (iii) связи; (iv) приоритетного доступа и (v) контроля. Приведенная архитектура показывает универсальность концепции, что позволяет использовать ее не только для наземных транспортных средств, но также и в области аэронавигации. В данном случае широкие возможности по масштабированию информационной сети IoV представляют беспилотные летательные аппараты (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) дальнего радиуса действия для полетов в стратосфере. В соответствии с прогнозами [1-4] данный класс авиационных систем позволит существенно расширить область применения UAV. Летательные аппараты дальнего радиуса действия для автономного полета на больших высотах в течение значительного промежутка времени, согласно международной классификации относятся к UAV класса «HALE» (High-Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle, HALE-UAV). HALE-UAV могут быть использованы как альтернатива средств спутниковой связи и спутниковой съемки [4, 5], при этом они характеризуются значительно меньшей себестоимостью как при построении, так и на этапе эксплуатации. Это связано с тем, что полет HALE-UAV, в отличие от полета спутниковой системы, является управляемым, а также в случае необходимости составляющие функциональных компонент HALE-UAV подвергаются модификации, замене и ремонту.

Анализ современных исследований и публикаций в профильных изданиях посвященных данной проблеме показал, что разработка HALE-UAV является комплексной задачей [1-4]. Она включает в себя организацию эффективной системы питания аппарата, что в значительной мере или полностью зависит от работы солнечных элементов. В соответствии с этим ключевым заданием становится организация системы электрических аккумуляторов и схемы распределения накопленной энергии, а также определение особенностей полета на больших высотах в соответствии с конструкцией летательного аппарата.

В представленных работах расчет проводится на основе численных методов оптимальной траектории полета, что происходит в автоматическом или полуавтоматическом режиме [8, 9]. Статистические данные и научные работы представлены в профессиональных изданиях, рассматривают принципы функционирования и недостатки современных прототипов HALE-UAV, как ERAST, Helios, HeliPla, Zephyr и другие [4-7], предоставляют возможность ознакомиться с современными подходами в указанной области и составить соответствующую методологическую базу исследования.

Особенностью эффективного внедрения HALE-UAV в рамках инфраструктуры IoV подразумевает существенное увеличение нагрузки на аппаратно-программную платформу аппарата, т.к. UAV в данном случае рассматривается как граничный сервер информационной сети с большим покрытием и многофункциональный

узел сенсорной сети [10-13]. Таким образом, данный подход подразумевает увеличение массы полезной нагрузки на аппарат, что является необходимым для увеличения функционала UAV с точки зрения приема и передачи данных, вычислительного ресурса и информационного хранилища, а также фото- и видеорегистрации. Это указывает на рост актуальности задач по оптимизации процессов накопления и распределения электроэнергии и расчета оптимальной с точки зрения экономии энергии траектории полета [14-20].

Таким образом, *целью работы* стало построение методики оценки эффективности беспилотных авиационных систем, определение задач, решаемых путем внедрения HALE-UAV как информационных узлов IoV, а также разработку математических моделей для определения ключевых показателей летательных аппаратов данного класса.

1. Постановка задачи организации авиационных систем HALE-UAV

В рамках данного исследования работа над решением задания организации авиационных систем HALE-UAV подразумевает рассмотрение следующего набора подзадач:

- формализация цели внедрения авиационных систем UAV;
- определение задач, которые должны быть решены с целью эффективного внедрения авиационных систем UAV;
- оценка уровня функциональных возможностей UAV, необходимых для решения конкретных задач;
- классификация конструктивных особенностей UAV, определяющих его функциональные возможности;
- классификация ограничений по решению поставленных задач в соответствии с конструктивных особенностей UAV;
- поиск методик оптимизации авиационных систем UAV в соответствии с целями исследования, а также уточнение цели и набора задач.

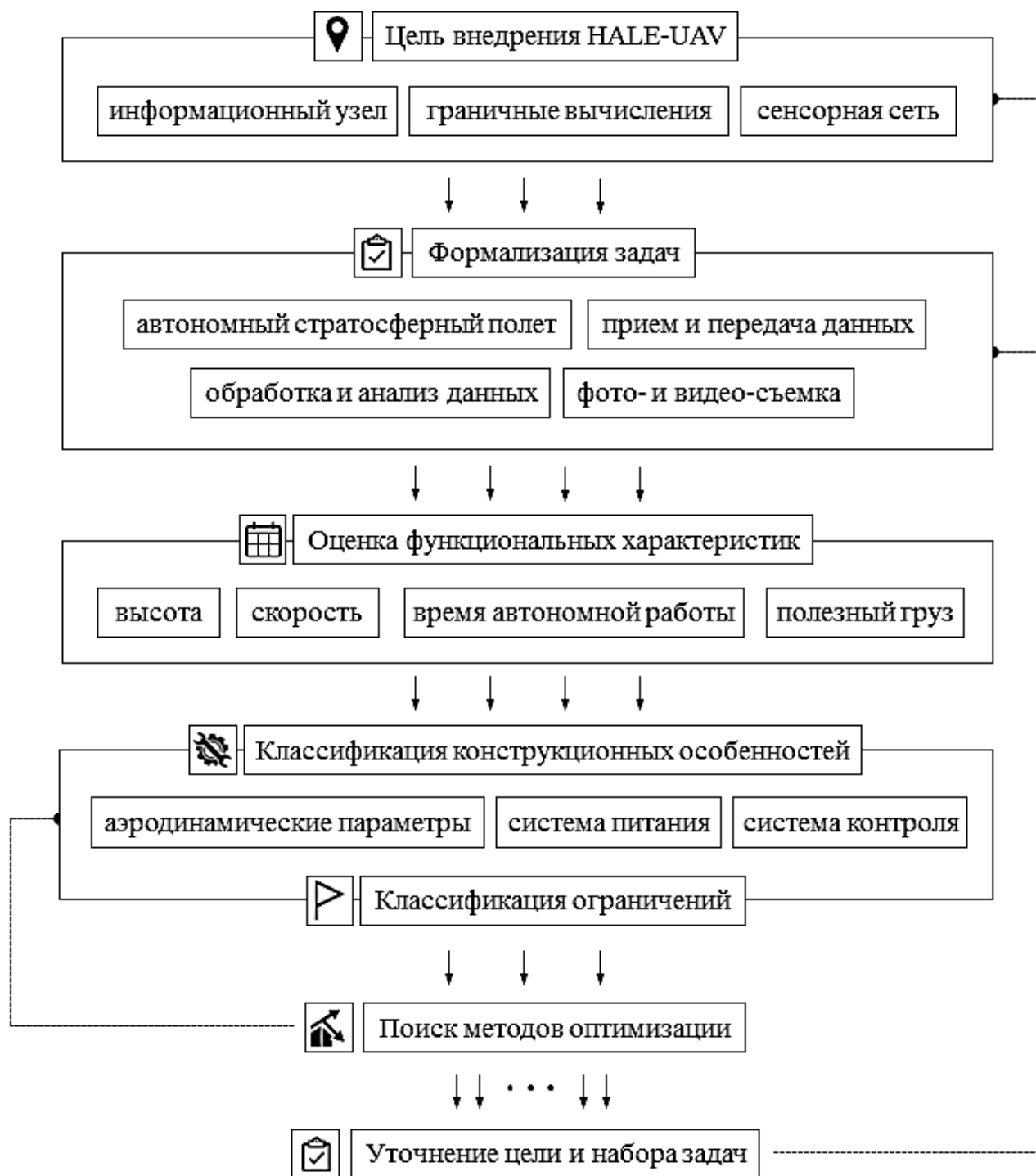


Рис. 1. Схема оптимизации параметров авиационных систем HALE-UAV

Базовая схема, которая унифицирует решение задач, связанных с внедрением авиационных систем HALE-UAV показана на рис. 1. Следует отметить, что на уровне математического моделирования необходимо учитывать, что отдельный функциональный блок в данной схеме может быть использован для решения нескольких задач.

2. Математическое моделирование системы автоматического контроля полета HALE-UAV

Математический аппарат модели контроля полета HALE-UAV базируется на системе уравнений для подъемной силы F_L и аэродинамического сопротивления F_D , которые могут быть представлены как функции от давления свободного потока q , общей площади крыльев S_x , а также коэффициентов подъемной силы C_L и аэродинамического сопротивления C_D (рис. 2).

$$\begin{cases} F_L = C_L(S_x \cdot q) \\ F_D = C_D(S_x \cdot q), \\ q = \rho_a(h) \cdot v^2 / 2 \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho_a(h)$ — плотность воздуха в зависимости от высоты нахождения UAV, а v — скорость полета UAV. Далее на основе показателя подъемной силы рассчитывается тяга двигателя F_T и момент тангажа M :

$$\begin{cases} F_T = C_D \cdot F_L / C_L \\ M = C_P \cdot L_{AC} \cdot (S_\Sigma \cdot q) \end{cases} \quad (2)$$

где L_{AC} — длина хорды аэродинамического профиля, а C_P — коэффициент момента тангажа.

В дальнейшем для моделирования изменения траектории движения UAV в плоскости, образованной осями OX (параллельной поверхности Земли и определяет направление полета аппарата) и OY (перпендикулярной поверхности Земли) надо построить дифференциальные уравнения для изменения скорости (ускорение, $a = dv/dt$) и угла тангажа (частоты вращения, $\omega_z = d\theta/dt$):

$$\begin{cases} a = \frac{F_T \cdot \cos(\alpha) - F_D}{m} - g \cdot \sin(\theta) \\ \omega_z = \frac{F_T \cdot \sin(\alpha) + F_L - mg \cdot \cos(\theta)}{m \cdot v} \end{cases} \quad (3)$$

где m — масса UAV, которую мы считаем постоянной, g — ускорение свободного падения, а α — угол атаки UAV, как разница между углом наклона ϑ и углом тангажа ($\alpha = \vartheta - \theta$). Аналогично, можно вывести дифференциальные уравнения по паре координат (x, y) , как это представлено на рис. 2.

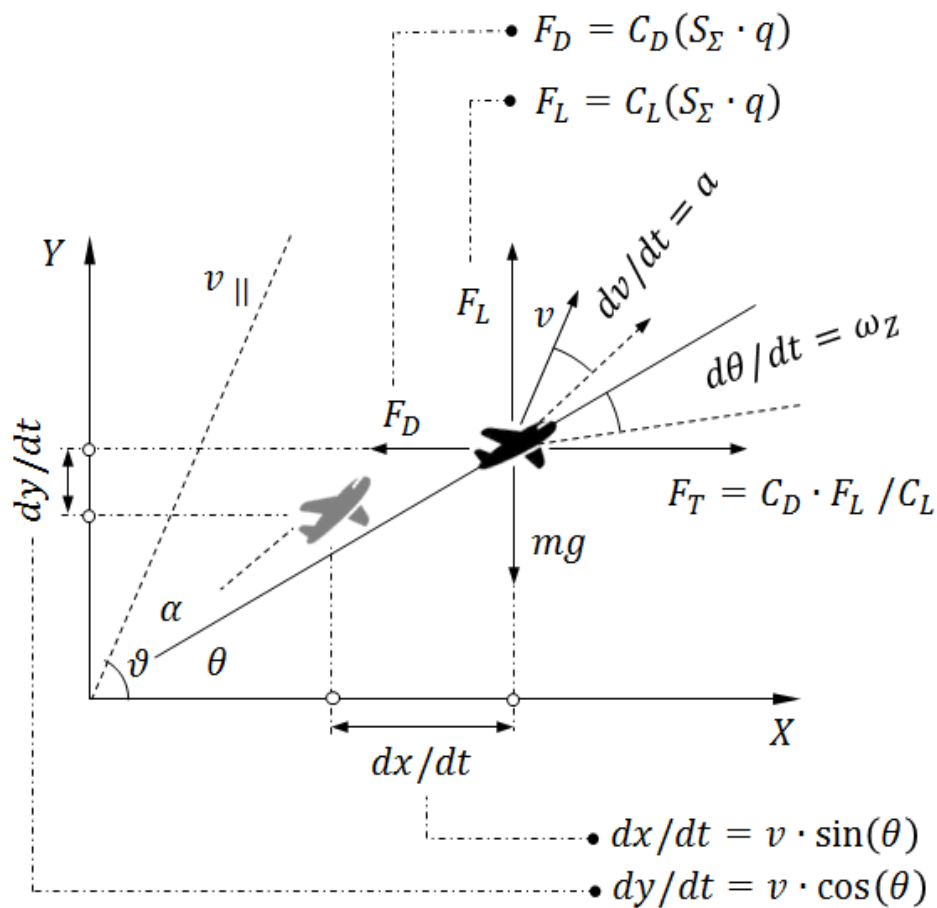


Рис. 2. Схема определения аэродинамических параметров UAV

Далее необходимо построить модель системы питания UAV, которая включает в себя панель солнечных элементов, набор аккумуляторов, топливную подсистему блок распределения энергии. Режимы функционирования системы питания зависят от задач, которые выполняет летательный аппарат и внешних условий. В рамках данной схемы исключается топливная подсистема, которая, как отмечается во многих исследованиях, для летательных аппаратов HALE-класса не является актуальной. Принцип работы подсистемы по распределению электроэнергии системы питания UAV в таком случае заключается в выделении режимов питания движущей системы от солнечных элементов и зарядки аккумуляторов (при достаточном уровне солнечного облучения) и потребления энергии накопленной аккумуляторами (при недостаточном уровне солнечного облучения).

В идеальном случае автоматическое определение момента переключения t' , которому соответствует значение мощности солнечного излучения P' , можно получить через усреднение функции мощности

солнечного излучения P_{SR} по времени — $\overline{P_{SR}}$ и определения минимального (порогового) значения мощности солнечного излучения работы подсистемы солнечных элементов — P_{SR}^{min} . Соответственно, $P' = P(t')$ для промежутка времени $t \in [t_0; t_1]$ рассчитывается как сумма указанных величин:

$$P(t') = \overline{P_{SR}} + P_{SR}^{min} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} P_{SR} dt}{t_1 - t_0} + P_{SR}^{m \in (4)}$$

Но при решении реальных задач необходимо также учитывать показатели эффективности электрических аккумуляторов η_{EB} и соответствующие потери, что будет рассмотрено ниже.

3. Оптимизация конструктивных параметров HALE-UAV на основе целевых функций эффективности

При адаптации математической модели для решения актуальных задач следует ввести значение ΔP_{SR} как функцию от η_{EB} и, по крайней мере, три временных диапазона в соответствии с уровнем мощности солнечного излучения $P_{SR}(t)$:

- при $P_{SR}(t) \geq (P' + \Delta P_{SR})$ уровень солнечного излучения является достаточным и система питания UAV работает в режиме питания движущей системы от солнечных элементов и зарядки аккумуляторов;
- при $P' < P_{SR}(t) < (P' + \Delta P_{SR})$ уровень солнечного излучения является достаточным, но учитывает потенциальных потерь электрических аккумуляторов система питания UAV переводится в режим потребления энергии накопленной аккумуляторами;
- при $P_{SR}(t) \leq P'$ уровень солнечного излучения недостаточно и система питания UAV переводится в режим потребления энергии накопленной аккумуляторами.

При этом мощность солнечного излучения как функция, зависящая от времени, рассчитывается через интенсивность солнечного излучения и угол падения лучей на поверхность фотоэлементов, которые покрывают крылья UAV. Как показано на схеме, моделирование указанных величин включает в себя анализ режима полета UAV, широты и долготы его нахождения (параметры λ и ϕ), высоты над уровнем моря, позволяющие определить часовой угол Солнца и усредненные данные о метеорологических условиях. Для определения угла падения лучей на поверхность фотоэлементов необходимо построить параметрическую модель, включающая в себя уравнения для углов положения Солнца как функции от солнечного азимута, широты и часового угла. Указанные уравнения для каждого фотоэлемента перечисляются с помощью соответствующих матриц перехода. Процедура, таким образом, включает в себя следующие этапы:

- построение параметрической модели на базе уравнений для углов положения Солнца;
- определение величин наклона поверхности UAV, углу наклона и углу рыскания;
- построение матрицы перехода от географической системы координат в систему координат UAV;
- определение угла наклона фотоэлемента по отношению к поверхности UAV;
- построение и применение матрицы перехода от системы координат UAV к системе координат фотоэлемента.

Очевидно, указанную процедуру можно существенно упростить и унифицировать для групп фотоэлементов, если поверхность крыла UAV моделируется как двумерную. С помощью математической модели процедуру оптимизации полета UAV, а соответственно максимизацию времени его автономной работы можно свести к задаче поиска максимума целевой функции для показателя эффективности потребления электроэнергии η_E (от аргумента тяги двигателя). Данная функция рассчитывается как соотношение потребляемой энергии элементами движущей системы аппарата $P_i^P, i \in [1; I]$, бортовым оборудованием $P_j^A, j \in [1; J]$ и потерями $P_l^L, l \in [1; L]$ в процессе перевода солнечной энергии в электрическую энергию фотоэлементами UAV $P_n^{SR}, n \in [1; N]$, что является усредненные по времени:

$$\max(\eta_E) = \max_{t_T} \left(\frac{\sum_{i=1}^I \overline{P}_i^P + \sum_{j=1}^J \overline{P}_j^A + \sum_{l=1}^L \overline{P}_l^L}{\sum_{n=1}^N \overline{P}_n^S} \right). (5)$$

Проведение численного расчета для поиска экстремума целевой функции является комплексной задачей, для решения которой определяется значение минимального шага анализа, а также максимальное количество и время итераций, для чего целесообразно использовать нейросетевые алгоритмы.

Выводы

В результате проведенной работы были рассмотрены особенности организации систем автоматического управления HALE-UAV. Проведена классификация базовых задач, которые необходимо решить для эффективного внедрения данных аппаратов в рамках концепции «Интернета транспортных средств» в качестве сенсорных и информационных узлов. На базе уравнений для подъемной силы, аэродинамического сопротивления, тяги и момента тангажа, как основы для дифференциальных уравнений состояния была построена математическая модель полета HALE-UAV. В предложенной модели учтена зависимость уровня солнечного облучения в соответствии с географического положением аппарата и расположением фотоэлементов на его поверхности. Задача оптимизации режима функционирования летательного аппарата

была, таким образом, сведена к математической задаче нахождения максимума целевой функции для показателя эффективности накопления и потребления энергии.

Список литературы

1. *Gilli A. & Gilli M.* (2018). Emerging Technologies: Unmanned Aerial Vehicles. Oxford Scholarship Online.
2. *Mink R.* (2020). Implementation and Evaluation of Unmanned Aerial Vehicles and Sensor Systems in Weed Research. Göttingen: Cuvillier Verlag.
3. *Kang K., Prasad J.V. & Johnson E.* (2016). Active Control of a UAV Helicopter with a Slung Load for Precision Airborne Cargo Delivery. *Unmanned Systems*, 04 (03), 213-226. doi:10.1142/s2301385016500072.
4. *Ahmad K. & Rahman H.* (2012). Flutter Analysis of X-HALE UAV-A Test Bed for Aeroelastic Results Validation. *Applied Mechanics and Materials*, 245, 303-309. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.245.303.
5. *Tarihi M., Noori M.M. & Madani M.* (2020). Improving the Performance of HALE UAV Communication Link Through MIMO Cooperative Relay Strategy. *Wireless Personal Communications*, 113 (2), 1051-1071. doi:10.1007/s11277-020-07267-5.
6. *Ahmad K. & Rahman H.* (2012). Flutter Analysis of X-HALE UAV-A Test Bed for Aeroelastic Results Validation. *Applied Mechanics and Materials*, 245, 303-309. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.245.303.
7. *Furfaro R., Ganapol B.D., Johnson L.F. & Herwitz S.* (2005). Model-based neural network algorithm for coffee ripeness prediction using Helios UAV aerial images. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VII*. doi:10.1117/12.627420.
8. *Hwang H., Cha J. & Ahn J.* (2019). Solar UAV design framework for a HALE flight. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91 (7), 927-937. doi:10.1108/aeat-03-2017-0093.
9. *Liu X.D., Li S.L. & Tanq Y.* (2015). Fuel System Configuration and Restructuring of MALE and HALE UAV. *Applied Mechanics and Materials*, 779, 268-276. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.779.268.
10. *Ng J.S., Bryan Lim W.Y., Dai H.-N., Xiong Z., Huang J., Niyato D., Hua X.-S., Leung C. & Miao C.* (2020). Communication-Efficient Federated Learning in UAV-enabled IoV: A Joint Auction-Coalition Approach. *GLOBECOM 2020* – 2020. IEEE Global Communications Conference. <https://doi.org/10.1109/globecom42002.2020.9322584>.
11. *Chakraborty N., Chao Y., Li J., Mishra S., Luo C., He Y., Chen J., & Pan Y.* (2021). RTT-based Rogue UAV Detection in IoV Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3051293>.
12. *Lim W.Y., Huang J., Xiong Z., Kang J., Niyato D., Hua X.-S., Leung C. & Miao C.* (2021). Towards Federated Learning in UAV-Enabled Internet of Vehicles: A Multi-Dimensional Contract-Matching Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–15. <https://doi.org/10.1109/tits.2021.3056341>.
13. *Abualola H., Otok H., Barada H., Al-Qutayri M. & Al-Hammadi Y.* (2021). Matching game theoretical model for stable relay selection in a UAV-assisted internet of vehicles. *Vehicular Communications*, 27, 100290. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2020.100290>.
14. *Xian-Zhong G., Zhong-Xi H., Zheng G., Xiong-Feng Z., Jian-Xia L. & Xiao-Qian C.* (2013). Parameters determination for concept design of solar-powered, high-altitude long-endurance UAV. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 85 (4), 293-303. doi:10.1108/aeat-jan-2012-0011.
15. *Shiau J.K., Ma D.M., Yang P.Y. and Wang C.F.* (2009). “Design of a solar power management system for an experimental UAV”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45 (4). Pp. 1350-1360.
16. *Klesh A.T. and Kabamba P.T.* (2009). “Solar-powered aircraft: energy-optimal path planing and perpetual endurance”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32 (4). Pp. 1320-1329.
17. *Shiau J.K., Ma D.M. and Chiu C.W.* (2010), “Optimal sizing and cruise speed determination for a solar-powered airplane”, *Journal of Aircraft*, 47 (2). Pp. 622-629.
18. *Hwang H., Cha J. & Ahn J.* (2019). Solar UAV design framework for a HALE flight. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91 (7), 927-937. doi:10.1108/aeat-03-2017-0093.
19. *Romeo G., Frulla G. and Cestino E.* (2007), “Design of a high-altitude long-endurance solar-powered unmanned air vehicle for multi-payload and operations”, *Journal of Aerospace Engineering*. Vol. 221. Pp. 199-216.
20. *Joshi T., Dhameliya J., Prakash T., Mistri S., Yerramalli C.S., Guha A. & Pant R.S.* (2019). Conceptual Design and Sizing of a Wing-Tip Extension Mechanism for HALE UAV. 2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). doi:10.1109/icnte44896.2019.8945964.