

УДК 629.7.01

Вопросы оптимизации использования дополнительных солнечных панелей для питания узлов беспилотных летательных аппаратов

Джахидзаде Ш.Н.

*Национальное аэрокосмическое агентство,
улица С.С. Ахундова, Баку, 1AZ1115, Азербайджанская Республика
e-mail: zshane@mail.ru*

Статья поступила 23.09.2019

Аннотация

Статья посвящена вопросам оптимизации использования дополнительных солнечных панелей для питания узлов беспилотных летательных аппаратов. Отмечено, что перспективным в настоящее время является решение задачи обеспечения БПЛА энергией путем установки солнечных панелей на верхней поверхности крыльев. Предлагается усилить энергоснабжение узлов БПЛА путем установки дополнительных солнечных панелей на нижней поверхности крыльев для дополнительного использования диффузной и отраженной от земли солнечной радиации. Сформулирована и решена задача наиболее эффективного использования дополнительных солнечных панелей, устанавливаемых на нижней поверхности крыльев БПЛА. Согласно полученному результату, суммарная дополнительная радиация, которая может быть преобразована в электрическую энергию может быть максимально эффективно использована в случае обеспечения следующего условия: при увеличении угла высоты Солнца альбедо должно уменьшаться и наоборот. Физически такая зависимость может быть обеспечена выбором такого

пространственно – временного маршрута полета БПЛА, в которой указанное требование выполняется.

Ключевые слова: БПЛА, солнечные панели, диффузная радиация, оптимизация, отраженная радиация

1. Введение

Как отмечается в работе [1] беспилотные летательные аппараты (БПЛА) начиная с 1950-го года используются для проведения разведки и сбора информации. Например, в работе [2] ставится задача создания глобальных систем мониторинга морской поверхности с помощью высотных разведывательных беспилотных аппаратов. При этом особую важность приобретает навигационное обеспечение БПЛА, для чего в последнее время используются лазерные локационные системы в качестве узлов коррекции бесплатформенных инерциальных навигационных систем [3]. Широко используются такие методы навигационного обеспечения как анализ фотоизображений и инерциальные измерения. [4]. Не менее важной задачей успешного функционирования БПЛА при выполнении разведывательных задач является обеспечение помехоустойчивости электронных средств и фильтрация низкочастотных помех в информационного – измерительных системах беспилотных аппаратов [5, 6]. Как отмечается в работе [7], добавление к беспилотному летательному аппарату бортовой системы манипулирования приводит к усложнению процесса стабилизации БПЛА и требует повышенных энергоресурсов.

Одной из важных проблем успешного функционирования БПЛА является обеспечение электронных и электромеханических узлов источником энергии. Традиционное решение проблемы энергоснабжения - использование электрических батареек (аккумулятор) и углеводородного топлива в конечном счете приводит к ограничению времени автономного полета БПЛА. Нетрадиционным, однако перспективным решением данного вопроса является обеспечение БПЛА солнечными панелями. Первый полет БПЛА со встроенной солнечной панелью был осуществлен в 1974-м году в Калифорнии (США) на высоте 100м в течение 20 минут. В настоящее время имеется довольно обширная литература по данному вопросу (См. например [7-21]). Согласно [7], низкая эффективность поликристаллических солнечных панелей, достигающая $13 \div 18 \%$ приводит к необходимости удлинения крыльев БПЛА, на которой размещаются батареи. Как отмечено в [8,9], солнечные батареи являются единственным видом источника энергии, позволяющим осуществить 24 часовой полет БПЛА, где в течение дневного времени осуществляется аккумуляция энергии, а в ночное время используется накопленная энергия. Согласно [10], был изготовлен малогабаритный БПЛА, весящий всего 6.9 кг, оснащенный солнечными панелями, позволяющими осуществить автономный полет в течение 81 часов на дистанции 2338 км.

Как отмечается в [11], БПЛА, питаемая от солнечных батарей находит практическое применение при осуществлении дневного контроля малых газов в атмосфере.

Согласно [12], солнечные панели, установленные на БПЛА могут быть дополнены пьезоэлектрическими преобразователями, преобразующими вибрационную энергию крыльев в электроэнергию.

В работах [12,13,14,15,16] сообщается о формировании и решении оптимизационных задач, позволяющих существенно повысить эффективность использования солнечных панелей для обеспечения функционирования БПЛА. Согласно [17], изготовлен БПЛА с солнечными панелями, снабженный аккумуляторной полимерной батареей из ионов лития, способный осуществить вертикальный взлет и посадку.

Вышеприведенные примеры указывают на перспективность использования солнечных панелей для обеспечения БПЛА энергией.

Вместе с тем, использование солнечной энергии для питания узлов БПЛА связано с рядом проблем, решение которых поможет еще более повысить эффективность их функционирования. Одной из таких проблем является обеспечение БПЛА дополнительными солнечными панелями на нижней поверхности крыльев для использования энергии рассеянной солнечной радиации. Далее, в настоящей статье формируется и решается задача обеспечения эффективной работы дополнительных солнечных панелей низколетящих БПЛА установленных на нижней плоскости крыльев, преобразующих в электроэнергию только диффузную и отраженную от земли солнечную радиацию.

2. Модель функционирования солнечных панелей на БПЛА

Прежде всего рассмотрим базовые теоретические положения функционирования солнечных панелей. Для этого воспользуемся сведениями, приведенными в [18-20]. Согласно [9], солнечная оптическая радиация зависит от двух основных параметров; высота Солнца и позиция Солнца

На рис.1. приведено пояснение позиции Солнца.

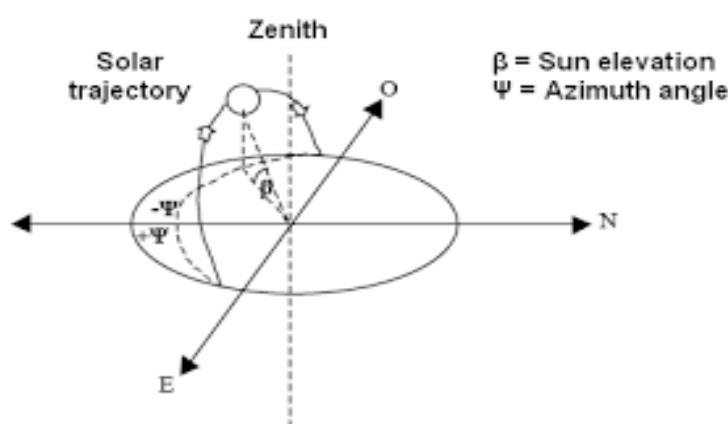


Рис.1. Пояснение позиции Солнца.

Принятые обозначения: β – угол высоты Солнца; Ψ – угол Азимута.

Согласно математической модели, принятой стандартом ASHRAE Солнечная постоянная φ_c определяется в качестве солнечной энергии, попадающей на единичную площадь на плоскости, перпендикулярной оси "Земля - Солнце", вне атмосферы, при средней величине расстояния до Солнца. Принято, что $\varphi_c = 1353$ Вт/м².

Из-за эксцентricности орбиты, расстояние Земля – Солнце изменяется в течение года и внеатмосферная радиация φ_N изменяется по закону

$$\varphi_N = \varphi_c \left[1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot g}{365}\right) \right] \quad (1)$$

где: g - день года, начиная с первого января.

Суммарная радиация, попадающая на поверхность солнечной панели (рис.2) определяется следующим образом (рис.2):

$$\varphi_T = \varphi_{dir} + \varphi_{dif} + \varphi_{ref} \quad (2)$$

где: φ_{dir} - прямая солнечная радиация; φ_{dif} - диффузная солнечная радиация; φ_{ref} - отраженная солнечная радиация.

Прямая радиация на Земли φ_{dir} определяется как

$$\varphi_{dir} = \frac{A}{e^{\beta/\sin \beta}} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

где: A – внеатмосферная радиация в случае когда лучи направлены в зенит; B – атмосферный коэффициент.

В общем случае, A и B являются сложной функцией аргумента g [9].

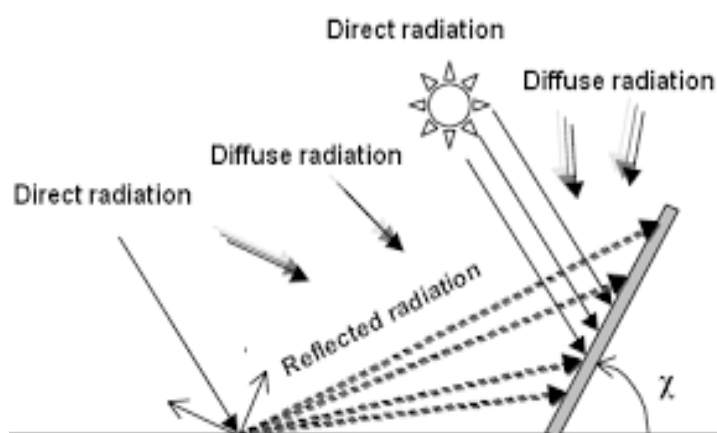


Рис.2. Иллюстрация формирования суммарной радиации на солнечной панели, находящейся под углом χ .

Так как целью настоящего исследования является анализ условий достижения высокой эффективности работы дополнительных солнечных панелей, установленных на нижней поверхности крыльев, то в дальнейшем будем рассматривать только составляющие φ_{dif} и φ_{ref} .

Согласно [9], φ_{dif} определяется по формуле

$$\varphi_{dif} = C \cdot \frac{A}{e^{B/\sin\beta}} \cdot F \quad (4)$$

где: C - фактор диффузной радиации, определяемая в качестве сложной функции аргумента g [9].

$$C = 1 / (16.9 + 0.0001g - 8.65^{-4} \cdot g^2 + 3.93 \cdot 10^{-6} \cdot g^3 - 4.005 \cdot 10^{-9} \cdot g^4) \quad (5)$$

F - фактор обзора, определяемый как

$$F = \frac{1 + \cos\chi}{2} \quad (6)$$

Очевидно, что если поверхность солнечной панели поворачивается в сторону вниз φ_{dif} уменьшается, а φ_{ref} увеличивается. Согласно [9], φ_{ref} определяется по формуле

$$\varphi_{ref} = \frac{A}{e^{B/\sin\beta}} (C + \sin\beta) \cdot \rho_g \cdot (1 - F) \quad (7)$$

где: ρ_g - альbedo земной поверхности.

3. Формирование и решение оптимизационной задачи

Далее рассмотрим вопрос о формировании оптимизационной задачи достижения наивысшей эффективности функционирования дополнительных солнечных панелей, установленных на нижней поверхности крыльев.

С учетом выражений (4), (6), (7) имеем

$$\varphi_{\text{доп}} = \varphi_{\text{dif}} + \varphi_{\text{ref}} = \frac{C \cdot A}{e^{B/\sin \beta}} \cdot F + \frac{A \cdot (C + \sin \beta) \cdot \rho_g \cdot (1 - F)}{e^{B/\sin \beta}} \quad (8)$$

Обозначив

$$\alpha = \frac{A}{e^{B/\sin \beta}}, \quad (9)$$

выражение (8) перепишем как

$$\varphi_{\text{доп}} = \alpha [C \cdot F + (C + \sin \beta) \cdot \rho_g \cdot (1 - F)] \quad (10)$$

Очевидно, что показатель F изменяется в пределах $(0 \div 1)$. Выражение (10) перепишем как

$$\varphi_{\text{доп}} = \alpha [F [C - (C + \sin \beta) \cdot \rho_g] + (C + \sin \beta) \cdot \rho_g] \quad (11)$$

или

$$\varphi_{\text{доп}} = \alpha \left[\left(\frac{1 + \cos \chi}{2} \right) [C - (C + \sin \beta) \cdot \rho_g] + (C + \sin \beta) \cdot \rho_g \right] \quad (11)$$

Введем на рассмотрение функцию

$$\chi = \chi(\beta) \quad (12)$$

и вычислим интеграл выражения (11) в диапазоне $(0 \div \beta_{max})$ с учетом следующих известных равенств:

$$(\cos x)' = -\sin x$$

$$(\sin x)' = \cos x$$

Как результат получаем следующий целевой функционал оптимизации

$$\varphi_{\text{доп.инт}} = \int_0^{\beta_{max}} \alpha \left[\frac{1 + \cos \chi(\beta)}{2} [C - (C + \sin \beta) \cdot \rho_g] + (C + \sin \beta) \cdot \rho_g \right] d\beta \quad (13)$$

Исследуем функционал (13) на экстремум от функции $\chi(\beta)$. Имеем

$$\frac{d\varphi_{\text{доп.инт}}}{d[\chi(\beta)]} = \frac{-\alpha \sin \chi(\beta)}{2} [C - (C + \sin \beta) \cdot \rho_g] \quad (14)$$

$$\text{Условие} \quad \frac{d\varphi_{\text{доп.инт}}}{d[\chi(\beta)]} = 0 \quad (15)$$

выполняется при равенстве

$$C - (C + \sin \beta) \cdot \rho_g = 0 \quad (16)$$

или

$$\sin \beta = \frac{C - \rho_g \cdot C}{\rho_g} \quad (17)$$

или

$$\beta = \arcsin \left[\frac{C - \rho_g \cdot C}{\rho_g} \right] \quad (18)$$

Таким образом, при угле высоты Солнца, определяемым формулой (18) $\varphi_{\text{доп.инт}}$ достигает экстремального значения .

Можно показать, что данный экстремум является максимумом, т.к.

$$\frac{d^2 \varphi_{\text{доп.инт}}}{d[\chi(\beta)]^2} \quad (19)$$

оказывается отрицательной величиной.

4.Обусуждение и основные выводы

Таким образом, согласно полученному результату, суммарная дополнительная радиация, которая может быть преобразована в электрическую энергию может быть максимально эффективно использовано в случае обеспечения условия (17). Суть условия (17) заключается в следующем: При увеличении угла β альbedo ρ_g должно уменьшаться и наоборот. Физически такая зависимость может быть обеспечена выбором такого пространственно – временного маршрута полета БПЛА, в которой указанное требование выполняется.

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Отмечено, что перспективное в настоящее время решение задачи обеспечения БПЛА энергией путем установки солнечных панелей на верхней поверхности крыльев может быть модифицировано путем установки дополнительных солнечных панелей на нижней поверхности крыльев для дополнительного использования диффузной и отраженной от земли солнечной радиации.

2. Сформулирована и решена задача наиболее эффективного использования дополнительных солнечных панелей, устанавливаемых на нижней поверхности крыльев БПЛА.

Библиографический список

1. A. Yazdian Varjani, H. Bahrami Turabi, M. Sadi. Solar power system for experimental unmanned aerial vehicle (UAV) // Drive Systems and Technologies Conference, IEEE, 2011. DOI: [10.1109/PEDSTC.2011.5742404](https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2011.5742404)
2. Трохов Д.А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53735>
3. Старовойтов Е.И. Характеристики лазерных локационных систем для коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=98911>
4. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Лунев Е.М., Пронькин А.Н. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75632>
5. Нуриев М.Г. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=99074>

6. Бухалев В.А., Болдинов В.А. Фильтрация сигналов при низкочастотных помехах в измерительного – информационных системах беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87283>
7. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90439>
8. Nelson Javier Padraza Betancourth, Julio Enoc Parra Villamarin, John Jairo Vaca Rios, Pedro David Bravo-Mosquera, Hernan Dario Ceron-Munoz. Design and manufacture of a solar-powered unmanned aerial vehicle for civilian surveillance missions // Journal of Aerospace Technology and Management, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 385 - 396. DOI: 10.5028/jatm.v8i4.678
9. Karthik S., Santoskhumar K., Ponjyapandian V., Sudhan P. Solar powered aircraft in unmanned aerial vehicle // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), NCRAIME-2015 Conference Proceeding, Special Issue-2015, vol. 3, issue 26, available at: <https://www.ijert.org/research/solar-powered-aircraft-in-unmanned-aerial-vehicle-IJERTCONV3IS26007.pdf>
10. Philipp Oettershagen, Amir Melzer, Thomas Mantel, Konrad Rudin, Thomas Stastny, bartosz Wawrzacz, Timo Hinzmann, Stefan Leutenegger, Kostas Alexis, Roland Siegwart. Design of small hand-launched solar-powered UAVs: From concept study to a multi-day world endurance record flight // Journal of Field Robotics, 2017, vol. 34, no.1,

available at: [https://www.atlantiksolar.ethz.ch/wp-content/downloads/publication/JFR81hFlight paper final.pdf](https://www.atlantiksolar.ethz.ch/wp-content/downloads/publication/JFR81hFlight%20paper%20final.pdf)

11. Alexander Malaver, Nunzio Motta, Peter Corke, Felipe Gonzalez. Development and integration of a solar-powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor Greenhouse Gases // Sensors, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 4072 - 4096. Doi: 10.3390/s150204072.

12. Steven R. Anton. Energy harvesting for unmanned aerial vehicles, 2008, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Anton-1-ENERGY-HARVESTING-FOR-UNMANNED-AERIAL-Anton/35904633f488e9f94eb0ef50ec0c57f7b6ae6156>

13. Zhu X., Guo Z., Hou Z., Gao X., Zhang J. Parameter's sensitivity analysis and design optimization of solar – powered airplanes // Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2016, vol. 88, pp. 550 - 560.

14. Spangelo S.C., Gilbert E.G. Power optimization of solar – powered aircraft with specified closed ground tracks // Journal of Aircraft, 2013, vol. 50, no. 1, pp. 232 - 238.

15. Rodriguez J.B., Morales G.C., Benavides E.M. A First Approach to Solar Aviation with the Use of Axiomatic Design // Procedis CIRP, 2015, vol. 34, pp. 186 - 192.

16. Yan sun, Derrick Wing Kwan Ng, Donhfang Xu, Linglong Dai, Robert Schober. Resource allocation for solar powered UAV communication systems, available at: <https://arxiv.org/pdf/1801.07188.pdf> .

17. Li Songqi, Yu Tianning, Wang Xuchhen, Li Haoran. The design of a new solar powered unmanned aircraft, available at:

http://pstu.ru/files/file/2015/stud/li_songqi_yu_tianning_wang_xuchen_li_haoran_the_design_of_a_new_solar_powered_unmanned_aircraft.pdf

18. A. Lay-Ekuakille, G. Vendramin, A. Fedele, L. Vasanelli, A. Trotta. PV maximum power point tracking through pyranometric sensor: modeling and characterization // International Journal on Smart Sensing and Intelligent System, 2008, vol. 1, no. 3, pp. 659 - 678.
19. Pinter G., Heged Baranyai, Williams N., Zsiborac A. Study of Photovoltaics and LED Energy Efficiency: Case Study in Hungary // Energies, 2018, vol. 11, no. 4. DOI: 10.3390/en11040790
20. Rahim M., Yoshino J., Yasuda T. Evaluation of solar radiation abundance and electricity production capacity for application and development of solar energy // International Journal of Energy and Environment, 2012, vol. 3, no.5, pp. 687.