

УДК 623.746; 519.7; 517.977.5

© Ф. Ф. Гулиев

ОПТИМАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА БАЗЕ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Результаты информационной оптимизации лазерного канала связи между элементами группы БПЛА, осуществляющих групповое дистанционное зондирование, показали, что в оптимальном режиме увеличение длины волны оптического сигнала неизбежно приводит к уменьшению достижимого расстояния между БПЛА. Результаты исследования зависимости требуемой площади полезного груза, предназначенной для размещения аппаратуры дистанционного зондирования, показали, что с увеличением длины волны указанная площадь неизбежно увеличивается.

Кл. сл.: экологический мониторинг, беспилотные летательные аппараты, оптимизация, дистанционное зондирование, групповой полет

ВВЕДЕНИЕ

Как отмечено в работе [1], дистанционное зондирование с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является наиболее подходящим техническим решением для менее развитых стран. Использование спутниковых систем проведения локального или регионального мониторинга является практически недостижимым и слишком дорогим для них, что подчеркивает актуальность разработки высокоэффективных технологий дистанционного зондирования, предусматривающих оптимальное использование ресурсов указанных носителей. В настоящей статье мы проанализируем возможность оптимального выбора основных режимных параметров группы БПЛА, совершающих совместное дистанционное зондирование, и покажем пути эффективного использования геометрического ресурса БПЛА в отдаленности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ДИСТАНЦИИ МЕЖДУ БПЛА

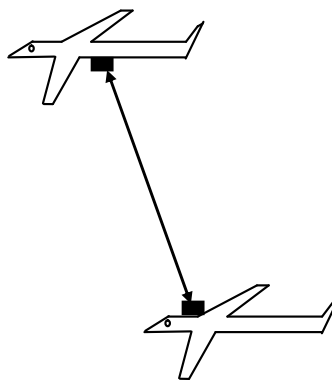
Проанализируем вопрос об оптимальном выборе длины волны в канале лазерной связи, используемой для организации коммуникации при групповых полетах БПЛА между центральным и периферийным БПЛА (см. рисунок). С этой целью проанализируем достижимую величину отношения сигнал / шум в лазерном оптическом канале при передаче по этому каналу информации спектрального дистанционного зондирования.

Как указано в работе [2], взаимосвязь между мощностью сигнала периферийного БПЛА и мощ-

ностью сигнала, принимаемого центральным БПЛА ($P_{r_{центр}}$), определяется по следующему выражению:

$$P_{r_{центр}} = \eta_T \cdot \eta_R \cdot \frac{S_{rec} \eta_{can}}{\pi Z^2 \left[t_{an}^2 \left(\frac{\lambda}{2\pi D_{com}} \right) \right]} P_{t_{БПЛА}}, \quad (1)$$

где S_{rec} — площадь апертуры спектральной аппаратуры центрального БПЛА; $P_{t_{БПЛА}}$ — мощность оптического сигнала БПЛА; η_T — оптическая эффективность передатчика; η_R — оптическая эффективность приемника; Z — расстояние между передатчиком и приемником; $\frac{\lambda}{\pi D_{com}}$ — угол расхождения лазерного луча, обусловленный дифракцией; η_{can} — пропускание канала, определяемое как



Графическая иллюстрация оптической связи при групповом полете двух БПЛА

$$\eta_{can} = e^{-Z \cdot \sigma(\lambda)},$$

где $\sigma(\lambda)$ — оптическая плотность канала.

Согласно [2], при $\frac{\lambda}{D_{com}} \ll 1$ имеем

$$t_{an}^2 \left(\frac{\lambda}{2\pi D_{com}} \right) \approx \frac{\lambda^2}{4\pi^2 D_{com}^2}.$$

Следовательно, получаем

$$P_{r_{центр}} = k_2 D_{com}^2 \cdot e^{-Z \sigma(\lambda)}, \quad (2)$$

где

$$k_2 = \frac{4\pi \eta_T \cdot \eta_R \cdot A_{rec} \cdot P_{t_{БПЛА}}}{Z^2 \lambda^2}. \quad (3)$$

Величина фототока в приемнике центрального БПЛА связана с мощностью принятого оптического сигнала следующим образом:

$$I_{центр.БПЛА} = R \cdot P_{r_{центр}}, \quad (4)$$

где R — чувствительность приемника.

С учетом выражений (1)–(4) и разложения

$$\sigma(\lambda) = \sigma_0 + \sigma' \lambda$$

отношение сигнал / шум канала коммуникации определится как

$$SNR \equiv \psi = \frac{A \cdot e^{-Z(\sigma_0 + \sigma' \lambda)}}{Z^2 \lambda^2}, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{R \cdot D_{com}^2 \cdot 4\pi \eta_T \cdot \eta_R \cdot S_{rec} \cdot P_{t_{БПЛА}}}{N_0 B}, \quad (6)$$

а N_0 — спектральная плотность шумов, B — ширина полосы частот приемника.

Задача оптимизации ставится следующим образом. Следует вычислить оптимальную функцию $Z = \varphi(\lambda)$, которая привела бы интегральный информационный функционал

$$F_1 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \ln \frac{A \cdot e^{-\varphi(\lambda)(\sigma_0 + \sigma' \lambda)}}{\varphi(\lambda)^2 \cdot \lambda^2} d\lambda \quad (7)$$

к его максимальному значению при соблюдении следующего ограничительного условия:

$$F_2 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varphi(\lambda) d\lambda = C. \quad (8)$$

РЕШЕНИЕ СФОРМУЛИРОВАННОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Безусловный информационный функционал, подлежащий оптимизации, имеет следующий вид:

$$F_0 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \ln \frac{A \cdot e^{-\varphi(\lambda)(\sigma_0 + \sigma' \lambda)}}{\varphi(\lambda)^2 \cdot \lambda^2} d\lambda + \gamma \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

где γ — множитель Лагранжа.

Согласно методу Эйлера, решение вышеуказанной оптимизационной задачи определяется по следующему условию:

$$\frac{d(F_1 + F_2)}{d\varphi(\lambda)} = 0. \quad (10)$$

С учетом выражений (9) и (10) получаем следующее уравнение:

$$-\frac{[(\sigma_0 + \sigma' \lambda) \cdot \varphi(\lambda) + 2]}{\varphi(\lambda) \cdot \lambda^2} + \gamma = 0. \quad (11)$$

Из выражения (11) имеем

$$\varphi(\lambda) = \frac{2}{\gamma \cdot \lambda^2 + (\sigma_0 + \sigma' \lambda)}. \quad (12)$$

С учетом выражений (8) и (12) получим

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2}{\gamma \cdot \lambda^2 - (\sigma_0 + \sigma' \lambda)} d\lambda = C. \quad (13)$$

Не останавливаясь подробно на раскрытии определенного интеграла (13), примем условное обозначение

$$\gamma = B(\lambda_{max}, \lambda_{min}, \sigma_0, \sigma', C) = B_0. \quad (14)$$

С учетом выражений (11) и (14) получим

$$Z \equiv \varphi(\lambda) = \frac{2}{\lambda^2 B - \sigma_0 - \sigma' \lambda}. \quad (15)$$

Как видно из полученного решения (15) при отрицательной величине σ' наблюдается уменьшение Z при увеличении λ . Однако при положительном значении σ' можно ждать появления максимума функции $\varphi(\lambda)$ при значении длины волны

$$\lambda = \frac{\sigma_0 + |\sigma'|}{2B}. \quad (16)$$

Далее в настоящей статье, следуя методике, изложенной в [2], рассмотрим вопрос об оптимальном распределении полезного объема грузового

отсека БПЛА с учетом размещения в нем как аппаратуры дистанционного зондирования, так и аппаратуры связи и управления.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ОБОРУДОВАНИЯ БПЛА

Считаем, что осуществляется групповой полет БПЛА, где центральный БПЛА оборудован приемопередатчиком оптического сигнала. При этом остальные БПЛА могут иметь лазерный трансивер или ретрорефлектор, способный модулировать пучок лазера, посланного с центрального БПЛА. При проектировании таких систем с использованием БПЛА должно быть учтено следующее равенство:

$$D_{sens}^2 + D_{com}^2 = D_{var}^2, \quad (17)$$

где D_{sens} — одномерный размер отсека, где размещаются приборы дистанционного зондирования; D_{com} — одномерный размер отсека, где размещается трансивер; D_{var} — одномерный размер суммарного приборного отсека, который подлежит определению.

Как указывается в [2], способность оптической аппаратуры к двумерному зондированию сверху ограничена дифракционным пределом. Согласно критерию Релея по пространственному разрешению, минимальная длина объекта, которая может быть различена оптической системой, определяется как

$$\Delta l = 1.22 \frac{f \cdot \lambda}{\Phi}, \quad (18)$$

где λ — длина волны оптического сигнала; f — фокусное расстояние линзы; Φ — диаметр линзы.

Как указывается в работе [1], с учетом вышеуказанных дифракционных ограничений максимальная скорость формирования информации может быть вычислена по следующей формуле:

$$R_d = k_1 \left(\frac{D_{sens}}{\lambda} \right)^2, \quad (19)$$

где

$$k_1 = \left(\frac{\alpha}{1.22} \right)^2 \cdot F \cdot Q; \quad (20)$$

α — угол зрения оптики; F — частота кадров; Q — уровни квантования.

Оценим пропускную способность оптического канала с учетом аэрозольного загрязнения атмосферы. Если в системе действует только аддитивный гауссовский шум, то пропускная способность

определяется как

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (21)$$

С учетом выражений (5) и (6) имеем

$$C = B \cdot \log_2 \left\{ 1 + \frac{\left[R \cdot k_2 \cdot D_{com}^2 \cdot e^{-Z\sigma(\lambda)} \right]^2}{N_0 B} \right\}. \quad (22)$$

Известно, что при широкой полосе частот имеет место следующий предельный переход:

$$\lim_{B \rightarrow \infty} B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \rightarrow 1.44 \frac{S}{N_0}. \quad (23)$$

Следовательно, имеет место следующее равенство:

$$k_1 \cdot \left(\frac{D_{sens}^2 - D_{com}^2}{\lambda^2} \right) = 1.44 \left(\frac{R^2 \cdot k_2^2 \cdot e^{-2Z\sigma(\lambda)} \cdot D_{com}^4}{N_0} \right). \quad (24)$$

Из выражения (24) окончательно имеем

$$D_{sens} = 1.12 \cdot \lambda \sqrt{\frac{1}{k_1 N_0} \left[R k_2 \cdot e^{-Z\sigma(\lambda) \cdot D_{com}^2} \right]}. \quad (25)$$

Таким образом, как видно из полученного выражения (25), выражение D_{sens} растет с увеличением λ . Суммируя результаты двух сформулированных решений в данной статье задач, необходимо отметить, что любое увеличение используемой длины волны в канале коммуникации в групповых системах дистанционного зондирования на базе БПЛА приведет к двум негативным последствиям, а именно произойдет:

- 1) уменьшение величины допустимого расстояния между парой БПЛА, связанных лазерным каналом связи;
- 2) увеличение части приборного отсека, необходимой для размещения приборов дистанционного зондирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

1. Результаты информационной оптимизации лазерного канала связи между элементами группы БПЛА, осуществляющими групповое дистанционное зондирование, показали, что в оптимальном режиме увеличение длины волны оптического сигнала неизбежно приводит к уменьшению достижимого расстояния между БПЛА.

2. Результаты исследования зависимости необ-

ходимой площади, предназначенной для размещения аппаратуры дистанционного зондирования, показали, что с увеличением длины волны указанная площадь неизбежно увеличивается.

trade-offs in picosatellite formation flying missions // J. Opt. Soc. Am. A. 2009. V. 26, N 10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dascalu S.* Remote sensing using autonomous UAVs suitable for less developed countries // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. 34. Part XXX.
2. *Arnon Sh., Kedar D.* Sensing and communication

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджан

Контакты: Гулиев Фалах Фахраддин оглы,
falakh2005@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 29.06.2012

OPTIMAL ORGANIZING OF ENVIRONMENTAL MONITORING ON THE BASIS OF UAV GROUP

F. F. Guliev

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

The results of information optimization of laser channel communication between elements of UAV group carrying out cooperative remote sensing have shown that in the optimal mode the increase of wavelength of the optical signal used for communication leads inevitably to decreasing of the attainable distance between two UAV.

The results of research of dependence of allowable area of payload designated for apparatus arrangement of remote sensing have shown that increasing of wavelength leads inevitably to decreasing of the mentioned area.

Keywords: ecological monitoring, unmanned aerial vehicle, optimization, remote sensing, formation flight