

# Lập tuyến đường bay khép kín tối ưu của vật thể bay không người lái hạng nhẹ có tính đến ảnh hưởng của gió trong vùng bay

- **Phạm Xuân Quyền**

Học viện Kỹ thuật Quân sự

- **Моисеев Дмитрий Викторович**

- **Trịnh Văn Minh**

Trường Đại học Hàng không Mátxcova, LB Nga

(Bài nhận ngày 16 tháng 04 năm 2014, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 21 tháng 08 năm 2014)

## TÓM TẮT

*Bài báo trình bày phương pháp lập tuyến đường bay khép kín tối ưu theo thời gian của vật thể bay không người lái hạng nhẹ đi qua các điểm cho trước có tính đến ảnh hưởng*

*của gió trong vùng bay, phân tích sự ảnh hưởng của gió tới tuyến đường và thời gian bay.*

**Từ khóa:** *Vật thể bay không người lái hạng nhẹ, tuyến đường bay khép kín, ảnh hưởng của gió tới tuyến đường bay.*

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay vật thể bay không người lái (UAV) là một trong số các dạng được phát triển phổ biến nhất của kỹ thuật hàng không vì dễ dàng sử dụng và giá thành rẻ. Chính vì thế nó được sử dụng rộng rãi để: lập bản đồ và khảo sát khu vực, giám sát đường ống, tuần tra biên giới... Hơn thế nữa nó còn được sử dụng trong môi trường nguy hiểm, đe dọa đến tính mạng của phi công như: đo nồng độ phóng xạ tại các khu vực bị nhiễm chất phóng xạ, xác định độc tố tại các khu vực bị nhiễm độc hóa học... Vì vậy để thực hiện được các nhiệm vụ trên cần phải giải quyết một loạt các bài toán đặc thù, một trong số chúng là bài toán điều khiển bay tự động và nói riêng là bài toán xác định tuyến đường bay khép kín tối ưu theo thời gian bay của UAV hạng nhẹ có tính đến tác động của gió trong vùng

bay. Tại thời điểm hiện tại ngoài những thành công đã đạt được của các tác giả khác khi nghiên cứu vấn đề nêu trên còn tồn tại một số vấn đề chưa được giải quyết, cụ thể như: chưa đề xuất phương pháp tìm tuyến đường bay khép kín nhanh nhất qua các điểm trong điều kiện có sự tác động của gió trong vùng bay. Việc xác lập tuyến đường bay gần đúng hay không tối ưu kéo theo việc chuẩn bị bay trở nên khó khăn hơn, sai lệch cao, hiệu quả sử dụng và khai thác UAV bị hạn chế. Chính vì vậy, nghiên cứu vấn đề chưa được giải quyết nêu trên là cấp thiết và có giá trị thực tiễn cao. Kết quả thu được có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả bay của UAV.

Các UAV hạng nhẹ (bảng 1) có bán kính vòng lượn rất nhỏ so với độ dài của toàn bộ tuyến

đường bay. Ví dụ như Gatewing X100 có bán kính vòng lượn là 15m [2].

Nếu bỏ qua bán kính vòng lượn của UAV và coi quỹ đạo bay của nó là đường gấp khúc (hình

1), thì độ sai lệch thời gian bay giữa đường bay dạng gấp khúc và dạng cong (bảng 2) là 3,17% tương đương với 85 giây so với tổng thời gian bay là 2700 giây khi thực hiện 100 lần quay đầu.

**Bảng 1.** Các đặc trưng kỹ thuật của UAV hạng nhẹ

Tên gọi của UAV	Thời gian bay (phút)	Bán kính hoạt động (km)	Độ cao bay (m)	Vận tốc bay (m/s)	Vận tốc gió tối đa cho phép (m/s)
«Inspector-101»	30-40	1,5	500	8-20	10
Zala 421-08	87	10	4000	18-33	22
«Airboat»	30	12	250	14	10
<b>«Gatewing X100»</b>	<b>45</b>	<b>20</b>	<b>100-750</b>	<b>20</b>	<b>18</b>
«Flaiiai»	120-240	30	4000	14-47	21
05 «Tibchak»	120	40-70	3000	25-55	18

**Bảng 2.** Sai lệch thời gian bay giữa đường bay dạng gấp khúc và dạng cong

Số lần quay (đôi hướng bay)	Sai lệch thời gian bay $\Delta t$ (giây)	Tổng thời gian bay theo đường gấp khúc(giây)	Sai lệch thời gian bay (%)
2	1,71	2700	0,06%
3	2,565	2700	0,10%
4	3,42	2700	0,13%
5	4,275	2700	0,16%
6	5,13	2700	0,19%
7	5,985	2700	0,22%
8	6,84	2700	0,25%
9	7,695	2700	0,29%
10	8,55	2700	0,32%
11	9,405	2700	0,35%
12	10,26	2700	0,38%
13	11,115	2700	0,41%
14	11,97	2700	0,44%
15	12,825	2700	0,48%
...	...	...	...
100	85,5	2700	3,17%



Hình 1. Dạng đường bay của UAV hạng nhẹ đi qua 6 điểm

Trên thực tế đối với tuyến đường của UAV hạng nhẹ thường đi qua vài chục điểm, thì độ lệch thời gian bay không vượt quá 1% so với tổng thời gian bay. Chính vì vậy trong bài báo này tuyến đường bay được xem xét có dạng như hình 1.

Mặt khác, kết quả nghiên cứu sự thay đổi hướng, vận tốc gió theo thời gian, độ cao và khoảng cách [7] trên cơ sở phân tích dữ liệu thống kê gió của vùng có diện tích khoảng  $1439 \text{ km}^2$  đã chỉ ra rằng, giá trị của các tham số gió thay đổi rất nhỏ. Ví dụ, khi vận tốc gió từ 11 đến 20m/s ở độ cao nhỏ hơn 1000m sau khoảng thời gian một giờ vận tốc gió thay đổi không lớn hơn 1,3m/s và hướng gió thay đổi không quá  $4^0$ ; sau khoảng thời gian hai giờ vận tốc gió thay đổi không lớn hơn 2m/s và hướng gió thay đổi không quá  $6^0$ . Từ kết quả tính toán đó có thể đưa ra kết luận về việc có thể bỏ qua sự thay đổi nhỏ giá trị của các tham số gió đối với vùng bay nhỏ của UAV hạng nhẹ.

Trong khuôn khổ của bài báo này cùng với tính toán các đặc trưng đối với UAV về thời gian, kích thước vùng bay và sự có mặt của thiết bị điều khiển trên khoang đảm bảo bay theo hướng cho trước ở độ cao cố định cho trước [1], [5], [6] với tư cách là yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến đến tuyến đường bay tối ưu giá trị của các tham số gió được coi là không đổi trong vùng bay [5]. Ngoài ra, vận tốc bay của UAV được giả thiết là không đổi trong toàn bộ thời gian bay.

## 2. PHÁC THẢO VẤN ĐỀ VÀ THIẾT LẬP KỸ THUẬT BÀI TOÁN LẬP HÀNH TRÌNH BAY

Cùng với sự phát triển của UAV việc tạo ra các modul và phương pháp nâng cao hiệu quả ứng dụng của chúng được gọi là một trong các lĩnh vực nghiên cứu quan trọng [8]. Một trong công việc trước khi bay có ý nghĩa ảnh hưởng quyết định đến hiệu quả sử dụng UAV là xây dựng chương trình bay. Chương trình này được đưa lên khoang trước khi cất cánh và tính toán trước theo sơ đồ tọa độ hoặc theo sơ đồ thời gian-tọa độ [8]. UAV bay qua các điểm cho trước, mà sự phân bố của chúng trên mặt đất thỏa mãn yêu cầu của bài toán đặt ra. Tuyến đường bay kín hay hở phụ thuộc vào yêu cầu của từng bài toán cụ thể. Một trong số những trường hợp thường gặp là tuyến đường bay kín đi qua mỗi điểm một lần duy nhất và bao gồm cả điểm cất và hạ cánh [3]. Bài toán tìm tuyến đường bay như vậy được diễn giải như bài toán người bán hàng [11]. Khi đó tiêu chuẩn tối ưu gọi là thời gian bay của UAV qua các điểm cho trước [4].

## 3. THIẾT LẬP TOÁN HỌC BÀI TOÁN LẬP HÀNH TRÌNH BAY

### 3.1. Tính thời gian bay của UAV trong môi trường gió không đổi đi qua các điểm cho trước

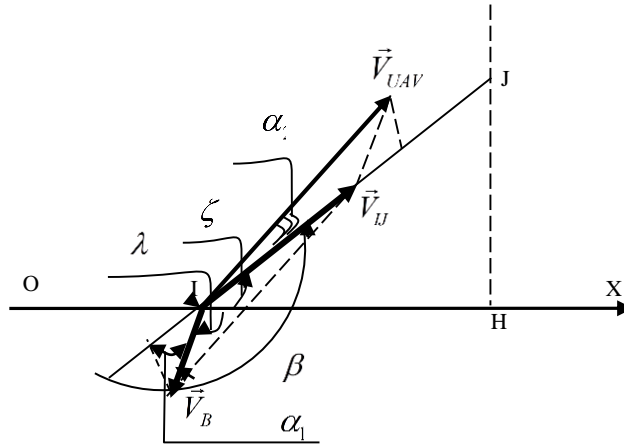
#### a- Tính thời gian bay giữa hai điểm bất kỳ

Xét đoạn đường bay giữa hai điểm I, J và tam giác vận tốc tương ứng (hình 2) khi có sự hiện diện của gió trong vùng bay.

$V_{UAV}$  - vận tốc bay so với môi trường không khí của UAV (còn gọi là không tốc),  $V_B$  - vận tốc gió trong vùng bay, sao cho  $V_{UAV} > V_B$ .

$\zeta \in [0, \pm 180^0]$  - góc giữa  $\vec{V}_{IJ}$  và trục  $Ox$

của hệ trục tọa độ gắn liền với mặt đất. Góc  $\lambda$  hướng gió trong hệ trục tọa độ gắn liền với mặt đất.



Hình 2. Đoạn đường bay giữa hai điểm I và J

Rõ ràng rằng,  $\vec{V}_{IJ} = \vec{V}_{UAV} + \vec{V}_B$   
 $\rightarrow V_{IJ} = V_{UAV} \cos \alpha_2 - V_B \cos \alpha_1$  (1)

Từ hình 2 ta có,

$$\cos \zeta = \frac{IH}{IJ} = \frac{x_J - x_I}{\sqrt{(x_J - x_I)^2 + (y_J - y_I)^2}} \quad (2)$$

$$\beta = |\zeta - \lambda|$$

$$\alpha_1 = |180^\circ - \beta|, \quad \beta \in [0^\circ, 360^\circ] \quad (3)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{V_B}{V_{UAV}} \sin \beta.$$

$\rightarrow$

$$\cos \alpha_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2} = \sqrt{1 - \left(\frac{V_B}{V_{UAV}} \sin \beta\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{V_B}{V_{UAV}}\right)^2 (1 - \cos^2 \beta)} = \sqrt{\frac{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta}{V_{UAV}^2}} \quad (4)$$

Thay (3) và (4) vào (1):

$$V_{IJ} = V_{UAV} \sqrt{\frac{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta}{V_{UAV}^2}} - V_B^* \cos(180^\circ - \beta) = \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta} + V_B \cos \beta \quad (5)$$

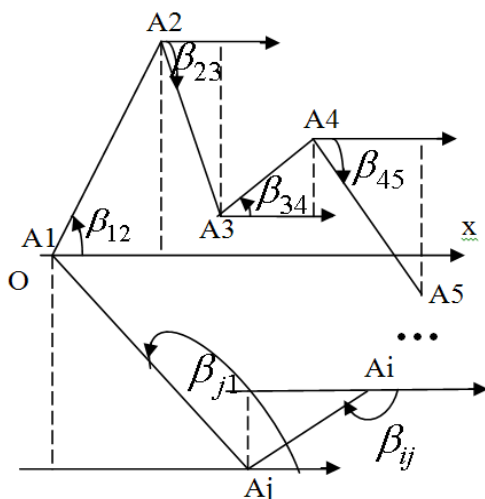
Như vậy thời gian bay giữa hai điểm I và J được tính theo công thức:

$$t_{IJ} = \frac{IJ}{V_{IJ}} = \frac{\sqrt{(x_J - x_I)^2 + (y_J - y_I)^2}}{\sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta} + V_B \cos \beta} \quad (6)$$

Từ (5) ta nhận thấy rằng, giá trị  $V_{IJ}$  không phụ thuộc vào dấu của góc  $\beta$ , bởi vì  $\cos(\beta) = \cos(\pm\beta)$ . Vì vậy, biểu thức (3) chúng ta chỉ quan tâm tới độ lớn giá trị của góc  $\beta$  và  $\alpha_1$ .

**b- Tính thời gian bay của tuyến đường bay khép kín bất kỳ**

Xét tuyến đường bay khép kín bất kỳ trong điều kiện tác dụng của gió không đổi (hình 3)



Hình 3. Tuyến đường bay khép kín bất kỳ

Bài toán sẽ không mất đi tính tổng quát nếu ta giả sử rằng, hướng gió trùng với hướng chiều dương của trục  $Ox$  ; góc  $\beta_{12}, \beta_{23}, \dots, \beta_{ij}, \beta_{j1}$  là góc giữa  $\vec{V}_{IJ}$  và  $\vec{V}_B$

Theo tính chất của tuyến đường bay khép kín ta có:

$$\vec{A_1A_2} + \vec{A_2A_3} + \dots + \vec{A_iA_j} + \vec{A_jA_1} = 0 \quad (7)$$

Khi đó hình chiếu của phương trình (7) trên trục  $Ox$  có dạng:

$$A_1A_2 \cos \beta_{12} + A_2A_3 \cos \beta_{23} + \dots + A_iA_j \cos \beta_{ij} + A_jA_1 \cos \beta_{j1} = 0 \quad (8)$$

Thời gian bay theo tuyến đường bay khép kín có tính đến tác động của gió trong vùng bay (hình 3) được tính theo công thức sau:

$$t = \frac{A_1A_2}{V_{12}} + \frac{A_2A_3}{V_{23}} + \dots + \frac{A_jA_1}{V_{j1}} \quad (9)$$

Thay (5) vào (9):

$$t = \frac{A_1A_2}{\sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{12}} + V_B \cos \beta_{12}} + \frac{A_2A_3}{\sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{23}} + V_B \cos \beta_{23}} + \dots + \frac{A_jA_1}{\sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{j1}} + V_B \cos \beta_{j1}}$$

→

$$t = \frac{A_1A_2 \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{12}}}{V_{UAV}^2 - V_B^2} + \frac{A_2A_3 \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{23}}}{V_{UAV}^2 - V_B^2} + \dots + \frac{A_jA_1 \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{j1}}}{V_{UAV}^2 - V_B^2} + \dots - \frac{V_B (A_1A_2 \cos \beta_{12} + A_2A_3 \cos \beta_{23} + \dots + A_jA_1 \cos \beta_{j1})}{V_{UAV}^2 - V_B^2} \quad (10)$$

Thay (8) vào (10):

$$t = \frac{A_1A_2 \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{12}}}{V_{UAV}^2 - V_B^2} + \frac{A_2A_3 \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{23}}}{V_{UAV}^2 - V_B^2} + \dots + \frac{A_jA_1 \sqrt{V_{UAV}^2 - V_B^2 + V_B^2 \cos^2 \beta_{j1}}}{V_{UAV}^2 - V_B^2} \quad (11)$$

Như vậy, thời gian bay qua các điểm cho trước trong môi trường gió không đổi được tính theo công thức (11)

### 3.2. Thủ tục giải bài toán lập hành trình bay

Trong phương án tính toán bài toán lập hành trình bay ở dạng bài toán người bán hàng được gọi là rất khó. Thật vậy, đối với n điểm số lượng tuyến

đường bay có thể là  $(n-1)!$ . Rõ ràng rằng, số lượng của chúng tăng lên rất nhanh khi tăng số lượng các điểm n. Ví dụ, khi n=10 số lượng tuyến đường bay có thể là  $(10-1)! = 362880$ , còn khi n=11, thì con số này là 3628800. Do đó, việc giải bài toán nêu trên bằng phương pháp thủ công hay bằng phương pháp lựa chọn từng tuyến đường là điều rất khó khăn. Để giải quyết bài toán nêu trên có thể sử dụng các thuật toán nổi tiếng trong [10] như: thuật toán “ăn tham”, Belman, “người hàng xóm gần nhất”, “phân nhánh và giới hạn”... Trong đó phương pháp “phân nhánh và giới hạn” trong nhiều tài liệu được gọi là mang đến kết quả chính xác nhất [9].

Định dạng bài toán người bán hàng theo dạng bài toán tuyến tính của lập trình số nguyên nhị phân [12] theo phương pháp “phân nhánh và giới hạn” được đưa ra như sau:

Thời gian bay nhỏ nhất qua các điểm cho trước được xác định bởi biểu thức sau:

$$\min \sum_{I=1}^n \sum_{J=1}^n t_{IJ} x_{IJ} = \tag{12}$$

$$\min \sum_{I=1}^n \sum_{J=1}^n t(x_I, y_I, x_J, y_J, V_{JA}, \overline{V_B}) x_{IJ}$$

$x_{IJ} = 1$ , nếu UAV bay trực tiếp từ điểm I tới điểm J, trong đó  $I, J = \overline{1, n}$

$x_{IJ} = 0$ , trong trường hợp ngược lại

$t_{IJ}$  được xác định theo công thức (6)

Khi (12) thỏa mãn các giới hạn:

$$\sum_{I=1}^n x_{IJ} = 1, \quad J = \overline{1, n} \tag{13}$$

$$\sum_{J=1}^n x_{IJ} = 1, \quad I = \overline{1, n} \tag{14}$$

$$x_{IJ} = 0; 1, \quad I, J = \overline{1, n} \tag{15}$$

Thế nhưng những giới hạn trên không loại bỏ được các chu trình con (các tuyến đường không đi qua tất cả n điểm). Để giải quyết được vấn đề này cần thiết phải thực hiện hoặc là bất phương trình (16) hoặc là (17)

$$u_I - u_J + x_{IJ} * n \leq n-1, \quad I, J = 1, 2, \dots, n, I \neq J \tag{16}$$

n- là số lượng các điểm bay qua,  $u_I, u_J$  - là những số bất kỳ thỏa mãn (16)

Do bất phương trình (16) mang đến nhiều khó khăn trong việc mô phỏng, vì vậy trong bài báo này tác giả đề xuất bất phương trình (17) rất thuận lợi khi loại bỏ các chu trình con nêu trên:

$$\sum_{I=1}^{z+1} \sum_{J=1}^{z+1} x_{IJ} \leq z, \quad z = \overline{2, n-2} \tag{17}$$

Số lượng các bất phương trình của biểu thức (17) được xác định theo công thức:

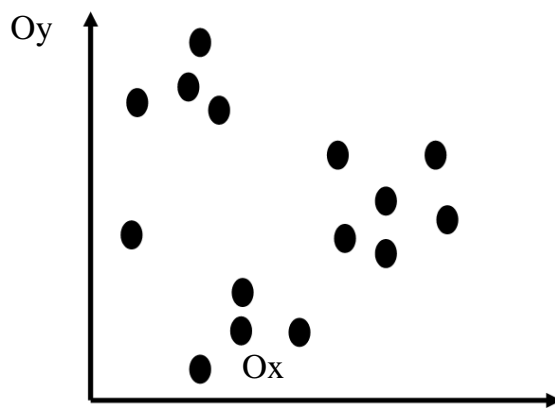
$$C_n^z = \frac{n!}{z!(n-z)!}$$

Như vậy, khi giải hệ phương trình (12-16) hoặc (12-15) và (17) ta thu được tuyến đường bay khép kín nhanh nhất qua n điểm cho trước đối với 1 cặp giá trị tham số gió trong vùng bay.

#### 4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ NHẬN ĐƯỢC

Xem xét bài toán lập hành trình bay qua 15 điểm, mà được phân bố như hình 4.

Vận tốc bay của UAV là 20m/s và tọa độ 15 điểm được đưa ra tại bảng 3. Hướng và vận tốc gió được đưa ra trong bảng 4.



Hình 4. Phân bố các điểm của tuyến đường bay

Bảng 3. Tọa độ các điểm của tuyến đường bay (km)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x	0	-2	4	0,5	-9	-5,5	-8,5	-11	-15,5	-12	-15	-11	-10,5	-2,5	3
y	0	-4	-1,5	-4,5	-11	-13,5	-13,5	-16	-3,5	11	9,5	14,5	8,5	3,5	3

Kết quả tính toán thu được tuyến đường bay tối ưu  $m_i^*$ ,  $i= 1, 2$  và  $3$  tương ứng với 3 trường hợp gió và thời gian bay (giờ) tương ứng với từng tuyến đường được thể hiện trong bảng 4. Từ kết quả thu được đối với trường hợp cụ thể (bảng 4) thời gian bay theo tuyến đường bay không tối ưu luôn lớn hơn từ 23 đến 33% so với tuyến đường bay tối ưu trong cùng một điều kiện bay.

Để thấy sự ảnh hưởng của gió tới tuyến đường bay và thời gian bay tác giả tiến hành so sánh giữa các tuyến đường bay tối ưu khi giá trị của các tham số gió thay đổi. Khi so sánh  $m_1^*$  và  $m_2^*$  dễ dàng nhận thấy sự khác nhau về thứ tự bay của các

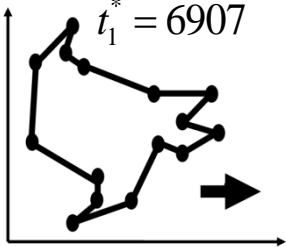
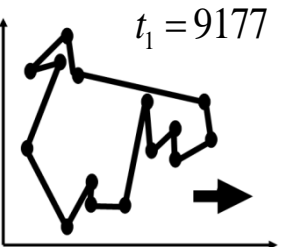
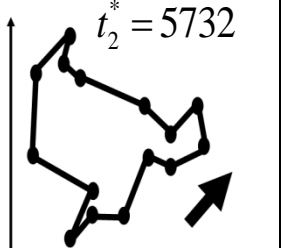
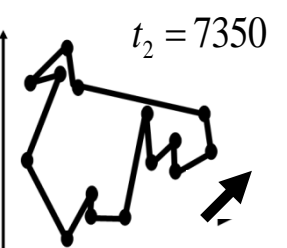
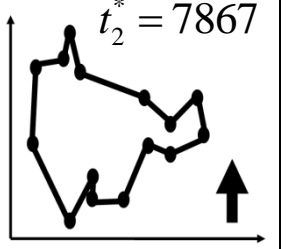
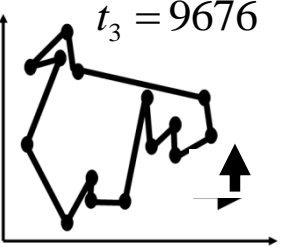
tuyến đường bay tối ưu tương ứng với các giá trị gió khác nhau. Sự thay đổi này diễn ra tại các điểm 14, 15, 1, 3, 4 và 5, 7, 8, 6. Sự khác nhau theo thời gian giữa chúng là:

$$\Delta t_1^* t_2^* = \frac{|6907 - 5732|}{5732} = 20,5\% .$$

Khi so sánh  $m_2^*$  và  $m_3^*$  nhận thấy rằng, khi thay đổi giá trị gió dẫn tới sự thay đổi tuyến đường bay tối ưu giữa các điểm 11, 10, 12, 13 và 8, 5, 7, 6. Sự khác nhau theo thời gian giữa chúng là:

$$\Delta t_2^* t_3^* = \frac{|5732 - 7867|}{5732} = 37,24\% .$$

**Bảng 4.** Tuyến đường bay tối ưu và không tối ưu đối với các giá trị tham số gió khác nhau

Giá trị các tham số gió	Tuyến đường bay của UAV		Chênh lệch thời gian bay giữa tuyến đường bay tối ưu và không tối ưu
Gió hướng Tây với vận tốc 13 m/s	 <p><math>t_1^* = 6907</math></p> <p><math>m_1^*</math> Tối ưu</p>	 <p><math>t_1 = 9177</math></p> <p><math>m_1</math> Không tối ưu</p>	$\Delta t_1^* = \frac{9177 - 6907}{6907} = 32,86\%$
Gió hướng Tây - Nam với vận tốc 11 m/s	 <p><math>t_2^* = 5732</math></p> <p><math>m_2^*</math> Tối ưu</p>	 <p><math>t_2 = 7350</math></p> <p><math>m_2</math> Không tối ưu</p>	$\Delta t_2^* = \frac{7350 - 5732}{5732} = 28,22\%$
Gió hướng Nam với vận tốc 15 m/s	 <p><math>t_3^* = 7867</math></p> <p><math>m_3^*</math> Tối ưu</p>	 <p><math>t_3 = 9676</math></p> <p><math>m_3</math> Không tối ưu</p>	$\Delta t_3^* = \frac{9676 - 7867}{7867} = 23\%$

Khi so sánh các trường hợp của tuyến đường bay tối ưu  $m_1^*$  và  $m_3^*$  đối với các giá trị của tham

số gió khác nhau sự khác nhau giữa chúng được phản ánh tại các điểm 11, 10, 12, 13 và 14, 1, 15,



3, 4, cũng như 6, 7, 5, 8. Sự khác nhau theo thời gian giữa chúng là:

$$\Delta t_1^{**} t_3^{**} = \frac{|6907 - 7867|}{6907} = 14\% .$$

## 5. KẾT LUẬN CƠ BẢN

Sử dụng tiêu chuẩn thời gian nhằm nâng cao tính linh hoạt khi giải bài toán lập hành trình bay, làm giảm khả năng bị mất vật thể bay do không đủ năng lượng dự trữ, nâng cao hiệu quả sử dụng UAV và đồng thời tiết kiệm được số lượng lớn năng lượng.

Từ kết quả khảo sát một số ví dụ tìm nghiệm của bài toán quy hoạch bay trong điều kiện có tính tới tác động của gió trong vùng bay nhận thấy rằng, thời gian bay theo tuyến đường bay khép kín luôn nhỏ hơn từ 20 đến 56% so với tuyến đường khác trong cùng điều kiện bay.

Các kết quả nghiên cứu nhận được có ý nghĩa quan trọng và là nền tảng cơ bản để lập tuyến đường bay trong điều kiện gió không xác định và gió biến đổi theo thời gian.

# Setting optimal closed flight route of lightweight unmanned aerial vehicles with consideration of wind in flight area

- **Pham Xuan Quyen**

Military Technical Academy

- **Моисеев Дмитрий Викторович**
- **Trinh Van Minh**

Moscow Aviation Institute, Russia

## ABSTRACT

*This article presents a method of planning closed routes by optimum time of unmanned light aerial vehicles passing*

*through the given points, taking into account the effect of wind in the air and analyzing the effects of wind to route and flight time.*

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Amirreza Rahmani, Xu Chu Ding, Magnus Egerstedt Optimal motion primitives for multi-UAV convoy protection // In IEEE

International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010, Anchorage,

- Alaska, USA, 3-7 May 2010. pages 4469-4474, IEEE, 2010.
- [2]. [http://gskgeo.ru/catalog/bespilotniki\\_gatewing/bespilotnik\\_gatewing\\_x100/](http://gskgeo.ru/catalog/bespilotniki_gatewing/bespilotnik_gatewing_x100/)
- [3]. Laszlo Techy, Derek A. Paley and Craig A. Woolsey UAV Coordination on Closed Convex Paths in Wind // AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 33, 2010, pp. 1946–1951.
- [4]. Nicola Ceccarelli, John J. Enright, Emilio Frazzoli, Steven J. Rasmussen and Corey J. Schumacher Micro UAV Path Planning for Reconnaissance in Wind // Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York City, USA, July 11-13, 2007.
- [5]. Techy, L. and Woolsey, C. A. Minimum-Time Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Steady Uniform Winds // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 32, No. 6, 2009, pp. 1736–1746.
- [6]. Timothy W. McLain, Randal W. Beard, Jed M. Kelsey Experimental Demonstration of Multiple Robot Cooperative Target Intercept // AIAA Guidance and Control Conference, Monterey, CA, August 2002, AIAA Paper no. 2002 - 4678.
- [7]. Гарифуллин К.К. Изменчивость ветра в свободной атмосфере. Л. Гидрометеиздат, 1967.- 143 с.
- [8]. Дремлюга Г.П., Есин С.А., Иванов Ю.Л., Ляшенко В.А. Беспилотные летательные аппараты: Состояние и тенденции развития // под ред. д.т.н., проф. Ю.Л. Иванова. –М.: Варяг, 2004,-176с.
- [9]. Корбут А.А., Сигал И.Х., Финкельштейн Ю.Ю. Метод ветвей и границ. Обзор теории, алгоритмов, программ и приложений // Math. Operation Forsch. Statist. Ser. Optimization. – 1977. – V. 8, № 2. – p. 253-280.
- [10]. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование // – М.: Наука, 1969;
- [11]. Кузнецова Г.В., Моисеев Д.В. Комбинированная процедура решения одного типа задач маршрутизации // Тезисы докладов 10-й международной конференции "Системный анализ, управление и навигация". - М.: Изд-во МАИ, 2005.
- [12]. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах // Учебное пособие, 2-е издание - М.: Высш. шк. , 2005 - 544 с.