

**Оцінка розмірів зони можливих положень дрона при його перехопленні**

*Запропоновано метод оцінки розмірів зони можливих положень дрона при його перехопленні. Приведені результати розрахунків конуса траєкторій руху дрона, що перехоплюється.*

**Метод оцінки зони можливих положень дрона.**

Нехай в момент часу  $t_0$  фіксується положення дрона ЛА1 в певній точці повітряного простору і його швидкість  $V_{ЛА1}$  (рис. 1). Для дрона-перехоплювача ЛА2 необхідний час  $\Delta t$  для того, щоб подолати відстань від пускового пристрою (ПП) до передбачуваної точки зустрічі обох ЛА. Задача оцінки розмірів зони можливих положень (ЗМП) ЛА1 у момент часу  $t_1=t_0+\Delta t$  необхідна для розрахунку потрібної площі сітки, що повинен скинути ЛА2 для перехоплення ЛА1 [1-3].

Нехай також ЛА1 буде намагатися максимально віддалитися від передбачуваної траєкторії свого руху після моменту часу  $t_0$ .

Радіус повороту ЛА1 в горизонтальній площині  $R_t$ , який рухається з постійною швидкістю, пропорційний значенню  $V^2$  за формулою:

$$R_t = \frac{V^2}{g\sqrt{n_y^2 - 1}}, \tag{1}$$

де  $g$  - прискорення сили тяжіння,  $n_y$  – нормальне перевантаження ЛА1.

Як наведено в [4], існують залежності між величинами  $L_1$ ,  $L_2$  та  $R_t$  (рис.2), а саме  $R_t = f(L_1, L_2)$  и  $R_t = f(L_2, \theta_c)$ .

Неважко показати, що значення кута розвороту вектора швидкості ЛА1

$$\theta_c = (V \Delta t) / R_t, \tag{2}$$

а величини  $L_2 = R_t - R_t \cos(\theta_c)$ ,  $L_1 = R_t \sin(\theta_c)$ .

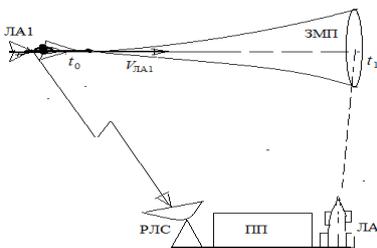


Рис. 1. Перехоплення дрона за допомогою сітки

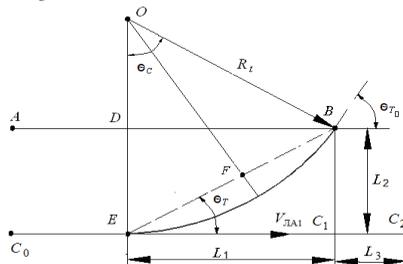


Рис. 2. Схема повороту ЛА1

Відстань, що пройде ЛА1 без повороту складає значення  $(L_1+L_3)$ .

Результати розрахунків конуса траєкторій руху дрона, що перехоплюється, для різних величин  $V$  та  $n_y$  при значенні  $\Delta t=2$  секунди наведені у Табл. 1.

Табл. 1.

Результати розрахунків конуса траєкторій руху дрона ЛА1

$V, \text{м/с}$	$n_y$	$R_t, \text{м}$	$\theta_c, \text{рад.}$	$L_1, \text{м}$	$L_2, \text{м}$	$(L_1+L_3), \text{м}$
30	1,5	82,057	0,731	54,794	20,975	60
30	2	52,968	1,133	47,967	30,501	60
30	2,5	40,04	1,499	39,935	37,148	60
30	3	32,436	1,849	31,181	41,368	60
30	4,5	20,91	2,869	5,6213	41,05	60
60	1,5	328,23	0,365	117,344	21,692	120
60	2	211,872	0,566	113,686	33,084	120
60	2,5	160,16	0,749	109,083	42,891	120
60	3	129,744	0,924	103,608	51,648	120
60	4,5	83,64	1,434	82,867	72,293	120
90	1,5	738,517	0,243	178,223	21,827	180
90	2	476,711	0,378	175,753	33,581	180
90	2,5	360,36	0,5	172,608	44,028	180
90	3	291,924	0,616	168,809	53,757	180
90	4,5	188,191	0,956	153,783	79,716	180

Запропонований метод оцінки розмірів зони можливих положень дрона може бути використаний тільки для кутів  $\theta_c \leq \pi/2 \approx 1,57$  (рад), тобто оцінка розмірів величин  $L_1$  та  $L_2$  для  $V=30$  м/с при  $n_y \geq 3$  некоректна.

Для подальшого розгляду розмірів зони можливих положень дрона зручно ввести прямокутну декартову систему координат з початком осей в точці положення ЛА1 в момент часу  $t_0$ , віссю  $OX$  спрямованої уздовж вектора  $V_{\text{ЛА1}}$  і віссю  $OZ$  розташованої в горизонтальній площині перпендикулярно осі  $OX$ .

Зони можливих положень дрона ЛА1 для  $\Delta t=2$  сек. наведені на рис. 3.

Як слідує з розрахунків, з ростом швидкості польоту дрона ЛА1 конус його можливих положень більшою мірою збільшується по осі  $OX$ , ніж по осі  $OZ$ .

Розширення конуса по осі  $OZ$  менш помітно і визначається в першу чергу величиною  $n_y$  (см. Табл. 1).

Залежності величини радіусу розвороту ЛА1 від значення переважання для різних швидкостей руху дрона показані на рис. 4.

Важливим моментом, що впливає на визначення розмірів ЗМП є розворот вектора швидкості дрона на кут більше  $\pi/2$ .

Формула для розрахунку значення  $n_y$ , при якому відбувається такий розворот, згідно (1)-(2) має вигляд

$$n_y = \sqrt{1 + \left( \frac{\pi V}{2g\Delta t} \right)^2}.$$

Так, наприклад, при невеликих швидкостях польоту дрона, а саме при  $V_{\text{ЛА1}} = 30$  м/с, розворот вектора швидкості на кут більше  $\pi/2$  здійснюється за час дві секунди при  $n_y \approx 2,6$ .

При збільшенні часу перехоплення ЛА1 в два рази результати принципово не змінюються (Табл. 2). Однак, при величині  $\Delta t=4$  секунди в 3,5 в 3,5 рази збільшилася кількість траєкторій з кутом розвороту вектора швидкості ЛА1 більш, ніж на  $\pi/2$ .

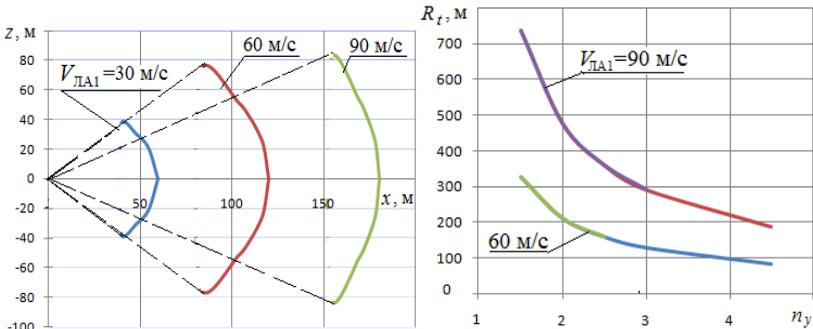


Рис. 3. Зони можливих положень дрона через час 2 секунди

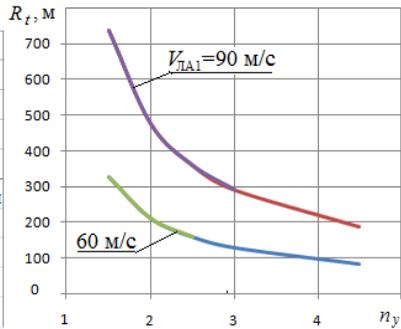


Рис. 4. Залежності величини  $R_t$  від  $n_y$

Наведені вище розрахунки виконані тільки для горизонтальній площині. Для уточнення розмірів просторового конуса ЗМП, а саме для розрахунку радіусу розвороту в вертикальній площині формулу (1) необхідно уточнити.

Таким чином, при умові що розміри ЗМП дрона ЛА1 для вертикальної і горизонтальної площин однакові, площа сітки навіть для величини швидкості ЛА1  $V_{\text{ЛА1}} \leq 30$  м/с, при значенні  $\Delta t=2$  секунди, повинна складати близько  $10^3$  м<sup>2</sup>.

Згідно з проведеними розрахунками можна зробити наступні попередні висновки:

- доставку сітки слід здійснювати високошвидкісним ЛА2, для того щоб зменшити час  $\Delta t$  і, відповідно, зменшити потрібну площу сітки для захоплення ЛА1;

- навіть при невеликій величині швидкості  $V_{\text{ЛА1}}=30$  м/с і значення перевантаження  $n_y=4,5$  вектор швидкості дрона ЛА1 за чотири секунди здійснює розворот на 329 градусів, а при збільшенні швидкості ЛА1 до  $V_{\text{ЛА1}}=90$  м/с і тієї ж величині  $n_y$  розворот дрона становить лише 110 градусів;

- з ростом перевантаження при одній і тій же величині швидкості ЛА1 значення радіусу розвороту дрона істотно зменшується, приблизно обернено пропорційно значенню  $n_y$ .

Табл. 2.

$V, \text{м/с}$	$n_y$	$R_t, \text{м}$	$\theta_c, \text{рад.}$	$L_1, \text{м}$	$L_2, \text{м}$	$(L_1+L_3), \text{м}$
30	1,5	82,058	1,462	81,576	73,179	120
30	2	52,9681	2,266	40,691	86,877	120
30	2,5	40,04	2,997	5,769	79,662	120
30	3	32,436	3,7	-17,174	59,952	120
30	4,5	20,91	5,739	-10,829	3,0224	120
60	1,5	328,23	0,7319	219,179	83,903	240
60	2	211,872	1,133	191,868	122,004	240
60	2,5	160,16	1,499	159,742	148,591	240
60	3	129,744	1,85	124,728	165,475	240
60	4,5	83,64	2,869	22,485	164,203	240
90	1,5	738,518	0,487	345,911	86,0196	360
90	2	476,711	0,755	326,745	129,593	360
90	2,5	360,36	0,999	303,038	165,354	360
90	3	291,925	1,233	275,446	195,232	360
90	4,5	188,192	1,913	177,284	251,332	360

### Список літератури

1. Противодействие БПЛА. Защита от дронов и квадрокоптеров. <https://www.ao-avtomatika.ru/media/blog/protivodeystvie-bpla-zashchita-ot-dronov-i-kvadrokopteroev>
2. Kris Osborn. Russia Wants to Capture Enemy Drones With a Net/ The National Interest Newsletter. December 9, 2020.
3. Patent No.: US 9,085.362 B1- Counter-unmanned aerial vehicle system and method/ Kilian et al.- 2015.
4. N. F. Tupitsin et al. The special case of operative programming method of flight route// Electronic and control systems. – 2015. – №2(43). – p. 36–41.