

Arytmetyka roju

MACIEJ M. KASPEREK

Budżet czasu liczony dla jednego drona to przypadek najłatwiejszy. Gdy drony nadlatują jeden po drugim, każdy kolejny zastaje obronę zajęłą poprzednim. Ten tekst liczy, ile z dziesięciu dronów zdąży obsłużyć jedno stanowisko, zależnie od odstępów, czasu zwalczania i roli człowieka.

Poprzednie analizy liczyły czas dla jednego celu, a rzeczywiste ataki rzadko tak wyglądają. Gdy dronów jest kilka albo kilkanaście, o wyniku decyduje suma czasów, a nie czas pojedynczego zwalczania. Ten tekst pokazuje, jak szybko ta suma przerasta możliwości jednego stanowiska obrony.

TRZY ATAKI, TRZY SKALE

W nocy z 5 na 6 stycznia 2018 roku rosyjskie bazy w Hmejmim i Tartusie w Syrii zaatakowało według rosyjskiego ministerstwa obrony 13 prostych dronów. Dziesięć leciało na bazę lotniczą, trzy na port. Rosjanie podali, że siedem zestrzelili, a sześć przejęli środkami walki elektronicznej.

We wrześniu 2019 roku zakład przetwarzania ropy w Abqaiq w Arabii Saudyjskiej trafiło według saudyjskiego resortu obrony 18 dronów. W tym samym uderzeniu użyto siedmiu pocisków manewrujących, z których cztery uderzyły w pole naftowe Churajs. Atak zatrzymał na pewien czas około połowy saudyjskiego wydobycia.

W nocy z 9 na 10 września 2025 roku Polska zarejestrowała 19 naruszeń swojej przestrzeni powietrznej przez drony, od około 23.30 do około 6.30. Potwierdzono zestrzelenie trzech, a według premiera prawdopodobnie także czwartego. Średnio wypada jedno naruszenie na ponad dwadzieścia minut, ale nie był to atak na jeden obiekt.

Dokładne odstępy między dronami w dwóch pierwszych atakach nie zostały ujawnione. Skoordynowane uderzenie na jeden obiekt skraca je jednak do sekund albo do zera. Taki przypadek liczy ten tekst.

MODEL

Dziesięć dronów średniej prędkości, 21 metrów na sekundę, zostaje wykrytych w równych odstępach, każdy z tej samej odległości. Każdy przechodzi najpierw przez techniczne ogniwa modelu, czyli wykrycie, klasyfikację i automatyczne sprawdzenie, czy lot jest uprawniony. Dalej model liczy trzy warianty. W wariantcie A człowiek w pętli decyduje o dronach po kolei i przekazuje polecenie strzelcowi. W wariantcie B decyzje biegają równolegle, jakby każdy dron miał swojego decydenta. W wariantcie C człowiek jest nad pętlą, a system zwalcza każdego drona, jeśli w ciągu dziesięciu sekund nie padnie weto.

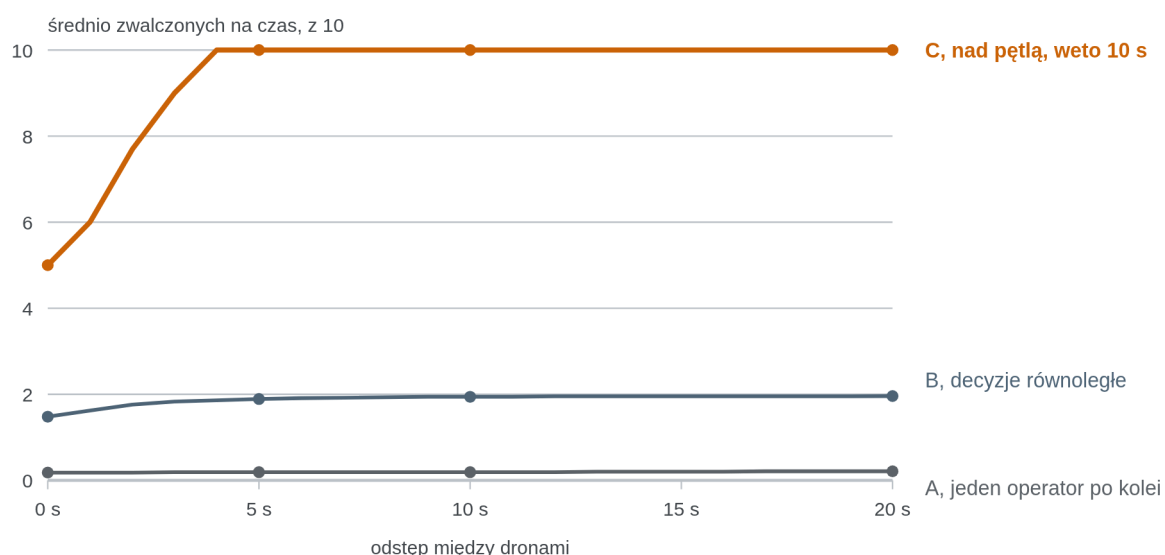
Stanowisko ma jeden efektor, który zwalcza drony pojedynczo. Czas zajęcia efektora na jednego drona przyjęto poglądowo jako 3, 6 albo 12 sekund. Efektor zajmuje się najpierw dronem, któremu zostało najmniej czasu, i pomija tego, którego nie zdąży już trafić.

CZŁOWIEK CZY EFEKTOR

Pierwsza tabela pokazuje, ile z dziesięciu dronów wykrytych z odległości kilometra stanowisko zwalcza na czas, gdy efektor potrzebuje sześciu sekund na drona.

Odstęp między dronami	A, jeden operator po kolei	B, decyzje równoległe	C, nad pętlą, weto 10 s
0 s	0,2	1,5	5,0
5 s	0,2	1,9	10,0
10 s	0,2	1,9	10,0
20 s	0,2	2,0	10,0

Średnia liczba dronów zwalczonych na czas, z dziesięciu. Model poglądowy, 4000 losowań na komórkę przy stałym ziarnie losowania.



Dziesięć dronów wykrytych z odległości kilometra, efektor 6 sekund na drona. Średnia liczba dronów zwalczonych na czas według odstępu między nimi, dla trzech ról człowieka. Model poglądowy.

Z człowiekiem w pętli stanowisko przy wykryciu z odległości kilometra nie zdąża prawie z niczym, bez względu na obsadę. Nawet równoległe decyzje dają najwyżej dwa drony. Z człowiekiem nad pętlą obraz się odwraca, bo przy dziesięciu dronach naraz stanowisko zwalcza połowę, a przy odstępach po pięć sekund wszystkie. Wąskie gardło przesuwa się z człowieka na efektor.

I LE WAŻY SEKUNDA EFEKTORA

Druga tabela dotyczy wariantu C i dziesięciu dronów naraz. Zmienia czas zajęcia efektoru i odległość wykrycia.

Czas efektora na drona	Wykrycie na 2 km	Wykrycie na 1 km	Wykrycie na 500 m
3 s	10,0	10,0	2,0
6 s	10,0	5,0	1,0
12 s	6,0	2,0	0,0

Wariant C, dziesięć dronów naraz, średnia liczba dronów zwalczonych na czas, z dziesięciu.

Gdy człowiek nie hamuje procedury, liczba zwalczonych dronów zależy prawie wyłącznie od dwóch rzeczy. To czas, jaki efektor spędza na jednym celu, i czas, jaki zostaje po wykryciu. Gdy efektor jest już wąskim gardłem, każde podwojenie czasu zwalczania zmniejsza liczbę obsługiwanych dronów o połowę albo więcej. Przy wykryciu na 500 metrów nawet najszybszy z trzech efektorów obsługuje tylko dwa.

RÓJ, CZYLI CZAS PODZIELONY

Rój to nie tylko liczba celów. To ten sam budżet czasu podzielony między wiele celów naraz. W roli z człowiekiem w pętli dzieli go człowiek, więc brakuje go już przy pierwszych celach. W roli z człowiekiem nad pętlą dzieli go efektor, więc liczy się każda sekunda zwalczania. Obie role mają wspólny mianownik, czyli odległość wykrycia, bo to ona wyznacza cały czas do podziału.

CZEGO MODEL NIE OBEJMUJE

Model ma jeden efektor i zakłada, że każdy strzał trafia. Kilka efektorów albo chybień zmieniłyby wynik w przeciwne strony. W wariancie C nie liczy też tego, czy jeden człowiek jest w stanie naraz śledzić dziesięć okien weta. Nikt tego nie zmierzył, a przy dziesięciu celach jest to wątpliwe. Czasy efektorów są wartościami pogładowymi, a nie danymi żadnego systemu.

Kod modelu i dane wejściowe (ZIP, Python)

Deklaracja konfliktu interesów. Autor jest założycielem zespołu startupowego Silesian Advanced Systems, który rozwija autonomiczny system antydronowy. System ma działać w roli, którą ten tekst nazywa nadzorem nad pętlą. Daje to autorowi bezpośredni interes w tym temacie. Model, kod i pełna siatka wyników są opublikowane, żeby rozumowanie dało się sprawdzić niezależnie.

ŹRÓDŁA

1. CBC News i Reuters. 2025. „Poland Shoots Down at Least 3 Russian Drones in Its Airspace.” 10 września. <https://www.cbc.ca/news/world/poland-drones-shot-down-1.7629795>
2. CNBC. 2018. „Russia Says It Killed Rebels behind Swarm Drone Attack in Syria, but Experts See More Such Strikes Ahead.” 12 stycznia. <https://www.cnbc.com/2018/01/12/russia-says-it-eliminated-rebels-behind-swarm-drone-attack-in-syria.html>
3. Defense Update. 2019. „Attack on Saudi Oil Refineries Proves the Devastating Potential of Iranian Cruise Missiles.” 20 września. https://defense-update.com/20190914_aramco_attack.html
4. DFRLab. 2018. „#PutinAtWar. Drone Attack at Khmeimim.” Medium, 22 stycznia. <https://medium.com/dfrlab/putinatwar-drone-attack-at-khmeimim-3000f31b72a3>

5. NBC News. 2025. „Poland Says It Shot Down Russian Drones That Violated Its Airspace during Attack on Ukraine.” 10 września. <https://www.nbcnews.com/world/europe/poland-engages-russian-drones-airspace-first-time-rcna230251>
6. Radio Free Europe/Radio Liberty. 2018. „Russia Says 13 Drones Used in Attack on Its Air Base, Naval Facility in Syria.” 8 stycznia. <https://www.rferl.org/a/syria-russia-says-drones-used-attack-bases/28963399.html>
7. The War Zone. 2019. „Here’s All the New Info You Need to Know in the Aftermath of the Saudi Oil Facilities Attacks.” 19 września. <https://www.twz.com/29918/heres-all-the-new-info-you-need-to-know-in-the-aftermath-of-the-saudi-oil-facilities-attacks>
8. UN News. 2025. „UN Warns of Escalation Risk after Large-Scale Russian Drone Incursion into Poland.” 12 września. <https://news.un.org/en/story/2025/09/1165838>

Wersja do druku, aktualna wersja online: <https://silesianadvanced.systems/analyses/swarm/?lang=pl>