

## CONTROLUL ȘI COORDONAREA ZBORULUI DRONELOR ÎN FORMAȚIUNE

**Autori:** Alexei MARTIMIUC, colaborator CNTS UTM.,

**Coordonator:** Nicolae SECRIERU, conf. univ., dr.

**Abstract:** Vehiculele aeriene pilotate la distanță (UAV – Unmanned Aerial Vehicle), numite drone, sunt utilizate în diverse domenii. Ele cuprind o gamă largă de aparate de zbor de diverse dimensiuni, construcții și arii de utilizare. În prezent dronele sunt utilizate eficient în operațiuni de salvare, transportarea coletelor, operațiuni militare și de urmărire, monitorizare și spionaj, cercetări științifice, în industria cinematografică, mass-media etc. Lucrarea de față se concentrează asupra algoritmilor de control a zborului și comunicare, destinați aplicării într-o formație de drone, care se pot deplasa ca grup spre țintele stabilite de către operator. Se vor analiza metodele și modelele deja existente, se va studia analitic problema și se vor propune soluții, exemple și recomandări de implementare a acestora.

**Keywords:** drone, zbor in formațiune, modele de control, comunicare, coordonare.

### Introducere

Sarcinile de pilotare la drone sunt îndeplinite de unitatea de comandă de bord, care este

principalul component al sistemului de comandă și navigare, care asigură zborul lor stabil. Fiecare dronă comunică cu operatorul cu ajutorul unei singure perechi emițător-receptor. Atât conexiunea transmițător (telecomanda) – receptor, cât și receptor - bloc de control au protocoale de comunicație specifice. De regulă, protocoalele de comunicare emițător-receptor pentru drone sunt digitale și operează în banda de frecvențe de 2-2.4GHz. Protocoalele de comunicare dintre receptor și blocul de comandă a zborului pot fi atât digitale, cât și analogice.

Există diverse metode de control al zborului în formație. În contextul formațiilor mici acestea se clasifică în două categorii: controlul centralizat și controlul decentralizat. Controlul centralizat presupune ca fiecare membru (dronă) al formației să fie controlat de un unitate de control (controller) central astfel că membrii formației sunt complet dependenți de comenzile parvenite de la unitatea de control centrală. Pentru o formație aceasta înseamnă că fiecare membru a acesteia este ghidat de-a lungul unei traiectorii proprii stabilite de unitatea de control centrală. În cazul controlului decentralizat, membrii individuali a formației au unități de comandă proprii. Aceasta permite fiecărui membru a formației să devină complet autonom. În loc să urmeze o traiectorie stabilită de unitatea de comandă centrală, membrii formației interacționează unul cu altul pentru a asigura un zbor sigur ca formație și a atinge în siguranță ținta<sup>12</sup>.

De obicei, se utilizează o combinație dintre controlul centralizat și cel decentralizat. Aceasta înseamnă că sarcina de control al dronelor din formație este partajată între o unitate de control centrală și alta locală. De exemplu, se consideră o misiune simplă de deplasare a unei formații din patru drone dintr-un punct A spre un alt punct B. Misiunea presupune zborul tuturor celor patru drone din formației din punctul A spre punctul B, fiecare dronă păstrându-și totodată poziția în interiorul unei regiuni cu raza R ce definește formația și păstrând o distanță sigură una față de cealaltă, definită de o sferă de rază  $\Omega_r$ . Într-o combinație dintre controlul centralizat și cel decentralizat, unitatea de control centrală ar stabili un punct (poziție) inițial A și un punct de destinație B, în timp ce unitățile de control individuale ar asigura crearea formației și păstrarea distanței sigure dintre drone<sup>34</sup>.

### 1. Elaborarea structurii rețelei de drone și a protocolului de comunicare.

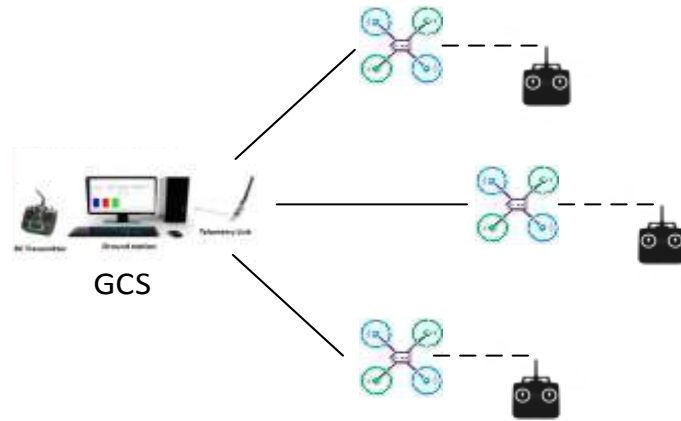
Un element fundamental care face posibilă cooperarea dronelor în timpul zborului în formație, în afară de un algoritm eficient de control al zborului, mai este comunicarea dintre drone în vederea schimbului de date despre poziția fiecărei drone din formație. Aceasta impune ca dronele să comunice prin intermediul unei rețele de comunicare, al cărei protocol trebuie să asigure o legătură fiabilă dintre membrii formației. Prima etapă în elaborarea structurii rețelei de comunicare dintre dronele ce zbor într-o formație este alegerea topologiei rețelei. Algoritmii de control a zborului în formație prevede ca fiecare dronă din formație trebuie să știe poziția celorlalte drone, iar rețeaua trebuie să fie scalabilă. De aceea, în urma analizei mai multor topologii s-a considerat că cea mai potrivită este topologia în formă de *stea*. Topologia în formă de *stea* permite adresarea secvențială a fiecărui membru în parte și facilitează sincronizarea între membri și evitarea interferenței întrucât toate nodurile rețelei operează în același canal de frecvență. Structura propusă a rețelei de comunicație din cadrul formației de drone este prezentată în fig. 1. Nodul GCS (*Ground Control Station*) reprezintă punctul de control al formației aflat la sol.

<sup>1</sup> Future of Life Institute. 2016. “Autonomous Weapons: An Open Letter from AI and Robotics Researchers.” July 28. Accessed January 7, 2017. <http://futureoflife.org/open-letter-autonomous-weapons/>

<sup>2</sup> Adams, E. 2016. “DARPA’s Developing Tiny Drones that Swarm to and from Motherships.” April 13. Accessed January 7, 2017. <https://www.wired.com/2016/04/darpa-developing-tiny-drones-swarm-motherships/>

<sup>3</sup> Erik de Vries, Kamesh Subbarao. Cooperative Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles – 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January 2011, Orlando, Florida;

<sup>4</sup> Erik de Vries, Kamesh Subbarao. Backstepping based Nested Multi-Loop Control Laws for a Quadrotor – 11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, Singapore, 7 – 10th decembrie 2010;



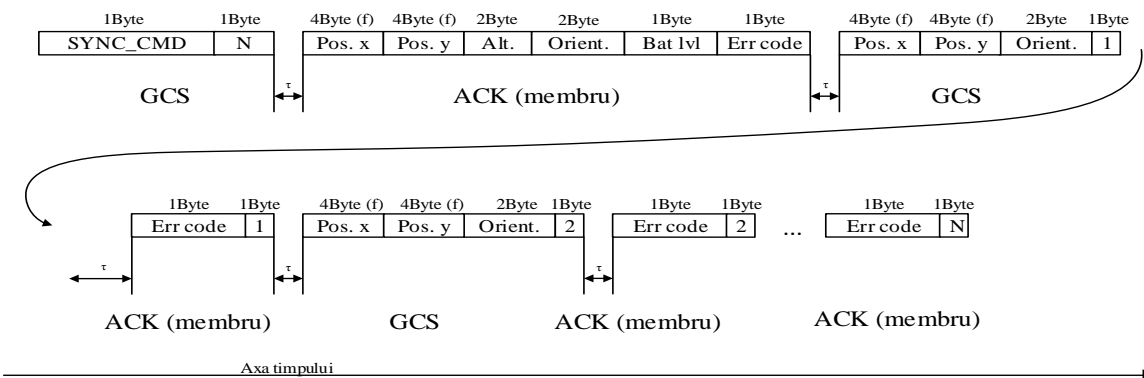
**Figura 1.** Schema topologiei rețelei de comunicație în cadrul unei formații din 3 drone.

Rețeaua de comunicație propusă admite controlul individual a fiecărei drone cu ajutorul unei telecomenzi dedicate cu toate că nu necesită neapărat de implementat aceasta. Comunicarea dintre dronă și telecomanda are loc printr-un canal dedicat. Pentru a fi posibilă implementarea topologiei rețelei prezentate, este necesar ca modulul de comunicare și protocolul asociat lui de la bordul fiecărei drone să suporte comunicarea bidirecțională cu reținere de timp cât mai mică pentru a păstra o bună sincronizare a datelor despre poziția fiecărei drone din formație. Sub canal aici se înțelege canal logic care are o adresă proprie fixă întrucât toate canalele din rețea vor avea aceeași frecvență (de exemplu, în banda ISM 2.4GHz).

Am propus protocolul de legătură de date *ShockBurst/Enhanced ShockBurst (ESB)*, suportat de transceiver-ele nRF24L01/+ produs al firmei Nordic Semiconductor, deoarece este un protocol bidirecțional bazat pe pachete și este utilizat în sisteme care necesită un consum de energie și cost al sistemului reduse, inclusiv în comunicarea cu telecomanda la dronele mici<sup>3,4</sup>. Protocolul *ESB* prevede validarea pachetelor utilizând suma de control (CRC) de 8 biți sau de 16 biți (se selectează la configurarea modulelor) și retransmisia programată a pachetelor dacă nu au fost recepționate cu succes (eveniment validat prin recepționarea unui pachet de confirmare (*acknowledge*)). Pentru implementarea hardware a rețelei de comunicație propuse pentru controlul zborului formației de drone au fost alese transceiver-ele nRF24L01+ care utilizează protocolul *ESB* deoarece au un consum redus de energie și sunt ușor de integrat (necesită puține componente adiționale).

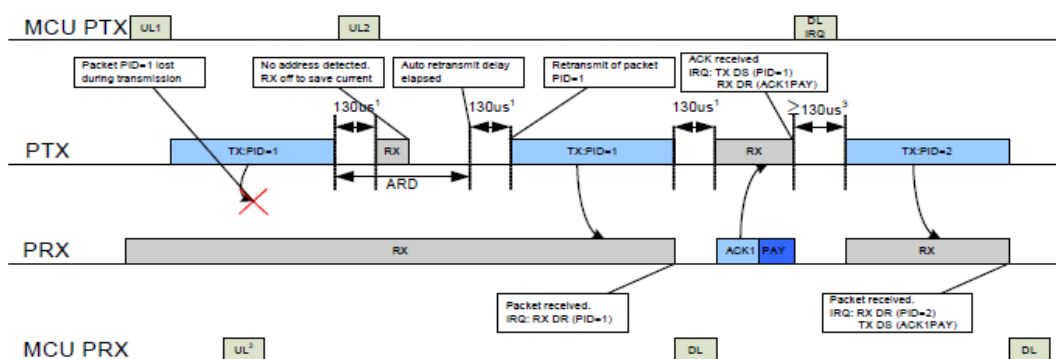
Structura rețelei propuse poate fi descrisă în felul următor. La nivelul punctului de control central (GCS) se definesc canalul radio și adresele membrilor formației. Aceste adrese sunt preprogramate în software-ul dronelor și rămân constante. Cu toate că topologia aleasă a rețelei permite extindere prin adăugarea dinamică a membrilor noi în formație, în lucrare prezentă ne vom concentra la modelul fix al topologiei alese. La nivel de GCS, adresele dronelor precum și structurile ce conțin poziția și orientarea lor sunt păstrate într-un tablou. Acest tablou este completat de către operator atunci când se configurează formația. Un tablou similar se creează și la nivel de membru însă acesta conține doar structurile cu datele despre poziția celorlalți membri.

Structura pachetului de date a protocolului *ESB* și a setului de pachete de date recepționate de GCS în faza de creare a formației are structura prezentată în fig. 2. în care se prezintă setul de pachete de date pe care le transmite GCS fiecărui membru în regim normal de zbor în formație.



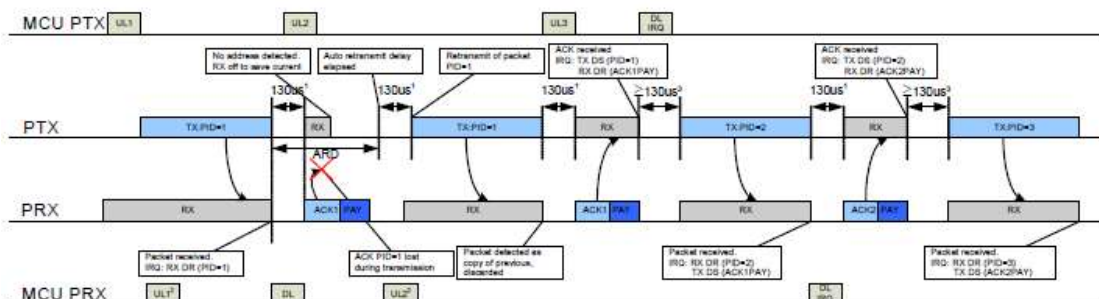
**Figura 0.** Diagrama de timp a schimbului de date dintre GCS și dronă în timpul zborului formației.

Diagramele de timp omit detaliile privind structura pachetelor de date la nivel de protocol de legătură. În cazul comunicării dintre GCS și membrii formației după crearea acesteia GCS emite comanda de sincronizare a datelor despre poziție și numărul de membri în formație minus unu (cel căruia GCS se adresează) către fiecare membru adresat. Membrul adresat răspunde ca confirmare de recepție printr-un pachet ce conține datele ce descriu despre poziția sa. La rândul său GCS transmite o serie de M-1 pachete, unde M este numărul de drone în formație, cu datele despre locațiile celorlalți membri pe care acesta le-a achiziționat anterior în același mod. După recepționarea fiecărui pachet cu datele despre locație membrul răspunde cu câte un pachet de confirmare ce conține numărul de ordine a pachetului tocmai recepționat. Tranzacția se repetă ciclic pentru toate dronele din formație. În cazul pierderii legăturii dintre un membru și GCS (membrul nu răspunde cu pachete de confirmare către GCS), GCS înlătură din tabloul membrilor datele despre drona lipsă și actualizează numărul membrilor în cadrul tranzacțiilor cu ceilalți membri care sunt activi. În acest caz algoritmul de agregare a formației va forța dronele rămase active să se reorganizeze geometric în cadrul formației.



**Figura 3.** Transmisia unui pachet cu pierderea acestuia și retransmisia lui.

Protocolul ESB prevede retransmiterea automată a pachetelor în cazul când emițătorul nu a primit pachetul de confirmare de la receptor. Numărul de retransmisii și intervalul dintre ele este programabil. Dacă toate retransmișiile eșuează transceiverul înlătură pachetul (re)transmis din buffer-ul de transmisie. În figurile 3 și 4 sunt prezentate diagramele de timp a transmisiei de date prin protocolul ESB pentru diferite scenarii. În cadrul schimbului de pachete prin protocolul ESB un transceiver funcționează ca emițător primar (PTX) iar altul ca receptor primar (PRX). Transferul de date este întotdeauna inițiat de PTX. Inițial transceiver-ul PTX se află în regim standby. După încărcare în buffer-ul de transmisie a unui pachet cu date și la activarea ulterioară transceiver-ului prin controlul unei intrări dedicate ( $CE = 1$ ), pachetul se assemblează și se emite în eter (după o reținere de circa  $130\mu s$  cât durează setarea PLL-ului). Dacă retransmisia automată este activată se verifică bitul  $NO\_ACK$  din câmpul de control al pachetului transmis<sup>12</sup>.



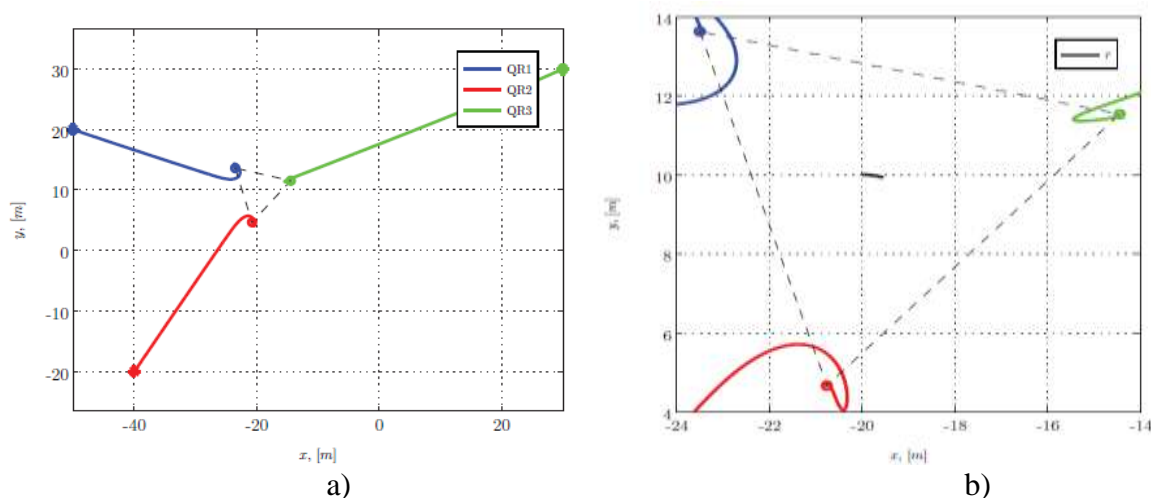
**Figura 4.** Diagrama de timp a tranzacției cu pierderea pachetului de confirmare și retransmisia pachetului inițial.

<sup>1</sup> Kenzo Nonami, Farid Kendoul, Satoshi Suzuki, Wei Wang, Daisuke Nakazawa. Autonomous Flying Robots. Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles – Springer, 2010, p. 1 – 24;

<sup>2</sup> S. Hayat, E. Yanmaz, R. Muzaffar, Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint, IEEE Communications Surveys Tutorials 18 (4) (2016) 2624–2661;

## 2. Testarea prin simulare a funcționării rețelei de drone.

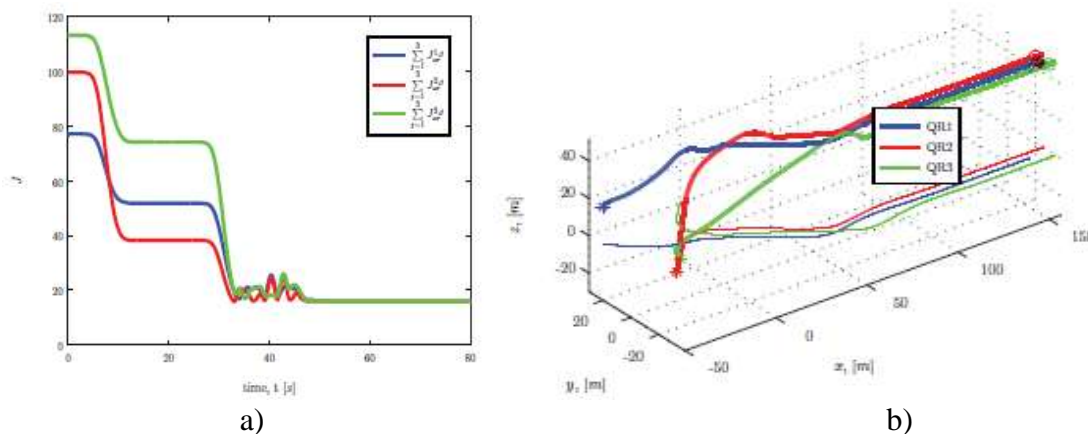
Vom prezenta rezultatele testării prin simulare în MATLAB a unei mici formații de drone, vom demonstra, că formația este capabilă să se deplaseze eficient în spațiu tridimensional din poziția inițială spre poziția-țintă definită de utilizator. Pentru a demonstra comportamentul de agregare a formației, coeficienții  $k_x$ ,  $k_y$  și  $k_z$  (criteriul de stabilitate Routh-Hurwitz) au fost setați egali cu zero, deci dronele se vor deplasa doar sub influența funcției potențialului de agregare  $\hat{r}_{pot}^i$ . Inițial altitudinea este setată cu zero iar coeficienții  $a$ ,  $b$  și  $c$  a funcției potențialului au fost setați respectiv cu valorile:  $a=0,03$ ,  $b=1$  și  $c=25$ . În fig. 5a, 5b se arată cum dronele sunt forțate una spre alta. Un overshoot mic este prezent, însemnând faptul că distanța dintre drone este mai mică decât  $\delta_{ij}$ . În acest moment dronele sunt imediat respinse înapoi una de alta și se stabilesc în poziția lor de echilibru. Calculând distanța de echilibru și comparând rezultatul cu distanța experimentală dintre drone după două minute de simulare rezultă valoarea distanței egale cu  $\delta_{ij}$  pentru fiecare dronă. Aceasta înseamnă că pentru o formație de trei drone se așteaptă ca forma geometrică a formației să fie un triunghi echilateral.



**Figura 5.** Agregarea formației de drone sub influența funcției potențialului (a) și imaginea mărită a centrului formației (b).

Pentru testarea abilității algoritmului de control a ghidării formației spre țintă, dronele au fost plasate în poziții aleatorii, la o distanță suficientă ca să se considere inițial că acestea sunt agenți liberi, dar sub influența atracției de potențial. Ținta este plasată destul de departe față de pozițiile inițiale ale dronelor, astfel că dronele se vor deplasa ca formație spre țintă. Astfel s-a demonstrat egalarea de viteze odată cu agregarea formației. Cel mai bun rezultat s-a obținut pentru modelul cu coeficienți variabili.

În cazul modelului cu coeficienți constanți agregarea formației este mai lentă. În acest caz  $k_{pot}$  are valoarea maximă egală cu 2. Din cauza limitelor impuse de platforma dronelor, controlul poziției este limitat. Aceasta înseamnă că este necesar ca controlul variabil al dronei să fie partajat între comanda controlului formației, centrul formației, și ieșirile controlului poziției  $u_d$ ,  $v_d$  și  $w_d$ . Când coeficientul de proporționalitate a lui  $\hat{r}$  este mărit în detrimentul câștigurilor de poziție, agregarea formației este rapidă, dar zborul acestora este lent din cauza câștigurilor de poziție foarte mici.



**Figura 6.** Variația funcțiilor potențialului în cazul zborului controlat al formației (model cu coeficienți constanți) (a) și diagrama de deplasare a formației dronelor în 3D (b).

În fig. 6b se prezintă în 3D mișcarea formației spre țintă. Pozițiile inițiale ale dronelor sunt aceleași cu excepția faptului că dronele acum pornesc de la înălțimi diferite. Coordonatele țintei sunt  $[150, -30, 50]$ . În loc să zboare în linie dreaptă, dronele se ridică la înălțimea stabilită înainte de atingerea țintei. Aceasta se datorează faptului că legile de control a altitudinii constau doar din două bucle imbricate. Deci atingerea altitudinii dorite e mult mai rapidă decât atingerea locației în plan orizontal. Liniile subțiri din diagrame sunt proiecțiile bidimensionale pe planul  $z=0$  a traiectoriilor de zbor. Fig. 6b prezintă profilul 3D a vitezelor dronelor. Aceasta totodată arată faptul că atunci când dronele ajung la altitudinea stabilită, este prezent un overshoot mic. Acesta poate fi evitat prin micșorarea coeficientului  $k_z$ .

### **Concluzii**

Zborul dronelor în formațiune deschide multe posibilități și avantaje, dar necesită o coordonare eficientă între ele. În calitate de suport al coordonării lor este protocolul de comunicare. În baza simulării s-a dovedit că se pot obține rezultate eficiente în cazul ajustării corecte a interacțiunii dronelor.