



# UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI



Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică  
Domeniul Inginerie Și Management

Decizie CSUD UPB nr. .... din .....

## REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

**Ing. Mihaela-Luminița COSTEA**

---

Detecția și soluționarea conflictelor în Managementul  
Traficului Aerian

---

### COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	<b>Prof.univ.dr.ing. Cristian DOICIN</b> Univ. Politehnica din București
Conducător științific	<b>Prof.univ.habil.dr.ing.ec.mat. Augustin SEMENESCU</b> Univ. Politehnica din București
Referent	<b>CS1.habil.dr.ing. Teodor-Lucian GRIGORIE</b> Academia Tehnică Militară “Ferdinand I”
Referent	<b>Prof.univ.dr.ing. Lucian CIOACĂ</b> Univ. “Lucian Blaga” din SIBIU
Referent	<b>Prof.univ.dr.ing. Corneliu BERBENTE</b> Univ. Politehnica din București

BUCUREȘTI 2021

## Cuprins

<b>INTRODUCERE</b> .....	- 4 -
<b>Capitolul 1</b> .....	- 7 -
1. Cadrul General al Managementului Spațiului Aerian.....	- 7 -
1.1 Studiu comparativ privind performanțele ATM în Europa și SUA.....	- 7 -
1.2 Domenii Cheie de Performanță (KPSs) și Indicatori Cheie de Performanță (KPIs)-	7 -
1.3 Factori externi care afectează KPIs .....	- 8 -
1.4 Impactul condițiilor meteo asupra operațiunilor aeroportuare .....	- 8 -
1.5 Schema de performanță a Cerului Unic European (SES).....	- 9 -
1.6 Automatizarea Managementului Traficului Aerian și Managementul Conflictului Aerian.....	- 9 -
1.7 Concluzii.....	- 9 -
<b>Capitol 2</b> .....	- 10 -
2. Controlul Traficului Aerian - Supraveghere Radar Modernă .....	- 10 -
2.1 Modelul propus pentru studiul Radar Cross Section .....	- 10 -
2.2 Posibilitățile și direcțiile de evoluție a Radar Cross Section pentru cazul unei aeronave	- 10 -
2.3 Studiu experimental.....	- 11 -
2.4 Suprafața Efectivă de Reflexie pentru ținte complexe – SER.....	- 11 -
2.5 Concluzii.....	- 13 -
<b>Capitolul 3</b> .....	- 14 -
3. Detecția și rezolvarea conflictelor aeriene în Managementul Traficului Aerian .....	- 14 -
3.1 Modele de conflict .....	- 14 -
3.2 Rezolvarea automată a conflictelor aeriene .....	- 14 -
3.3 Protocol îmbunătățit .....	- 15 -
3.4 Concluzii.....	- 15 -
<b>Capitolul 4</b> .....	- 16 -
4. Optimizarea algoritmului probabilistic de rezolvare a conflictelor din spațiul aerian.-	16 -
4.1 Cerințe tehnice aplicabile pentru automatizarea navigației aeriene .....	- 16 -
4.1.1 Tranziția automată între etapele de zbor.....	- 17 -
4.1.2 Schimbarea segmentului de zbor în plan vertical .....	- 17 -
4.1.3 Controlul automat al axei de tangaj a avionului .....	- 17 -
4.2 Metode de optimizare ale algoritmului aplicat .....	- 18 -
4.3 Concluzii.....	- 18 -
<b>Capitolul 5</b> .....	- 19 -
5. Utilizarea metodei celui mai apropiat punct de coliziune pentru aeronavele fără pilot-	19 -

5.1	Ecuatii de mișcare – dezvoltare .....	- 19 -
5.1.1	Descriere poziție și viteză.....	- 19 -
5.1.2	Dezvoltarea ecuațiilor cinetice .....	- 19 -
5.1.3	Liniarizarea ecuațiilor cinetice. Feedback.....	- 20 -
5.1.4	Transformarea ecuațiilor cinematice .....	- 20 -
5.2	Schemă de control – prezentare generală - algoritm CDR .....	- 20 -
5.2.1	Schemă de control - urmărirea traiectoriei .....	- 20 -
5.2.2	Formularea ecuațiilor mișcării relative.....	- 21 -
5.2.3	Algoritm CDR – formulare .....	- 21 -
5.3	Simulator: buclă deschisă .....	- 21 -
5.4	Simulator buclă închisă, cu 4PF .....	- 23 -
5.5	Simulator buclă închisă, cu 4PF+CDR.....	- 23 -
5.6	Concluzii.....	- 24 -
<b>Capitolul 6.....</b>		<b>- 25 -</b>
6.	Evitarea coliziunii între obiecte spațiale .....	- 25 -
6.1	Importanța sistemelor de evitare a coliziunii în zbor .....	- 25 -
6.2	Importanța studiului aprofundat a tematicii ACAS/TCAS.....	- 25 -
6.3	Algoritmi generali pentru detectarea coliziunii între două obiecte virtuale .....	- 25 -
6.3.1	Metoda 1.....	- 26 -
6.3.2	Metoda 2.....	- 26 -
6.4	Realizarea aplicației de detectare și simulare a coliziunilor în zbor dintre obiecte virtuale.....	- 26 -
6.5	Testare aplicație metoda 1 .....	- 27 -
6.6	Testare aplicație metoda 2 .....	- 27 -
6.7	Concluzii.....	- 27 -
<b>Capitolul 7.....</b>		<b>- 28 -</b>
7.	Concluzii Generale, Contribuții Originale, Direcții Viitoare de Cercetare și Sinteza Lucrărilor.....	- 28 -
7.1	Concluzii Generale .....	- 28 -
7.2	Contribuții Originale.....	- 29 -
7.3	Direcții viitoare de cercetare.....	- 30 -
7.4	Sinteza Lucrărilor .....	- 30 -
<b>Bibliografie selectivă .....</b>		<b>- 31 -</b>

## INTRODUCERE

Detectarea și Rezolvarea Conflictelor din traficul aerian (CDR) presupune interacțiunea mai multor domenii, simularea sistemelor fizice de tip aeronautic, codificarea algoritmilor de detectare și soluționare a conflictelor aeriene, procedurile operaționale de soluționare a conflictelor detectate. În cadrul Managementului Traficului Aerian (ATM) sunt numeroase soluții de detectare și evitare a conflictelor aeriene, având algoritmi de simulare particulari. Direcția similară în cazul sistemelor dinamice studiate în cadrul CDR, constă în faptul că, o gamă variată de agenți ai sistemelor au un comportament hibrid, astfel încât există o multitudine de moduri discrete în cadrul studiilor realizate asupra Sistemului de Management al Zborului (FMS). Modalitatea de detectare și soluționare a conflictului aerian debutează cu precizarea și alarmarea indicată de către sistemele ACAS/TCAS, și studiul probabilității apariției conflictului care se determină calculând poziția și viteza efectivă a aeronavelor aflate în conflict.

Sistemul de automatizare traficului aerian conferă o multitudine de rezolvări pentru decongestionarea traficului aerian, care este preconizată în viitorii 20 de ani. Soluționarea automatizată determină în mod clar o eficiență sporită, ducând la creșterea securității și siguranței aeriene, optimizându-se astfel efortul depus de către controlorii de trafic.

Lucrarea propune un nou algoritm de rezolvare automată a conflictelor existente în spațiul aerian real, care consideră problemele anterior detectate, elimină elementele aleatorii, soluționând astfel noile conflicte aeriene și pentru cazul inexistenței unei soluții, care este bazată strict pe schimbarea vitezei de zbor pe traiectorie.

Lucrarea dezvoltă și testează algoritmul de detecție și rezolvare a conflictelor aeriene pentru aeronavele cu și fără pilot la bordul aeronavelor. Se dezvoltă un algoritm CDR, ulterior testat, și ulterior se rafinează această logică în cazul aeronavelor care prezintă un echipaj în cabina de pilotaj. Se integrează un simulator util pentru testarea și evaluarea logicii de control, optimizând astfel siguranța aeriană în spațiul considerat a fi cu un risc ridicat de coliziune aeriană. Se utilizează metoda celui mai apropiat punct de coliziune, precum și CD (Detectarea Conflictelor) pe termen mediu, Mid Term Conflict Detection (MTCDD) 2D. Algoritmul urmărește astfel determinarea distanței minime, precum și a timpului dintre aeronavele care au aceeași altitudine de zbor.

Teza de doctorat se încadrează în **Domeniul Inginerie și Management** prin abordarea unor problematici specifice domeniului de utilizare a traficului aerian în vederea formulării contramăsurilor capabile să prevină apariția incidentelor și accidentelor aviatice. Pentru acest lucru este necesar un studiu metodic bazat pe cunoștințe temeinice și rezultate experimentale, metode numerice și simulări, care s-au dovedit a fi instrumente de calcul matematic deosebit de eficiente. Toate acestea nu se pot efectua decât într-un mediu de simulare adecvat, necesar a fi dezvoltat și actualizat continuu.

**Scopul lucrării** se concentrează pe dezvoltarea și testarea algoritmilor de detecție și rezolvare a conflictelor aeriene în timp real.

**Obiectivul general al tezei** îl reprezintă contribuția originală la dezvoltarea, dar și testarea algoritmului de evitare a coliziunilor aeriene, dar și modelarea, simularea, standardului de avertizare inteligentă, precum și a metodologiei optimizării din punct de vedere al ingineriei sistemelor dinamice. Abordare personală ține seama de multitudine factorilor de risc ce apar în fiecare etapă a zborului. Dezvoltarea și testarea algoritmului original de detecție și rezolvare

a conflictelor aeriene s-a realizat din perspectiva aeronavele atât fără pilot la bord, cât și în prezența pilotului la bordul aeronavei considerate.

**Metodologia de cercetare** pentru realizarea tezei a necesitat utilizarea următoarelor metode și instrumente de investigare:

- Cercetarea unei ample bibliografii, analiză comparativă, analiză descriptivă;
- Modelare conceptuală, simulare și testare;
- Limbaje de programare: Matlab, Python, Simulink.

### **Importanța Sistemelor de Evitare a Coliziunilor în Zbor – ACAS/TCAS în contextul internațional actual**

Se prezintă mai întâi elementele structurale și funcționale ale Managementului Traficului Aerian, pornind de la particularitățile legate de tendințele sistemului utilizate pe teritoriul Uniunii Europene, dar și pe cel al Statelor Unite ale Americii.

Interesul pentru dezvoltarea unor sisteme de evitare a coliziunii aeriene poate fi considerat încă anii 1950, când două aeronave de transport aerian ale armatei SUA s-au ciocnit în aer deasupra Marelui Canion. După acest eveniment, FAA a avut atenția focusată pe Sistemul de Evitare a Coliziunii Radiofar (BCAS), care este un sistem bazat pe transponder. În 1978 s-a produs a doua coliziune aeriană, coliziunea fiind între o aeronavă de aviație generală și o aeronavă de transport, ceea ce a dus la dezvoltarea sistemului BCAS - Beacon Collision Avoidance System, care în anul 1981 este redenumit ca TCAS – Traffic Alert and Collision Avoidance System. După producerea celei de-a treia coliziune aeriană, a fost impusă o nouă legislație de către FAA, a fost impusă instalarea sistemului TCAS pe toate aeronavele ce transportau mai mult de 30 de persoane în SUA. În anul 1990 a avut loc primul zbor comercial în care a fost introdus sistemul TCAS. Monitorizarea și evaluările de siguranță au condus la o serie de modificări care au dus la o versiune internațională, denumită Versiunea 7 sau Sistem de Evitarea Coliziunilor în zbor (ACAS).

Pe parcursul ultimilor ani, dezvoltarea Sistemelor de Aeronave Pilotate de la Distanță (RPAS) a fost caracterizată printr-o creștere exponențială, atât în aplicații militare, cât și în medii civile și comerciale. Una dintre provocările majore legate de utilizarea intensă a RPAS este integrarea lor în spațiul aerian civil. Rezultatele cercetărilor efectuate atât în Europa, cât și în SUA, individualizează tehnologia Sense and Avoid ca un factor esențial pentru integrarea RPAS în spațiul aerian civil, ținând seama de un nivel adecvat de siguranță. Una dintre cele mai recente și promițătoare soluții propuse se bazează pe dezvoltarea sistemelor Sense and Avoid bazate pe utilizarea tehnologiei ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast), care a devenit obligatorie începând cu anul 2020 în SUA [1], dar și în Europa, pentru toate aeronavele care zboară în spațiile aeriene din clasele A, B și C. [2] Referințele bibliografice [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] arată CAS-uri (Collision Avoidance Systems) bazate pe tehnologia ADS-B. Aceste metode diferă atât pentru metodele de calcul ale manevrei de evitare a coliziunilor, cât și pentru cele de detectare a coliziunilor în zbor. O metodă propusă în literatura de specialitate, prezentată în [4], calculează probabilitatea coliziunii având în vedere incertitudinile asociate măsurătorilor ADS-B și utilizând simulările Monte-Carlo. Tot în acest studiu, sarcina computațională asociată este imensă, datorită necesității de a folosi simulările Monte-Carlo pentru calculul probabilității de coliziune. Metoda de detecție a coliziunii bazată pe abordarea geometrică propusă în [5], consideră o încălcare admisă a priori, a minimelor de separare predefinite inițial. În acest caz, se impune o comandă de poziție pentru a mări distanța

prevăzută la cel mai apropiat punct de coliziune. Metoda nu are un calcul de procesare foarte mare, dar este necesară cooperarea avioanelor intrus care sunt implicate [2]. O altă metodă care ia în considerare încălcarea unui prag minim de eşalonare orizontală sigură și generarea unei referințe corespunzătoare unghiului de direcție pentru a restabili distanța minimă de separare admisă este prezentată în [6]. Similar cu metodologia propusă în [6] și metodele propuse în [8] și [7] formulează problema de evitare a coliziunii ca sarcină de planificare a traseului, constrângeri de spațiu și de separare, limite de înălțime și puncte de trecere pre-allocate. O abordare promițătoare bazată pe camerele monoculare, pentru detectarea coliziunii, este propusă în [10]; datorită greutateii reduse, a dimensiunii reduse, dar și a consumului redus de energie al sensorului necesar, poate fi interesantă, dar metoda poate avea un răspuns de viteză lent datorită imaginilor neclare, în special în mediile întunecate, deci este posibil să nu fie adecvată pentru aplicații în timp real. Referințele bibliografice [11] și [12] propun o metodă de evitare a coliziunii pentru mai mult de două vehicule fără pilot. Condiția de detectare a coliziunii este verificată dacă distanța dintre agenți este mai mică decât suma razei calculate în jurul aeronavei implicate în conflict. În plus, Laboratorul de Cercetare a Forțelor Aeriene și Lockheed Martin au dezvoltat un sistem automat de evitare a coliziunii pentru a efectua manevre agresive pentru a evita coliziunile [13], [14], [15]. Manevra este calculată printr-un instrument de optimizare care alege între cele mai bune manevre disponibile, cea mai bună care urmează să fie aplicată.

În cele din urmă, Administrația Federală a Aviației (FAA) a format o echipă pentru a dezvolta o nouă tehnologie ACAS (Sistemul de evitare a coliziunilor în zbor), identificată ca ACAS X, începând cu anul 2008. Intenția este ca ACAS X să substituie TCAS II (ACAS II); eficacitatea lui TCAS II a fost demonstrată pe o perioadă de mulți ani, iar în urma unor estimări făcute, a redus riscul unei coliziuni aeriene, în Europa, cu un factor de aproximație 5. Logica de alertare ACAS X se bazează pe un set de considerații de siguranță, considerații operaționale, dar și pe un tabel de căutare numerică care este optimizat în raport cu un model statistic pentru spațiul aerian. Adaptarea logicii la diferite configurații ale spațiului aerian sau anumite proceduri, scopul este de a oferi performanțe îmbunătățite de alertă, o reducere a costurilor, a termenelor de actualizare, o îmbunătățire pentru logica de consultanță și pentru supraveghere. Noua abordare profită de progresele actuale din „programarea dinamică”, dar și de tehnicile de informatică pentru generarea alertelor utilizând optimizarea online a rezoluției de avertizări. Dacă TCAS II se bazează doar pe supravegherea pe transponder, ACAS X trebuie să fie compatibil orice sursă de supraveghere care să îndeplinească specificațiile criteriilor de performanță. Sistemul va trece de la supravegherea semnalului luminos al TCAS-ului la supravegherea de tip plug-and-play care acceptă supravegherea bazată pe un sistem de poziționare globală (GPS) de date și care poate să obțină date de supraveghere dintr-o varietate de surse, cum ar fi sistemele de supraveghere prin radar, satelit, infraroșu și electro-optic. Acestea din urmă surse sunt deosebit de necesare pentru a sprijini cerințele ca UAV-urile să detecteze și să evite aeronavele care nu sunt echipate cu transponder. Noile capacități de supraveghere vor permite protecția împotriva evitării coliziunii pentru noi clase de utilizatori, inclusiv aeronave de mici dimensiuni, aviație generală, care nu sunt echipate în prezent cu TCAS [16]. Însă, ACAS X, este un sistem de evitare a coliziunii pentru care, încă se efectuează cercetări și este în curs de dezvoltare. În ceea ce privește problema de evitare a coliziunilor, Centrul Italian de Cercetare Aerospațială (CIRA) desfășoară activități specifice care vizează identificarea unei noi metodologii de calcul al manevrei de evitare a coliziunilor, care să fie potrivită pentru implementarea în timp real, constituind astfel un factor tehnologic promițător pentru integrarea sigură a RPAS Spațiul aerian civil.

## Capitolul 1

### 1. Cadrul General al Managementului Spațiului Aerian

Acest capitol oferă informații generale importante atât despre sistemul ATM european cât și cel american, care pot fi utilizate pentru a se explica multitudinea diferențelor existente între indicatorii de performanță de bază. Se prezintă diferențele existente în gestionarea traficului aerian, privind spațiului aerian geografic, tehnologia și echipamentele de comandă și control. Responsabilitățile și rolurile pe care le are ANSP-ul (Air Navigation Services Provider) în ASM (Managementului Spațiului Aerian) sunt evidențiate, dar și tehnicile ATFM care sunt folosite în diferite etape și scenarii de planificare pentru gestionarea dezechilibrelor existente în capacitatea de cerere din cele două regiuni de studiu, SUA și Europa.

Scopul este de a identifica cele mai bune practice și de a înțelege diferențele dintre cele două sisteme ASM, având scopul de a optimiza performanța ATM, în avantajul cert al sistemului global de transport aerian. Studiile se bazează pe un set de indicatori de performanță comparabili, revizuit în fiecare an și elaborat de comun acord, astfel s-a creat o bază solidă pentru studii comparative reale, între diverse regiuni ale lumii, cât și între țări. KPIs (Indicatori Cheie de Performanță) specifici se bazează pe cele mai bune practici de la EUROCONTROL, cât și pe cele de la Air Traffic Organization System Operation Services, având accentul pe studiul comparativ în ceea ce privesc indicatorii în care domeniile de performanță diferă, între SUA și Europa.

#### 1.1 Studiu comparativ privind performanțele ATM în Europa și SUA

În general, Managementul Traficului Aerian (ATM) este format din Controlul Traficului Aerian (ATC), Managementul Spațiului Aerian (ASM) și Managementul Fluxurilor de Trafic Aerian (ATFM). Preocuparea ATC-ului este de a asigura separarea/eșalonarea în condiții de siguranță a aeronavelor, iar rolul ATFM-ului este asigurarea siguranței, prin avertizarea reglementării cererii și a suprasarcinilor, având în vedere disponibilitatea capacității. În comparație cu ATC, ATFM are un timp mai îndelungat pentru efectuarea operațiunilor cu câteva zile înainte. Astfel, din performanțe fac parte: Organizarea Managementului Traficului Aerian, Controlul de Trafic Aerian (ATC), Managementul Spațiului Aerian (ASM), Managementul Fluxului de Trafic Aerian (ATFM) și Întârzieri ATFM de aeroport influențate de condițiile meteorologice

#### 1.2 Domenii Cheie de Performanță (KPSs) și Indicatori Cheie de Performanță (KPIs)

În manualul privind Performanța Globală a Sistemului de Navigație Aeriană, ICAO a identificat unsprezece Domenii Cheie de Performanță, de interes în înțelegerea de ansamblu a performanței sistemului ATM: Acces și Capital propriu, Capacitatea, Eficacitatea costurilor, Eficiența, Durabilitatea mediului, Flexibilitate, Interoperabilitatea globală, Predictibilitate, Participare, Siguranță și Securitate. Studiul abordează Domeniile Cheie de Performanță, care se referă la eficiența operațională a sistemului ATM. Acestea sunt KPA-urile de Capacitate, Eficacitate, Predictibilitatea și Durabilitatea mediului, deoarece este legată de Eficiență, la evaluarea arderii de combustibil suplimentar, deci scăderea consumului specific de combustibil pe rută.

### 1.3 Factori externi care afectează KPIs

*Caracteristicile de trafic în SUA și în Europa.* Această secțiune oferă câteva caracteristici cheie pentru traficul aerian al sistemului ATM din S.U.A, comparativ cu cel din Europa. Scopul este de a oferi unele informații de fond și pentru a se asigura studiul comparativ al probelor de trafic. *Creșterea traficului aerian.* Traficul din Europa, între anii 2000 - 2017 a avut o creștere de 23,1%, iar în același timp cel din SUA a avut o scădere cu -14,7%. O creștere de 2,6% pe principalele 34 aeroporturi a fost raportată de către SUA pentru anii 2015-2017, iar Europa a avut o creștere cu 6,6% pe aceeași perioadă.

*Densitatea traficului aerian.* În Europa, "centrul" este format din statele: Elveția, Benelux (Olanda, Belgia, Luxemburg), Germania și Nord-Estul Franței care este cel mai complex spațiu aerian și totodată prezintă cea mai densă zonă.

*Sezonalitatea.* Variabilitatea și sezonalitatea cererii de trafic aerian, ar putea fi factori care afectează, în timp, performanța ATM. Dacă traficul aerian este extrem de variabil, resursele pot fi insuficient utilizate în afara orelor de vârf, însă sunt limitate pe parcursul orelor de vârf.

*Fluxul de trafic aerian.* O diferență însemnată între SUA și Europa este ponderea aviației generale, reprezentând 19%, corespunzător 3,5% din traficul anului 2017

### 1.4 Impactul condițiilor meteo asupra operațiunilor aeroportuare

Impactul meteo (vânt, fenomene meteo convective, vizibilitate, etc.) asupra operațiunilor desfășurate pe un aeroport, astfel că performanța ATM, poate varia semnificativ, unde depinde de o serie de factori ca: echipamente ATM, și cele existente pe un aeroport (radar, ILS, etc.), proceduri și norme care sunt aprobate, configurații de pistă (intensificarea mișcărilor curenților de aer) și în funcție de tipul de aeroport. Procedurile aplicate pentru condițiile de Vizibilitate Redusă, necesită o spațiere/eșalonare mărită între aeronave, pentru a menține integritatea semnalului Sistemul de Aterizare Instrumentala (ILS), care, la rândul său, reduce posibilitățile de tranzitare. Declararea capacității pistei, în Europa, se bazează de obicei pe cerințele de separare/eșalonare, pentru condițiile meteorologice considerate a fi "medii". În cazul în care, condițiile reale sunt mai bune decât cele luate în considerare în cadrul procesului de declarare a capacității, o tranzitare mai mare a pistei decât cea declarată, poate fi atinsă.

Analiza performanței prin starea meteorologică oferă o indicație asupra modului în care vremea afectează performanța sistemului și care aeroporturi sunt cele mai afectate de schimbările condițiilor meteo. Evoluția acestor valori în timp, poate furniza o indicație certă a modului în care, starea vremii poate influența performanța sistemului pe o anumită perioadă considerată. [28] [29] [24, 25]. Ambele grupuri din Europa și SUA utilizează rapoarte amănunțite de observare a vremii, cunoscut ca și METAR de ambele grupuri care au dezvoltat proceduri de evaluare a impactului meteo asupra performanței aviației.

Un METAR tipic conține date referitoare la temperatură, viteza și direcția vântului, punct de rouă, precipitații, înălțimi și nebulozitate, presiune barometrică și vizibilitate [26] [33].

Cum vremea este un factor major care influențează debitul pistei capacitatea aeroportuară și aeroporturile, emit de obicei restricții ATFM care se adresează dezechilibrelor capacității la cerere atunci când se produc condiții meteorologice nefavorabile. Studiul comparativ al performanțelor operaționale S.U.A - se referă la Serviciile de Navigație Aeriană (ANS) care sunt furnizate de către Statele Unite ale Americii în cele 48 de state învecinate amplasate pe continentul nord-american la sud de granița cu Canada, incluzând Districtul Columbia, însă excluzând Hawaii, Alaska și zonele oceanice (US CONUS). Europa – este denumită drept o zonă geografică unde Serviciile de Navigație Aeriană (ANS) sunt date de către statele membre



ale UE, la care se adaugă și statele din afara EU, care sunt membre EUROCONTROL (41 de state membre și 2 state de acord (Israel și Maroc)), exceptând zonele oceanice Insulele Canare și Georgia.

### 1.5 Schema de performanță a Cerului Unic European (SES)

Este o inițiativă emblematică a UE (Uniunii Europene) având scopul de a reforma arhitectura traficului aerian din Europa, odată cu îndeplinirea cerințelor viitoare de siguranță și capacitate în cadrul SES I și SES II, inițiatiile au fost dezbătute la sfârșitul anilor 1990, dar au fost adoptate în perioada 2004 (SES I) – 2009 (SES II). În prima Perioadă de Referință (RP1) (2012-2014), obiectivele la nivelul UE au fost stabilite în baza eficienței costurilor, întârzierilor pe rută per zbor și eficiența zborului orizontal [23]. În urma creșterii traficului în țările europene, s-a reconfigurat spațiul aerian pentru optimizarea Managementul Fluxurilor și a Capacității Traficului Aerian (ATFCM) și de reducere considerabilă a întârzierilor. În urma prevederilor regulamentare SES din anul 2004, Comisia Europeană a dat un raport către Eurocontrol care se numea „Mandate on Support for Establishment of Functional Airspace Blocks (FABs)”. Referitor la implementarea Blocurilor Funcționale de Spațiu Aerian -FAB, ideea principală a SES este aceea de a fortifica cooperarea regională având intenția de a simplifica efortul controlorilor de trafic aerian.

### 1.6 Automatizarea Managementului Traficului Aerian și Managementul Conflictului Aerian

Automatizarea ATM și Managementul Conflictului au drept scop reducerea substanțială a încărcărilor cu sarcini / per zbor a controlorului de trafic aerian, printr-o creștere semnificativă a sprijinului integrat legat de procesele de automatizare, în timp ce se îndeplinesc simultan obiectivele de siguranță, dar și de mediu ale Programului SESAR. Operatorii umani vor rămâne plasăți în centrul sistemului, folosind sistemele automatizate cu un grad accesibil de integrare și redundanță. În plus, această cerință de afaceri strategice se referă la evoluția Ground and Airborne Safety Nets (compatibilitatea reciprocă a acestora) prin utilizarea de noi mijloace de supraveghere, precum și a unui schimb de informații între componentele sistemului la acest nivel. Totul va fi pe deplin adaptat la viitoarele sisteme de management al traiectoriei – din Programul SESAR precum și la noile moduri de eșalonare ale aeronavelor, asigurându-se astfel eficacitatea lor continuă, drept un nivel de siguranță împotriva riscului de coliziune în zbor, cât și a altor pericole iminente [26].

### 1.7 Concluzii

Studiul are rolul de a evidenția tendințele sistemului și oferă o analiză comparativă, deosebit de interesantă între Statele Unite și Europa, utilizând KPI (Indicatori Cheie de Performanță), care au fost adaptați de către ambele sisteme. Au fost folosiți un număr de 14 din totalul celor 19 Indicatori Cheie de Performanță (KPI), care sunt regăsiți în ICAO GNAP (Planul Global de Navigație Aeriană). În studiu au fost analizate punctele comune, dar și diferențele privind gestionarea traficului aerian și a factorilor ce influențează performanța, ca de exemplu: vremea și caracteristicile traficului aerian. Cu privire la sistemul Managementul Traficului Aerian, Europa prezintă un nivel mai ridicat de fragmentare și operează cu mai multe facilități fizice decât Statele Unite. Regiunea de studiu european înglobează 37 de ANSP-uri cu 62 centre de rută și 16 unități APP (Approach). În opoziție, CONUS Statele Unite are un ANSP, 20 ARTCC și 26 unități TRANCON (Controlul Abordării Radarului din zona de Terminal).

## Capitol 2

### 2. Controlul Traficului Aerian - Supraveghere Radar Modernă

În acest capitol, cu ajutorul programului Pofacets implementat în Matlab, va fi creat un obiect complex, iar comportamentul acestuia în banda de frecvență 400 MHz - 30 GHz va fi analizat într-o manieră monostatică și bistatică. Programul Pofacets este o interfață grafică pentru o analiză a Suprafeței Efective de Reflexie bazată pe aproximare optică.

#### 2.1 Modelul propus pentru studiul Radar Cross Section

Radar Cross Section (RCS) - reprezintă o suprafață virtuală care redă intensitatea reflexiei semnalului emis de la țintă la radar [18]. În dimensiunea Radar Cross Section se înglobează că, ținta nu va fi atinsă de toată energia radiată. Radar Cross Section – ținta  $\sigma$ , se descrie ca fiind produsul a trei factori, astfel:  $\sigma = A_p \times R \times D$  (2.1)  $A_p$  – pentru țintă este aria secțiunii transversale, care este conturat pe un plan ortogonal corespunzător direcției de radiație;  $R$  – reflectivitatea;  $D$  – directivitatea. Din puterea interceptată, reflexivitatea este un procent, fiind reflectat de către țintă. Suprafața Efectivă de Reflexie pentru corpurile de formă sferică, este independentă de frecvență, doar dacă se lucrează la frecvențe suficient de mari, unde lungimea de undă  $\lambda \ll$  distanța și  $\lambda \ll$  raza ( $r$ ).

Din punct de vedere experimental, semnalul reflectat de o țintă și care este recepționat de radar, este comparat cu semnalul recepționat de același radar, în aceleași condiții, dar reflectat de o sferă care are o arie frontală (sau în proiecție plană) de  $1 \text{ m}^2$  (un diametru de  $\approx 44 \text{ in}$ ). Un avion, care este considerat drept țintă, este extrem de complex. El prezintă foarte multe elemente de reflexie și forme variabile. Suprafața Efectivă de Reflexie a unui avion real trebuie să fie complet măsurată. Ea variază semnificativ cu direcția de vizualizare a radarului utilizat [38]. Imaginea tridimensională a RCS formează amprenta electromagnetică a țintei. Aceste măsurători se efectuează în camere speciale și au ca scop determinarea amprentei electromagnetice a aparatelor de zbor care pot efectua misiuni diferite.

Suprafața Efectivă de Reflexie a unui obiect este reprezentată de zona (fictivă) de interceptare a semnalului de la radar cu o putere suficientă încât să determine împrăștierea uniformă, în toate direcțiile, și să producă un ecou suficient de puternic pentru a putea fi considerat țintă, de către radarul de supraveghere aeriană.

#### 2.2 Posibilitățile și direcțiile de evoluție a Radar Cross Section pentru cazul unei aeronave

Evoluția Radar Cross Section se poate realiza astfel:

1. Alegând cea mai favorabilă configurație geometrică conductivă a aeronavei, care să garantează o formă aerodinamică optimă și un Radar Cross Section îndeajuns de mare. Datorită necesității de a acorda prioritate problemelor de proiectare aerodinamică, există modalități de limitare de a crește Radar Cross Section pe această direcție.

2. Se acoperă suprafața aerodinamică externă (dacă este neconductivă) cu material conductiv sau de creștere a conductivității materialului carcasei.

Dacă structura ampenajelor, a aripilor, a fuzelajului este acoperit cu fibră de carbon sau se utilizează vopsea cu conductivitate ridicată, metoda de creștere Radar Cross Section în direcția 2 este posibilă. Aceste metode pot fi utilizate independent sau simultan.

3. Dotarea aeronavei cu corpuri reflectante focalizatoare

## 2.3 Studiu experimental

Metoda de creștere a Radar Cross Section în această direcție este limitată, deoarece va afecta puternic calitatea aerodinamică a echipamentului datorită formei și dimensiunii reflectorului poliedric. Acolo unde este posibil un astfel de echipament, pot fi oferite și soluții de proiectare având costuri mai scăzute pentru aeronava respectivă. Cu ajutorul programului Pofacets implementat în Matlab, va fi creat un obiect complex și comportamentul acestuia în banda de frecvență 400 MHz-30 GHz va fi analizat într-o manieră monostatică și bistatică. Programul Pofacets este o interfață grafică pentru o analiză eficientă a Suprafeței Efective de Reflexie bazată pe aproximare optică.

Din teorie rezultă faptul că, Suprafața Efectivă de Reflexie depinde de raportul dintre dimensiunile obiectului și lungimea de undă folosită [40]. Figura de mai jos prezintă un obiect complex în formă de rachetă. Se presupune că unde incidentă este polarizată  $\theta$ , iar frecvența va avea valori diferite între 400 MHz și 30GHz. Analiza se efectuează pe planul  $\varphi = 0^\circ$ , unghiul  $\theta$  variază între  $0^\circ$  și  $360^\circ$ , iar mărimea pasului este de  $2^\circ$ . Lungimea obiectului de analiză este de 287cm, frecvența variază între 20MHz și 30GHz, astfel lungimea de undă va fi în intervalul (1-15cm) [31].

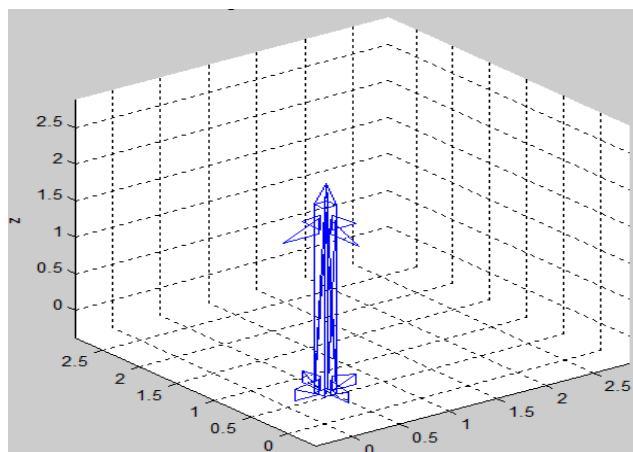
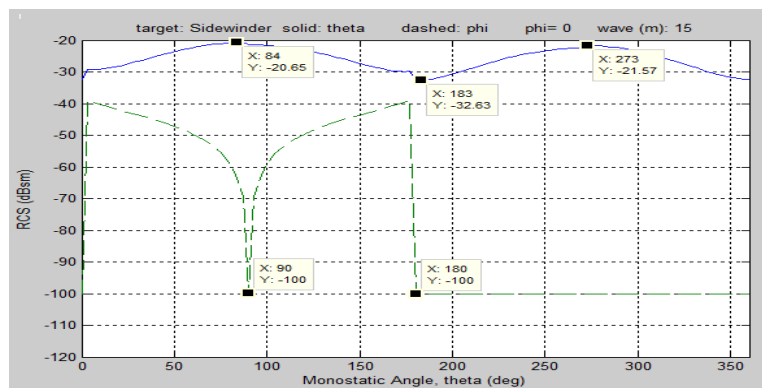


Fig. 2. 1. Obiect obținut din datele experimentale

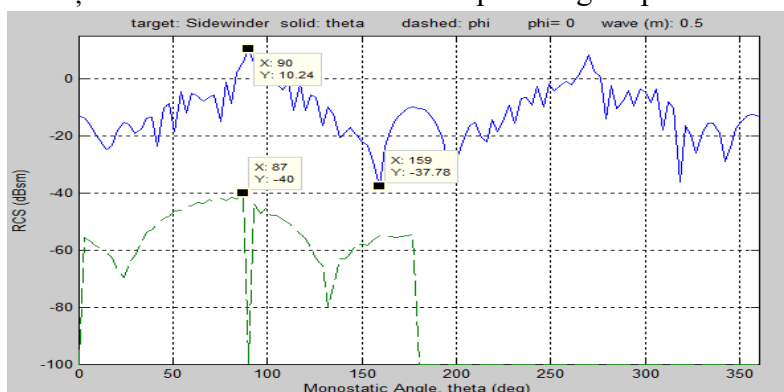
Obiectul care urmează a fi analizat este un obiect creat anterior și specifică faptul că fețele sunt considerate a fi realizate din materiale care nu sunt complet conductoare. Se observă faptul că primele 15 fețe ale obiectului sunt iluminate pe o singură parte, iar cele 11 fețe din spate pe ambele părți iluminate.

## 2.4 Suprafața Efectivă de Reflexie pentru ținte complexe – SER

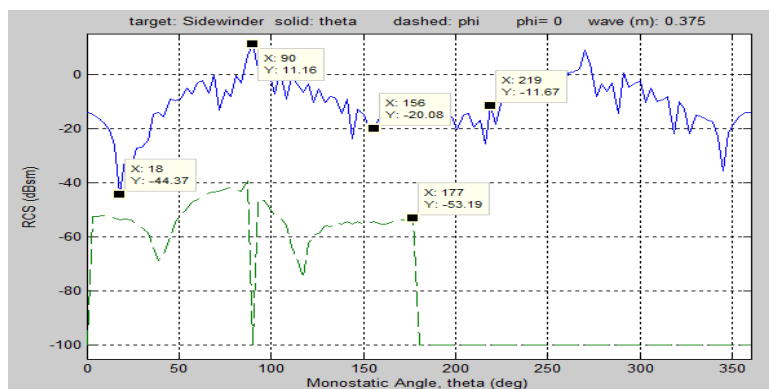
Se consideră că o țintă complexă include un număr numeros de obiecte care sunt independente și care dispersează în toate direcțiile energia primită de la radar. Cea mai importantă este energia dispersată în direcția radar. Fazele relative și amplitudinile semnalului ecou din obiectele dispersate, măsurate la receptorul radar, determină secțiunea transversală totală. Fazele și amplitudinile fiecărui semnal pot fi adăugate pentru a obține o secțiune transversală totală sau poate determina anularea completă a relațiilor matematice dintre acestea. Dacă separarea dintre obiectele de dispersare individuale este mare, punând în comparație lungimea de undă, care este de obicei valabil pentru majoritatea aplicațiilor radar, faza unui singur semnal la intrarea receptorului radar va fluctua în funcție de poziția de amplasare al țintei la radar, rezultând astfel un ecou oscilant.



**Fig. 2. 2.** Unghiul  $\theta$  fluctuează  $0^\circ$  și  $360^\circ$  cu pas de  $2^\circ$  și o frecvență 20 MHz. Întrucât lungimea de undă este mult mai mare decât valoarea obiectului de studiat, ne aflăm în zona de reflexie Rayleigh. Se observă o ușoară modificare a suprafeței efectivă de reflexie, iar valoarea este cuprinsă între -30 și -20 dBsm. Figura de mai sus, Figura 2.2, prezintă graficul suprafeței efectivă de reflexie, când suprafața fațetelor nu este integral conductivă. Cele două grafice de mai sus (Fig 2.1 și Fig. 2.2), caracterizează cele două tipuri de polarizare, astfel: primul grafic concordă polarizării liniare, iar al doilea grafic concordă polarizării încrucișate. În ceea ce privește polarizarea liniară, pe Suprafața Efectivă de Reflexie se regăsesc valori negative pentru intervalul -30 și -20 dBsm. Referitor la polarizarea încrucișată valoarea Suprafeței Efective de Reflexie este mai mică decât în polarizarea liniară. La  $90^\circ$  avem un minim de -100 dBsm. Suprafața Efectivă de Reflexie = constant de la  $180^\circ$ , cu o valoare de -100 dBsm, deoarece 15 fețe ale obiectului sunt iluminate pe o singură parte.



**Fig. 2. 3.** Unghiul  $\theta$  fluctuează  $0^\circ$  și  $360^\circ$  cu pas de  $2^\circ$  și o frecvență 600 MHz. Se constată o creștere, în Figura 2.9, a Suprafeței Efective de Reflexie. Dacă pentru cazul polarizării liniare se obține un maxim pentru unghiul  $\theta$  de  $90^\circ$ , atunci în cazul polarizării încrucișate maximul atins pentru unghiul  $\theta$  este de  $80^\circ$ . În ceea ce privește polarizarea încrucișată, după o valoare de  $180^\circ$ , avem o valoare a Suprafeței Efective de Reflexie constantă de -100 dBsm.



**Fig. 2. 4.** Unghiul  $\theta$  fluctuează  $0^\circ$  și  $360^\circ$  cu pas de  $2^\circ$  și o frecvență 800 MHz

În ceea ce privește polarizarea liniară, se constată o creștere a timpului comparativ cu valoarea din Figura 2.9, anterioară. Valoarea maximă a Suprafeței Efective de Reflexie a crescut cu greu. În timp ce lungimea de undă descrește, în cazul polarizării încrucișate valoarea maximă a Suprafeței Efective de Reflexie devansează valoarea minimă a polarizării liniare, deci pentru frecvențe înalte, nu va mai exista o diferență mare între ele. Suprafața Efectivă de Reflexie este strâns legată de unghiul de incidență în regim monostatic, dar și regim bistatic. În cazul în care unda incidentă atinge un colț al obiectului, atunci Suprafața Efectivă de Reflexie măsurată va fi mai mică decât în cazul în care aceasta atinge o față plană. Deopotrivă, datorită complexității obiectului, Suprafața Efectivă de Reflexie va fluctua foarte mult. Va atinge valoarea maximă când unda incidentă este reflectată de la o suprafață care dă lungimea rachetei și va avea o valoare mică, când se reflectată de la o suprafață care este corespunzătoare aripii avionului [32].

În modul bistatic, poziționarea corectă a antenei de recepție este importantă. Dacă din componenta obiectului analizat o suprafață plană reflectă unda, este important ca antena de recepție să fie localizată pe calea undei, altfel Suprafața Efectivă de Reflexie măsurată va fi mult mai mică decât pentru o poziție favorabilă a antenei de recepție. Cu privire la frecvențe cu lungimi de undă mai mari decât dimensiunile cubului luat în considerare, conform enunțurilor teoretice prezentate, așa cum era de așteptat, se observă o creștere a Suprafeței Efective de Reflexie.

## 2.5 Concluzii

Nivelul de putere al câmpului reflectat și proprietățile directive ale reflexiei depind, de asemenea, în mod semnificativ de valoarea raportului dintre dimensiunile țintei și lungimea de undă a radiației incidente. Când dimensiunile țintei sunt mai mici decât lungimea de undă ne găsim în regiunea Rayleigh a reflexiilor, atunci când sunt comparabile cu lungimea de undă, în regiunea de reflexii rezonante, nivelul puterii reflectate este semnificativ mai mare decât cel obținut în cazul în care dimensiunile țintei sunt mai mari decât lungimea de undă a câmpului electromagnetic incident – zona optică a reflexiei.

Prin urmare, pot spune că Suprafața Efectivă de Reflexie este o mărime complexă, care caracterizează caracteristicile de reflexie ale unui obiect atunci când acesta este iradiat de o undă electromagnetică, iar valoarea sa depinde de raportul dintre dimensiunea obiectului și de unghiul de incidență, de lungimea de undă a radiației incidente, de rugozitate, de natura suprafeței, precum și de tipul radarului folosit, bistatic sau monostatic.

În consecință, Suprafața Efectivă de Reflexie poate fi micșorată în două metode, astfel:

- prima metodă implică utilizarea de materiale sau amestecuri de substanțe care atenuează unda electromagnetică incidentă. Atenuarea rezultă din conversiei energiei electromagnetice incidente în căldură, astfel încât materialul trebuie să aibă pierderi magnetice și electrice;
- a doua metodă este schimbarea formei suprafeței astfel încât fenomenul de difuzie să domine reflexia undei electromagnetice incidente. Acest lucru se realizează prin împărțirea suprafeței plane în suprafețe cât mai mici, care sunt conectate în unghiuri obtuze.

## Capitolul 3

### 3. Detecția și rezolvarea conflictelor aeriene în Managementul Traficului Aerian

Acest capitol propune o cercetare privind teoria, standardul de avertizare inteligentă a coliziunilor aeriene și metodologia optimizării din punct de vedere al ingineriei sistemelor. Se prezintă procedura de luare a deciziilor ATC, se stabilește obiectivul îmbunătățit cu privire la luarea deciziilor ATC, se propune o îmbunătățire a detectării conflictelor aeriene și o soluționare a conflictelor în spațiul 4D între mai multe aeronave. Strategia de avertizare a coliziunilor pe termen lung și mediu se realizează prin adaptarea altitudinii și a vitezei, și strategia de avertizarea a coliziunilor pe termen scurt se realizează prin adaptarea direcției, aceste strategii fac ca sistemul ATC să fie unul absolut. Principala preocupare a ATC-ului este de a menține o separare sigură între aeronave. Pentru realizarea detectării conflictelor, se ia în considerare incertitudinea privind poziția viitoare a aeronavelor și starea curentă a spațiului aerian, astfel că trebuie evaluată probabilitatea unor posibile conflicte aeriene viitoare. Cu privire la această sarcină este nevoie de un model, iar acest model trebuie să prevadă viitorul.

#### 3.1 Modele de conflict

Cu privire la viitorul sistem ATM, pentru a face față creșterii traficului aerian, activitate bazată pe traiectoria 4D este un concept important, care este definit ca o redare precisă a unei rute aeriene în timp și spațiu tridimensional. Luând în considerare conflictele dintre aeronave în plan orizontal bidimensional în care aeronava care vine din direcții diferite fuzionează cu waypoint-ul. Modelul vântului constituie doar componenta stochastică, ceea ce înseamnă inexactitatea predicției vântului ce constituie incertitudinea în anticipația meteorologică deterministă. În acest mod, vitezele vântului  $w_x$  și  $w_y$  fac referire la inexactitățile de anticipare ale vântului. Procesele aperiodice  $w_x(x, y)$  și  $w_y(x, y)$  sunt aproape ca o combinație liniară de funcții deterministe, care sunt înmulțite cu variabile aperiodice independente și care utilizează expansiunea Karhunen-Loeve (KL). Prin urmare, eroarea vântului este prezentată ca eroarea vântului care este corelată spațial cu numărul finit de variabile aperiodice independente care utilizează expansiunea KL. Rezolvând problema de control optim stochastic, pentru rezolvarea conflictelor, se generează traiectoria optimă, fără conflicte, sub incertitudinea vântului.

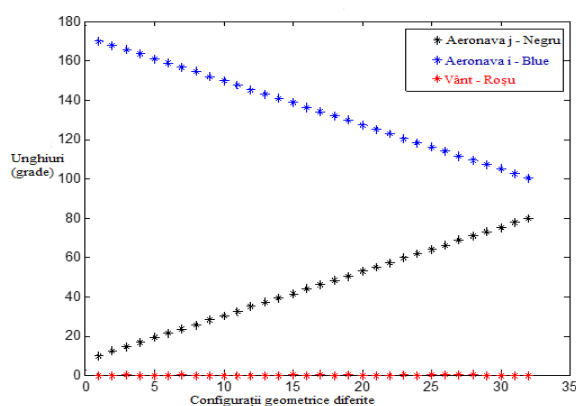
#### 3.2 Rezolvarea automată a conflictelor aeriene

Folosind algoritmul, Residual Mean Interacting Multiple Model (RMIMM) ca un estimator de stare, se dorește rezolvarea problemelor de urmărire a mai multor aeronave precum și administrarea identității aeronavelor într-un mediu vacarm pentru ATC. De la un sistem radar de supraveghere pentru Controlul Traficului Aerian, *clutter* (dezordine, aglomerație) este o măsură zgomotoasă; *clutter* - se definește ca măsurători rezultate de la non-ținte, cum ar fi vremea, obiectele din proximitate, dar și interferențele electromagnetice care sunt aleatorii ca intensitate, număr și locație. Având în vedere măsurătorile zgomotoase nu putem presupune cum arată traiectoria și ce număr de aeronave se află în regiunea de supraveghere.

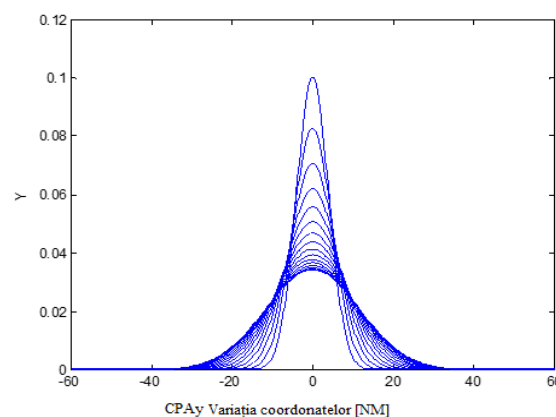
Scopul de urmărire a mai multor aeronave precum și administrarea identității aeronavelor într-un mediu vacarm/zgomotos este urmărirea concomitentă a identităților și a traiectoriilor aeronavelor. Pentru dezvoltarea unui algorit de detectarea și rezolvarea conflictelor necesar ATC-ului, un algoritm de estimarea stării este necesar pentru urmărirea traiectoriilor aeronavelor din zona de supraveghere a senzorilor (exemplu: radar).

### 3.3 Protocol îmbunătățit

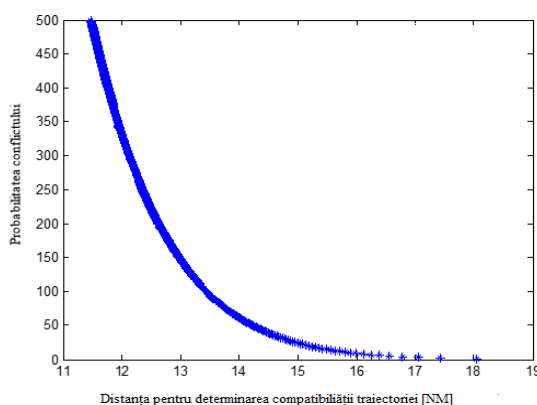
În cazul mai multor aeronave **protocolul îmbunătățit** asigură siguranța conflictului inexact. În **protocolul îmbunătățit**, pentru rezolvarea conflictului aerian este necesară schimbarea de direcție a aeronavei care crește odată cu scăderea  $\theta_{min}$ . Există posibilitatea ca  $\theta_{min}$  să fie mic, dacă în rezolvarea conflictelor sunt mai multe aeronave. Prin urmare, pe traiectoria inițială a aeronavei perturbarea va fi mare, astfel păstrarea unui grup mic de rezolvare a conflictului este de dorit [37]. Prin aplicarea protocolului de avertizare a conflictelor, se poate reduce dimensiunea grupului de rezolvare. Dacă avem cazul a trei aeronave, două dintre cele trei aeronave iau manevră de rezolvare a conflictului aerian, în acest mod avem o perturbare mai mică pe rutele dorite, decât dacă cele trei aeronave luau manevră de rezolvare a conflictului. Dacă avem patru aeronave, una dintre cele patru aeronave este exclusă din grupul de rezolvare, astfel că în implicarea pentru manevra de rezolvare a conflictului sunt implicate restul de trei aeronave. Dacă avem cazul a zece aeronave, doar opt aeronave pot evita conflictele aeriene, iar restul de două aeronave sunt excluse din grupul de manevră.



**Fig. 3. 1.** Aeronavele i, j - evoluția unghiurilor de vânt al Factorului Geometric maxim



**Fig. 3. 2.** Funcția densității probabilității al Factorului Geometric maxim



**Fig. 3. 3.** Rezolvarea conflictului aerian – Caz 3

### 3.4 Concluzii

În concluzie, iau în calcul problema detectării probabilistice a conflictelor, astfel încât elementul cheie pentru îndeplinirea viitoarelor sisteme de trafic aerian sunt diferitele incertitudini, care sunt luate în considerare în timpul zborului. Astfel a fost propus un algoritm îmbunătățit de detectare stohastică în ceea ce privesc conflictele aeriene.

## Capitolul 4

### 4. Optimizarea algoritmului probabilistic de rezolvare a conflictelor din spațiul aerian

În acest capitol va fi propus un algoritm de rezolvare automată a conflictelor din spațiul aerian real, bazat pe un algoritm original. Procedurile Standard de Operare (SOPs) – sunt orientate în interesul menținerii eficienței și a siguranței, dar și către o aplicare maximă a autorizării zborului. Totuși aceste proceduri de operare trebuie să fie satisfăcătoare de flexibile pentru a autoriza piloții să zboare chiar și în caz de eșec al funcțiilor automate, sau eșecul unora dintre funcții, în scopul de a-și menține nivelul de competență, între antrenamentele recurente efectuate de echipajul de zbor, pe simulator. Acest lucru este extrem de important pentru toate companiile aeriene cărora le este permis să extindă această durată de șase luni între antrenamentele realizate pe simulatorul de zbor.

#### 4.1 Cerințe tehnice aplicabile pentru automatizarea navigației aeriene

##### **Schimbarea controlului lateral și secvențierea punctelor intermediare de zbor.**

Conform profilului lateral al avionului, traiectoria de zbor este formată din mai multe segmente de zbor. Marea majoritate a schimbărilor cursului de zbor sunt tratate drept tranziții de tip „flyby”. Activarea anticipată a următoarei comenzi de control în planul vertical de zbor este necesară pentru a se evita depășirea segmentului respectiv. Distanța de ruluu a aeronavei este selectată în funcție de cât de repede răspunde aeronava la modificarea poziției eleroanelor. Tranzițiile de tip „flyby”, care însă necesită un schimb al cursului mai mare de 135°, sunt construite pentru o depășire planificată a segmentului de zbor respectiv.

Inițierea tranziției de viraj și secvența punctului intermediar, nu este aceeași pentru toate tranzițiile de tip „flyby”. Punctul este inițial secvențiat, în mod logic, la punctul bisector al virajului, în timpul segmentului de tranziție. Controlul de ruluu este bazat pe starea curentă a aeronavei, calculată de către funcția de navigație și de profilul lateral, care este furnizat de către funcția de predicție a traiectoriei de zbor, ghidarea aeronavei produce astfel o comandă de control a unghiului de ruluu. Această comandă este restricționată chiar de către limitele de performanță proprii a aeronavei, dar este și influențat de necesitatea asigurării unui confort continuu al pasagerilor, dar și de spațiul aerian care este disponibil, pentru a se executa manevra. Această comandă are rolul de a ajuta la menținerea aeronavei pe traiectoria corectă, presetată. Controlul de ruluu este de obicei o comandă simplă, generată din cauza deviațiilor de la traiectorie.

Pentru virajele planificate sunt calculate unghiuri nominale de ruluu. Unghiul nominal de ruluu este zero pentru segmentele de zbor drepte, dar corespunde unghiului de ruluu planificat, care este folosit pentru calculul segmentelor de tranziție, care urmează ulterior executării manevrelor de viraj necesare.  $Roll = xtrk\ gain \times xtrk + trkgain \times trkerror + \theta_{nominal}$  (4.3) unde:  $\theta_{nominal}$  - este unghiul de ruluu nominal, care este cel planificat/setat.

Valorile necesare pentru optimizare, care sunt folosite pentru acest sistem de comandă și control al zborului, sunt caracteristice pentru îndeplinirea criteriilor de performanță ale unui anumit tip de aeronavă, fiind specifice și respectivului sistem de control al zborului, care a fost considerat.

**Funcțiile de ghidare a aeronavei într-un plan vertical de zbor.** Funcția de ghidare în planul vertical de zbor, oferă comenzi pentru înclinarea aeronavei dar și pentru nivelul forței de propulsie, pentru a se controla parametrii de viteză, de propulsie și de altitudine (unele sisteme FMS – Flight Management System oferă controlul automat numai asupra anumitor parametrii, în funcție de arhitectura aeronavei). Similar funcției de ghidare în planul lateral de zbor, funcția de ghidare în plan vertical, oferă parametrii de ghidare dinamici pentru segmentul de zbor,



pentru a oferi echipajului din cabina de pilotaj, profilul zborului în planul vertical. Spre deosebire de parametrii de ghidare în planul lateral, parametrii pentru ghidarea aeronavei în plan vertical sunt dependenți de faza de zbor, într-o oarecare măsură. În același mod pot fi calculate timpul și distanța până la orice punct, precum și altitudinea punctului respectiv raportată la sol.

#### 4.1.1 Tranziția automată între etapele de zbor

Funcția de ghidare în plan vertical controlează schimbul realizat între fazele de zbor, în funcție de anumite criterii specifice, care trebuie luate în calcul. Schimbul de la faza din procedura de urcare spre faza de croazieră, are loc, de obicei, atunci când aeronava se află foarte aproape de altitudinea specificată în planul de zbor inițial.

$$|Cruise\ altitude - current\ altitude| < capture\ gain \cdot current\ vertical\ speed \quad (4.8)$$

Tranziția de la faza de croazieră la faza de coborâre se poate efectua în mai multe moduri. Dacă echipajul a inițiat faza de coborâre prin micșorarea altitudinii de zbor, care a fost selectată, atunci procedura de coborâre va fi inițiată într-un mod automat, la o distanță optimă față de punctul de începere a coborârii, calculată de către sistemul automat, pentru a se permite astfel avionului să micșoreze viteza. Dacă echipajul de zbor nu a inițiat încă faza de coborâre prin micșorarea altitudinii selectate, atunci etapa de zbor de croazieră, va continua dincolo de punctul de începere a procedurii de coborâre, până atunci când altitudinea care a fost selectată, este ulterior și micșorată. În general, echipajul de zbor este ajutat în vederea inițierii etapei de coborâre înainte de a se atinge punctul de începere a secvenței de coborâre, prin instrucțiuni din partea controlului de trafic aerian.

#### 4.1.2 Schimbarea segmentului de zbor în plan vertical

Similar cazului anterior prezentat și anume cel al profilului de zbor din planul lateral, este acum, în planul vertical de zbor, necesară anticiparea activării tranziției de la un segment la altul, astfel încât segmentul următor să poată fi atins, fără ca aeronava să poată să îl depășească cumva. Astfel, devine necesară existența și aplicarea corectă a unor criterii de selectare pentru tranzițiile realizate între segmentele de zbor existente pe traiectoria 4D. Aceste criterii au forma unei relații de inegalități între diferența de altitudine și diferența de viteză în planul vertical de zbor.

#### 4.1.3 Controlul automat al axei de tangaj a avionului

Comanda de tangaj, care este produsă de către funcția de ghidare în planul vertical de zbor, este bazată pe viteza selectată, traiectoria calculată de FMS- Flight Management System, precum și menținerea unei anumite altitudini de zbor în funcție de faza de zbor respectivă, dar și de situația considerată. Strategiile de control ar putea varia în funcție de implementările specifice a FMS [31]. Problema de detectare, dar și de soluționare a conflictelor din spațiul aerian este de o complexitate extrem de mare, ținând cont de numărul variabilelor care sunt implicate în studiu. Rezolvarea acestor conflicte de zbor presupune o modificare cât mai redusă a planului original de zbor. Din acest motiv, cea mai utilizată metodă este cea de modificare a nivelului de zbor, atunci când acest lucru este posibil. Pe lângă această metodă, modificarea vitezei de zbor a aeronavelor este, de asemenea, o abordare extrem de interesantă. În prezent, rezolvarea conflictelor prin modificarea vitezei de zbor a aeronavelor nu este folosită de către ATC - Control de Trafic Aerian, aceștia având la dispoziție modificarea traiectoriei de zbor și a nivelului de zbor, metode care sunt mai simplu de aplicat pe sistemele tehnice utilizate în prezent. Pentru testarea și implementarea corectă a algoritmului de rezolvare a conflictelor din spațiul aerian au fost considerate una sau mai multe perechi de aeronave, dispuse pe un cerc cu raza de 100 NM, care zboară către centrul cercului.

Voi considera următoarea structură a datelor de intrare:

**Tabel 1.** Structura considerată, a datelor de intrare în cadrul programului de calcul realizat

```
numberOfAircraft = {
  'aircraft1':
  {
    'originalSpeed': 200, # m/s
    'changedSpeed': 201, # m/s
    'direction': 55, # degree
    'altitude': 10000 # m
  },
  'aircraft2':
  {
    'originalSpeed': 200, # m/s
    'changedSpeed': 201, # m/s
    'direction': 25, # degree
    'altitude': 10000 # m
  }
}
```

În Tabelul 12 se poate observa un obiect principal denumit „numberOfAircraft”, care conține alte două obiecte având dimensiuni mici, fiecare reprezentând o anumită aeronavă, având o anumită viteză inițială, dar și o viteză care a fost schimbată ulterior, o anumită direcție și un nivel de zbor. Acest obiect va fi furnizat algoritmului de rezolvare a conflictelor în zbor, împreună cu raza cercului pe care îl voi considera pentru determinarea calculelor matematice ulterioare [63]. Implementarea algoritmului, intitulat Algoritm 1, va rula continuu, până atunci când toate conflictele aeriene au fost deja corectate, iar într-un final acesta va returna obiectul conținând toate aeronavele, deci întreg ansamblul considerat, cu absolut toate informațiile despre acestea, dar și valoarea funcției obiectiv de calculat. Funcția obiectiv este considerată ca fiind suma variațiilor vitezelor tuturor avioanelor studiate. Se va minimiza această sumă pentru a se rămâne cât mai aproape de planul inițial de zbor presetat.

În plus, algoritmul propus este limitat la rezolvarea conflictelor de zbor strict prin modificarea vitezei de zbor a aeronavelor. Această limitare ar putea duce la situații în care algoritmul nu poate determina corect o soluție, deci conflictul aerian nu ar putea fi corect rezolvat.

#### 4.2 Metode de optimizare ale algoritmului aplicat

Considerând că există un conflict între două aeronave considerate și, ținând cont de aceste posibile îmbunătățiri, o evaluare a unui conflict aerian s-ar putea face în următorul mod: 1) Este detectat conflictul dintre cele două aeronave și se compară vitezele de zbor ale aeronavelor; 2) Se calculează noile viteze de zbor, folosind coeficienții maximi admisibili din intervalul [-0.06, 0.03] pentru a verifica dacă este posibilă o soluție prin modificarea vitezei de zbor a aeronavelor; 3) Se verifică dacă vitezele maxime admisibile rezolvă conflictul aerian; 4) Dacă conflictul este rezolvat prin simpla modificare a vitezelor de zbor, atunci algoritmul propus va calcula automat coeficientul optim de modificare al vitezelor și va oferi o soluție optimă.

Ținând cont de aceste optimizări, au fost definite patru funcții pentru: evaluarea numărului de conflicte și al aeronavele care se află în conflict, a se calcula rapid vitezele aeronavelor, a modifica altitudinea aeronavelor, a optimiza rapid vitezele de zbor ale aeronavelor aflate într-un potențial conflict aerian. Astfel încât, aceste funcții vor ajuta la îmbunătățirea algoritmului 1, rezultând un nou algoritm.

#### 4.3 Concluzii

În acest capitol am propus un algoritm de rezolvare automată a conflictelor din spațiul aerian real, bazat pe un algoritmul original, explicat în extenso. În această nouă formă propusă, algoritmul ține cont de problemele anterior detectate și propune rezolvarea tuturor acestor probleme apărute în mod inevitabil în procesul de cercetare științifică. Prin înlăturarea tuturor elementelor aleatorii din algoritmul propus inițial, noua formă de implementare a acestuia este preconizată a fi mult mai rapidă și mai eficientă, în rezolvarea cu succes a tuturor conflictelor aeriene. De asemenea, comparativ cu forma anterioară, noul algoritm poate rezolva conflictele dintre aeronave și în cazul în care nu există o soluție bazată strict pe modificarea vitezei de zbor a acestora.

## Capitolul 5

### 5. Utilizarea metodei celui mai apropiat punct de coliziune pentru aeronavele fără pilot

Conținutul acestui capitol se concentrează pe dezvoltarea și testarea unui algoritm de detecție și rezolvare a conflictelor aeriene în ceea ce privesc aeronavele fără pilot. Astfel că, revizuirea istoricului detecției și rezolvării conflictelor aeriene este o etapă importantă. După o cercetare a literaturii de specialitate, scopul acestui capitol este de a dezvolta un algoritm CDR, care este bazat pe metoda celui mai apropiat punct de apropiere, pentru prevenirea conflictelor aeriene și pentru a evalua performanța algoritmului în care se folosește un simulator de zbor. Perioada actuală a cunoscut o dezvoltare rapidă a sistemelor de evitare a coliziunilor în zbor, aplicabile aeronavelor fără pilot, dar există și o dezvoltare a tehnologiei de comunicații aeriene, încercându-se eliminarea pilotului uman și de a se face numeroase aeronave fără pilot care să fie astfel complet autonome. Aeronavele fără pilot autonome (AUAV) întâmpină reale probleme atunci când doresc a se încadra în spațiul aerian al FAA. Dacă pe o traiectorie de zbor, un AUAV va declanșa un conflict aerian unde este implicată o altă aeronavă și se încalcă regulile FAA, AUAV-ul trebuie să aibă capacitatea de a detecta și de a rezolva conflictul astfel încât limitele de separare să se producă în deplină siguranță. De-a lungul timpului, diferite metode au fost implementate pentru detecția și rezolvarea conflictelor aeriene având diferite grade de complexitate.

#### 5.1 Ecuații de mișcare – dezvoltare

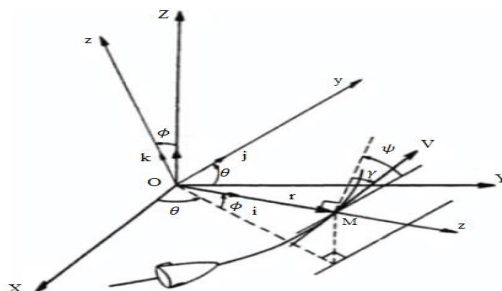
##### 5.1.1 Descriere poziție și viteză

Sunt prezentate ecuațiile de mișcare, care sunt utilizate pentru simularea traiectoriei aeronavei. Considerăm aeronava un obiect ca punct material, care are trei grade de libertate de translație, cu pozițiile  $X, Y, Z$  fiind în cadrul inerțial.

Considerăm starea de mișcare a aeronavei într-un cadru aliniat cu direcția vitezei și starea vitezei inerțială Nord, Vest, direcții în sus ( $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$ ). Sistemul este cunoscut sub denumirea de cadru de viteză, fixat pe aeronavă cu axa  $x_V$ , care este mereu orientată de-a lungul vectorului viteză. Acest cadru de viteză se obține din cadrul inerțial printr-un șir de două rotații: o rotație a unghiului  $\chi$  care este în jurul axei  $Z$ , apoi o rotație  $\gamma$  care este în jurul axei  $-y_V$ .

##### 5.1.2 Dezvoltarea ecuațiilor cinetice

Dezvoltarea ecuațiilor de mișcare pentru aeronavă începe cu cercetarea modelului 3DOF, prezentat în lucrarea [70], unde cele șase ecuații de mișcare sunt formulele cinematice, definite pe Pământul considerat sferic:



**Fig. 5. 1.** Sistem de coordonate

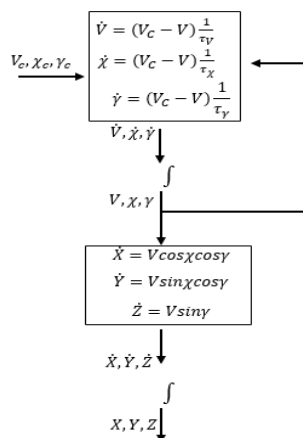
### 5.1.3 Liniarizarea ecuațiilor cinetice. Feedback

Pentru crearea unei traiectorii 4D, succedând un sistem exterior având buclă închisă, este nevoie de existența unui sistem interior cu buclă închisă, care să aibă controlul asupra stărilor de viteză. Pentru controlul manual al aeronavei, pilotul poate modifica unghiul de înclinare, unghiul de atac, dar și accelerația pentru a avea control. Este prezentat un controler automat de liniarizare automată a feedback-ului pentru realizarea acestei funcționalități, având beneficiul complementar de generarea unui model liniar cinetic având buclă închisă pentru dinamica vitezei.

### 5.1.4 Transformarea ecuațiilor cinematice

Determinarea vitezei inerțiale  $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$  se poate realiza prin una din cele două modalități. Ecuațiile lui Vinh [70] se pot transforma din coordonate polare inerțiale sferice centrate ale Pământului, în coordonate carteziene centrate inerțial la suprafața plană a Pământului.

În figura de mai jos, este reprezentată o diagramă bloc a dezvoltării ecuațiilor de mișcare. Modelul este un sistem cu buclă deschisă, în pofida faptului că denumirea este de model cu buclă închisă, se poate observa în figura de mai jos - bucla de feedback, în care efectul controlerului de liniarizare a feedback-ului este descris. Procesarea va fi introdusă pe un computer digital, iar modelul cu buclă deschisă este întrebuințat pentru constituirea unui sistem de control 4D Dimensional Path Following - 4PF, care, pe bază de comenzi ale traiectoriei de intrare, va controla poziția aeronavei în fiecare punct de pe traiectorie.

**Fig. 5. 2.** Diagramă bloc pentru un sistem cu buclă închisă (deschisă)

## 5.2 Schemă de control – prezentare generală - algoritm CDR

### 5.2.1 Schemă de control - urmărirea traiectoriei

Aeronava țintă considerată este un UAV, astfel misiunea se realizează în mod autonom prin utilizarea sistemului de control ce succedă ruta; iar controlul feedback-ului negativ este metoda de control folosită în sistem. Feedback-ul negativ folosește diferența dintre valoarea curentă și valoarea poziției de comandă, există o eroare, dar care trebuie minimizată acționare, pentru ca sistemul să aibă o valoare de stare constantă, iar aceasta corespunde cu valoarea comenzii. Sunt mai eficiente de a transforma din Sistemul de Referință Inerțial în cadru viteză, erorile, dinainte de a trece la controler. Pentru transformare, matricea a fost dezvoltată în subcapitolul 5.1, care poate fi adaptată și folosită pentru acționarea peste semnalele de eroare. Proporțional-Integrativ-Derivativ este folosit în procesarea semnalului pentru controler. Pentru

un sistem eficace, ușor de utilizat, și care să aibă un controler puternic în care să poată extinde sistemul în orice mod se dorește, se folosesc strategiile de compensare, care sunt îndeplinite de controlerul PID. O metodă simplă este *controlul proporțional*, care utilizează un factor de amplificare care este aplicat erorii pentru producerea unui semnal de ieșire, fiind proporțional cu semnalul de eroare. Însă, *controlul integrativ* lucrează prin integrarea semnalului de eroare cu înmulțirea unui factor de amplificare. *Controlul derivativ* folosește un factor de amplificare multiplicat cu derivata erorii pentru crearea unui semnal de ieșire. Modificările valorilor pentru factorii de amplificare a celor trei metode: proporțional, derivativ, integrativ, care afectează în diferite moduri sistemul de studiat. Astfel că, creșterea factorilor de amplificare integrativi și proporționali, vor contribui la o descreștere a timpului de simulare a sistemului dinamic, totodată crescând concomitent și valoarea limitelor pentru intervalul de timp considerat. Astfel că, creșterea factorului de amplificare va diminua eroarea staționară a sistemului considerat.

### 5.2.2 Formularea ecuațiilor mișcării relative

Ecuțiile de mișcare absolută ale cadrului inerțial, atât pentru vectorii de viteză cât și pentru vectorii de poziție pentru aeronava aflată în conflict, dar și pentru aeronava țintă.

Viteza și pozițiile relative ale aeronavei în comparație cu aeronava țintă sunt următoarele:  $\vec{V}_r = \vec{V}_B - \vec{V}_A, \vec{r}_r = \vec{R}_B - \vec{R}_A$  (5.38) ( $\vec{V}_r$  – vectorul vitezei relative;  $\vec{r}_r$  – vectorul poziției relative)

### 5.2.3 Algoritm CDR – formulare

Distanța și timpul de întârziere sunt două mărimi importante în logica CDR. Utilizând starea de mișcare relativă, aceste mărimi sunt comparate și calculate cu valorile critice, care ar putea duce la coliziune, sau pot rezolva condiții actuale pentru prevenirea coliziunii. La fiecare ciclu de calcul, componenta de detectare a conflictelor este mereu actualizată și permanent activă. Este activă componenta de rezolvare a conflictelor doar când este detectată o eventuală coliziune. Dacă există o eventuală coliziune, o traiectorie nouă se calculează pentru detectarea și rezolvarea conflictului aerian, astfel că, după îndepărtarea pericolului de coliziune se reia ruta traiectoriei inițiale. Pe sferă sunt o infinitate de puncte care vor rezolva conflictul, însă doar un singur punct este eficient pentru deplasarea aeronavei.

## 5.3 Simulator: buclă deschisă

Pentru simularea traiectoriei aeronavei ținte, vor fi utilizate software-uri pentru calcul și simulare, în MATLAB, fiind folosite pentru condițiile inițiale, generarea graficelor și a traiectoriilor de referință, iar Simulink-ul [78] va gestiona propagarea în timp și simularea modelului. Simulink-ul are mai multe setări pentru soluționarea unui set de ODE-uri. ODE4 este cel folosit, și implementează un Runge-Kutta de ordinul patru. Parametrii  $\tau_V, \tau_\chi, \tau_\gamma$ , utilizați în toate simulările, sunt constanți având valoarea 1. Mărimea pasului ODE4 = ct la 0,001 unități de timp. În ceea ce privește aeronava țintă, simulările numerice încep cu pozițiile inițiale la unitățile de distanță  $X = 0, Y = 0, Z = 0$ . În figura de mai jos, este prezentat modelul simulink în buclă deschisă, care corespunde schemei din anterioara Figură 5.6.

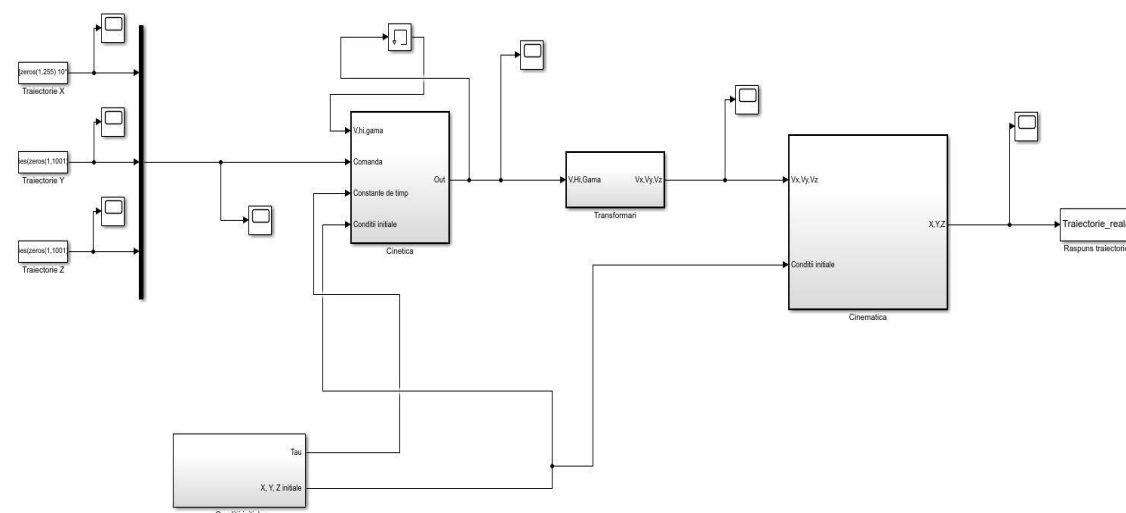


Fig. 5. 3. Simulink: modelul în buclă deschisă

Modelul cu buclă deschisă acceptă valorile inițiale calculate pentru  $X, Y, Z$  și  $\tau_V, \tau_\chi, \tau_\gamma$ , și acceptă  $V_C, \chi_C, \gamma_C$  fiind din zona de funcționare a Matlab, dar și propagă cinematica și cinetica aeronavei în cadrul vitezei, dar și în cadrul inerțial. În figura de mai jos, este prezentat un caz de simulare 3D a sistemului în buclă deschisă în care este utilizat zbor la nivel și drept; viteza inițială este de  $110 \frac{d}{s}$ , iar valorile inițiale  $\chi$  și  $\gamma$  sunt 0 rad. După 4 secunde se dă o intrare  $+10 \frac{d}{s}$  aeronavei, iar pe parcursul simulării numerice se continuă cu această viteză.

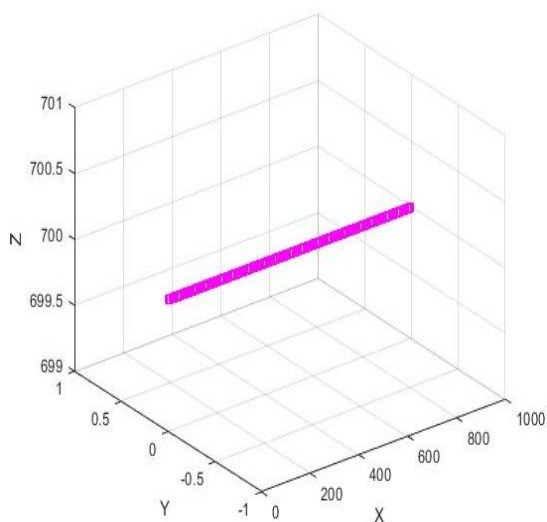


Fig. 5. 4. Model în buclă deschisă, la nivel orizontal și traiectorie dreaptă,  $V_c = +10 \frac{d}{s}$

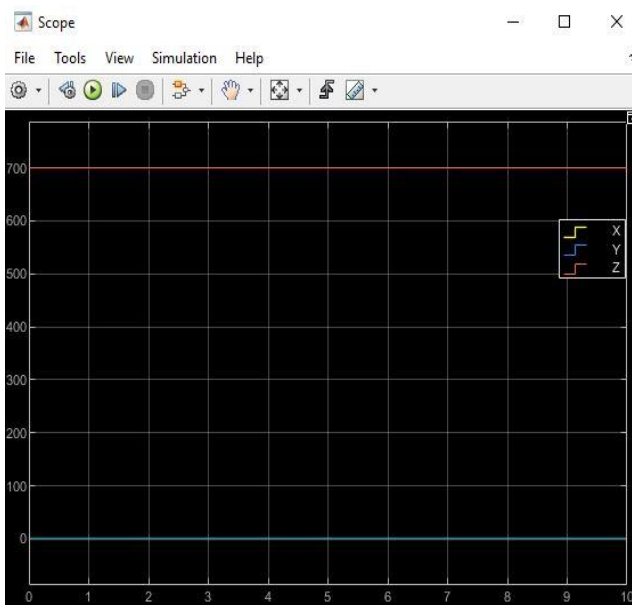
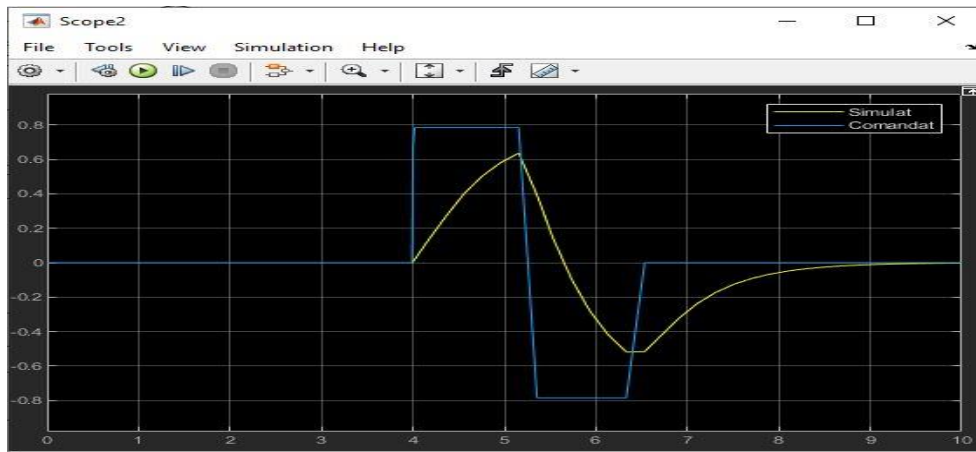


Fig. 5. 5. Buclă deschisă, dreaptă și la nivel  $h=700, V_c = +10 \frac{d}{s}$

În Figura 5.16, se observă faptul că, liniile de comandă y și z sunt suprapuse

În figura de mai jos se prezintă graficul  $\gamma$  și  $\gamma_C$ , în funcție de timp.

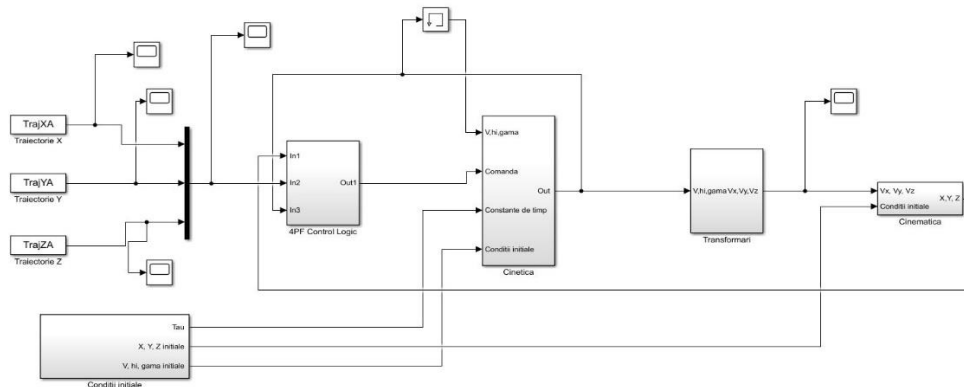


**Fig. 5. 6.**  $\gamma$  versut  $t$ , unde  $\gamma_C$  din  $\pm \frac{\pi}{4}$  radian

Din testările simulărilor, de mai sus, rezultă faptul că relațiile cinematice și cinetice îndeplinesc cerințele de calcul numeric.

#### 5.4 Simulator buclă închisă, cu 4PF

După fixarea logicii de control 4PF, subcapitolul 5.2.1, și după închiderea buclei, astfel simulatorul poate prelua condițiile inițiale, valorile parametrilor din zona de funcționare conform codului Matlab, coordonatele traiectoriei inerțiale  $X, Y, Z$ , și propagarea aeronavei în spațiul tridimensional. În raport cu modelul buclă deschisă, coordonatele inițiale în ceea ce privește traiectoria sunt constante. Figura 5.22 arată modelul Simulink în buclă închisă care are capacitatea 4PF. 4PF admite  $X_C, Y_C, Z_C$ , dinamica aeronavei emite comenzi de viteză  $V_C, \chi_C, \gamma_C$ , și ca intrări semnalele de feedback  $X, Y, Z$  și  $V, \chi, \gamma$ .



**Fig. 5. 7.** Schemă bloc a sistemului în buclă închisă, care are integrat blocul 4PF

#### 5.5 Simulator buclă închisă, cu 4PF+CDR

Diagrama bloc cu buclă închisă, este prezentată în figura de mai jos, având inclusă logica Detectarea și Rezolvarea Conflictelor (CDR). În „Cel mai apropiat Punct de Coliziune Logic” se calculează timpul de întârziere și vectorul de distanță, în care se introduc stările de viteză și de poziție pentru ambele aeronave, A și B, dar și ieșirile  $r_m$  și  $\tau_m$  – Figura 5.34.

În Figura 5.30 este prezentată prelucrarea internă a subsistemului CDR Logic cu ieșirile și intrările sale, aceasta este blocul funcțional privind algoritmul de rezolvare a conflictului aerian.

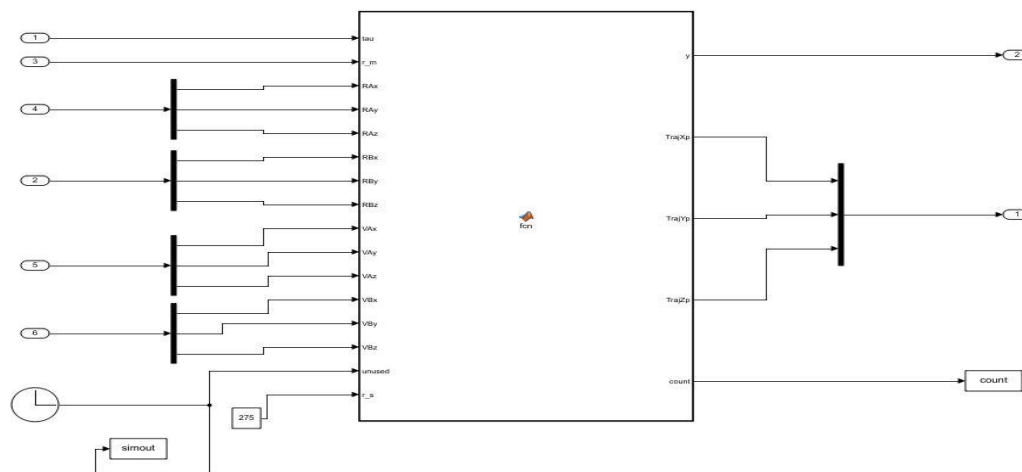


Fig. 5.8. CDR schemă logică

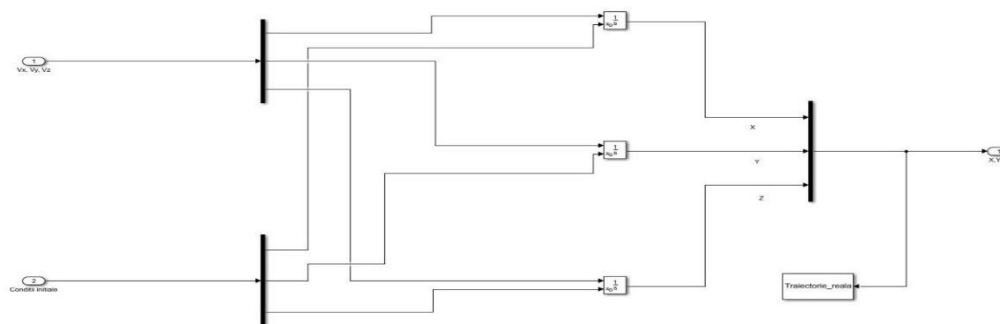


Fig. 5.9. Cinematica pentru sistemul în buclă închisă cu CDR

## 5.6 Concluzii

Aeronava simulată 3DOF are capacitatea de a accepta comenzi în acest cadru și poate converti aceste comenzi într-un Sistemul de Referință Inerțial pentru a prezenta clar poziția aeronavei în orice sistem legat de bord ori de sol. Utilizând Simulink-ul, a fost construit un simulator cu buclă deschisă pentru a se verifica capacitatea modelului 3DOF de a propaga în mod corespunzător traiectoria aeronavei în timp. Doar valorile pentru constantele de întârziere folosite limitează capacitatea modelului cu buclă deschisă la a respecta instrucțiunile  $V, \chi, \gamma$ . Liniarizarea prin feedback a EOM cinetică 3DOF ODE neliniară este validată folosind acest model. Au fost efectuate diferite cazuri de testare, cu anumite valori, și care au îndeplinit așteptările preconizate. În ceea ce privește cazul în care avem bucla închisă, în Simulink au fost prezentate o multitudine de scheme bloc. S-a testat simularea traiectoria aeronavei, în care a fost folosit un model pentru sistem cu buclă închisă sub efectul controlului de urmărire în buclă închisă. Controlul PID a fost selectat deoarece este o abordare eficientă și testată în timp, care produce răspunsuri predictibile atunci când se schimbă factorii de amplificare ale controlului



## Capitolul 6

### 6. Evitarea coliziunii între obiecte spațiale

În acest capitol vor fi prezentate în extenso două metode pentru evitarea coliziunii între două sau mai multe obiecte spațiale și se formulează un răspuns cert pentru a se preveni coliziunea efectivă. Detectarea și evitarea coliziunii este o problemă fundamentală pentru numeroase domenii care constau în a se cunoaște dacă, pentru oricare două obiecte de studiu există o probabilitate diferită de zero ca atunci când sunt în imediata apropiere, traiectoriile acestora să se intersecteze. Privitor la metodele de detectare a coliziunilor în zbor, literatura de specialitate consemnează două categorii de metode în domeniul discret și domeniul continuu.

#### 6.1 Importanța sistemelor de evitare a coliziunii în zbor

Interesul pentru dezvoltarea unui sistem de evitare a coliziunii datează din anii 1950 când s-a produs o coliziune aeriană între două aeronave de transport aerian ale armatei Statelor Unite ale Americii deasupra Marelui Canyon. În anii 1970, SUA a dezvoltat un sistem numit BCAS (Beacon Collision Avoidance System) sistem care se baza pe utilizarea răspunsurilor primite de la transpondere SSR (Secondary Surveillance Radar). După această catastrofă, o varietate de sisteme de evitare a coliziunilor au fost studiate, până în anul 1974 când Administrația Federală de Aviație (FAA – Federal Aviation Administration) și-a focalizat atenția asupra sistemului de evitare a coliziunii radiofar (BCAS – Beacon Collision Avoidance System), un sistem aerian bazat pe transponder.

#### 6.2 Importanța studiului aprofundat a tematicii ACAS/TCAS.

Pe parcursul ultimilor ani, dezvoltarea Sistemelor de Aeronave Pilotate de la Distanță (RPAS) a fost caracterizată printr-o creștere exponențială, atât în aplicații militare, cât și în medii civile și comerciale. Una dintre cele mai recente și promițătoare soluții propuse se bazează pe dezvoltarea sistemelor Sense and Avoid bazate pe utilizarea tehnologiei ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast), care a devenit obligatorie începând cu anul 2020 în SUA [1], dar și în Europa, pentru toate aeronavele care zboară în spațiile aeriene din clasele A, B și C [2]. Referințele [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] arată CAS-uri (Collision Avoidance Systems) bazate pe tehnologia ADS-B. Aceste metode diferă atât pentru metodele de calcul ale manevrei de evitare a coliziunilor, cât și pentru cele de detectare a coliziunilor în zbor.

#### 6.3 Algoritmi generali pentru detectarea coliziunii între două obiecte virtuale

Problema coliziunii coincide cu determinarea existenței unui punct interior pentru două sau mai multe obiecte. Algoritmul ar consta în verificarea apartenenței fiecărui vârf al poliedrului unuia dintre obiecte în sferile determinate de oricare patru vârfuri din obiectul celălalt, folosind faptul că un punct  $E$  se află în interiorul sferei determinată de punctele  $A, B, C, D$  dacă  $\det(A) > 0$ , pe sferă dacă  $\det(A) = 0$  și în exteriorul ei dacă  $\det(A) < 0$ , unde  $A = (ax, ay, az)$ ,  $B = (bx, by, bz)$ ,  $D = (dx, dy, dz)$  și  $E = (ex, ey, ez)$ . Procedura nu poate fi aplicată datorită numărului mare de cazuri ce trebuie tratate.

O altă abordare propusă de Gilbert-Johnson-Keerthi [88] care modelează problema ca o problemă de programare pătratică în care se caută puncte  $P$  în primul obiect și puncte  $Q$  în cel de-al doilea obiect, care minimizează distanța  $v$  dintre  $P$  și  $Q$  (problemă matematică de optimizare). De asemenea, procedura nu poate fi aplicată datorită numărului mare de cazuri ce trebuie tratate.

Aplicația dezvoltată în acest capitol implementează metodele expuse mai jos:

### 6.3.1 Metoda 1

**Detectarea coliziunii abordată drept o problemă geometrică.** Metoda geometrică [89] consideră că obiectele sunt înscrise în poliedre convexe (tetraedre sau paralelipede). Consider, în cele ce urmează, două astfel de poliedre convexe P1 și P2 care cu fost definite de vârfurile:

$$v_i, \text{ unde: } i = \{1, 2, \dots, n_1\}, v_i = \begin{bmatrix} v_i^x \\ v_i^y \\ v_i^z \end{bmatrix} \text{ și } w_j, \text{ unde: } j = \{1, 2, \dots, n_2\}, w_j = \begin{bmatrix} w_j^x \\ w_j^y \\ w_j^z \end{bmatrix}. \text{ Metodologia de}$$

rezolvare a acestei probleme se bazează pe algoritmul numit interior-point. Problema poate fi scrisă sub formă canonică astfel:  $f = \min \mu \phi$  (6.11)

Dacă  $f = 0$ , obiectele se intersectează.

### 6.3.2 Metoda 2

**Detectarea coliziunii ca problemă de analiză a unei ecuații algebrice**

Wang [90], Choi [91] reduc problema detectării coliziunii continue la o problemă de analiză a unei ecuații algebrice. Metoda algebrică [90] consideră că obiectele sunt înscrise în primitive geometrice (elipsoizi sau în particular sfere). Ecuația implicită a elipsoidului, în coordonate

$$\text{carteziene este: } \frac{(x-xc)^2}{a^2} + \frac{(y-yc)^2}{b^2} + \frac{(z-zc)^2}{c^2} - 1 = 0 \quad (6.13) \text{ unde: } (x, y, z) \in$$

$[-a, a] \times [-b, b] \times [-c, c] \subset R^3$ , iar  $xc, yc, zc$  – este centru de simetrie al elipsoidului. În cazul în care mișcarea obiectelor este dependentă de timp, în cazul elipsoizilor  $A(t)$  și  $B(t)$  se poate scrie ecuația caracteristică:

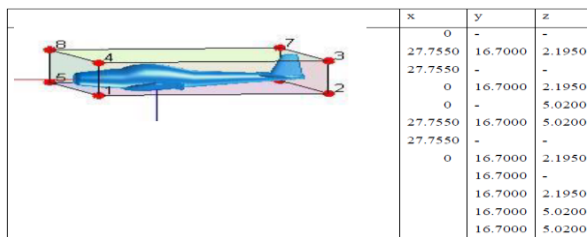
$$f(\lambda, t) = \lambda^4 + a(t)\lambda^3 + b(t)\lambda^2 + c(t)\lambda + d(t) \quad (6.25)$$

## 6.4 Realizarea aplicației de detectare și simulare a coliziunilor în zbor dintre obiecte virtuale

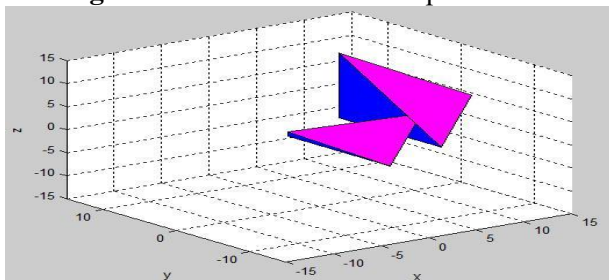
Primul model folosește ca frontieră pentru obiect “vârfulurile” fețelor lui. Din analiza mai multor obiecte virtuale CAD, în format STL, s-a concluzionat că nu pot fi folosite toate vârfurile originale deoarece, fiind foarte numeroase, produc un consum mare de calcul sau aparțin unor suprafețe concave. Folosind unele vârfuri se pot construi poliedre convexe sau alte primitive geometrice de bază: paralelipede, sfere, elipsoizi, cilindrii și conuri pentru a include obiectul. În cazul folosirii vârfurilor obiectelor originale ar fi necesară verificarea convexității cu unul dintre algoritmi specializați (Andrew, [92], Myszowski95, sau Quickhull).

Modelul care folosește metoda algebrică consideră că obiectele sunt înscrise în primitive geometrice descrise analitic. În acest caz aplicația folosește elipsoizi. Faza de proiectare stabilește arhitectura (componentele, interfețele și modul lor de comportare). Codul aplicației este scris în Matlab, iar aplicația a fost testată. Pentru verificarea algoritmului care implementează Metoda 1 s-au făcut diferite animații luându-se două sau trei obiecte similare/diferite a căror mișcare a fost independentă și aleatoare [49]. Suprafața poliedrală convexă care mărginește obiectul se creează folosind valorile extreme ale coordonatelor vârfurilor extrase din obiectele stl, sau, pentru cazuri particulare se poate construi ușor prin câteva puncte. Suprafața poliedrală împarte spațiul în două regiuni distincte: interior și exterior. Aplicația privind analiza evenimentului coliziune pe baza algoritmului folosește ca obiecte doar vârfurile poliedrelor. Pentru verificarea algoritmului s-a folosit și rezultatul offline a unei simulări JSBSim pentru o aeronavă cu următoarele date: time, v, altitudine, phi, theta, psi, longitude, latitude, iar celelalte date au fost create random în limite acceptabile.

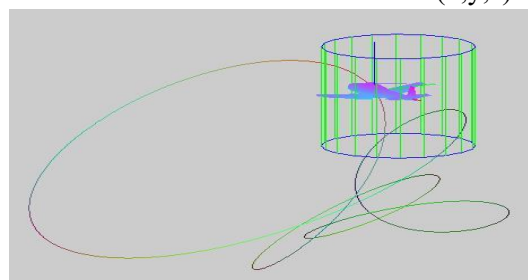
## 6.5 Testare aplicație metoda 1



**Fig. 6. 1.** Aeronava înscrisă în poliedrul convex determinat de vârfurile de coordonate (x,y,z)



**Fig. 6. 2.** Reprezentarea grafică a coliziunii dintre tetraedrele considerate



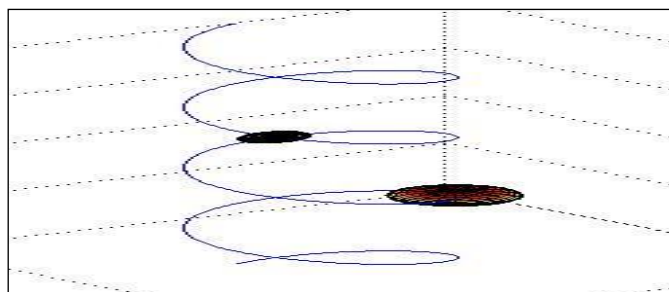
**Fig. 6. 3.** Reprezentarea grafică a evoluției aleatoare a unui aeronave care se consideră a fi înscrisă în spațiu într-un volum virtual de formă cilindrică

## 6.6 Testare aplicație metoda 2

$$\frac{(x-xc_i)^2}{a_i^2} + \frac{(y-yc_i)^2}{b_i^2} + \frac{(z-zc_i)^2}{c_i^2} - 1 = 0, \quad i = 1,2 \quad (6.27)$$

$$a1=5;b1=5;c1=5; xc1=0;yc1=0;zc1=0;$$

$$a2=3;b2=2;c2=4; xc2=0;yc2=0;zc2=0;$$



**Fig. 6. 4.** Reprezentarea grafică a evoluției în cazul elipsoizilor, pentru care traiectoriile sunt definite în mod analitic

## 6.7 Concluzii

A fost realizată o abordare de programare liniară, în care au fost prezentate două metode de evitare a coliziunii între două sau mai multe obiecte spațiale. Dacă proiectarea unor algoritmi pentru detectarea coliziunii dintre diferite obiecte geometrice nu a fost foarte dificilă, adevărata provocare a apărut atunci când s-a cerut detectarea coliziunii într-un mediu cu obiecte în mișcare având viteze arbitrare – Continuous Collision Detection. Dezvoltările recente în hardware și software au permis tehnologiei realității virtuale să ofere instrumente foarte puternice pentru construcția mediului virtual interactiv comun utilizatorului și obiectelor, în care pot fi create scenarii cât mai realiste pentru diferite tipuri de analize. Acest studiu s-a finalizat cu realizarea unei aplicații software de simulare a coliziunii obiectelor a căror poziție și orientare în spațiul tridimensional se schimbă. Aplicația poate fi folosită doar pentru analize și simulare, nu poate fi folosită pentru implementarea pe sisteme reale ambarcabile, deoarece îi lipsește comunicarea dintre sistemul de calcul și obiecte sau interobiecte, ceea ce reprezintă o direcție viitoare de cercetare și dezvoltare a lucrării.

## Capitolul 7

### 7. Concluzii Generale, Contribuții Originale, Direcții Viitoare de Cercetare și Sinteza Lucrărilor

#### 7.1 Concluzii Generale

Cercetarea abordează un domeniu de maxim interes și de actualitate, fiind într-o continuă dezvoltare, care contribuie la creșterea siguranței zborului aeronavei în spațiul aerian flexibil. Tematica abordată parcurge următoarele obiective stabilite:

##### - *Capitolul 1*

- evidențierea tendințelor actuale ale sistemului ATM, din Europa și SUA ;
- Europa prezintă un nivel mai ridicat de fragmentare și operează cu mai multe facilități fizice decât Statele Unite;
- analiza punctelor comune, a diferențelor în ceea ce privește traficul aerian, precum și a factorilor ce influențează performanța în domeniul aerospațial.

##### - *Capitolul 2*

- prezentarea modelului propus pentru studiul Radar Cross Section;
- detalierea evoluției realizării Radar Cross Section;
- realizarea studiului experimental, în care a fost creat un obiect complex, fiind analizat într-o manieră monostatică și bistatică;
- prezentarea coordonatelor punctelor ce definesc obiectul;
- au fost analizate la diferite unghiuri și frecvențe, astfel încât Suprafața Efectivă de Reflexie poate fi redusă prin două moduri: utilizarea de materiale ori amestecuri de substanțe care atenuează unda electromagnetică incidentă, și schimbarea formei suprafeței astfel încât fenomenul de difuzie să domine reflexia undei electromagnetice incidente.

##### - *Capitolul 3*

- prezentarea modelelor de conflict și propunerea unui algoritm îmbunătățit;
- simularea a două aeronave în care acționează și vântul, fiind utilizat noul algoritm îmbunătățit;
- analiza și luarea deciziilor în momentul în care se detectează conflictul aerian, imediat sistemul inițiază rezolvarea conflictului organizată în patru etape;
- identificarea intrusului în Zona Spațiul Aerian Protejat, detectarea conflictului, se calculează o nouă traiectorie pentru rezolvarea conflictului, planul de zbor fiind restabilit imediat ce separarea a avut loc în condiții de siguranță;
- analiza problemei detectării probabilistice este determinat elementul cheie, sunt incluse diferitele incertitudini, care sunt luate în considerare în timpul zborului.

##### - *Capitolul 4*

- evidențierea cerințelor tehnice privind automatizarea navigației aeriene;
- crearea unei structuri a datelor de intrare în cadrul programului de calcul realizat, precum și descrierea modului de lucru;
- descrierea algoritmului 1 și a funcției obiectiv, precum și implementarea acesteia;
- descrierea metodelor de optimizare pentru algoritmul aplicat, iar în funcție de aceste metode au fost definite și funcțiile necesare rescrierii algoritmului propus;
- analiza noii forme a algoritmului denotă faptul că, acesta poate rezolva conflictele dintre aeronave și în cazul în care nu există o soluție bazată strict pe modificarea vitezei de zbor.

## - Capitolul 5

- aeronava de studiu 3DOF prezintă capabilitatea de a permite comenzi și de a converti aceste comenzi într-un Sistem de Referință Inerțial pentru a se determina clar poziția aeronavei în orice sistem legat de aeronavă sau de pământ;
- aplicând Simulink-ul, a fost implementat un simulator cu buclă deschisă pentru a se evalua capacitatea modelului 3DOF de a extinde traiectoria aeronavei în timp;
- constantele de întârziere utilizate limitează modelul cu buclă deschisă la a satisface instrucțiunile  $V, \chi, \gamma$ .

## - Capitolul 6

- calculul de programare liniară, a fost realizat prin două metode de evitare a coliziunii în zbor;
- generarea unor algoritmi pentru detectarea coliziunii dintre obiectele geometrice, detectarea coliziunii într-un mediu având obiectele în perfectă mișcare, dar cu viteze arbitrare – Continuous Collision Detection;
- dezvoltările software au admis tehnologiei realității virtuale să confere sisteme dinamice pentru elaborarea mediului virtual interactiv comun utilizatorului și obiectelor de studiat, putându-se astfel realiza scenarii cât mai aproape de realitate pentru o multitudine de studii de caz;
- realizarea unei aplicații software de simulare a coliziunii obiectelor mobile în spațiul tridimensional.
- analiza poate fi folosită și pentru o multitudine de noi simulări numerice pe sistemele reale amarcabile, pentru care trebuie realizată comunicarea dintre sistemul de calcul considerat și obiectele sau interobiectele noi, fapt care poate fi dezvoltat în viitor.

### 7.2 Contribuții Originale

1. Din analiza unui număr însemnat de informații bibliografice din multiple domenii manageriale și tehnice am realizat o analiză comparativă cu privire la diferențele dintre cele două sisteme ASM (Managementul Spațiului Aerian) de pe teritoriul SUA și al Uniunii Europene, prezentând utilitatea, optimizarea performanței și limitele fiecărui sistem, în avantajul sistemului global al transportului aerian.

2. Propunerea unui model matematic pentru studiul Radar Cross Section, unde cu ajutorul posibilităților și a direcțiilor de evoluție a RCS pentru o aeronavă s-a realizat:

- studiu experimental în care a fost creat un obiect complex;
- efectuarea experimentelor de simulare pentru diverse cazuri, la unghiuri și frecvențe diferite.

3. Propunerea unui algoritm îmbunătățit în ceea ce privește conflictele aeriene

- soluționarea unei game variate de cazuri pentru rezolvarea conflictelor aeriene;
- recunoașterea intrusului în Zona Spațiului Aerian Protejat, detectarea conflictului aerian, determinarea noii traiectorii pentru soluționarea conflictului, actualizarea planului de zbor după evitarea conflictului și restabilirea condițiilor de siguranță;
- studiul aplicației detectării probabilistice, implementarea noilor modele care includ diferitele incertitudini, acestea fiind precizate pe întreaga durată a zborului.

4. Propunerea unui algoritm de rezolvare automată a conflictelor din spațiul aerian real (bazat pe un algoritm original):

- crearea unei structuri a datelor de intrare;
- crearea de metode de optimizare a algoritmului aplicat;

- crearea unor funcții de optimizare;
- realizarea unui nou algoritm îmbunătățit.

#### 5. Analiza și crearea unei noi matrici de rotație în SC ales:

- crearea unui simulator în buclă deschisă, pentru a se verifica capacitatea modelului realizat;
- crearea simulatorului în buclă închisă cu CDR și 4PF.

#### 6. A fost realizată aplicația software de simulare a coliziunii obiectelor virtuale:

- realizarea arhitecturii aplicației;
- realizarea testării prin două metode pentru evitarea coliziunii între două sau mai multe obiecte spațiale;
- obținerea unor noi algoritmi de detectare a coliziunii dintre obiectele geometrice de studiu;
- implementarea software conform tehnologiei realității virtuale să permită sistemelor dinamice noi elaborări în mediului virtual corespunzător utilizatorului, dar și obiectelor de studiu, analizând scenariile foarte aproape de realitate pentru o multitudine de aplicații;
- dezvoltarea unei aplicații software pentru simularea coliziunilor dintre obiectele mobile situate în spațiul tridimensional.

### 7.3 Direcții viitoare de cercetare

Reluarea și aprofundarea în ceea ce privește bucla închisă cu CDR și cu 4PF, vor fi simulate traiectoriile curbate, traiectoriile liniare 2D și 3D, sau oricare asociație dintre aceste intrări.

Din materialele studiate pentru problema evitării coliziunii, nu este tratată problema revenirii pe cursul inițial după evitarea coliziunii, problemă încă nerezolvată în contextul unui spațiu aerian aglomerat, care poate introduce noi pericole de coliziune. Etapele următoare încearcă să rezolve problema globală a evitării coliziunii în zbor și a revenirii pe traseul dorit inițial. Pentru aceasta, spațiul trebuie să fie împărțit în zone de supraveghere în plan orizontal, distribuite în plan vertical conform rutelor aeriene și având intercalate, în planul vertical, zone temporare de triere necesare rezolvării problemei globale a pericolului de coliziune.

1. Delimitarea unei zone în planul orizontal de zbor curent, care sunt în funcție de viteza aeronavelor vizate;
2. În funcție de direcția de deplasare a aeronavelor se creează două formații de aeronave: unele care se pot înscrie într-un viraj stânga (viraj mai mic de 90 grade) pentru încadrarea într-un sens giratoriu ad-hoc pe stânga și altele care se pot înscrie într-un viraj dreapta (virajul mai mic de 90 grade) pentru încadrarea într-un sens giratoriu ad-hc pe dreapta. Menținerea distanței de protecție în sensul giratoriu se efectuează prin variația vitezei;
3. Traectoria aeronavei țintă nu trebuie să se intersecteze cu traiectoriile aeronavelor intrus și se poate înscrie pe direcția cerută de traseul de zbor.

### 7.4 Sinteza Lucrărilor

Doctoranda a publicat 18 de lucrări științifice în Domeniul Ingineriei și Management, toate au fost elaborate pe durata studiilor doctorale, dintre care: 8 (opt) articole/studii (4 în curs de publicare) publicate în reviste cotate **ISI**; 8 (opt) articole/studii publicate în reviste cotate **BDI**; 2 (două) cărți la o editură acreditată **CNCSIS** ca și coautor.

## Bibliografie selectivă

- [22] „COMPARISON OF AIR TRAFFIC MANAGEMENT-RELATED OPERATIONAL PERFORMANCE U.S./EUROPE,” 2019.
- [28] G. J.-P. D. V. Duong, „Sector-Less Air Traffic Management,” *4th USA/Europa Air Traffic Management R&D Seminar*, p. 158, 3-7 December 2001.
- [26] EUROCONTROL, „The impact of fragmentation in European ATM/CNS,” Belgium, 2006.
- [23] G. STROE, **M.-L. COSTEA**, MANAGEMENTUL SPAȚIULUI AERIAN, vol. I, MATRIX ROM București, 2020.
- [37] G. STROE, **M.-L. COSTEA**. MANAGEMENTUL SPAȚIUL AERIAN, vol. II, București: MATRIX ROM, 2020.
- [39] H. J.J. Browman, *Methods of Radar Cross-Section Analysis*, New York: Academic Press.
- [41] B. R. Mahafza, *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, CRC Press LLC.
- [42] G. STROE, **M.-L. COSTEA**, A. SEMENESCU „MODERN SURVEILLANCE RADAR FOR AIR TRAFFIC CONTROL,” *Journal Fiability and Durability*, vol. 2, 2020.
- [43] Gabriela STROE, **M.-L. COSTEA**, A. SEMENESCU „DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF A RADAR SURVEILLANCE SYSTEM,” *Journal Fiability and Durability*, vol. 2, 2020.
- [46] I. W. Liu, „Probabilistic aircraft mid air conflict resolution using stochastic optimal control,” în *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014.
- [45] I. W. Liu, „Probabilistic trajectory prediction and conflict detection for air traffic control,” *Journal of Guidance, Control and Dynamic*, vol. 34, nr. 6, pp. 1779-1789, 2011.
- [31] G. STROE, **M.-L. COSTEA**, A. SEMENESCU, „STUDY OF AUTOMATIC TRAFFIC ALERT AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM,” *Journal Fiability and Durability*, vol. No.2, pp. 83-92, December 2020.
- [63] „B772, San Francisco CA USA, 2013,” SKYbrary, San Francisco, 2013.
- [64] G. STROE, **M.-L. COSTEA**, A. SEMENESCU „OPTIMIZATION OF THE PROBABILISTIC ALGORITHM FOR RESOLVING AIRSPACE CONFLICTS,” *Journal Fiability and Durability*, vol. 2, 2020.
- [75] N.X. Vinh, *Flight Mechanics of High-Performance Aircraft*, Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [81] B. N. B. K. M. Yiannis Pangelis, „On The Feasibility of Using Sub-Scale Aerial Vehicles For Testing Full-Scale NAS Concepts,” în *AUVSI Unmanned Systems 2015 Conference*, Atlanta, Georgia, 4-7 May 2015.
- [95] Y.-K. C. B. M. W. W. Xiaohong Jia, „An Algebraic Approach to Continuous Collision Detection For Ellipsoids,” vol. 28(3), pp. 164-176, 30 November 2011.
- [96] YI-King Choi, Jiaye Wange, Myung-Soo Kim, „Efficient Collision Detection for Moving Ellipsoids Using Separating Planes,” *Computing*, 2004.
- [97] W. W. H. S. Baciu George, „RECODE: an image-based collision detection algorithm,” vol. 10, *Journal of Visualization Computer Animation*, 1999, pp. 181-192.
- [49] **Mihaela-Luminița Costea**, C. NAE. N. A., F. COSTACHE, I. ANDREI. G.-L. STROE. A. SEMENESCU, „Automatic Aircraft Collisions Algorithm Development for Civil Aircraft,” în *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2020.