



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ  
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2022-23

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ  
ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ –  
MASTER OF SCIENCE IN OPERATIONAL  
RESEARCH AND DECISION MAKING



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ:

ΑΜΥΝΑΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ  
(DEFENSE AND SECURITY)

Συνεργατική αναχαίτιση πολλαπλών  
πυραυλικών επιθέσεων  
(Cooperative Interception in a Multi-  
Missile Engagement)

Υπό:

Κωνσταντίνου Τσιτσιά

A.M.: 2024018107

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2025



Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του κ. Τσιτσιά Κωνσταντίνου εγκρίνεται:

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Καθηγητής Νικόλαος Ιω. Δάρας (Επιβλέπων):



Καθηγητής Βασίλειος Κουϊκόγλου:

Καθηγητής Νικόλαος Παπαδάκης:





ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό Κωνσταντίνου Τσιτσιά

Έτος 2025

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

*Αφιερώσεις*

**Στην οικογένειά μου**

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου, Νικόλαο Δάρα, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η ακαδημαϊκή του κατάρτιση και υποστήριξη, καθώς και το ενδιαφέρον του υπήρξαν εξαιρετικά καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της προσπάθειας που κρατάτε αυτή τη στιγμή στα χέρια σας.

Επιπλέον, ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένεια μου για την αγάπη, υπομονή και εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αποτελώντας το πιο σημαντικό μου στήριγμα σε κάθε βήμα της πορείας μου. Η συμπαράσταση τους ήταν για μένα πηγή δύναμης και έμπνευσης.

# Περιεχόμενα

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>12</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ .....</b>	<b>15</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>16</b>
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	17
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	17
<b>2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....</b>	<b>19</b>
2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΗ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΜΥΝΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	19
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ ΠΥΡΑΥΛΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΣΤΟΧΩΝ .....	20
2.3 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΗ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	22
2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ .....	25
<b>3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>28</b>
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ .....	28
3.2 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΧΟΥ ΚΑΙ ΠΥΡΑΥΛΩΝ .....	31
3.2.1 Σύστημα Αναφοράς και Κατάστασης – Δυναμικές Εξισώσεις Κατάστασης .....	32
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ (SHARING/NON SHARING) .....	33
3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ (INITIALIZATION) ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΤΩΝ .....	34
<b>4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ .....</b>	<b>36</b>
4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ (ΚΑΛΜΑΝ, IMM, PF) .....	36
4.2 ΕΚΤΙΜΗΤΗΣ IMM (INTERACTING MULTIPLE MODEL): ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΟ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΟ .....	37
4.3 ΕΚΤΙΜΗΤΗΣ MMPF (MULTIPLE MODEL PARTICLE FILTER): ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ .....	41
4.4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΒΑΣΕΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ .....	44
<b>5 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ / ΣΥΝΟΨΗ .....</b>	<b>46</b>
5.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	46
5.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ .....	48
5.3 ΤΑΚΤΙΚΕΣ/ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ .....	51
<b>6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....</b>	<b>54</b>

6.1	ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΟΙΧΤΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	54
6.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	55
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.</b>	
8.1	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ..... <b>ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.</b>	
8.2	ΟΡΙΣΜΟΙ, ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ, ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ..... <b>ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.</b>	

# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Γεωμετρική αναπαράσταση της εμπλοκής (Shaferman & Oshman, 2009: 3)

.....28

# Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη και σύγκριση δύο προηγμένων αλγόριθμων εκτίμησης, ως προς τη συνεργατική παρακολούθηση και αναχαίτιση ενός στόχου από πολλαπλούς πυράυλους. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι λειτουργίες ενός φίλτρου πολλαπλών μοντέλων MMPF και ένας αλληλεπιδρών εκτιμητής πολλαπλών μοντέλων IMM που βασίζεται στο επεκταμένο φίλτρο Kalman. Το βασικό σενάριο περιλαμβάνει την εκτίμηση των καταστάσεων που μπορεί να βρεθεί ένας ευκίνητος στόχος που εκτελεί απρόβλεπτους ελιγμούς, χρησιμοποιώντας γωνιακές μετρήσεις που λαμβάνονται από τους πυράυλους είτε υπό ένα αυτόνομο καθεστώς λειτουργίας, είτε ανταλλάσσοντας πληροφορίες μεταξύ τους.

Η εργασία παρουσιάζει το μαθηματικό μοντέλο της δυναμικής του στόχου και των μετρήσεων, καθώς και στον σχεδιασμό των αλγόριθμων IMM και MMPF για τις δυο λειτουργίες της μη συνεργατικής και συνεργατικής εκτίμησης. Μέσω εκτενών προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo, αναδεικνύεται η σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια εκτίμησης και στην ίδια την απόδοση της αναχαίτισης των πυράυλων στο συνεργατικό μοντέλο,, ενώ αναδεικνύεται και η υπεροχή του MMPF έναντι του IMM όσον αφορά την ταχύτητα της ανίχνευσης του ελιγμού του εχθρικού στόχου, καθώς και της τελικής ακρίβειας στην προσβολή του.

Η μελέτη καταδεικνύει την αξία της ανταλλαγής της πληροφορίας μεταξύ πολλαπλών πυράυλων ως προς τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων κατεύθυνσης και υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής κατάλληλου αλγόριθμου, προσαρμοσμένου ειδικά στις ανάγκες αλλά και στους περιορισμούς που παρουσιάζει κάθε εφαρμογή. Οι προτεινόμενες μέθοδοι, αποτελούν σημείο αναφοράς στην περαιτέρω εξέλιξη των συστημάτων αεράμυνας και αναχαίτισης υψηλής απόδοσης στα αβέβαια, σύγχρονα και μελλοντικά περιβάλλοντα του πολέμου.

# Abstract

This paper focuses on the development and comparison of two advanced estimation algorithms for the cooperative tracking and interception of a target by multiple missiles. More specifically, it analyzes the functions of a multiple model filter (MMPF) and an interactive multiple model estimator (IMM) based on the extended Kalman filter. The basic scenario involves estimating the states that an agile target performing unpredictable maneuvers may be in, using angular measurements taken by the missiles either in an autonomous mode or by exchanging information between them.

The thesis presents the mathematical model of target dynamics and measurements, as well as the design of IMM and MMPF algorithms for the two modes of non-cooperative and cooperative estimation. Extensive Monte Carlo simulations highlight the significant improvement in estimation accuracy and missile interception performance in the cooperative model, while also highlighting the superiority of MMPF over IMM in terms of the speed of detecting the enemy target's maneuver and the final accuracy of the attack.

The study demonstrates the value of information exchange between multiple missiles in optimizing the effectiveness of guidance systems and emphasizes the importance of selecting an appropriate algorithm, specifically tailored to the needs of the application.

# Γλωσσάριο

Αρχικολέξο	Πλήρης Ονομασία
IMM	Interacting Multiple Model
MMPF	Multiple Model Particle Filtering
PF	Particle Filtering
KF	Kalman Filter
EKF	Extended Kalman Filter
UKF	Unscented Kalman Filter
LOS	Line of Sight
OGL	Optimal Guidance Laws
C4ISR	Command, Control, Communication, Computers , Intelligence, Surveillance and Reconnaissance
MCDM	Multi Criteria Decision Making
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning
OR	Operational Research
CI	Cooperative Interception
MSDF	Multi Sensor Data Fusion
PN	Proportional Navigation
CMME	Cooperative Multiple Model Estimation
DDPG	Deep Deterministic Policy Gradient

# 1 Εισαγωγή

Η επιχειρησιακή έρευνα αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό εργαλείο στη διαδικασία της λήψης αποφάσεων, και έχει έναν σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη άμυνα, ιδίως στον τομέα των αντιπυραυλικών συστημάτων και της αναχαίτισης απειλών με απρόβλεπτα και δυναμικά χαρακτηριστικά. Τα τελευταία χρόνια, καθώς η πολυπλοκότητα και η δυνατότητα ελιγμών των εναέριων και βαλλιστικών στόχων έχουν αναπτυχθεί με ταχείς ρυθμούς, έχουν οδηγήσει την πολεμική βιομηχανία στην ανάπτυξη προηγμένων και συνεργατικών μεθόδων καθοδήγησης και αναχαίτισης πυραυλικών συστημάτων. (Dong et al., 2023; Yanushevsky, 2018). Εντός αυτού του πλαισίου, η συνεργατική αναχαίτιση πολλαπλών πυραυλικών επιθέσεων αποτελεί ένα από τα πλέον πρωτοποριακά και επίκαιρα ερευνητικά πεδία, συνδυάζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της καθοδήγησης του πυραυλικού συστήματος, την ανάλυση συστημάτων πολλαπλής στόχευσης και προηγμένους αλγόριθμους εκτίμησης καταστάσεως, έχοντας ως στόχο την βελτιστοποίηση και την μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας αντιμετώπισεως ευέλικτων και ταχέως μεταβαλλόμενων απειλών. (Su et. Al., 2018).

Με αυτά τα δεδομένα, η δυνατότητα ταυτόχρονης εκτόξευσης και συνεργασίας πολλαπλών πυραύλων εναντίον ενός ή περισσότερων εχθρικών στόχων αναβαθμίζει ριζικά την επιχειρησιακή ικανότητα των συστημάτων αεράμυνας. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή προσέγγιση, όπου κάθε πύραυλος λειτουργεί ανεξάρτητα βάσει των δικών του δυνατοτήτων, η συνεργατική αναχαίτιση επιτρέπει τη βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού του πυραύλου, τη μείωση της πιθανότητας μιας αποτυχημένης πρόσκρουσης στον στόχο, και αυξάνει σημαντικά τις πιθανότητες επιτυχούς αναχαίτισης, ακόμα και αν έρχεται αντιμέτωπος με ένα σενάριο εμπλοκής με εξαιρετικά ευέλικτους στόχους. (Su et al., 2018, Dong et al., 2023)

Το πεδίο της μελέτης και της εφαρμογής συνεργατικών αλγορίθμων καθοδήγησης και εκτίμησης της κατάστασης, λόγω χάρη το φίλτρο αλληλοεπιδρών πολλαπλών μοντέλων (IMM), ή το φίλτρο σωματιδίων πολλαπλών μοντέλων (MMPF), έχουν αποδειχθεί ότι προσφέρουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα κατά των παραδοσιακών μεθόδων αναχαίτισης (Yanushevsky, 2018; Song et al., 2023). Η θεωρία της εκτίμησης καταστάσεως καθορίζει τις



τεχνικές αυτές, που εκμεταλλεύονται τη διάχυση των μετρήσεων μεταξύ κάθε πυραυλικού συστήματος για την επίτευξη της συλλογικής πρόβλεψης και καθοδήγησης, και αξιοποιούνται από συστήματα με διακριτή δυναμική συμπεριφορά, όπως τα εναλλασσόμενα δυναμικά ελιγμών ενός στόχου.

### **1.1 Σκοπός της εργασίας**

Η παρούσα εργασία έχει ως βασικό της αντικείμενο την συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση και την βαθύτερη ανάλυση του θεωρητικού, μαθηματικού και τεχνολογικού υπόβαθρου της συνεργατικής αναχαίτισης σε σενάρια πολλαπλών πυραύλων. Συγκεκριμένα, εστιάζει:

- Στη διερεύνηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τις συνεργατικές τεχνικές καθοδήγησης και την εμπειρική τους απόδοση σε σχέση με τις μη-συνεργατικές μεθόδους. (Su et al., 2018; Dong et al., 2023)
- Στην αναλυτική παρουσίαση της μαθηματικής θεμελίωσης των σχετικών μοντέλων δυναμικών αισθητήρων και αλγορίθμων εκτιμήσεως,
- Στην επισήμανση των επιχειρησιακών και των τακτικών προεκτάσεων των ευρημάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα των αμυντικών συστημάτων.
- Στην συνοπτική παρουσίαση των ερευνητικών ζητημάτων και μελλοντικών τάσεων που υπάρχουν σήμερα στο πεδίο.

Η εργασία ακολουθεί μια αυστηρή βιβλιογραφική μεθοδολογία, άνευ πρωτότυπης πειραματικής έρευνας ή προσομοίωσης. Οι ερμηνευτικές και αξιολογικές τοποθετήσεις προέρχονται αποκλειστικά από την υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία και την βαθύτερη ανάλυση της.

### **1.2 Δομή της εργασίας**

Η διάρθρωση της εργασίας, σαφώς δομείται επί των στόχων και του περιεχομένου του αντικειμένου. Πιο αναλυτικά:

- Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή στο θεωρητικό και επιχειρησιακό πλαίσιο της συνεργατικής αναχαίτισης, περιγράφοντας αναλυτικά τη σημασία του θέματος και τις βασικές βιβλιογραφικές κατευθύνσεις.
- Ακολούθως, το δεύτερο κεφάλαιο προσεγγίζει σημαντικές προηγούμενες έρευνες, τάσεις ή εφαρμογές, με έμφαση στις τεχνικές της συνεργατικής καθοδήγησης και εκτίμησης καταστάσεως.
- Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται με λεπτομέρεια το μαθηματικό μοντέλο της τεχνικής συνεργατικής καθοδήγησης, ξεκινώντας από τις βασικές υποθέσεις, το δυναμικό μοντέλο μετρήσεων και την διαδικασία αρχικοποίησης των εκτιμητών, έως και τα βασικά σχήματα της αλληλεπίδρασης.
- Το τέταρτο κεφάλαιο θα είναι αφιερωμένο στην θεμελίωση και λειτουργία των κυριότερων αλγορίθμων εκτίμησης (IMM, MMPF), με συνοπτική σύγκριση των στη βάση βιβλιογραφικών αλλά και θεωρητικών κριτηρίων.
- Τέλος, η εργασία θα συνοψίσει τα βασικά συμπεράσματα, με ιδιαίτερη επισήμανση στα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς, και στις πρακτικές επιχειρησιακές συνέπειες, με αναφορά σε ανοιχτές επιστημονικές προκλήσεις.

Η εργασία αποσκοπεί να έχει ρόλο βιβλιογραφικού εγχειριδίου εστιασμένου στην τεκμηριωμένη θεώρηση, τόσο ακαδημαϊκά όσο και επιχειρησιακά, του φαινομένου της συνεργατικής αναχαίτισης πολλαπλών πυραυλικών απειλών.

## 2 Θεωρητικό και επιχειρησιακό πλαίσιο

### 2.1 Η έννοια της επιχειρησιακής έρευνας στη λήψη αποφάσεων αμυντικών συστημάτων

Η επιχειρησιακή έρευνα (Operational Research – OR), αποτελεί έναν διεπιστημονικό κλάδο της εφαρμοσμένης μαθηματικής επιστήμης, που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της λήψης αποφάσεων, βάσει μαθηματικών μοντέλων, εφαρμογών στατιστικής ή αλγοριθμικών τεχνικών. (Hillier & Liebermann, 2021). Η σημαντική της συνεισφορά στην αποτελεσματική διαχείριση πόρων, την αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγιών και τον σχεδιασμό πολύπλοκων στρατιωτικών επιχειρήσεων, βρίσκεται στον συγκροτημένο τρόπο κατά τον οποίο προσεγγίζονται καταστάσεις και ζητήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια, την απόδοση αλλά και την επιβίωση των αμυντικών συστημάτων (Morris, 2018).

Ιστορικά, η έννοια προέκυψε από την ανάγκη της υποστήριξης σημαντικών και κρίσιμων στρατιωτικών αποφάσεων κατά τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο (1939-1945), όταν επιστημονικές ομάδες αξιοποίησαν μαθηματικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση των αντιαεροπορικών μέσων άμυνας, αλλά και των στρατηγιών αεροπορικών επιδρομών (Morris, 2018). Από τότε, η επιχειρησιακή έρευνα βρίσκεται συνεχώς σε ρυθμούς εξέλιξης, και επεκτάθηκε σε πολλαπλά πεδία όπως τον σχεδιασμό και την διαχείριση δικτύων αισθητήρων, την βελτιστοποίηση των λογιστικών ζητημάτων, της αντικειμενικής αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας αμυντικών συστημάτων, την περαιτέρω ανάλυση κινδύνων αλλά και την εκτίμηση της επιχειρησιακής ευχέρειας διαφόρων οπλικών συστημάτων. (Hillier & Lieberman, 2021)

Στο ιδιάζον πλαίσιο της λήψης αποφάσεων για αντιαεροπορικά και αντιπυραυλικά συστήματα, η επιχειρησιακή έρευνα λειτουργεί με ένα μωσαϊκό μεθοδολογικών εργαλείων· η ανάλυση Markov, η θεωρία ελέγχου, η θεωρία παιγνίων ή η ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων είναι μερικά από τα μέσα που αξιοποιούνται προκειμένου να εκπληρωθεί ο στόχος μεγιστοποίησης της πιθανότητας επιτυχούς αναχαίτισης απειλών, να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες, αλλά και να επιτευχθεί μια εις βάθος κατανόηση των περιορισμών που ελλοχεύουν στο πάντοτε αβέβαιο περιβάλλον του πολέμου. (DeLaurentis & Callaway, 2004; Hillier & Lieberman, 2021).

Η λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων στα αμυντικά συστήματα, χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες βασικές αρχές:

- **Την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας:** Αντιμετάθεση της αβεβαιότητας στο επίπεδο των αισθητήρων, της συμπεριφοράς του εχθρού, και της βαλλιστικής μέσω ενός δυναμικού μοντέλου (DeLaurentis & Callaway, 2004).
- **Την διαχείριση περιορισμένων πόρων:** Ο βασικός στόχος είναι αυτός της βέλτιστης κατανομής και χρήσεως των διαθέσιμων μέσων αναχαίτισης, υπό το πρίσμα των περιορισμών εμπλοκής και χρόνου.
- **Εδραίωση της απόφασης σε ανάλυση πολλών κριτηρίων:** Αξιοποιούνται μέθοδοι που καλύπτουν την αναγκαιά πολυδιάστατη αξιολόγηση των σεναρίων, όπως αυτή του MCDM (Multi-Criteria Decision Making).
- **Πρόγνωση και προσομοίωση:** Την ανάπτυξη μοντέλων πρόγνωσης και προσομοιώσεων επιχείρησης για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός στρατηγήματος προτού εφαρμοστεί επί του πεδίου μάχης (Morris, 2018).

Η επιχειρησιακή έρευνα, ιδίως σε συστήματα υψηλής τεχνολογίας, συνδυάζεται με αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης αυτοματοποιημένης εκμάθησης, με σκοπό να έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει με δυναμικό και συνεργατικό τρόπο τα συστήματα απόφασης, αλλά και να ελαχιστοποιήσει τον ανθρώπινο παράγοντα του σφάλματος υπό καταστάσεις πίεσης. (Dong et al., 2023).

Εν τέλει, η επιχειρησιακή έρευνα λειτουργεί ως καταλύτης στον τομέα της λήψης αποφάσεων αμυντικών συστημάτων, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της τεχνικής γνώσεως και της στρατιωτικής πρακτικής, με τη χρήση μεθοδολογικών εργαλείων και επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας και ασφάλειας στο διαρκώς μεταβαλλόμενο πεδίο των αμυντικών τεχνολογιών.

## **2.2 Βασικές αρχές καθοδήγησης πυραύλων και αναχαίτισης εναέριων στόχων**

Η καθοδήγηση των πυραύλων αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργίας των αντιαεροπορικών και αντιπυραυλικών συστημάτων. Αφορά την διαδικασία υπολογισμού των εντολών ελέγχου που οδηγούν τον πύραυλο από το σημείο εκτόξευσης μέχρι την πρόσκρουση του στον στόχο, ακόμα και όταν ο τελευταίος έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει περίπλοκους ή απρόβλεπτους ελιγμούς (Shaferman & Oshman, 2009). Ο βασικός σκοπός που έχει η καθοδήγηση, είναι να

μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα καταστροφής του στόχου, μειώνοντας την απόκλιση της πρόσκρουσης (impact miss) μέσω της ακρίβειας του ελέγχου της τροχιάς του πυραύλου, όποιες και αν είναι οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από την ανεπάρκεια στοιχείων εντοπισμού και τις δυναμικές ιδιαιτερότητές που έχει ο στόχος (Yanushevsky, 2018). Στο πλαίσιο αυτό, βασικοί όροι όπως αυτοί της διαφορικής εξίσωσης της περιγραφής κινήσεως, το σύστημα ελέγχου και η ανάδραση, αποτελούν τους βασικούς πυλώνες του συστήματος ελέγχου.

Οι θεμελιώδεις κατηγορίες των μεθόδων καθοδήγησης, ταξινομούνται σε δύο: Αυτή της κλασσικής καθοδήγησης, που στηρίζεται σε νόμους καθοδηγήσεις που έχουν προηγουμένως προκαθοριστεί, και αυτή της βέλτιστης ή σχεδόν βέλτιστης καθοδήγησης, που προκύπτει από την θεωρία ελέγχου.

## **1. Αναλογική Πλοήγηση (Proportional Navigation - PN)**

Αποτελεί τη πιο συχνή μέθοδο καθοδήγησης, και βασίζεται στον ομώνυμο νόμο, ο οποίος εκφράζει ότι η επιτάχυνση ενός πυραύλου, είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας της γραμμής οράσεως (Line of Sight, LOS) προς τον στόχο (Hodžić & Prljača, 2024). Ουσιαστικά, η τροχιά του στόχου θεωρείται ευθύγραμμη, και έτσι διασφαλίζεται η αποδοτική σύγκλιση του πυραύλου με τον στόχο, με τις βασικές υποθέσεις να είναι ο πρώτος που κινείται με σταθερή ταχύτητα, και ότι υπάρχει απουσία έντονων και περίπλοκων ελιγμών.

## **2. Βέλτιστοι Νόμοι Καθοδήγησης (Optimal Guidance Laws - OGL)**

Χρησιμοποιώντας τα διαφορικά παίγνια και τη θεωρία ελέγχου ως βάσεις, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι καθοδήγησης που πλέον, λαμβάνουν υπόψη την δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του πυραύλου και του στόχου, ακόμα και όταν ο στόχος και η κίνηση του είναι ασαφής ή μη γραμμική. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή απαιτεί υπολογιστική ισχύ αλλά και ακριβείς εκτιμητές της κατάστασης. (Ben-Asher & Yaesh, 1998).

Φυσικά, τα τελικά μοντέλα αναχαίτισης πρέπει να αντιμετωπίσουν μια σειρά προκλήσεων. Μερικές από αυτές αφορούν:

- **Ασάθεια/Αβεβαιότητα:** Ο στόχος πάντοτε εκτελεί ελιγμούς με απρόβλεπτη και αιφνιδιαστική συμπεριφορά, ένα φαινόμενο που καθιστά απαραίτητη τη χρήση αλγόριθμων με δυνατότητα υποστηρίξεως πολλών δυναμικών μοντέλων. (Shaferman & Oshman, 2009)
- **Προσαρμογή στις Επιχειρήσεις Συνεργασίας:** Η συνεργατική αναχαίτιση στην πράξη αναφέρεται αποκλειστικά στη συνεργασία των πυραύλων αναχαίτισης μεταξύ τους· δηλαδή, οι αμυντικοί πύραυλοι μοιράζονται πληροφορίες σχετικά με την εκτίμηση της κατάστασης του στόχου και βελτιστοποιούν συλλογικά τις εντολές καθοδήγησης, με απώτερο στόχο τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας επιτυχούς αναχαίτισης. Οι επιθετικοί (εχθρικοί) πύραυλοι απλώς λειτουργούν ανεξάρτητα προσπαθώντας να διαφύγουν ή να ξεφύγουν από την άμυνα, χωρίς να εφαρμόζουν τεχνικές συνεργασίας μεταξύ τους.
- **Περιορισμένα Μέσα Μέτρησης/Θόρυβος:** Οι πυραυλικοί αισθητήρες δημιουργούν «θορυβώδεις», περιορισμένης ακρίβειας μετρήσεις (π.χ. γωνιακές μετρήσεις μέσω υπέρυθρων αισθητήρων), που σαφώς επηρεάζουν την εκτίμηση της κατάστασης και κατά συνέπεια, την ίδια την αποτελεσματικότητα της καθοδήγησης (Shaferman & Oshman, 2009).

Συνοψίζοντας, η καθοδήγηση των πυραυλικών συστημάτων και η αναχαίτιση εναέριων στόχων, αποτελούν ένα εύφορο πεδίο όπου η σύνθετη θεωρία ελέγχου, η στοχαστική εκτίμηση και η στρατιωτική τεχνολογία συνεργάζονται προς την ανταπόκριση στις προκλήσεις οιασδήποτε απειλής, αξιοποιώντας προχωρημένες μεθόδους και τεχνικές συνεργασίας, προς όφελος της αποτελεσματικότητας και ασφάλειας των συστημάτων αεράμυνας.

### **2.3 Προηγούμενη έρευνα στη συνεργατική αναχαίτιση: βιβλιογραφική ανασκόπηση**

Ο όρος συνεργατική αναχαίτιση (Cooperative Interception - CI) εξελίχθηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα στρατιωτικής επιστήμης και επιχειρησιακής έρευνας, καθρεφτίζοντας την ανάγκη της αποτελεσματικής αντιμετώπισης απειλών που λειτουργούν υπό καθεστώς πολυπλοκότητας, και την αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα κατανεμημένα οπλικά συστήματα και αισθητήρες (Su et al., 2018; Dong et al., 2023). Όπως προαναφέρθηκε, η σύγχρονη προσέγγιση έρχεται σε αντιδιαστολή με την παραδοσιακή ως τώρα· έναντι της αυτόνομης λειτουργίας του πυραύλου, πλέον ενθαρρύνεται η συλλογική επεξεργασία των αναγκαίων πληροφοριών και η δυναμική

κατανομή των εντολών ελέγχου και εκτίμησης της κατάστασης, γύρω από ένα δίκτυο συνεργαζόμενων εγκαταστάσεων αναχαίτισης (Yanushevsky, 2018).

Οι πρώτες προσπάθειες συνεργασίας σε σενάρια πολλαπλών αναχαιτιστικών συστημάτων, συναντιούνται στις αρχές της δεκαετίας του 2000, με εργασίες που είχαν την εστίαση τους στην ταυτόχρονη εκτόξευση και κατανομή των πυραυλικών συστημάτων με στόχο την μεγιστοποίηση της πιθανότητας της καταστροφής ενός ή πολλαπλών στόχων (Oshman et al., 2001). Ωστόσο, η ιδέα της ανταλλαγής στοιχείων μεταξύ των πυραύλων, περιοριζόταν απλά στην ενημέρωση των θέσεων εκτόξευσης. (Shaferman & Oshman, 2009).

Σημαντική εξέλιξη στον τομέα της διαχείρισης της συνεργασίας πολλαπλών συστημάτων αναχαίτισης, συναντάται στη μελέτη των Liu & Liang (2018), όπου παρουσιάζονται προηγμένοι αλγόριθμοι καθοδήγησης, οι οποίοι επιτρέπουν την γρήγορη ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων μεταξύ των πυραύλων. Παράλληλα στην μελέτη τους, οι Guo et al. (2022) αναδεικνύουν ένα πλήθος στρατηγικών σχετιζόμενες με τη συλλογική κάλυψη (cooperative covering), που δίνουν τη δυνατότητα σε πλήθος πυραυλικών συστημάτων αεράμυνας να διαμοιράζονται τη περιοχή που εντοπίζεται ο κίνδυνος, διατηρώντας ταυτόχρονα σε ισορροπία τα ελάχιστα όρια της ασφάλειας και τα ποσοστά επιτυχίας σε πολλαπλά σημεία αναχαίτισης.

Οι Ziwei et al. (2023), στη μελέτη τους, εξέτασαν τη πρακτικότητα αλγόριθμων που λειτουργούν σε τρισδιάστατο επίπεδο, υπό συνθήκες σταθερού χρόνου. Αναλυτικότερα, οι αλγόριθμοι αυτοί (fixed-time cooperative guidance), προσφέρουν σε ένα πλήθος εκτοξευτών περισσότερη ευελιξία και αυτονομία στον τομέα της εμπλοκής στον ίδιο χρόνο, απαιτώντας ελάχιστη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους, μεγιστοποιώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητά τους. Το πεδίο της έρευνας τους, μετασχηματίζει τα επιχειρησιακά πρότυπα απάντησης ενάντια σε σύνθετες απειλές, που λειτουργούν υπό ένα αιφνιδιαστικό και πολύπλοκο προφίλ.

Δυο ακόμα αξιοσημείωτες μελέτες, αποτελούν αυτές των Xiao et al. (2021) και Yuksek et al. (2018), που εμπλουτίζουν ακόμα περισσότερο τη σύγχρονη βιβλιογραφία. Στις μελέτες τους, κύρια ζητήματα που εξετάζονται αποτελούν τα φυσικά και επιχειρησιακά όρια, με σκοπό



να εξεταστούν σενάρια όπου η συνεργατική στρατηγική παρέχει εξαιρετικά αποτελέσματα στην βελτιστοποίηση της ανθεκτικότητας κατά του εχθρικού στόχου, και στην ίδια την επίτευξη πρακτικών αποτελεσμάτων σε ρεαλιστικές συνθήκες μάχης.

Η ιδέα πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη των τεχνικών data fusion και της κατανομής εκτίμησης της κατάστασης, στην οποία οι πύραυλοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες που αντλούν από τους αισθητήρες τους σε πραγματικό χρόνο, και συνδυάζουν ταυτόχρονα τα εκτιμώμενα δυναμικά μοντέλα στόχων, καθιστώντας έτσι εφικτή τη λειτουργία πλήρως συνεργατικών σχημάτων αναχαίτισης.

Στο θεωρητικό και τεχνικό επίπεδο, οι εξελίξεις γύρω από τη βελτιστοποίηση της πολλαπλής αναχαίτισης στόχων είναι:

1. **Αλγόριθμοι Συνεργατικής Εκτίμησης:** Το βασικό ερώτημα της έρευνας αφορά το πώς η ανταλλαγή πληροφοριών των μετρήσεων που εκτελούν οι πύραυλοι, βελτιώνει την ακρίβεια πρόβλεψης του ελιγμού του εχθρικού στόχου σε ρεαλιστικά σενάρια, όπου υπάρχει ο θόρυβος από τους υπέρυθρους αισθητήρες και της ελλιπούς γνώσης ή αβεβαιότητας. Τις κεντρικές συνεισφορές επί αυτού αποτελούν τα έργα που πρότειναν τη χρήση αλγόριθμων Multi-Sensor Data Fusion και Cooperative Multiple Model Estimation (Mazor et al., 1998; Shaferman & Oshman, 2009). Σε αυτό το είδος προσέγγισης, τα φίλτρα IMM και MMPF προσαρμόζονται προς τη διαχείριση διαμοιρασμένων μετρήσεων σε συμβατικό non sharing modus, είτε σε συνεργατικό sharing modus. (Shaferman & Oshman, 2009). Παράλληλα, αναπτύσσονται σύγχρονοι τρισδιάστατοι σταθερού χρόνου συνεργατικοί αλγόριθμοι καθοδήγησης οι οποίοι αξιοποιούν δίκτυα ανταλλαγής των εκτιμήσεων της κατάστασης μεταξύ των πυραύλων ως προς την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, γρηγορότερης σύγκλισης και αντοχής ενάντια σε παρεμβολές και στον παράγοντα της αβεβαιότητας (Li et al., 2025; Liu et al., 2025).
2. **Σενάρια Πολλαπλής Στόχευσης:** Η μελέτη που υπάρχει πίσω από την συλλογική αναχαίτιση ευέλικτων και στόχων επιθετικής φύσεως, προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά την ελάττωση της πιθανότητας σφάλματος στην εκτίμηση της κατάστασης, την ταχύτερη σύγκλιση στον πραγματικό ελιγμό του στόχου, και τη συνολική βελτιστοποίηση του miss distance ακόμα και όταν έχει εκτιμηθεί εσφαλμένος υπολογισμός από τον αισθητήρα (Su et al., 2018; Dong et al., 2023)
3. **Εμπειρικές και Πρακτικές Αξιολογήσεις:** Μετά από εκτενείς προσομοιώσεις τύπου Monte Carlo (Shaferman & Oshman, 2009) καταδεικνύουν ότι η συνεργατική χρήση ουσιαστικά βελτιώνει την ακρίβεια των μεταβλητών που είναι



κρίσιμες προς τη ταυτοποίηση του στόχου (π.χ. επιτάχυνση, απόσταση, ταχύτητα), ειδικά στις περιπτώσεις που ο στόχος αλλάζει δυναμικά τη πορεία του ή εισάγονται συνθήκες κορεσμού στον ίδιο τον έλεγχο του πυραύλου. Συγκρίνοντας τα φίλτρα IMM και MPFF, το MPFF αναδεικνύεται ανώτερο στη παρακολούθηση των μη γραμμικών και μη Γκαουσιανών συμπεριφορών, προσφέροντας σχεδόν «hit to kill» απόδοση (πλήγμα δια φυσικής πρόσκρουσης, χωρίς χρήστη εκρηκτικού φορτίου, ήτοι διάρρηξης κεφαλής με ηλεκτρικό πυροσωλήνα και θραυσματοποίηση της γόμωσης), με μοναδικό μειονέκτημα την ανάγκη μεγαλύτερης υπολογιστικής ισχύος και κατὰ συνέπεια, κόστους (Shaferman & Oshman, 2009)

4. **Βελτιστοποίηση της Καθοδήγησης και Ολοκληρωμένοι Νόμοι Ελέγχου:** Η ενσωμάτωση βέλτιστων νόμων καθοδήγησης που συνδυάζουν τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί συνεργατικά, με την αυτονομία της λήψης αποφάσεων για τον κάθε πύραυλο αποτελεί ένα ακόμη πεδίο έρευνας (Dong et al., 2023). Αναδεικνύονται οι ανταλλαγές (trade-offs) μεταξύ της ταχύτητας ανταπόκρισης, της ακρίβειας, της ασφάλειας ενάντια σε αντιπερισπασμούς και τελικά, των απαιτήσεων των υπολογιστικών πόρων.

Οι σύγχρονες τάσεις και τα ανοιχτά ζητήματα, παραμένουν φυσικά στο προσκήνιο. Μια σύγχρονη τάση που εξετάζεται, είναι η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνικών Artificial Intelligence (AI) και του Machine Learning (ML) για την κατανομή δικτύων αισθητήρων, που ανοίγουν νέους ορίζοντες στην επίτευξη μεγαλύτερης προσαρμοστικότητας, αυτονομίας και αποτελεσματικότητας γύρω από την συνεργατική αναχαίτιση (Dong et al., 2023). Άλλοι ερευνητές, λόγω χάρη οι Su et al. (2018), προτείνουν τεχνικές-υβρίδια, με στοχαστικές μεθόδους εκτίμησης που λαμβάνουν υπόψιν το επιχειρησιακό περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά του στόχου. Τέλος, στη παρούσα κατάσταση, η κυριότερη πρόκληση συναντάται στην ασφάλεια της ανταλλαγής των δεδομένων, στη διαχείριση των περιορισμών που θεσπίζονται στην επικοινωνία, και στην επαύξηση της επίδοσης στους περιορισμούς που θέτονται στρατιωτικά στον πραγματικό χρόνο.

#### **2.4 Τεχνολογικές προκλήσεις και εφαρμοσμένα παραδείγματα**

Η πραγματοποίηση ενός συνεργατικού συστήματος αναχαίτισης και η διαδικασία της ενσωμάτωσης προηγμένων αλγόριθμων εκτίμησης της κατάστασης και της καθοδήγησης, είναι

φυσικά αντιμέτωπη με πολυάριθμες και ποικίλες τεχνολογικές προκλήσεις, που συναντιούνται τόσο στη σύγχρονη έρευνα όσο και στα πρακτικά παραδείγματα εφαρμογής (Shaferman & Oshman, 2009; Su et al., 2018, Dong et al., 2023)

Οι Su et al. (2018), περιγράφουν ότι η αποτελεσματικότητα κάθε συνεργατικού συστήματος εξαρτάται άμεσα από την γρήγορη και αξιόπιστη ανταλλαγή των μετρήσεων και εκτιμήσεων που πραγματοποιούν οι πύραυλοι. Είναι γεγονός ότι η επικοινωνία μπορεί να διαταραχθεί εύκολα στο πεδίο, τόσο από τεχνικά ζητήματα όπως παρεμβολές, όσο και από προσπάθειες του εχθρού (ηλεκτρονικός πόλεμος). Καθίσταται λοιπόν κρίσιμότερη η ανάπτυξη ασφαλέστερων πρωτοκόλλων ασφαλείας και των συστημάτων δικτύωσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιβίωση των δεδομένων στις συνθήκες του πολέμου.

Μια άλλη πρόκληση που προκύπτει και έχει προαναφερθεί συνοπτικά, είναι το υπολογιστικό κόστος: η ενσωμάτωση αλγόριθμων και φίλτρων όπως αυτό του MPFF, προσφέρει προφανώς σημαντικά πλεονεκτήματα σε ακραία σενάρια μη γραμμικής και μη δυναμικής Gauss, ωστόσο η απαίτηση της υπολογιστικής ισχύος αυξάνεται με το πλήθος των συνεργατικών στοχεύσεων που λαμβάνουν μέρος σε πραγματικό χρόνο. Συνεπώς, η επιλογή του αλγόριθμου αναγκαστικά απαιτεί και κάποια ανταλλαγή μεταξύ της επίδοσης και της δυνατότητας της ενσωμάτωσης.

Η αβεβαιότητα επίσης αποτελεί μια πρόκληση. Στις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο, σπανίως θα παρατηρηθεί ανταπόκριση στα μαθηματικά μοντέλα, καθώς η αβεβαιότητα που συναντάται στην ίδια τη στόχευση, η απώλεια ενός αισθητήρα, ή η αιφνιδιαστική ευελιξία που μπορεί να παρουσιάζει ο στόχος, απαιτούν τη χρήση στοχαστικών μεθόδων εκτίμησης και ελέγχου, αλλά και εφαρμογής μηχανισμών graceful degradation στο λογισμικό ή υλικό επίπεδο.

Μια τελευταία πρόκληση που συναντάται κατά τους Dong et al. (2023), είναι η εναρμόνιση των δεδομένων από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων, π.χ. των IR/EO payload, του Radar ή των data links, και η υλοποίηση ενός data fusion υψηλού επιπέδου σε πραγματικό χρόνο, κάτι που αποτελεί μια βασική επιχειρησιακή πρόκληση.

Στο πεδίο των εφαρμοσμένων παραδειγμάτων και των σύγχρονων υλοποιήσεων, συναντάμε τόσο παραδείγματα πειραματικών προσομοιώσεων, όσο και υλοποιημένα

συστήματα. Μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo, οι Shaferman & Oshman απέδειξαν την υπεροχή της συνεργατικής αναχαίτισης σε σύγκριση με την ως τότε συμβατική, παραδοσιακή μέθοδο, καθώς επιτυγχάνεται η μικρότερη απόκλιση πρόσκιρσης (miss distance), η ταχύτερη σύγκλιση και η ανθεκτικότητα κατά θορυβώδους μέτρησης των αισθητήρων. (Shaferman & Oshman, 2009)

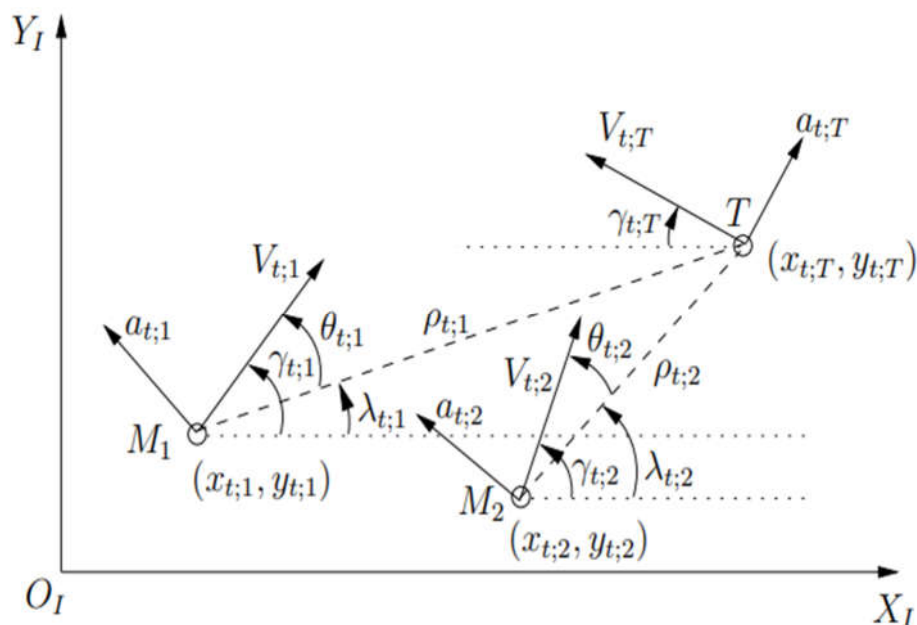
Άλλη μια πειραματική προσπάθεια να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η απόδοση τέτοιων συστημάτων, είναι αυτή στο πεδίο του machine learning και AI, που ανοίγει τον δρόμο στην βελτίωση της προσαρμοστικότητας στρατηγικών guidance-fusion, κάτι που ενισχύει την αυτονομία λήψης αποφάσεων, ακόμα και όταν επικρατούν συνθήκες με άγνωστα στοιχεία ή σε εχθρικές συνθήκες στο μέτωπο (Dong et al., 2023).

Σύγχρονα αντιαεροπορικά συστήματα που έχουν ενσωματώσει αυτές τις τεχνικές, αποτελούν αυτά της οικογένειας Patriot-3, Arrow-3 και SAMP/T, που αξιοποιούν προηγμένα multi-sensor δίκτυα, με αρχιτεκτονικό σύστημα C4ISR (Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance). Αυτά τα αντιαεροπορικά συστήματα είναι ικανά να μεταδώσουν μεταξύ τους τις εκτιμήσεις των πυραύλων τους, αυξάνοντας κατακόρυφα τα ποσοστά επιτυχίας επιτυχημένης αναχαίτισης (Dong et al., 2023).

### 3 Παρουσίαση και ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου

#### 3.1 Περιγραφή του σεναρίου και των βασικών υποθέσεων

Το σενάριο που εξετάζεται, επικεντρώνεται στη συνεργατική αναχαίτιση ενός μοναδικού, μα ευέλικτου και δυναμικά κινούμενου στόχου από πολλαπλούς πυραύλους. Ο στόχος αναπαριστάται γραφικά σε ένα επίπεδο δύο διαστάσεων, σε καρτεσιανό αδρανές σύστημα, με συντεταγμένες  $X_I$  και  $Y_I$ , όπου λαμβάνονται υπόψη οι θέσεις, οι γωνίες της πτήσης και οι επιταχύνσεις των πυραύλων και του στόχου (Shaferman & Oshman, 2009). Η παρουσία των περιορισμών της λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων του χρόνου απόκρισης, τις ικανότητες που διαθέτει ο στόχος όσον αφορά το εύρος των ελιγμών που μπορεί να εκτελέσει, καθώς και τις μονάδες πτήσης τόσο των πυραύλων όσο και του ίδιου του στόχου, αποτελεί ένα ρεαλιστικό πλαίσιο που απαιτεί σκέψη και προβληματισμό στην διαδικασία της ανάπτυξης λειτουργικών και υλοποιήσιμων αλγορίθμων συνεργασίας.



Εικόνα 1. Γεωμετρική αναπαράσταση της εμπλοκής (Shaferman & Oshman, 2009: 3)

Οι πύραυλοι -δύο ή περισσότεροι- επιχειρούν στον ίδιο χώρο και χρόνο, και ανταλλάσσουν δεδομένα και πληροφορίες, έχοντας σκοπό να βελτιώσουν την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του στόχου. Κάθε πύραυλος παρακολουθεί τη σχετική απόσταση και γωνία πρόσκρουσης βάσει της γραμμής οράσεως του (LOS) προς τον στόχο, με το σύνολο των

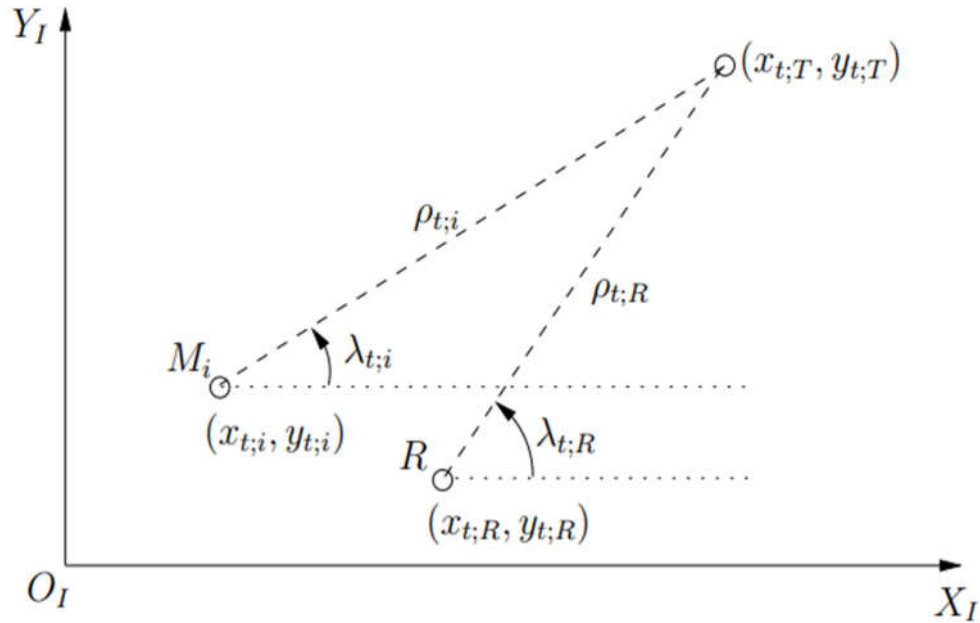
μετρήσεων να γίνεται είτε ανεξάρτητα (non sharing) είτε συνεργατικά με τους υπόλοιπους πυραύλους (sharing), ώστε να μεγιστοποιηθεί η ακρίβεια της εκτίμησης των μεταβλητών κατάστασης (Shaferman & Oshman, 2009).

Πίνακας 1 Υπόμνημα μαθηματικού μοντέλου γεωμετρικής αναπαράστασης της εμπλοκής

Σύμβολο	Επεξήγηση	Φυσική Διάσταση
$Q_{ti}$	Η απόσταση του στόχου από τον $i$ -οστό πύραυλο τη χρονική στιγμή $t_i$	Μήκος (meters)
$\Lambda_{ti}$	Η γωνία της γραμμής οράσεως (Line of Sight, LOS) του $i$ -οστού πυραύλου προς τον στόχο τη στιγμή $t_i$	Γωνία (radians ή degrees)
$T_{\gamma t}$	Η γωνία πτήσης του στόχου τη χρονική στιγμή $t_i$	Γωνία (radians ή degrees)
$A_{\tau T}$	Η ορθή επιτάχυνση του στόχου τη χρονική στιγμή $t_i$	Επιτάχυνση (m/s) <sup>2</sup>
$V_{\tau i}$	Η ταχύτητα του $i$ -οστού πυραύλου	Ταχύτητα (m/s)
$V_T$	Η ταχύτητα του στόχου	Ταχύτητα (m/s)
$t_i$	Χρονική στιγμή	Χρόνος (δευτερόλεπτα)
$i_i$	Δείκτης για τον $i$ -οστό πύραυλο	Ανέγκαιος αριθμός

Οι βασικές υποθέσεις του παρόντος μοντέλου, περιλαμβάνουν:

- **Μη-γραμμική δυναμική με στοχαστική φύση:** Ο στόχος εκτελεί ελιγμούς, που ερμηνεύονται με σύστημα πρώτης τάξεως, όπου είναι γνωστή η χρονική σταθερά και η μέγιστη επιτάχυνση, και αλλάζουν διακριτά σε περιπτώσεις με γνωστές πιθανότητες μετάβασης (Markovian Switching) (Shaferman & Oshman, 2009).
- **Προσαρμοστικότητα και Επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο:** Κρίσιμος παράγοντας για την υλοποίηση του sharing modus operandi, οι πυράυλοι πρέπει να είναι σε θέση να ανταλλάσσουν δεδομένα γωνιακών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
- **Σταθερή ταχύτητα:** Ασχέτως των ελιγμών που πραγματοποιεί ο στόχος, η απόλυτη ταχύτητα του θεωρείται σταθερή.
- **«Θόρυβος» μετρήσεων:** Οι μετρήσεις της γωνίας που πραγματοποιούνται με αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας, περιλαμβάνουν «θόρυβο» Gauss, ο οποίος είναι ανεξάρτητος μεταξύ των πυραύλων.
- **Άμεση και αδιάλειπτη επικοινωνία:** Η ανταλλαγή των δεδομένων γίνεται αδιάλειπτα, άνευ καθυστερήσεων, σε ιδανικές συνθήκες ώστε να εκτιμηθεί συνεργατικά η κατάσταση.
- **Αρχική εκτίμηση μέσω εξωτερικού συστήματος RADAR:** Η αρχική εκτίμηση της θέσης και της κίνησης του στόχου προέρχεται από ένα κοινό σύστημα RADAR, το οποίο μεταδίδει αυτές τις πληροφορίες στα συστήματα των πυραύλων συνοδευόμενες από σφάλμα κατανομής Gauss. Η σχέση μεταξύ των μετρήσεων του RADAR και της σχετικής κατάστασης του πυραύλου μετασχηματίζεται προσεγγιστικά σε γραμμικό μοντέλο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους αλγόριθμους εκτίμησης κατάστασης..
- **Προσαρμογή περίπλοκων σκοπών καθοδήγησης:** Τέλος, επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμων όπως αυτόν του Optimal Guidance Law (OGL) η καθοδήγηση των πυραύλων, που αξιοποιούν τις εκτιμήσεις κατάστασης που έχουν αντλήσει, προς την τελική και επιτυχή αναχαίτιση.



Εικόνα 2. Γεωμετρική απεικόνιση της αρχικής εκτίμησης μέσω εξωτερικού συστήματος RADAR (Shaferman & Oshman, 2009 : 5-6)

Αυτές οι υποθέσεις αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκαν τα φίλτρα εκτίμησης και καθοδήγησης IMM και MMPF. Αυτοί οι αλγόριθμοι, παρέχουν την δυνατότητα να επεξεργάζονται οι πληροφορίες συνεργατικά μεταξύ των πυραύλων, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι πραγματικές, ρεαλιστικές προκλήσεις που θα συναντηθούν στο πεδίο της μάχης (Shaferman & Oshman, 2009).

Το βασικό πρόβλημα του μοντέλου είναι η ίδια η εκτίμηση της κατάστασης του στόχου σε συνθήκες όπου συναντάται η δυσλειτουργία των αισθητήρων, ή της ανεπαρκούς πληροφορίας (bearing-only), του «θορύβου» που δημιουργούν, και στην αβεβαιότητα που επικρατεί γύρω από την κινησιολογία του εχθρού. Η συνεργατική διάρθρωση που προτείνεται, επιτρέπει την ανταλλαγή των πληροφοριών και δεδομένων που αντλεί ο κάθε πύραυλος, βελτιστοποιεί την ασφαλή επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος, της αναχαίτισης δηλαδή του εχθρικού στόχου, ακόμα και σε αβέβαιες και απρόβλεπτες φαινομενικά συνθήκες.

### 3.2 Κινηματική και δυναμική μοντελοποίηση στόχου και πυραύλων

Ο θεμέλιος λίθος της ανάλυσης για το πρόβλημα της συνεργατικής αναχαίτισης είναι η μοντελοποίηση της κινηματικής και δυναμικής κατάστασης τόσο του στόχου, όσο και του



πυραύλου. Περιγράφει με μαθηματικό τρόπο την εξέλιξη της κατάστασης του στόχου και του πυραύλου στις μεταβλητές του χρόνου και χώρου. Εστιάζοντας στη σχετική τροχιά του πυραύλου ως προς τον στόχο, οι εξισώσεις διατυπώνονται σε δισδιάστατο γεωμετρικό σύνολο, υπό συνθήκες ελιγμών του στόχου και της αβεβαιότητας που παρουσιάζεται από εικάστη κατάσταση.

### 3.2.1 Σύστημα Αναφοράς και Κατάστασης – Δυναμικές Εξισώσεις Κατάστασης

Το σύστημα αναφοράς είναι αδρανές καρτεσιανό  $X_i - Y_i$ . Λαμβάνεται η παραδοχή, ότι οι ταχύτητες του στόχου και των πυραύλων ( $V_t$  και  $M_i$ ), είναι γνωστές, και παραμένουν σταθερές. Οι καταστάσεις που περιγράφονται ανά  $i$ -οστό πύραυλο και στόχο  $t$  είναι:

$$\chi_{R;t;i} = [\rho_{t;i}, \lambda_{t;i}, \gamma_{t;T}, \alpha_{t;T}]^T$$

Όπου:

- $\rho_{t;i}$ : Η απόσταση του στόχου από τον πύραυλο
- $\lambda_{t;i}$ : Η γωνία της γραμμής οράσεως του πυραύλου προς τον στόχο (LOS)
- $\gamma_{t;T}$ : Η γωνία της πτήσης του στόχου
- $\alpha_{t;T}$ : Η ορθή επιτάχυνση του στόχου

Σύμφωνα με τη μελέτη των Shaferman & Oshman (2009), η δυναμική του συστήματος διατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης:

$$\begin{cases} \dot{\rho}_{t;i} = [V_{t;i} \cos(\gamma_{t;i} - \lambda_{t;i}) + V_T \cos(\gamma_{t;T} + \lambda_{t;i})] \\ \dot{\lambda}_{t;i} = \frac{-V_{t;i} \sin(\gamma_{t;i} - \lambda_{t;i}) + V_T \sin(\gamma_{t;T} + \lambda_{t;i})}{\rho_{t;i}} \\ \dot{\gamma}_{t;T} = \frac{\alpha_{t;T}}{V_t} \\ \dot{\alpha}_{t;T} = \frac{\alpha_{t;T}}{\tau_T} + \frac{u_{t;T}}{\tau_T} \end{cases}$$

Όπου:

- $\rho_{t;i}$ : Η μεταβολή της απόστασης του πυραύλου από τον στόχο
- $\lambda_{t;i}$ : Η μεταβολή της γωνίας οράσεως LOS
- $\gamma_{t;T}$ : Η μεταβολή της γωνίας πτήσης του στόχου
- $\alpha_{t;T}$ : Η δυναμική επιτάχυνση του στόχου (μοντέλο ελιγμών)



- $\tau_T$ : Η χρονική σταθερά των ελιγμών του στόχου
- $u_{t,T}$ : Η εντολή επιτάχυνσης του στόχου

### 3.3 Μοντέλο εκτιμήσεων και παραδοχές πληροφόρησης (sharing/non sharing)

Η ακριβής εκτίμηση της κατάστασης και των χαρακτηριστικών του στόχου αποτελεί τον κύριο παράγοντα για την επιτυχή καθοδήγηση και αναχαίτιση από πολλαπλούς πυραύλους που βάλλονται εναντίον του στόχου. Το μοντέλο μετρήσεων και οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι αναγκαίοι για την έκβαση της βολής, οι οποίες μετρήσεις γίνονται μέσω υπέρυθρων (infrared, IR) αισθητήρες που διαθέτουν οι πύραυλοι, παρέχοντας γωνιακές μετρήσεις (bearing only measurements), που όπως όμως έχει σημειωθεί παραπάνω, συνοδεύονται από «θόρυβο».

Η μέτρηση που λαμβάνει ο  $i$ -οστός πύραυλος ανά πάσα χρονική στιγμή, έχει σχέση με τη γωνία ανάμεσα στη γραμμή οράσεως LOS προς τον στόχο και τη διεύθυνση της πτήσης του πυραύλου, με τον θόρυβο της να είναι τυχαίος λευκός τύπου Gauss, μηδενικής μέσης τιμής (Shaferman & Oshman, 2009). Συγκεκριμένα:

$$z_i = \theta_i + u_i = \gamma_i - \lambda_i + u_i$$

όπου:

- $\theta_i$ : Η γωνία ανάμεσα στη διεύθυνση πτήσης του πυραύλου και της γραμμής οράσεως προς τον στόχο
- $\gamma_i$ : Η γωνία πτήσης του πυραύλου
- $\lambda_i$ : Η γωνία της γραμμής οράσεως LOS
- $u_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\theta i}^2)$ : Ο θόρυβος της μέτρησης σε Κατανομή Gauss με σταθερή διασπορά

Οι μετρήσεις αυτές είναι κρίσιμες, καθώς παρέχουν ουσιαστικές πληροφορίες για τη θέση, και τα χαρακτηριστικά της κίνησης του στόχου, παρόλα αυτά λόγω της φύσεως των γωνιακών δεδομένων, το πρόβλημα της εκτίμησης παρουσιάζει μια σειρά προκλήσεων, κυρίως στην εκτίμηση της απόστασης.

Το καθοριστικό σημείο της συνεργατικής αναχαίτισης είναι ο τρόπος διαχείρισης και ανταλλαγής των μετρήσεων μεταξύ των πυραύλων. Όπως έχει παρατεθεί και παραπάνω,

υπάρχουν δύο κατηγορίες λειτουργικών διαμορφώσεων· ο μη συνεργατικός τρόπος (non-sharing mode) και ο συνεργατικός (sharing mode).

### 3.4 Διαδικασία αρχικοποίησης (initialization) των εκτιμητών

Η διαδικασία αρχικοποίησης αποτελεί ένα ακόμα σκαλοπάτι στην σωστή λειτουργία και απόδοση των αλγορίθμων παρακολούθησης στα σενάρια της συνεργατικής αναχαίτισης πολλαπλών πυραύλων. Όπως προαναφέρθηκε στο υπό-κεφάλαιο 3.1, η αρχική εκτίμηση της εκτίμησης ενός στόχου, προέρχεται από ένα εξωτερικό σύστημα RADAR (Initializing RADAR), το οποίο είναι σταθερής θέσης, παρέχοντας μια εκτίμηση της σχετικής κατάστασης στην οποία βρίσκεται ο στόχος. Έτσι, εκτιμάται το διάνυσμα κατάστασης:

- Της απόστασης του στόχου από τον σταθμό RADAR,
- Της γωνίας γραμμής οράσεως LOS ως προς τον άξονα αναφοράς,
- Της γωνίας πτήσης του στόχου
- Της επιτάχυνσης του στόχου

Η εκτίμηση αυτή εμφανίζει κατανομή Gauss, αυτή τη φορά με γνωστή μέση τιμή και διασπορά, που χαρακτηρίζουν το αβέβαιο αρχικό πλαίσιο της στόχευσης (Shaferman & Oshman, 2009).

Καθώς ο κάθε πύραυλος εκτελεί τη δική του εκτίμηση για την κατάσταση του στόχου σε ένα δικό του σχετικό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο βασίζεται στην απόσταση και στη γωνία όρασης μεταξύ αυτού και του στόχου, απαιτείται και η μετατροπή της αρχικής εκτίμησης που δόθηκε στο σύστημα RADAR σε αντίστοιχο πλαίσιο για τον πύραυλο.

Αυτή η γεωμετρική μετατροπή, είναι μια μη-γραμμική και περιγράφεται μέσω της εφαρμογής των σχετικών θέσεων και των διαφορών τους μεταξύ του RADAR και του πυραύλου, που οδηγεί τελικά στον υπολογισμό των σχετικών αποστάσεων και γωνιών. (Shaferman & Oshman, 2009). Συνεπώς, η αρχική κατανομή σταματάει πλέον να είναι μια κατανομή Gauss.

Για λόγους συμβατότητας με τον αλγόριθμο της εκτίμησης, ο οποίος απαιτεί τις αρχικές καταστάσεις σε κατανομή Gauss, η μέση τιμή της εκτίμησης του RADAR, η οποία είναι μια μη-γραμμική σχέση μετασχηματισμού, μετατρέπεται σε γραμμική σχέση, έτσι ώστε να

υπολογιστεί κατά προσέγγιση η αρχική μέση τιμή, καθώς και η μήτρα διασποράς για την κατάσταση του κάθε πυραύλου.

Αυτή η διαδικασία, γίνεται μέσω της αξιοποίησης μιας Jacobian μήτρας (Matrix of Partial Derivatives), της μη-γραμμικής συνάρτησης μετασχηματισμού. (Shaferman & Oshman, 2009). Το αποτέλεσμα είναι μια πλέον συμβατή, σε κατανομή Gauss, αρχικοποίηση στα πλαίσια του κάθε φίλτρου που είναι εγκατεστημένο σε κάθε πύραυλο.

Επιπροσθέτως, για τους αλγορίθμους τύπου IMM και MMPF, οι οποίοι στηρίζονται σε πολλαπλά μοντέλα δυναμικού χαρακτήρα, ορίζεται μια ίση κατανομή πιθανοτήτων αρχικής κατάστασης της λειτουργίας (mode probabilities), μεταξύ των πιθανών δυναμικών καταστάσεων, η βασίζεται σε εμπειρικά στοιχεία. Αυτές οι κατανομές που βασίζονται στην έννοια της πιθανότητας, επιτρέπουν την ευελιξία στην προσαρμογή των φίλτρων στις συχνά αιφνιδιαστικές κινήσεις και συμπεριφορές του εχθρικού στόχου.

Τέλος, εξαιρετικής σημασίας ορίζονται η ακρίβεια, αλλά και η πληρότητα της αρχικής εκτίμησης· ειδικά σε σενάρια που ο στόχος εκτελεί περίπλοκους και ευέλικτους ελιγμούς αποφυγής, η σωστή μεταβίβαση και η προσαρμογή της αρχικής στόχευσης, με όποιους ορισμούς και χαρακτηριστικά είχε τεθεί, εξασφαλίζει την μείωση της απόκλισης και της καθυστέρησης στην πρόβλεψη οιασδήποτε συμπεριφοράς που έχει ο στόχος.

## 4 Αναλυτική εξέταση των εκτιμητικών αλγορίθμων

### 4.1 Θεωρητική εισαγωγή στην στοχαστική εκτίμηση (Καλμάν, IMM, PF)

Η στοχαστική εκτίμηση αποτελεί τη πιο σημαντική μέθοδο προς την βελτιστοποίηση της παρακολούθησης και της πρόβλεψης της επικείμενης κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος αεράμυνας, ενσωματώνοντας φυσικά την αβεβαιότητα και τον «θόρυβο» που υπάρχει ενός των μετρήσεων του πυραύλου. Βάσει της σύγχρονης βιβλιογραφίας, αναδεικνύονται τρεις βασικές κατηγορίες αλγορίθμων εκτίμησης με ευρεία χρήση στους χώρους της αεροναυτικής και τις εφαρμογές της συνεργατικής αναχαίτισης, το φίλτρο Kalman (KF και οι εκτεταμένες του μορφές), το φίλτρο Πολλαπλών Μοντέλων (Interacting Multiple Model - IMM), και τέλος, οι μέθοδοι Particle Filtering (PF).

Το πλέον διαδεδομένο φίλτρο τύπου Kalman, προσφέρει μια βέλτιστη λύση που ελαχιστοποιεί τη μέση τετραγωνική απόκλιση για τα γραμμικά συστήματα στα οποία παρουσιάζεται ο λευκός «θόρυβος» τύπου Gauss. Πλέον στις μέρες μας, οι σύγχρονες εφαρμογές απαιτούν λύσεις σε ισχυρά περιβάλλοντα με μη γραμμική λειτουργία: παράλληλα, το φίλτρο συνεχίζει να εκσυγχρονίζεται, με την ανάπτυξη προηγμένων εκδόσεων του, όπως αυτών του εκτεταμένου φίλτρου Kalman (EKF), και του Unscented Kalman Filter (UKF), φίλτρα που προσεγγίζουν τα μη-γραμμικά δεδομένα μετατρέποντας τα σε γραμμικά, ή με μια δειγματοληψία στοχαστικής φύσεως (Dong et al., 2023 : 8-9). Πιο συγκεκριμένα, το EKF χρησιμοποιεί τη μερική παραγωγή τύπου Jacobian, ώστε να μετατρέψει το μη-γραμμικό μοντέλο σε γραμμικό, ενώ το UKF εφαρμόζει μια τυχαία δειγματοληψία, για να εκτελέσει μια εκτίμηση της κατανομής μιας κατάστασης, χωρίς όμως να στηρίζεται στη γραμμικοποίηση των συναρτήσεων.

Για προβληματικές περιστάσεις όπου το δυναμικό σύστημα παρουσιάζει εναλλασσόμενα μοντέλα (π.χ. ένας εχθρικός στόχος που ελίσσεται με άγνωστο, αιφνιδιαστικό μοτίβο), το φίλτρο Πολλαπλών Μοντέλων (IMM), έχει καθιερωθεί ως μια ημι-βέλτιστη αλλά ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδο. Το συγκεκριμένο φίλτρο, λειτουργεί διατηρώντας μια «τράπεζα» φίλτρων (συνήθως τύπου Kalman ή Extended Kalman Filter, EKF), με το καθένα από αυτά να προσεγγίζει τον στόχο με ένα υποψήφιο καθεστώς δυναμικής. Ο αλγόριθμος IMM αμέσως

συγκριθεί τις δύο εκτιμήσεις, και τις σταθμίζει σε πιθανότητες μεταξύ των μοντέλων, έτσι ώστε να είναι ικανό να προσαρμόζεται ταχύτατα σε τυχόν ξαφνικές αλλαγές της δυναμικής συμπεριφοράς (Mazor et al., 1998).

Οι εξελίξεις που έλαβαν χώρα στον τομέα της πολυπλοκότητας των δυναμικών συστημάτων με έντονες αβεβαιότητες μη γραμμικού, Gauss χαρακτήρα, οδήγησαν στην ανάπτυξη των μεθόδων Particle Filtering (PF). Βάσει των Su et al. (2018, : 5-7), τα PF είναι ικανά να εκτιμούν την κατανομή της πιθανότητας της εκτιμώμενης κατάστασης, δημιουργώντας ένα πλήθος μορίων (particles), τα οποία αποτελούν ένα είδος προσομοίωσης διαφορετικών ενδεχομένων. Με επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία και κλιμακωμένης αύξησης του βάρους των μορίων, τα PF προσφέρουν την δυνατότητα να αντληθεί μια ακριβής εκτίμηση σε δύσκολες περιπτώσεις όπου επικρατεί μια μη γραμμική δομή. Αν και θεωρούνται πιο απαιτητικά από τα EKF και IMM σε υπολογιστική ισχύ, τα PF εμφανίζονται σε εφαρμογές συνεργατικής αναχαιτίσης, καθώς και σε περιβάλλοντα όπου η κατανομή του «θορύβου» δεν ακολουθεί κάποιο μαθηματικό υπόδειγμα.

#### **4.2 Εκτιμητής IMM (Interacting Multiple Model): θεωρία και απεικόνιση στο υπό εξέταση σενάριο**

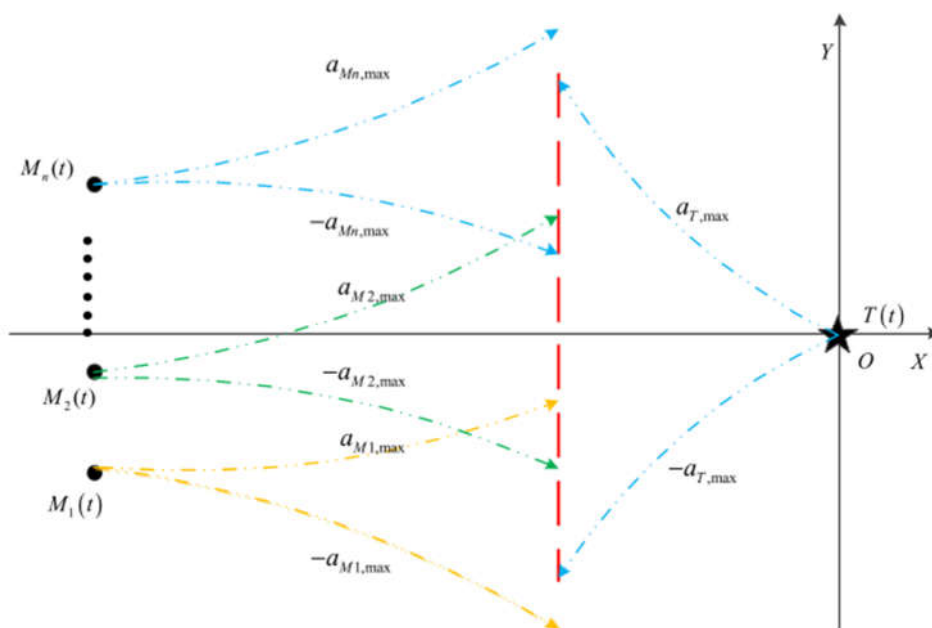
Ο εκτιμητής Interacting Multiple Model ή IMM, αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους, στον τομέα της στοχαστικής εκτίμησης σε συστήματα όπου τα δυναμικά μοντέλα είναι εναλλασσόμενα, π.χ. τα μοντέλα που χαρακτηρίζονται από έντονους και μη γραμμικούς ελιγμούς που εκτελεί ένας εχθρικός στόχος. Ο εκτιμητής συνδυάζει την ευρωστία που παρουσιάζουν τα KF και EKF, σε γραμμικά μοντέλα, και την δυνατότητα της ανταπόκρισης με δυναμικό τρόπο στην αλλαγή της λειτουργίας (π.χ την διαφοροποίηση και την πολυπλοκότητα των ελιγμών) του εκτιμώμενου αντικείμενου.

Όπως προαναφέρθηκε, η βασική αρχή του IMM, στηρίζεται στη χρήση μιας τράπεζας φίλτρων KF ή EKF, όπου το κάθε ένα είναι συνδεδεμένο με ένα συγκεκριμένο δυναμικό mode, δηλαδή μια διακριτή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Σε κάθε βήμα που πραγματοποιείται στον αλγόριθμο, τα επιμέρους φίλτρα που αξιοποιούνται, επικοινωνούν μεταξύ τους, και ανταλλάσσουν πληροφορίες και δεδομένα μέσω ενός συστήματος

πιθανοτήτων μετάβασης, που αντιπροσωπεύουν τη δυναμική εναλλαγή μεταξύ των μοντέλων, Συγκεκριμένα, σε κάθε βρόγχο υπολογίζονται:

- **Η μίξη των εκτιμήσεων:** Οι συνθήκες που επικρατούν στην αρχή σε κάθε φίλτρο, ανανεώνονται ως ένα ζυγισμένο άθροισμα των εκτιμήσεων όλων των φίλτρων, ανάλογα με τις πιθανότητες της μετάβασης.
- **Η εξέλιξη (Model-Matched Filtering):** Το κάθε φίλτρο εκτελεί μια τυπική ενημέρωση τύπου Extended Kalman Filter – EKF – με βάση το δικό του (mode specific) μοντέλο για την πρόβλεψη και διόρθωση της κατάστασης.
- **Η ενημέρωση των πιθανοτήτων:** Οι πιθανότητες του κάθε μοντέλου, ενημερώνονται βάσει της τρέχουσας εκτίμησης της νέας μέτρησης.
- **Η συγχώνευση:** Η συνολική εκτίμηση παράγεται ως ένα σταθμισμένο άθροισμα των μετρήσεων που έγιναν από τα επιμέρους φίλτρα, ανάλογα με τις επίκαιρες πιθανότητες.

Στο σενάριο της συνεργατικής αναχαίτισης που μελετάται, ο στόχος εκτελεί με ένα διακριτό μοντέλο τύπου Markov με δύο mode, που αντιπροσωπεύουν τις δυναμικές φάσεις της απότομης αλλαγής της επιτάχυνσης. Το φίλτρο στη συνέχεια μοντελοποιεί με κατάλληλο τρόπο το σύνολο αυτών των δυναμικών μέσω της εφαρμογής δυο φίλτρων EKF, με τη μήτρα της μετάβασης μεταξύ των περιστάσεων να στηρίζεται σε γνωστές ή έστω, εκτιμώμενες πιθανότητες μετάβασης.



Εικόνα 2. Γραφική Απεικόνιση της συνεργατικής Στρατηγικής (Su et al., 2018, : 93)

Η εφαρμογή του IMM στο εξεταζόμενο σχήμα έχει ως εξής:

- Κάθε πύραυλος εκτελεί το IMM αξιοποιώντας τις μετρήσεις (bearing-only) των γωνιών από τον δικό του αισθητήρα, και από τους αισθητήρες των άλλων πυραύλων που ταυτόχρονα εκτιμούν τη κατάσταση.
- Στις δυναμικές του στόχου, συνυπολογίζονται τόσο η έλλειψη της γραμμικής σχέσης της εμπλοκής, όσο και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του στόχου (πολυπλοκότητα των ελιγμών, κινησιολογία, ταχύτητα κλπ.), υιοθετώντας το IMM για διακριτές αλλαγές στο μοντέλο της δυναμικής ( $\alpha_{max}, \tau_T$ ).
- Η διαδικασία εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας τους πύραυλους ικανούς να προσαρμόσουν τη καθοδήγηση προς τον εχθρικό στόχο, βάσει της πλέον βελτιστοποιημένης εκτίμησης της θέσεως, αλλά και της επιταχύνσεως του εχθρού.

Σε συνάρτηση με το  $Z_k$ , η πιθανότητα ότι η λειτουργία  $i$  ήταν σε ισχύ τη χρονική στιγμή  $k - 1$ , δεδομένου ότι η λειτουργία  $j$  είναι σε ισχύ τη χρονική στιγμή  $k$ , υπολογίζεται μέσω του κανόνα του Bayes ως εξής:

$$\mu_{k-1}^{i|j} = Pr\{r_{k-1} = i | r_k = j, Z_{k-1}\} = \frac{Pr\{r_k = j | r_{k-1} = i, Z_{k-1}\} \mu_{k-1}^i}{Pr\{r_k = j | Z_{k-1}\}}$$

Όπου  $\mu_{k-1}^i = Pr\{r_{k-1} = i | Z_{k-1}\}$  είναι η  $i$ -οστή πιθανότητα που εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας στο  $k - 1$  (Shashman & Oshman, 2009: 5-6). Χρησιμοποιώντας το θεώρημα της ολικής πιθανότητας και τη τύπου Markov μετάβαση του τρόπου λειτουργίας προκύπτει:

$$\mu_{k-1}^{i|j} = \frac{\pi_{ij} \mu_{k-1}^i}{\sum_{i=1}^8 \pi_{ij} \mu_{k-1}^i}$$

Όπου:

- $\mu_{k-1}^{i|j}$ : Η πιθανότητα της μίξης (mixing probability), δηλαδή η πιθανότητα ότι το mode ήταν  $i$  τη χρονική στιγμή  $k - 1$ , όταν όμως στον χρόνο  $k$  είναι στο mode  $j$ .
- $\pi_{ij}$ : Η πιθανότητα της μετάβασης (transition probability) της αλυσίδας Markov, δηλαδή η πιθανότητα να υπάρξει μετάβαση του συστήματος από το mode  $i$  στο mode  $j$  ανάμεσα τις χρονικές στιγμές  $k - 1$  και  $k$ .



- $\mu_{k-1}^i$ : Η πιθανότητα ότι το mode του συστήματος στη προηγούμενη χρονική στιγμή  $k - 1$  ήταν τύπου  $i$  λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα δεδομένα όλων των μετρήσεων ήταν μέχρι τότε  $Z_{k-1}$ .
- $\sum_{i=1}^8 \pi_{ij} \mu_{k-1}^i$ : Ο παρονομαστής της σχέσης, αποτυπώνει την συνολική πιθανότητα να βρεθεί το σύστημα στο mode  $j$  στον χρόνο  $k$ , εφόσον όμως ληφθούν υπόψιν όλα τα δυνατά mode στη προηγούμενη φάση, σταθμισμένα με τις αντίστοιχες πιθανότητες μετάβασης, καθώς και των ατομικών τους πιθανοτήτων. Ο τελεστής  $\Sigma$  είναι ο αριθμός των πιθανών mode, με το 8 να αποτελεί μια γενίκευση της σχέσης.

Ουσιαστικά, ο τύπος ορίζει πως εκτιμώνται οι προηγούμενες πιθανότητες του κάθε mode, φέρνοντας έτσι τις αρχικές συνθήκες που είχαν τα φίλτρα IMM πριν ληφθεί το κάθε βήμα κάθε εκτίμησης.

Θεωρητικά, βάσει των Shashman & Oshman (2009: 6), «οι αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε κάθε φίλτρο θα έπρεπε να είναι ένα άθροισμα Gauss, αλλά για να μπορέσει να λειτουργήσει το KF, απαιτείται η ισχύς μιας αρχικής συνθήκης Gauss κατανομής, οπότε και ο αλγόριθμος να είναι σε θέση να εκτιμά το σύνολο χρησιμοποιώντας αυτή ακριβώς τη κατανομή για κάθε στιγμή.» Οπότε, οι αρχικές συνθήκες εκφράζονται μαθηματικά:

$$x_{k-1|k-1}^{0j} = \sum_{i=1}^8 \chi_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1}^{i|j}$$

και ο πίνακας συν-διακύμανσης είναι:

$$P_{k-1|k-1}^{0j} = \sum_{i=1}^8 \mu_{k-1}^{i|j} \{P_{k-1|k-1}^i + [\hat{\chi}_{k-1|k-1}^i - \hat{\chi}_{k-1|k-1}^{0j}][\hat{\chi}_{k-1|k-1}^i - \hat{\chi}_{k-1|k-1}^{0j}]^T\}$$

Όπου:

- $P_{k-1|k-1}^{0j}$ : Η αρχική συνδιακύμανση του υπομοντέλου  $j$ , υπολογισμένη ως μια «μίξη» όλων των προηγούμενων επιμέρους συνδιακυμάνσεων από τα  $i$  υπομοντέλα.
- $\sum_{i=1}^8 \mu_{k-1}^{i|j}$ : Το άθροισμα όλων των πιθανών mode  $i$ , και η πιθανότητα της «μίξης», δηλαδή η πιθανότητα ότι το mode ήταν  $i$  τη χρονική στιγμή  $k - 1$ , όταν όμως στον χρόνο  $k$  είναι στο mode  $j$ .



- $P_{k-1|k-1}^i$ : Η εκτιμημένη συνδιακύμανση του  $i$ -οστού mode στο προηγούμενο βήμα, πριν τη «μίξη».
- $\hat{\chi}_{k-1|k-1}^i$ : Η εκτιμημένη κατάσταση (state estimate) του  $i$ -οστού φίλτρου στο προηγούμενο βήμα.
- $\hat{\chi}_{k-1|k-1}^{0j}$ : Η κατάσταση της «μίξης» (mixed initial state estimate) που χρησιμοποιείται ως αρχική εκτίμηση για το φίλτρο του  $j$  mode, είναι δηλαδή ο μέσος όρος των καταστάσεων των άλλων modes για τη «μίξη» στο  $j$ -οστό mode.
- $[\hat{\chi}_{k-1|k-1}^i - \hat{\chi}_{k-1|k-1}^{0j}]^T$ : Ο όρος αυτός λαμβάνει υπόψη την απόκλιση κάθε εκτιμημένης κατάστασης  $i$  από τη κατάσταση «μίξης» που χρησιμοποιείται για το  $j$  mode, έτσι ώστε να μετρηθεί σωστά η συνολική διασπορά.

Βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Monte Carlo που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία (Shaferman & Oshman, 2009), το IMM στη λειτουργία διαμοιρασμού των πληροφοριών μεταξύ των πυράδων, βελτιώνει σημαντικά τα ποσοστά της ακρίβειας στην εκτίμηση της επιτάχυνσης και των αλλαγών της κατεύθυνσης, ενώ ταυτόχρονα ελαττώνει το μέσο χρόνο μη ανταπόκρισης (time lag) της ανίχνευσης των ελιγμών, κάτι που κατά συνέπεια αυξάνει δραματικά τη συνολική πιθανότητα της επιτυχούς αναχαίτισης του εχθρικού στόχου.

Τα οφέλη που προσφέρει το μοντέλο, είναι ποίκιλα και πλέον αναγκαία στο πεδίο της εμπλοκής. Η γρήγορη προσαρμογή στις έντακτες καταστάσεις που παρουσιάζονται στο πεδίο, σε συνδυασμό με την αξιόπιστη λειτουργία στις πάντα αβέβαιες συνθήκες και την χαμηλή της ανάγκη σε υπολογιστική ισχύ, καθιστά το IMM εξαιρετικά αποτελεσματικό και ισχυρό μοντέλο στην αναχαίτιση δυναμικών στόχων. Φυσικά, περιλαμβάνει περιορισμούς όπως η εγκυρότητα των πιθανοτήτων μετάβασης, η του δεδομένου ότι η ακρίβεια εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα διαχωρισμού.

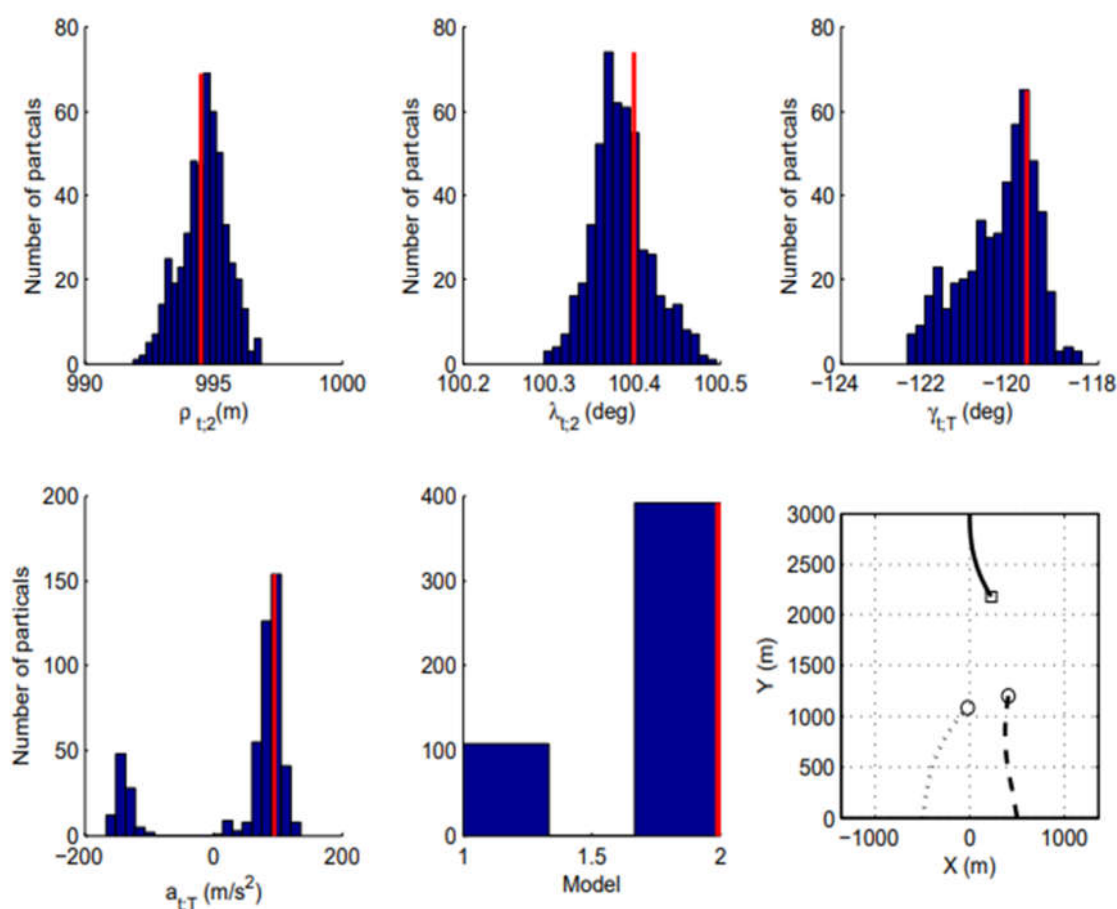
#### **4.3 Εκτιμητής MMPF (Multiple Model Particle Filter): θεωρία και εφαρμογή στο συγκεκριμένο πρόβλημα**

Το φίλτρο εκτίμησης MPFF (Multiple Model Particle Filter) συνδυάζει τις τεχνικές που αξιοποιούν τα φίλτρα IMM, και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι μέθοδοι Particle

Filtering (PF), καθιστώντας το ικανό να αντιμετωπίζει μη-γραμμικές και δυναμικές που δεν είναι τύπου Gauss. Είναι καθιερωμένο ως ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο, και αποδεδειγμένα εφαρμοζόμενα σε αβέβια και απαιτητικά σενάρια, όπως αυτό της συνεργατικής αναχαίτισης πυραύλων με περιορισμένη όραση (βάσει bearing-only μετρήσεων).

Στη θεωρητική του βάση, το MMPF αναπαριστά μια κατανομή πιθανότητας του παρακολουθούμενου στόχου. Αυτή η παρακολουθούθηση λαμβάνει χώρα διάμεσα ενός «νέφους» μορίων (particles), με κάθε μόριο να αντιστοιχεί ή σε μια υπόθεση της κατάστασης, ή σε ένα mode δυναμικής, δηλαδή μιας διακριτής λειτουργικής κατάστασης· παράδειγμα αυτής αποτελεί ένας διαφορετικός ελιγμός που εκτελεί ο εχθρικός στόχος. Ο αλγόριθμος, εξελίσσεται και οργανώνεται σε πέντε βασικά στάδια που παρατίθενται παρακάτω:

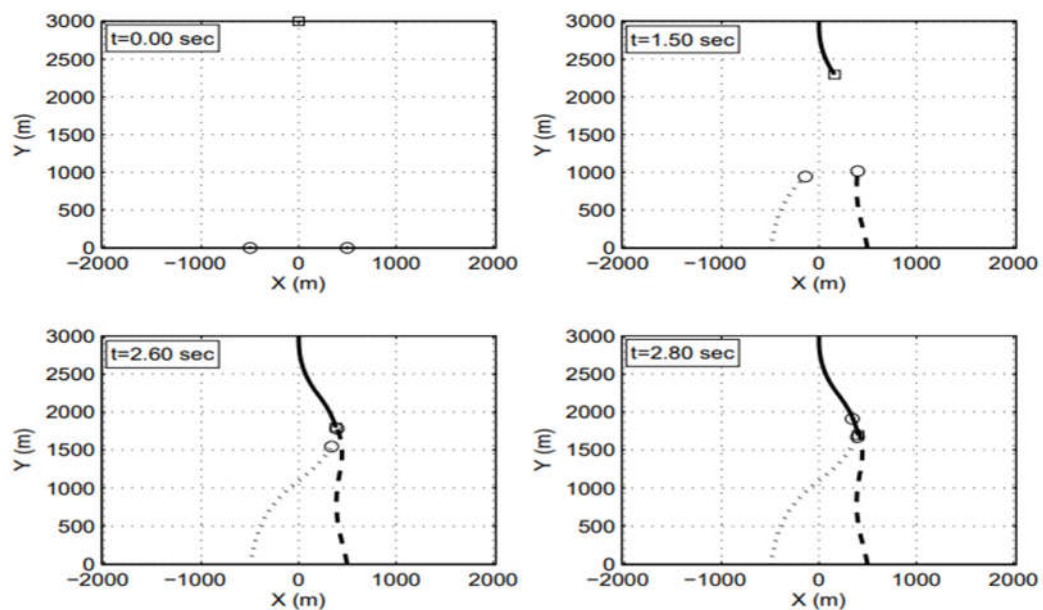
- **Προβλεψη (Sampling/Prediction):** Το κάθε μόριο είναι ικανό να προβλέπει την επόμενη του κατάσταση δυναμικά, σύμφωνα με το αντίστοιχο mode και τις δυναμικές εξισώσεις.
- **Εναλλαγή των Μοντέλων:** Τα διάφορα mode των μορίων έχουν την ικανότητα να μεταβάλλονται τυχαία με βάση ένα σύνολο πιθανοτήτων Markov, που ορίζει τις πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των μοντέλων.
- **Αναβάθμιση της Πιθανότητας:** Το «βάρος» του κάθε μορίου, αναβαθμίζεται αναλόγως της συμβατότητας που έχει σημειωθεί στην εκτιμώμενη κατάσταση, με τη νέα μέτρηση.
- **Επαναληπτική Δειγματοληψία:** Οι συνεχείς επαναλήψεις στην δειγματοληψία, βοηθούν στην ευκολότερη συγκέντρωση του «πληθυσμού» των μορίων γύρω από οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση, και εξαλείφονται έτσι τα μόρια με χαμηλό «βάρος» (χαμηλής πιθανότητας).
- **Fusion:** Σε συνεργατικά σενάρια, οι πληροφορίες, είτε πρόκεινται για μετρήσεις είτε για εκτιμήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, διαμοιράζονται μεταξύ των πυραύλων, κάτι που ενισχύει περαιτέρω την απόδοση και την ακρίβεια.



Εικόνα 3. Ιστογράμματα αποτελεσμάτων εφαρμογής του MMPF (Shaferman & Oshman, 2009: 17)

Εφαρμόζοντας το MMPF στο εξεταζόμενο σενάριο της συνεργατικής αναχίτισης, το MMPF αποτελεί το βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης του στόχου, δηλαδή της θέσης του, της ταχύτητάς του ή της επιτάχυνσής του. Βάσει θεωρητικών μετρήσεων τύπου bearing-only από ένα πλήθος αισθητήρων που βρίσκονται επί των πυραύλων, το φίλτρο είναι ικανό να υποβοηθά ακόμα και σε συνθήκες όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι θα αιφνιδιαζόντουσαν από τους απότομους ελιγμούς που μπορεί να διαγράφει ο στόχος. Η διαδικασία ξεκινά με τον αρχικό «πληθυσμό» των μορίων να κατανέμεται εργονομικά, ούτως ώστε να ο χώρος πιθανών καταστάσεων και απότομων ελιγμών να καλύπτεται πλήρως. Αμέσως μετά, ξεκινά η διαδικασία της πρόβλεψης, με κάθε μόριο να αντανακλά κάθε πιθανό ελιγμό του εχθρού, βασισμένο στο δικό του υπόδειγμα της δυναμικής: όσα μόρια έχουν βρεθεί στα σωστά δυναμικά πλαίσια, αποκτούν μεγαλύτερο «βάρος», δηλαδή αυξάνουν τις πιθανότητες

συνεπούς και ακριβούς εκτίμησης. Τέλος, σε περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα συνεργατικής ανταλλαγής των πληροφοριών από τους πυράλους, τα «βάρη» των μορίων λαμβάνουν υπόψιν τις συνδυασμένες μετρήσεις, και έτσι αυξάνουν θεαματικά τα ποσοστά της ακρίβειας και της εγκυρότητας της εκτίμησης, ασχέτως της συμπεριφοράς που μπορεί να παρουσιάζει ο στόχος.



Εικόνα 4. Αναπαραστάσεις των τροχιών. Έντονη ίσια γραμμή: Στόχος, Διακεκομμένη γραμμή με τελείες: Πύραυλος 1, Διακεκομμένη γραμμή: Πύραυλος 2. (Shaferman & Oshman, 2009: 16)

#### 4.4 Συγκριτική ανάλυση προσεγγίσεων βάσει βιβλιογραφίας

Έχοντας καλύψει το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με την λειτουργία των δύο προσεγγίσεων, είναι ζωτικής σημασίας να συγκριθούν οι δύο, βάσει της σύγχρονης βιβλιογραφίας. Η σύγχρονη βιβλιογραφία στον τομέα της συνεργατικής αναχίτισης πυραύλων και της εκτίμησης του στόχου, χαρακτηρίζεται άλλωστε από τη συστηματική αξιολόγηση τόσο των παραδοσιακών, καθιερωμένων ως σήμερα μεθόδων, όσο και των μοντέρνων λύσεων που δίνονται από την επιστημονική κοινότητα παγκοσμίως, έχοντας ως κύριο στόχο τη βελτιστοποίηση και μεγιστοποίηση της ακρίβειας και της υπολογιστικής απόδοσης των συστημάτων. Παρακάτω συνοψίζονται σε ξεχωριστούς τομείς, τα συμπεράσματα που μπορούν να αντληθούν από τις βιβλιογραφικές πηγές.

1. **Ακρίβεια των Εκτιμητών:** Οι μελέτες των Su et al. (2018) και των Dong et al. (2023), είναι δύο από τις διάφορες μελέτες που αποδεικνύουν ότι οι αλγόριθμοι

που βασίζονται στο σύστημα του Particle Filtering (PF), λόγω χάρη το MMPF, υπερτερούν κατά των κλασικών και ίσως ξεπερασμένων, Extended Kalman Filter (EKF) και Interacting Multiple Model (IMM). Συγκεκριμένα, ανέδειξαν πλεονεκτήματα στις περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα «θορύβου» και έντονη μη-γραμμικότητα. Οι Ziwei et al. (2023), θεωρούν ότι το MMPF αποδεδειγμένα είναι βέλτιστο εργαλείο στη παρακολούθηση των σύνθετων ελιγμών που εκτελεί ο στόχος, με λιγότερο λανθάνων χρόνο ανίχνευσης.

2. **Συνεργατική Ανταλλαγή Δεδομένων και Πληροφορίας - Information Sharing:** Η συνεργασία τύπου sharing δεδομένων που αντλούν πολλαπλοί πύραυλοι, αποτελεί καταλύτη βελτίωσης των επιδόσεων της αναχίτισης και της ακρίβειας της εκτίμησης. Οι Dong et al. (2023) και Guo et al. (2022) αναδεικνύουν ότι ο «θόρυβος» που δημιουργείται από τους αισθητήρες πρακτικά καθίσταται αμελητέος, κάτι που αυξάνει δραματικά την ισχύ της απάντησης στις απρόβλεπτες μεταβολές που παρουσιάζονται στη κίνηση του εχθρού.
3. **Πρακτική επίτευξη λόγω υπολογιστικής ισχύος:** Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα των PF και MPFF που παρατέθηκαν άνωθεν του υποκεφαλαίου, ένας ξεκάθαρος περιορισμός που τίθεται είναι αυτός του αυξημένου υπολογιστικού κόστους που απαιτούν αυτά τα συστήματα. Στη μελέτη των Shaferman & Oshman (2009), καθώς και στη μελέτη των Yuksek et al. (2018), τονίζεται ότι αναγκαστικά πρέπει να υπάρξει ένας συμβιβασμός μεταξύ του κόστους που παρουσιάζεται στον τομέα της υπολογιστικής ισχύος, και της απόδοσης. Έχουν όμως προταθεί σχήματα υβριδικής φύσεως, όπου δηλαδή συνδυάζονται τα IMM και PF μοντέλα, και βρίσκονται υπό εξέταση, όπως αυτή που πραγματοποίησαν οι Liu & Liang (2018), ως λύση προς τη μείωση του κόστους χωρίς να θυσιάζεται σημαντικά η ακρίβεια του συστήματος.
4. **Εφαρμογή σε ρεαλιστικά σενάρια - Περιορισμοί:** Οι σύγχρονες προσεγγίσεις που συναντιούνται, έχουν κατά νου τους φυσικούς περιορισμούς που τίθενται προ των πυλών, όπως παραδείγματος χάρη η γωνία της προσβολής του στόχου, ή η επιτάχυνση που μπορεί να σημειώνει ο στόχος. Σε μελέτες όπως αυτές των Dong et al. (2023) και Guo et al. (2022), παρουσιάζονται ολοκληρωμένες στρατηγικές όπου τίθεται στο προσκήνιο η ρεαλιστική σχεδίαση συστημάτων καθοδήγησης σε αντίξοες συνθήκες, ενώ συναντάμε και το επιχείρημα της αναγκαιότητας συγχρονισμένης συνεργασίας κατά επιθέσεων τύπου salvo, στη μελέτη του Ziwei (2023).

Εν κατακλείδι, η βιβλιογραφία ξεκάθαρα στηρίζει την αποτελεσματικότητα του IMM σε σενάρια όπου παρουσιάζεται μια μέτρια μη-γραμμικότητα, και έχοντας περιορισμένη

υπολογιστική ισχύ (Su et al., 2018), αναδεικνύοντας παράλληλα την υπεροχή του MPFF σε πολύπλοκες, υπό συνθήκες πίεσης καταστάσεις. Παρόλα αυτά, το MPFF απαιτεί πολύ περισσότερη ισχύ σε υπολογιστικά μέσα. Παράλληλα, η έρευνα συνεχίζει να μελετά εναλλακτικά σενάρια υβριδικών ή ημί-υβριδικών σχημάτων υπολογισμού, δίνοντας ευκαιρία και σε ιδέες όπως την ενσωμάτωση του AI για την δυναμική διαχείριση σε επίπεδο multi model εκτιμήσεων. (Liu & Liang, 2018)

## 5 Κριτική αξιολόγηση / Σύνοψη

### *5.1 Συνοπτικά συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανάλυσης*

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας στο πεδίο της συνεργατικής αναχαίτισης πολλαπλών πυράύλων αναδεικνύει κάποια σημαντικά ευρήματα, τόσο σε ερευνητικό και πρακτικό επίπεδο,



σχετικά με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων εκτίμησης και καθοδήγησης όπως αυτών των IMM και MMPF.

Σε πρώτο πλάνο, οι αλγόριθμοι τύπου MMPF έχουν αποδειχθεί ήδη αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση μη-γραμμικών απειλών, δηλαδή σε καταστάσεις όπου ο στόχος εκτελεί απότομους και απρόβλεπτους ελιγμούς, όπως στο υπό εξέταση σενάριο. Τα φίλτρα σωματιδίων PF έχουν την ικανότητα να αναπαριστούν κατανομές που δεν είναι τύπου Gauss, κάτι που επιτρέπει την βελτιστοποίηση της ακρίβειας στη διαδικασία της πρόβλεψης, αλλά και την ταχύτερη προσαρμογή σε οποιαδήποτε αλλαγή υπάρξει στα modes (Su et al., 2018; Ziwei et al., 2023; Shaferman & Oshman, 2009). Η ανωτερότητα αυτή εκφράζεται στην ελάττωση της εμφάνισης πιθανών σφαλμάτων στην εκτίμηση της επιτάχυνσης και των γωνιακών κινήσεων, οδηγώντας σε υψηλότερη ακρίβεια στον τομέα της καθοδήγησης και στη μεγιστοποίηση της πιθανότητας της επιτυχούς αναχαίτισης.

Επιπροσθέτως, η συνεργατική ανταλλαγή των πληροφοριών μεταξύ των πυραύλων μέσω δεδομένων που αντλούν από τους αισθητήρες που βρίσκονται επί αυτών, ενισχύει επίσης τις επιδόσεις των αλγορίθμων. Η χρήση συλλογικών μετρήσεων μειώνει σημαντικά το μέσο σφάλμα εστίασης που μπορεί να προκύψει, συντομεύοντας τον μέσο χρόνο της απόκρισης όσον αφορά την αναγνώριση των αλλαγών στη συμπεριφορά του εχθρικού στόχου (Dong et al., 2023: 12-14; Guo et al., 2022: 5-7; Su et al., 2018: 7-9). Αυτή η ικανότητα των αλγορίθμων μεταφράζεται σε μια σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων στο πεδίο της καθοδήγησης και στη σταθερότητα της αναχαίτισης ακόμη και σε αντίξοες συνθήκες όπου επικρατούν φαινόμενα όπως αυτά της αβεβαιότητας και του «θορύβου».

Παρά τα προφανή θετικά σημεία που φαίνονται στις μεθόδους Particle Filtering, η ιδιαίτερα αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, σε συνδυασμό με την απαίτηση σε ένα ισχυρό υπολογιστικό σύστημα, αποτελεί τροχοπέδη για τη πρακτική τους εφαρμογή σε συστήματα περιορισμένων πόρων. Ταυτόχρονα, οι συμβατικοί αλγόριθμοι IMM, αν και ξεκάθαρα λιγότερο απαιτητικοί σε υπολογιστικούς πόρους και όντες πιο εύκολα εφαρμόσιμοι, εμφανίζουν σχετικά περιορισμένη ικανότητα όσον αφορά τις απρόβλεπτες και αιφνιδιαστικές συχνά κινήσεις που εκτελεί η εχθρική απειλή, και δεν είναι ιδανικοί για τη διαχείριση θορύβων

που δεν ακολουθούν μια κατανομή της μορφής Gauss (Shaferman & Oshman, 2009; Yuksek et al., 2018; Liu & Liang, 2018). Επομένως, είναι κρίσιμης σημασίας να τεθεί ένα ζήτημα επιλογής μεταξύ των δύο, ισορροπώντας τις ανάγκες μεταξύ της απόδοσης αλλά και της υπολογιστικής επιβάρυνσης.

Τέλος, η σύγχρονη βιβλιογραφία στρέφει τον προσανατολισμό της προς την ανάπτυξη μεθόδων-υβριδίων, που συνδυάζουν τόσο τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων και εμπλουτίζοντας τα με τις σύγχρονες τεχνολογίες της τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, όσο και να ελαχιστοποιήσει όσο περισσότερο τα ελαττώματα των εκατέρωθεν συστημάτων (Ziwei et al., 2023; Liu & Liang, 2018).

## **5.2 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των προσεγγίσεων**

Όπως ήδη έχει διαπιστωθεί, η συνεργατική αναχαίτιση πολλαπλών πυραύλων αποτελεί ένα περίπλοκο πρόβλημα που απαιτεί υψηλά επίπεδα όσον αφορά την ακρίβεια και ευστοχία της εκτίμησης της κατάστασης του εχθρικού στόχου, ο οποίος παρουσιάζει μη-γραμμικές μεταβολές στη πορεία του. Οι αλγόριθμοι IMM και MMPF έχουν μεν αναδειχθεί όπως αναφέρθηκε παραπάνω ως τα βασικά πλέον εργαλεία για την αντιμετώπιση τέτοιων στόχων, παρόλα αυτά, και οι δυο προσεγγίσεις παρουσιάζουν μεταξύ των πλεονεκτημάτων τους, μια πληθώρα περιορισμών που επηρεάζουν την επιλογή και εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες. (Ziwei et al., 2023; Liu & Liang, 2018).

Όσον αφορά το φίλτρο IMM, που βασίζεται σε ένα σύνολο παραλλαγών των φίλτρων Kalman και των προεκτάσεων τους, αποτελεί μια σχετικά αποδοτική μέθοδο, στο πλαίσιο της συνεργατικής αναχαίτισης, συναντάμε ένα πλήθος πλεονεκτημάτων. Συγκεκριμένα:

- **Υψηλή υπολογιστική αποδοτικότητα:** Η αρχιτεκτονική του IMM δεν απαιτεί τόσους πόρους υπολογισμού σε σύγκριση με μοντέλα όπως αυτό των PF, καθιστώντας το ιδανικό για συστήματα όπου η ισχύς του υπολογιστικού συστήματος είναι περιορισμένη, ή σε συνθήκες όπου απαιτείται ταχύτερη απόκριση (Shaferman & Oshman, 2009).
- **Εύκολη παραμετροποίηση:** Το IMM, έχοντας πλέον εδραιωθεί στο θεωρητικό πλαίσιο και χρησιμοποιώντας λιγότερες παραμέτρους, δύναται να ενσωματωθεί ευκολότερα σε ήδη υπάρχοντα συστήματα καθοδήγησης και εκτίμησης.
- **Ικανοποιητική απόδοση σε μη-γραμμικά περιβάλλοντα:** Σε σενάρια όπου ο στόχος δεν εκτελεί ιδιαίτερα δύσκολες κινήσεις, και η αλλαγή της δυναμικής του



κίνησης είναι σπάνια, το IMM παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην εκτίμηση της κατάστασης του στόχου. (Su et al., 2018; Ziwei et al., 2023)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, κάθε σύστημα φέρει πάνω του ένα σύνολο περιορισμών στην εφαρμογή τους, και το IMM δεν αποτελεί εξαίρεση· συγκεκριμένα, το IMM παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, όπως:

- **Αποκλειστική υποστήριξη κατανομής Gauss:** Καθώς αξιοποιούνται επιμέρους φίλτρα τύπου Kalman ή Extended Kalman Filters, η λειτουργία του IMM προϋποθέτει τις προσεγγίσεις κατανομών Gauss, που συνήθως δεν επαρκούν για την εκτίμηση της κατάστασης σε σύνθετες ή μη-γραμμικές καταστάσεις με «θόρυβο» από μια κατανομή που δεν είναι τύπου Gauss (Shaferman & Oshman, 2009).
- **Περιορισμένη ικανότητα απόκρισης:** Οι ξαφνικές και έντονες μεταβολές στην κίνηση του στόχου, όπως οι αιφνιδιαστικοί ελιγμοί και η πολυπλοκότητα τους, αποτελεί εμπόδιο για την υπολογιστική δομή του IMM, περιορίζοντας έτσι τη ταχεία προσαρμογή του φίλτρου σε γρήγορες εναλλαγές των modes, κάτι που αυξάνει σημαντικά τον χρόνο που χρειάζεται το φίλτρο να αναγνωρίσει τη δυναμική των ελιγμών και να επιβαρυνθεί έτσι η καθοδήγηση (Su et al., 2018).
- **Εξάρτηση από τον αριθμό των modes:** Το μεγαλύτερο πιθανώς πλήθος των modes καθιστά περίπλοκο τον υπολογισμό, ενώ η ίδια η επιλογή τους έχει καθοριστική σημασία στην απόδοση του συστήματος.

Παράλληλα, αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια το MMPF, το οποίο με τη σειρά του, παρουσιάζει μια σειρά τόσο ευεργετικών χαρακτηριστικών και πλεονεκτημάτων, όσο και συγκεκριμένων περιορισμών που δυσχεραίνουν την ομαλή λειτουργία του. Πιο αναλυτικά, συναντάμε ένα πλήθος στρατηγικών πλεονεκτημάτων όπως:

- **Ικανότητα διαχείρισης μη-γραμμικών, non-Gauss μοντέλων:** Η χρήση των σωματιδίων επιτρέπει μια ακριβή αναπαράσταση των κατανομών της κατάστασης που παρουσιάζουν περίπλοκο χαρακτήρα, κάτι που επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση σε σενάρια όπου παρουσιάζεται υψηλή έλλειψη γραμμικότητας και «θορύβου» (Ziwei et al., 2023).
- **Ταχεία αναγνώριση και προσαρμοστικότητα:** Το φίλτρο MMPF είναι ικανό να ανταποκριθεί ταχύτατα σε αλλαγές που παρουσιάζονται στα λειτουργικά modes, κάτι που εμποδίζει τη παρουσίαση της πιθανής καθυστέρησης στη ανίχνευση των ελιγμών του εχθρού (Su et al., 2018).

- **Βελτιωμένα αποτελέσματα στη συνεργατική αναχαίτιση:** Σε modes συνεργατικής ανταλλαγής των πληροφοριών, το MMPF παρουσιάζει σημαντικά υψηλά ποσοστά ακρίβειας, συμβάλλοντας έτσι στην βελτιστοποίηση της πιθανότητας της επιτυχούς αναχαίτισης, καθώς και στη μείωση της απαιτούμενης ισχύος ανά πύραυλο (Dong et al., 2023).

Όλα αυτά τα σαφώς στρατηγικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το φίλτρο σωματιδίων τύπου MMPF, συνοδεύονται από σημαντικούς περιορισμούς, όπως:

- **Υψηλή απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ:** Ο αλγόριθμος απαιτεί ένα μεγάλο πλήθος σωματιδίων που λειτουργούν ταυτόχρονα για την επαρκή προσέγγιση της πιθανότητας εκτίμησης και αναχαίτισης, κάτι που μεταφράζεται σε μεγάλη ανάγκη σε επεξεργαστική ισχύ και ενέργεια, περιορίζοντας έτσι τη χρήση του σε embedded συστήματα χωρίς ισχυρά υπολογιστικά μέσα (Shaferman & Oshman, 2009; Yuksek et al., 2018).
- **Πιθανή απώλεια ποικιλότητας:** Η διαδικασία της επαναληπτικής δειγματοληψίας, καθιστά πιθανή την απώλεια της ποικιλότητας των μορμών, μειώνοντας έτσι την δυνατότητα της ανάλυσης της κατανομής που παρουσιάζεται στην κατάσταση, απαιτώντας τη χρήση πρόσθετων τεχνικών (π.χ. Regularization Method) (Shaferman & Oshman, 2009; Doucet & Gordon, 2001).
- **Ανάγκη Παραμετροποίησης:** Το φίλτρο απαιτεί προσεχτικό σχεδιασμό στον τομέα των παραμέτρων, λόγου χάρη στον αριθμό των σωματιδίων ή τον παράγοντα της πιθανότητας. Αυτό είναι κάτι που απαιτεί τον περαιτέρω πειραματισμό σε κάθε πιθανή εφαρμογή, που σημαίνει ότι υπάρχουν ακόμα πολλά βήματα που πρέπει να ληφθούν ώστε το σύστημα να είναι ικανό να προβλέπει τη πλειοψηφία όλων των πιθανών καταστάσεων (Su et al., 2018; Ziwei et al., 2023; Shaferman & Oshman, 2009).

Συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, η επιλογή μεταξύ των δυο αποτελεί μια ανταλλαγή μεταξύ των παραγόντων της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και της απαιτούμενης ακρίβειας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το IMM αποτελεί αποδεδειγμένα μια αποδοτική επιλογή· είναι ένα σύστημα που δεν απαιτεί ιδιαίτερα ισχυρή επεξεργαστική ικανότητα, και είναι ικανότατο να προβλέπει αλλαγές στη δυναμική της κίνησης του στόχου σε περιπτώσεις που αυτές είναι μετριασμένες. Σε περιπτώσεις όμως που εμφανίζεται «θόρυβος», οι ελιγμοί του εχθρικού στόχου είναι περίπλοκοι και τα σενάρια είναι απαιτητικά στον χρόνο της απόκρισης, το MMPF αποτελεί ένα ικανότερο μέσο, εφόσον όμως διατίθεται ο απαιτούμενος υπολογιστικός

εξοπλισμός (Yukseket al., 2018; Shaferman and Oshman, 2009; Ziwei et al., 2023; Dong et al., 2023; Su et al., 2018).

Η τρέχουσα σύγχρονη τάση στην έρευνα γύρω από τον τομέα της συνεργατικής αναχαίτισης και των υπαρχόντων μοντέλων που τη καθιστούν δυνατή, στρέφεται γύρω από την υλοποίηση υβριδικών συστημάτων και λύσεων, και στην βελτίωση της αποδοτικότητας συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα δύο μοντέλα, και ελαχιστοποιώντας κατά το δυνατόν περισσότερο τα μειονεκτήματα που μελετήθηκαν παραπάνω (Liu & Liang, 2018; Ziwei et al., 2023).

### **5.3 Τακτικές/επιχειρησιακές συνέπειες**

Η εξέλιξη των αλγορίθμων συνεργατικής εκτίμησης και καθοδήγησης πυραύλων, κυρίως μέσω των φίλτρων IMM και MMPF, παρουσιάζει μια πληθώρα επιπτώσεων τόσο στο τακτικό επίπεδο, όσο και στο ευρύτερο πλαίσιο των επιχειρησιακών ικανοτήτων που έχουν τα αντιαεροπορικά και τα αντιπυραυλικά συστήματα.

Στο τακτικό επίπεδο συγκεκριμένα, η δυνατότητα που παρέχεται από τη χρήση τέτοιων συστημάτων στον τομέα της ανταλλαγής των πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο καθώς και της συνδυαστικής εκτίμησης, βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια της παρακολούθησης, κάτι που αποτελεί αρωγό στην επιτυχή αναχαίτιση, ακόμα και σε σενάρια όπου ο στόχος εκτελεί περίπλοκους και ταχύτατους ελιγμούς αποφυγής. Η ικανότητα διαχείρισης σύνθετων και μη-γραμμικών μεταβολών του στόχου που διαθέτει το MMPF, καθιστά δυνατή τη ταχύτερη προσαρμογή σε απρόβλεπτες κινήσεις που εκτελεί ο εχθρός, προωθώντας έτσι την διεύρυνση της ευελιξίας και της απόκρισης των συστημάτων καθοδήγησης (Dong et al., 2023; Su et al., 2018; Shaferman & Oshman, 2009; Ziwei et al., 2023).

Παράλληλα, η βελτίωση που παρατηρείται στην ακρίβεια της εκτίμησης μέσω προσεγγίσεων συνεργατικού χαρακτήρα, ελαττώνει την ανάγκη να χρησιμοποιούνται ισχυρές πυραυλικές κεφαλές, καθώς η καθοδήγηση γίνεται ακριβέστερη, ταχύτερη και στοχευμένη. Αυτό συνεπάγεται τόσο το οικονομικό όφελος, όσο και μια βελτιωμένη αποφυγή κινδύνων στο

περιβάλλον και στο συλλογικό επίπεδο, όπως η ελάττωση της καταστροφής αστικών η ευαίσθητων περιοχών (Shaferman & Oshman, 2009; Dong et al., 2023; Guo et al., 2022).

Στο επιχειρησιακό πλαίσιο, η ικανότητα να εφαρμόζεται η χρήση τέτοιων κατανεμημένων αλγορίθμων εκτίμησης και καθοδήγησης ενισχύει τους παράγοντες της ανθεκτικότητας των αντιαεροπορικών δικτύων και ελαττώνοντας τον αναγκαίο αριθμό των εφεδρικών συστημάτων. Σε περιπτώσεις όπου ένας ή περισσότεροι πύραυλοι τίθενται εκτός λειτουργίας, ή ένας αισθητήρας ή περισσότεροι δυσλειτουργήσουν, το σύστημα δεν θέτεται εκτός μάχης, καθώς οι υπόλοιποι συμμετέχοντες πύραυλοι συνεχίζουν κανονικά την συλλογική παρακολούθηση με αξιόπιστο τρόπο. Αυτό το στρατηγικότατο πλεονέκτημα επιτρέπει την ανάπτυξη ευέλικτων αλλά και επεκτάσιμων συστημάτων με τη περαιτέρω δυνατότητα προσαρμοστικότητας σε δυναμικές επιχειρησιακές απαιτήσεις και συνθήκες (Shaferman & Oshman, 2009; Dong et al., 2023; Guo et al., 2022).

Η ανάγκη για τον προσεχτικό σχεδιασμό και την υλοποίηση τόσο του αλγορίθμου όσο και των δικτύων επικοινωνίας είναι προφανής· σε περιβάλλοντα όπου επικρατεί μια σημαντική απειλή στη μορφή του ηλεκτρονικού πόλεμου, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα των διαύλων πληροφόρησης ώστε να αποτραπεί το ενδεχόμενο της υπονόμευσης της συνεργασίας μεταξύ των πυραύλων (Shaferman & Oshman, 2009; Dong et al., 2023). Παράλληλα, η εισαγωγή των νέων αλγορίθμων και των συνεργατικών τακτικών στον τομέα της πολλαπλής αναχαίτισης, ανοίγει τον δρόμο σε πιο προηγμένα σενάρια εμπλοκής, όπως αυτό της αντιμετώπισης πολλαπλών στόχων με περιορισμένους διαθέσιμους πόρους. Οι τεχνολογίες αυτές, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη χρήση των τεχνολογιών της τεχνητής νοημοσύνης, δημιουργούν τις βάσεις για την δημιουργία πιο αυτοματοποιημένων και εξελιγμένων μοντέλων, που θα είναι πιο ευπροσάρμοστα σε περίπλοκα και απρόβλεπτα περιβάλλοντα μάχης. (Ziwei et al., 2023; Liu & Liang, 2018; Shaferman & Oshman, 2009)

Εν συνόλω, οι τεχνικές που υπάρχουν στον τομέα της συνεργατικής αναχαίτισης, όπως αυτές των IMM και MMPF, δεν αποτελούν απλώς βελτιώσεις σε αλγοριθμικό επίπεδο· αντιπροσωπεύουν μια πραγματικά ευεργετική στρατηγική εξέλιξη στον χώρο της λειτουργίας και αξιοποίησης των σύγχρονων αμυντικών συστημάτων, προσφέροντας ένα αποτελεσματικότερο, ανθεκτικότερο και πιο ευέλικτο μέσο στον τομέα της αεράμυνας.



## 6 Συμπεράσματα και προοπτικές

### 6.1 Τάσεις και ανοιχτά ζητήματα στη διεθνή βιβλιογραφία

Η διεθνής βιβλιογραφία στον τομέα των συνεργατικών συστημάτων αναχαίτισης πολλαπλών πυραύλων γυρνάει πλέον σε μια νέα σελίδα, αφού οι εκτιμητές πλέον εστιάζουν πλέον όχι μόνο στην βελτίωση της επίδοσης των βασικών αλγορίθμων, αλλά και στην αντιμετώπιση σύνθετων και πολύπλοκων προκλήσεων, με σκοπό να σχεδιαστούν πιο ευέλικτα, αμεσότερα, ακριβέστερα και ανθεκτικά συστήματα. Οι κύριες τάσεις στρέφονται κυρίως γύρω από:

- **Ενίσχυση των Υβριδικών Συστημάτων:** Η τάση προς την ανάπτυξη προσεγγίσεων με υβριδικό χαρακτήρα, δηλαδή τον συνδυασμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ των IMM και MMPF, ή και άλλων φίλτρων σωματιδίων, είναι εμφανής στη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία έχει θέσει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της ανταλλαγής μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και της υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται. Τα υβριδικά συστήματα επιδιώκουν κυρίως την βελτιστοποίηση της ευελιξίας των φίλτρων σωματιδίων, ελαττώνοντας την υπολογιστική ισχύ που αυτά απαιτούν (Liu & Liang, 2018: 4-6; Ziwei et al., 2023).
- **Ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης:** Η χρήση τέτοιων τεχνικών, μεταξύ τους και αυτή της μηχανικής μάθησης, στη προσαρμογή των φίλτρων και των παραμέτρων τους, στην ανίχνευσης των αλλαγών που πραγματοποιούνται μεταξύ των modes και στη βελτιστοποίηση της συνεργατικής στρατηγικής εν συνόλω, αποτελεί ανερχόμενο πεδίο στην διεθνή έρευνα. Ενσωματώνοντας αυτές τις τεχνολογίες στους αλγόριθμους εκτίμησης, θα επιτευχθεί ένα υψηλότερο επίπεδο αυτονομίας και ένας ταχύτερος χρόνος απόκρισης των συστημάτων αεράμυνας (Ziwei et al., 2023; Liu & Liang, 2018).
- **Κατανεμημένη και Ανθεκτική Επικοινωνία σε συνθήκες Ηλεκτρονικού Πολέμου:** Με την απειλή του ηλεκτρονικού πολέμου να ελλοχεύει στις συνθήκες του πεδίου μάχης, η ανάγκη για ασφαλείς επικοινωνιακές υποδομές κρίνεται πλέον εξαιρετικά σημαντική, με τους ερευνητές να στρέφουν επίσης τη προσοχή τους στη δημιουργία νέων πρωτοκόλλων προστασίας, καθώς και στην καλύτερη διαχείριση της πληροφορίας, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος (Shaferman & Oshman, 2009; Guo et al., 2022).
- **Προσαρμοστικότητα και αυτό-διόρθωση:** Οι ερευνητές ακόμα, μελετούν τα μέσα γύρω από τα οποία θα μπορούν τα φίλτρα και τα δυναμικά τους μοντέλα να

προσαρμόζονται σε κάθε κατάσταση και συνθήκη πλήρως αυτόνομα, βελτιώνοντας ή διορθώνοντας τις εκτιμήσεις που πραγματοποιούν πληρεξούσια, καθιστώντας τα ικανά να λειτουργούν αξιόπιστα ακόμα και υπό ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και σύνθετες απειλές (Ziwei et al., 2023; Liu & Liang, 2018).

Παράλληλα, στην διεθνή έρευνα τίθενται υπό συζήτηση τα ανοιχτά ζητήματα που υπάρχουν ακόμη, όπως:

- **Υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις:** Παρά τη πρόοδο που σημειώνεται, η πρόκληση της ανάπτυξης ελαφρών υπολογιστικών μοντέλων για ειδικά προσαρμοσμένα συστήματα παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο για την ολική εφαρμογή τέτοιων συστημάτων (Shaferman & Oshman, 2009; Yuksek et al., 2018)
- **Απώλειες Δεδομένων:** Για να υπάρχουν επιτυχή αποτελέσματα στο πλαίσιο της συνεργατικής αναχαίτισης, η όλη διαδικασία πρέπει να είναι συνεχής και αξιόπιστη, και να μη διακόπτεται από αστοχίες και παρεμβολές στον διαμοιρασμό της πληροφορίας. (Su et al., 2018; Guo et al., 2022)
- **Πληθωρισμός Παραμέτρων:** Η ανάγκη για ευέλικτες τεχνικές παραμετροποίησης είναι πλέον αναγκαία, καθώς έτσι θα μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο και συνεπώς, το βάρος του πειραματισμού. (Ziwei et al., 2023)
- **Διασφάλιση της Επικοινωνίας:** Η διασφάλιση της επικοινωνίας κατά των ηλεκτρονικών απειλών, παραμένει ένα μείζον θέμα που μελετά εντατικά η διεθνής επιστημονική κοινότητα. (Shaferman & Oshman, 2009; Guo et al., 2022)

## **6.2 Τεχνολογικές και επιχειρησιακές προσεγγίσεις μελλοντικής έρευνας**

Η επερχόμενη έρευνα στον τομέα της συνεργατικής αναχαίτισης πολλαπλών πυραύλων έχει ως κύριο στόχο τη περαιτέρω βελτίωση όσον αφορά την ακρίβεια, την αυτονομία και την επιχειρησιακή αξιοπιστία των συστημάτων αεράμυνας, χρησιμοποιώντας προηγμένα τεχνολογικά μέσα και προηγμένες ηλεκτρονικές αρχιτεκτονικές. Στη βιβλιογραφία, διαγράφονται οι εξής κατευθύνσεις:

- **Εμβάθυνση και Εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης και της Μηχανικής Μάθησης:** Η εφαρμογή της τεχνολογίας της Τεχνητής Νοημοσύνης και της



Μηχανικής Μάθησης για την επίτευξη της αυτοματοποίησης όσον αφορά τη προσαρμογή των παραμέτρων που αξιοποιούν τα διαφορικά φίλτρα εκτίμησης και καθοδήγησης, την πρόβλεψη και την ανίχνευση της δυναμικής των ελιγμών του εχθρικού στόχου, αλλά και της βέλτιστης συνεργασίας μεταξύ των πυραυλικών μέσων, αποτελεί τον κύριο άξονα της μελλοντικής έρευνας. Η ανάπτυξη προηγμένων αυτό-εκπαιδευόμενων αλγόριθμων θα αποτελέσει σημαντικότατο αρωγό στο να μειωθεί η ανθρώπινη εμπλοκή και την ταχύτερη προσαρμογή σε συνεχώς μεταβαλλόμενα επιχειρησιακά σενάρια. (Davis, Z., 2019; Ziwei et al., 2023; Liu & Liang, 2018)

- **Υβριδικές Αρχιτεκτονικές Αλγορίθμων:** Η περαιτέρω ανάπτυξη λύσεων υβριδικού χαρακτήρα, που συνδυάζουν πλεονεκτήματα από διαφορετικές προσεγγίσεις, λόγω χάρη το IMM και της υπολογιστικής του αποδοτικότητας, και του MPFF για την ικανότητα του να δουλεύει σε σενάρια όπου υπάρχει έλλειψη γραμμικότητας, θα προσφέρει ευέλικτες λύσεις, βρίσκοντας το βέλτιστο ισοζύγιο μεταξύ της απόδοσης και του κόστους. Επιπροσθέτως, αναπτύσσονται συνεχώς νέοι προηγμένοι αλγόριθμοι καθοδήγησης συνεργαζόμενων πυραύλων, που λειτουργούν υπό ένα τρισδιάστατο επίπεδο ταυτόχρονα, από διαφορετικές γωνίες επίθεσης. Αυτοί οι νέοι αλγόριθμοι είναι ικανοί να χρησιμοποιούν προσαρμοστικές μεθόδους τύπου sliding mode control, οι οποίες υπόσχονται τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας και της ταχύτερης συγκλίνουσας αντίδρασης στους ελιγμούς που διαγράφει ο στόχος, τονίζοντας παράλληλα τη σημασία της ανταλλαγής της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο. (Li et al., 2025; Liu & Liang, 2018)
- **Ασφαλή δίκτυα επικοινωνίας:** Η αύξηση της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας των δικτυακών υποδομών έναντι περιβαλλόντων ηλεκτρονικού πολέμου και ψηφιακών απειλών, αποτελεί ένα πεδίο έρευνας εξαιρετικής σημασίας στους επιχειρησιακούς και στρατηγικούς τομείς: οι εξελίξεις στη κρυπτογραφία, στις τεχνικές αντιμετώπισης τυχόν παρεμβολών και η ανάπτυξη πρωτοκόλλων διανομής των πληροφοριών και δεδομένων σε κατανεμημένα επικοινωνιακά δίκτυα έχουν ως κύριο στόχο να ελαχιστοποιήσουν τις διακοπές στην επικοινωνία και στο να αποτρέψουν αθέμιτες παρεμβολές (Guo et al., 2022).
- **Αυτονομία και κατανεμημένες λήψεις αποφάσεων:** Η αύξηση της αυτονομίας του κάθε πυραύλου ή μιας ομάδας αυτών επιταχύνει τον χρόνο αντίδρασης τους και βελτιστοποιεί την αξιοπιστία τους σε σενάρια διακοπή, ή της απώλειας ενός πυραύλου, ενισχύοντας έτσι τη κατανομή των πόρων και της απαιτούμενης ενέργειας, αναδεικνύοντας κυρίως τεχνικές τύπου DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) (Tsourdos et al., 2021; Dong et al., 2023; Su et al., 2018).



- **Επέκταση σε σενάρια πολυπλοκότερων απειλών:** Παράλληλα, η έρευνα στρέφεται στην ανάπτυξη πιο σύνθετων μοντέλων του στόχου, περιλαμβάνοντας πολλαπλούς στόχους που εκτελούν ταυτόχρονα απρόβλεπτους ελιγμούς, τονίζοντας την ανάγκη της διαχείρισης της ταυτόχρονης αναχαίτισης. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται διαχείριση πόρων όταν αυτοί είναι περιορισμένοι, σε περιβάλλοντα όπως αυτά που αναφέρθηκαν, απαιτεί την ανάπτυξη εξελεγχόμενων στρατηγικών καθοδήγησης και συνεργασίας μεταξύ των πυραύλων (Guo et al, 2022; Dong et al., 2023).

## 7 Βιβλιογραφία

1. DeLaurentis, D. & Callaway, R., 2004. A system-of-systems for Public Policy Decisions. Review of Policy Research, 21(6). <https://doi.org/10.1111/j.1541-1338.2004.00111.x>
2. Hillier, F.S. & Lieberman, G.J., 2021. Introduction to Operations Research, 9<sup>th</sup> Edition Mc-Graw-Hill. <https://www.academia.edu/download/50899729/695494b434b3711f396bc5f0d3c0a54e-original.pdf>
3. Magill, T.D., 1965. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes. IEEE Transaction on Automatic Control, AC-10(4). <https://doi.org/10.1109/TAC.1965.1098191>
4. Yanushevsky, R. 2018. Modern Missile Guidance. 2<sup>nd</sup> Edition. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351202954>
5. Dong, Y., Xu, Z., Wang, X., Zheng, Y. & Hou. M., 2023. Research on the Integrated Design of Missile Guidance Control Considering the Angle of Attack Constraint, Academic Journal of Engineering and Technology Science, 6(2). <https://doi.org/10.25236/AJETS.2023.060202>
6. Su, W., Shin, H.-S., Chen, L. & Tsourdos, A., 2018. Cooperative interception strategy for multiple inferior missiles against one highly maneuvering target. Aerospace Science and Technology, 78. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.06.026>
7. Mazor E., Averbuch, A., Bar-Shalom, Y. & Dayan, J., 1998. Interacting Multiple Model Methods in Target Tracking: A Survey. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 34(1),. <https://doi.org/10.1109/7.640267>
8. Shaferman V., Oshman, Y., 2009. Cooperative Interception in a Multi-Missile Engagement. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, pp.6. <https://doi.org/10.2514/6.2009-5783>
9. Ben, A., Yaesh I., 1998. Advances in Missile Guidance Theory American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://dx.doi.org/10.1017/s0001924000065003>
10. Bar-Shalom, Y., Rong Li, X. & Kirubarajan, T., 2001. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. John Wiley and Sons, New York. <https://dx.doi.org/10.1002/0471221279>
11. Li, J., Liu, P. Zhang, H., Li, C., 2025. Guidance Laws for Multi-Agent Cooperative Interception from Multiple Angles Against Maneuvering Target, MDPI, <https://doi.org/10.3390/aerospace12060531>

12. Hodžić, M. & Prljača, N., 2024, Missile Guidance using Proportional Navigation and Machine Learning, Volume 3, Journal of Engineering Research and Sciences <http://dx.doi.org/10.55708/js0303003>
13. Zhan Y, Li S, Zhou D. Time-to-go based three-dimensional multi-missile spatio-temporal cooperative guidance law: A novel approach for maneuvering target interception. ISA Transactions. 2024 Jun;149:178-195. DOI: 10.1016/j.isatra.2024.04.017. PMID: 38714374.
14. Liu, Z. Wang, J., He, S., Shin, H.S., Tsourdos, A., 2021, A Learning-Based Computational Impact Time Guidance, [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2021arXiv210305196L/doi:10.48550/arXiv.2103.05196](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2021arXiv210305196L/doi:10.48550/arXiv.2103.05196)
15. Li, Y., Zhu, M., An, Y., Zhi, Y., Liu, L., Fan, Y., Wang, B., Three-dimensional cooperative guidance laws with impact velocity and impact angles constraints, Aerospace Science and Technology, Volume 159, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.109997>.