



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ  
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2021-22

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ

(ΠΔ 97 /2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

## ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΥΡΑΥΛΩΝ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Εκπονών: **Γεώργιος Δ. Γεωργούσης**

A.M.: 2016018049

**Απρίλιος 2022**



Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Γεώργιου Γεωργούση εγκρίνεται:

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Καθηγητής Δάρας Νικόλαος (Επιβλέπων)

,.....



Αναπλ.Καθηγητής Καραματσούκης Κων/νος

,



..

Αναπλ.Καθηγητής Τσαφαράκης Στέλιος

,.....

© Copyright υπό Γεώργιου Γεωργούση

Έτος 2022

***«Όταν οι νόμοι των μαθηματικών ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, δεν είναι σαφείς, και όταν είναι σαφείς, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα».***

**Αλβέρτος Αϊνστάιν, 1879-1955**

## Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος σχημάτων .....	8
Κατάλογος αλγορίθμων .....	9
Κατάλογος πινάκων .....	9
<b>Κεφάλαιο 1. Ιστορικά στοιχεία .....</b>	<b>13</b>
1.1 Ιστορικά στοιχεία .....	13
1.2 Τύποι εκτοξευτών .....	14
<b>Κεφάλαιο 2. Εισαγωγικά στοιχεία .....</b>	<b>17</b>
2. 1. Εισαγωγή .....	17
2.2. Προηγούμενες εργασίες σχετικά με τη συλλογική εκτίμηση και έλεγχο πυραύλων .....	22
2.3. Προηγούμενες εργασίες για την κατανομή πυραύλων .....	23
2.4 Επισκόπηση και συνεισφορές αυτής της εργασίας .....	24
<b>Κεφάλαιο 3. Διατύπωση προβλήματος και μοντέλο πυραύλων .....</b>	<b>26</b>
3.1. Πρόβλημα αναχαίτισης βαλλιστικών στόχων πολλαπλών πυραύλων .....	26
3.2. Μοντέλα πυραύλων .....	28
3.2.1. Μοντέλο SAM αναχαίτισης .....	28
3.2.2. Βαλλιστικό μοντέλο στόχου .....	28
<b>Κεφάλαιο 4. Αλγόριθμοι ελέγχου και εκτίμησης .....</b>	<b>31</b>
4.1. Μέτρηση ραντάρ για την προετοιμασία .....	31
4.2. Σχετική Κινηματική .....	33
4.3. Μοντέλο Μέτρησης .....	35
4.4. Εκταταμένο φίλτρο Kalman .....	37
4.5. Αλγόριθμος πλοήγησης 3D True Proportional .....	40
<b>Κεφάλαιο 5. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης .....</b>	<b>42</b>
5.1. Αλγόριθμος CMA .....	42
5.2. Αλγόριθμος CMA-MV .....	44
<b>Κεφάλαιο 6 . Αποτελέσματα προσομοίωσης .....</b>	<b>47</b>
6.1. Αποτελέσματα για στόχο μεγάλου υψομέτρου-χαμηλής ταχύτητας .....	48
6.2. Αποτελέσματα για στόχο ταχύτητας χαμηλού υψομέτρου .....	51
6.3. Αποτελέσματα Μόντε Κάρλο για πολλαπλά σενάρια .....	51
<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>57</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>59</b>



## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Δυνάμεις που δρουν στο μοντέλο βαλλιστικού στόχου

Σχήμα 2: Γεωμετρία Radar

Σχήμα 3: Τρισδιάστατη γεωμετρία εμπλοκής

Σχήμα 4: Σχετική κινηματική σε επίπεδο  $Sxz$

Σχήμα 5: Σχετική κινηματική σε επίπεδο  $Sxy$

Σχήμα 6: Σχετική κινηματική σε επίπεδο  $Syz$

Σχήμα 7: Αναχαίτιση βαλλιστικού στόχου μεγάλου υψομέτρου-χαμηλής ταχύτητας. Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την τροχιά του βαλλιστικού στόχου. Ο αλγόριθμος επιλέγει μόνο 1 βλήμα για αναχαίτιση.

Σχήμα 8: Απόδοση φίλτρου σε σχέση με το χρόνο στην τερματική φάση για την αναχαίτιση στόχου μεγάλου υψομέτρου-χαμηλής ταχύτητας.

Σχήμα 9: Αναχαίτιση βαλλιστικού στόχου χαμηλού υψομέτρου-υψηλής ταχύτητας. Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την τροχιά του βαλλιστικού στόχου. Ο αλγόριθμος εκτοξεύει 3 βλήματα για να αναχαιτίσει τον στόχο.

Σχήμα 10: Απόδοση φίλτρου σε σχέση με το χρόνο στην τερματική φάση για την αναχαίτιση στόχου χαμηλού υψομέτρου-υψηλής ταχύτητας.



## Κατάλογος αλγορίθμων

Αλγόριθμος 1: Προσαρμογή πίνακα συνδιακύμανσης CMA

Αλγόριθμος 2: Δείγμα από πολυμεταβλητή κατανομή Bernoulli

Αλγόριθμος 3: Προσαρμογή πίνακα συνδιακύμανσης με μικτές μεταβλητές CMA – MV

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Μέσος αριθμός πυραύλων και μέση απόσταση αστοχίας που λήφθηκαν με διαφορετικές μεθόδους, με μέσο όρο πάνω από 100 τυχαίες αρχικές συνθήκες του βαλλιστικού στόχου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας εκτοξευτής πολλαπλών πυραύλων (MRL) ή Σύστημα εκτόξευσης πολλαπλών πυραύλων (MLRS) αποτελεί ένα σύστημα εκτόξευσης πυραύλων που αποτελείται από πολλαπλούς εκτοξευτές τοποθετημένους σε μια πλατφόρμα και πυρομαχικά που εκτοξεύονται με τρόπο που μοιάζει με όπλο. «Ο πύραυλος είναι αυτοπροωθούμενος κατά την πτήση και έχει διαφορετικές ικανότητες από τις συμβατικές οβίδες πυροβολικού, όπως μεγαλύτερο αποτελεσματικό βεληνεκές, μικρότερη ανάκρουση, γενικά υψηλότερα ωφέλιμα φορτία από πλατφόρμες πυροβολικού παρόμοιου μεγέθους και ακόμη και μεταφορά πολλαπλών κεφαλών».

Οι μη επανδρωμένοι πύραυλοι είναι προφανώς ανακριβείς και αργοί στην επαναφόρτωση σε σύγκριση με το πυροβολικό. Πολλαπλοί εκτοξευτές πυραύλων εξισορροπούν αυτό, με την ικανότητα να εκτοξεύουν πολλαπλούς πυραύλους με ταχεία διαδοχή, η οποία σε συνδυασμό με τη μαζική ζώνη εξόντωσης κάθε κεφαλής, μπορεί να δώσει εύκολα κορεσμένα πυρά σε μια περιοχή - στόχο. Ωστόσο, οι σύγχρονοι πύραυλοι μπορούν να χρησιμοποιούν GPS ή αδρανειακή καθοδήγηση, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των πυραύλων με τη μεγαλύτερη ακρίβεια των κατευθυνόμενων πυρομαχικών ακριβείας.

## ABSTRACT

A multi-missile launcher (MRL) or Multi-Missile Launch System (MLRS) is a missile launch system consisting of multiple launchers mounted on a platform and munitions launched in a weapon-like manner. "The rocket is self-propelled in flight and has different capabilities from conventional artillery shells, such as longer effective range, shorter recoil, generally higher payloads from artillery platforms of similar size, and even multi-head transport."

Unmanned missiles are obviously inaccurate and slow to reload compared to artillery. Multiple rocket launchers balance this with the ability to launch multiple missiles with rapid succession, which combined with the massive kill zone of each head, can easily give saturated fire to a target area. However, modern missiles can use GPS or inertial guidance, combining the advantages of missiles with the greater accuracy of directed munitions.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την εργασία θα εξετάσουμε το ολοκληρωμένο ζήτημα διανομής και ελέγχου πυραύλων αέρος-αέρος για την αναχαίτιση βαλλιστικών στόχων. Υπάρχουν αρκετές προγενέστερες μελέτες, οι οποίες έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η χρήση πολλαπλών πυραύλων για την αντιμετώπιση ενός στόχου, καθώς και η χρήση νόμων για την αξιολόγηση και τον έλεγχο της συνεργασίας μεταξύ αυτών, μπορεί να μειώσει σημαντικά τις ενδιάμεσες αποστάσεις σφαλμάτων. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις συνθήκες της πρώτης εκτόξευσης, όπως τα αρχικά δεδομένα και η γωνία διεύθυνσης.

Θα αναπτύξουμε μια μέθοδο για την επιλογή των βέλτιστων πολλαπλών εκτοξεύσεων, από μια συλλογή βλημάτων με προκαθορισμένους κώδικες και συνθήκες εκτόξευσης. Θα χρησιμοποιήσουμε μοντέλα πυραύλων 3DoF και βαλλιστικούς στόχους για την εκτόξευση. Η φύση του προβλήματος της δυναμικής και της διανομής των πυραύλων είναι μη γραμμική, συμπεριλαμβανομένων των διαχωρισμών και των συνεχών μεταβλητών, έτσι ώστε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης να αποτελεί το πρόβλημα της συνδυασμένης πλήρους μη γραμμικής προγραμματισμού (MINP). Η τροχιά των πυραύλων ελέγχεται από τον νόμο της συνεργασίας σε επίπεδο ελέγχου και αξιολόγησης με τη χρήση τρισδιάστατης επέκτασης των υφιστάμενων αλγόριθμων. Στόχος αυτής της εργασίας είναι η προσπάθεια ανάπτυξης νέων δυναμικών αλγόριθμων αναζήτησης ώστε να επιτευχθεί η επίλυση του προβλήματος της εκτόξευσης των πυραύλων, όπως συνέβη και στις προγενέστερες μελέτες.

## Κεφάλαιο 1. Ιστορικά στοιχεία

### 1.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι αρχαιότερες μορφές πυραύλων εφευρέθηκαν κατά τη διάρκεια της δυναστείας των Σονγκ στη μεσαιωνική Κίνα, το 1180, τα κινεζικά μουσκέτα στερεώνονταν προς τα πίσω σε δόρατα ή βέλη για να πυροβολούν τον εχθρό. Αυτή η μορφή πυραύλων, που προέρχεται από το κινεζικό μουσκέτο, πολιορκήσε το Kaifeng στη Μογγολία.

Αργότερα, ο κινεζικός στρατός εφηύρε τους πολλαπλούς πυραύλους και κατάφερε να εκτοξεύσει ταυτόχρονα, έως και 100 μικρούς πυραύλους την ίδια στιγμή. Το τυπικό τμήμα αυτού του πυραύλου έχει μήκος 1/3 έως 1/2 πόδι (10-15cm). Οι άξονες μπαμπού είναι από 1,5 πόδια (45cm) έως 2,5 πόδια (75cm). Ο κινεζικός στρατός επίσης βελτίωσε το άκρο του πυραύλου, με δηλητήριο και διασφάλισε ότι ο εκτοξευτής είναι επίσης κινητός. Οι σχεδιαστές ανέπτυξαν έναν εκτοξευτή πυραύλων πολλαπλών χρήσεων που θα μπορούσε να μεταφερθεί και να ελεγχθεί από έναν στρατιώτη. Συνέχισαν να αναπτύσσονται διάφορες μορφές πολλαπλών εκτοξευτών πυραύλων, συμπεριλαμβανομένων των εκτοξευτών που τοποθετούνται σε καρότσι.

Το 1409, διάφοροι επιστήμονες ανακάλυψαν το “Hwacha”, συμπεριλαμβανομένου του Li Dao και Choi Haesan της δυναστείας Joseon. Μια βάση εκτοξευτή 100-200 τρυπών, είναι τοποθετημένη σε ένα δίτροχο καρότσι. Το βεληνεκές του σκοπευτικού βέλους υπολογίζεται στα 2000 μέτρα. Το Hwacha ήταν ένα σημαντικό όπλο που χρησιμοποιήθηκε κατά των δυνάμεων εισβολής, κατά την εισβολή στην Ιαπωνία το 1592-1598. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η Μάχη του Xingzhou, όπου 40 κινεζικά άρματα αναπτύχθηκαν για να απωθήσουν 30.000 Ιάπωνες στρατιώτες.

Πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι Ευρωπαίοι στρατιώτες προτιμούσαν σχετικά μεγάλους πυραύλους μονής βολής. Τα στρατεύματα του Ναπολέοντα υιοθέτησαν τους πύραυλους Mysorean όπως τον Congreave rocket, ακολουθώντας τους Βρετανούς. Πρόκειται για εκρηκτικούς βομβαρδιστικούς πυραύλους με ελάχιστους εκτοξευτές. Το Ευρωπαϊκό Ναυτικό έχει αναπτύξει σταθερά βελτιωμένους πολλαπλούς ναυτικούς εκτοξευτές, εκρηκτικούς πυραύλους για ελαφρά και παράκτια σκάφη. Στα τέλη του 19ου αιώνα, αυτά τα όπλα αντικαταστάθηκαν σε μεγάλο βαθμό από το παραδοσιακό ελαφρύ πυροβολικό.

## 1.2 Τύποι εκτοξευτών

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πολλαπλών εκτοξευτών πυραύλων:

- Ο σωλήνας, συνήθως κατασκευασμένος από χάλυβα, δεν αφαιρείται από τον εκτοξευτή και μπορεί προαιρετικά να επαναφορτωθεί στο πεδίο της μάχης, με τον πύραυλο να φορτώνεται χειροκίνητα ή ημιαυτόματα. Αυτός είναι ο πιο κοινός τύπος μέχρι τον 21ο αιώνα. Το Battlefield είναι πιο βολικό στη χρήση, επειδή δεν απαιτεί ειδικά εργαλεία για να φορτώσουν ξανά τις μονάδες και να τις δοκιμάσουν πριν χρησιμοποιήσουν άλλους τύπους εκτοξευτών.
- Εμπορευματοκιβώτια, λοβοί ή μονάδες μπορούν να αφαιρεθούν από τον εκτοξευτή και να αντικατασταθούν γρήγορα με ρουκέτες ή διαμετρήματα ίδιου ή διαφορετικών τύπων. Συνήθως επαναφορτώνονται σε εργοστάσια ή ειδικά εξοπλισμένα στρατιωτικά εργαστήρια. Αυτά δεν συνδέονται απαραίτητα με έναν μόνο τύπο πυραύλου, αλλά με περισσότερους τύπους, για να μπορεί ο εκάστοτε διοικητής των πεδίων μάχης να χρησιμοποιεί διαφορετικούς τύπους πυραύλων, ανάλογα την τακτική κατάσταση και να επαναφορτώνουν γρήγορα τον πολλαπλό εκτοξευτή. Είναι πιο σύγχρονος τύπος όπλου και προσφέρει διαφορετικές επιλογές πυρομαχικού.

Τα MRL μπορεί να μην εμπλέκονται σωστά σε θέσεις αντίστροφης κλίσης σε ορεινό πόλεμο, καθώς είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστεί η τροχιά προσθέτοντας ή αφαιρώντας αυξήσεις προωθητικού σε σύγκριση με τα κυνηγετικά όπλα. Για τον ίδιο λόγο, το ελάχιστο βεληνεκές ενός απλού πυραύλου MRL είναι πολύ μεγάλο. Ένας τρόπος για να μειώσουμε αυτόν τον περιορισμό, είναι να προσθέσουμε έναν δακτύλιο έλξης στο μπροστινό άκρο του πυραύλου. Η πρόσθετη έλξη επιβραδύνει τον πύραυλο και δημιουργεί μια λιγότερο επίπεδη

τροχιά από μια καθαρή διαμόρφωση. Αυτή η επιλογή δεν είναι διαθέσιμη για προσυσκευασμένα πυρομαχικά MRL, αλλά είναι διαθέσιμη για ορισμένους τύπους MRL που είναι μεμονωμένα φορτωμένα με βλήματα.

Τα σύγχρονα συστήματα MRL μπορούν να χρησιμοποιούν υπερσύγχρονη πλοήγηση στην ξηρά (ειδικά τη δορυφορική πλοήγηση όπως το GPS) για γρήγορο και ακριβή εντοπισμό θέσης. Στο παρελθόν, η ανάθεση λειτουργιών της συστοιχίας απαιτούσε τόση προσπάθεια, που η σωστή τοποθέτηση της συστοιχίας μπορεί να μην ήταν τόσο πρακτική. Τα συστήματα GPS MRL μπορούν να διασκορπίσουν το MRL και να βάλλουν μεμονωμένους στόχους από διαφορετικές τοποθεσίες. Στο παρελθόν, πολλές συστοιχίες συνδυάζονταν συχνά σε μια περιοχή - στόχο.

Το ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των μετεωρολογικών μπαλονιών για ανίχνευση ανέμου ή για την παρακολούθηση ειδικών αυτοκαταστροφικών πυραύλων. Η παρακολούθηση μπορεί να καθορίσει την επίδραση του ανέμου και της θερμοκρασίας του προωθητικού στην πορεία πτήσης του πυραύλου.

Αυτό το ραντάρ παρακολούθησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του εύρους σφάλματος μεμονωμένων πυραύλων. Τα πυρομαχικά βαλλιστικής διόρθωσης θα μπορούσαν να ωφεληθούν από αυτό, καθώς τα κατευθυντικά ραδιοκύματα μπορούν να στείλουν κωδικοποιημένες πληροφορίες στον πύραυλο για να ενεργοποιήσουν το σύστημα πέδησης την κατάλληλη στιγμή, για να διορθώσουν τα περισσότερα σφάλματα εμβέλειας. Αυτό απαιτεί ο πύραυλος να στοχεύει πολύ μακριά αρχικά, καθώς η εμβέλεια μπορεί να μειωθεί, όχι να επεκταθεί, μόνο με το αερόφρενο. Ένα πιο εξελιγμένο σύστημα χρησιμοποιεί δεδομένα ραντάρ και μια μονόδρομη ζεύξη δεδομένων ραδιοκυμάτων για την έναρξη δισδιάστατων διορθώσεων (βεληνεκές και αζιμούθιο) της διαδρομής πτήσης του πυραύλου και του συστήματος διεύθυνσης μέσω προωθητηρίων ουράς ή μύτης. Το τελευταίο είναι πιο συνηθισμένο σε συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναβάθμιση παλαιότερων πυραύλων, με παράδειγμα το IMI ACCULAR.

Οι πύραυλοι σταθεροποιημένοι στην ουρά επιτρέπουν επίσης εύκολη διόρθωση πορείας με χρήση πηδαλίου ή λεπτής φόρτισης. Για να επωφεληθούν από αυτό, έχουν εισαχθεί πυρομαχικά με καθοδήγηση ακριβείας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κατευθυντήριες αρχές, όπως η δορυφορική πλοήγηση GPS, τα συστήματα αδρανειακής πλοήγησης και οι ημιενεργοί αναζητητές λέιζερ. Αυτό βελτιώνει τη διασπορά από μερικές εκατοντάδες μέτρα CEP σε εμβέλεια δεκάδων χιλιομέτρων και είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητο από την εμβέλεια του γύρου (εκτός από το INS, επειδή η πλοήγηση INS παράγει μια μικρή διασπορά περίπου ανάλογη της εμβέλειας). Αυτό με τη σειρά του καθιστά χρήσιμη μια σημαντική αύξηση στο βεληνεκές πυραύλων. Οι πύραυλοι MRL μεγάλου βεληνεκούς συνήθως πετούν σε υψηλότερες, σχεδόν βαλλιστικές τροχιές από τους πύραυλους μικρού βεληνεκούς, παρουσιάζοντας έτσι προκλήσεις σύγκρουσης καθώς μπορούν να συγκρουστούν με φίλια αεροσκάφη στον εναέριο χώρο.



## Κεφάλαιο 2. Εισαγωγικά στοιχεία

### 2. 1. Εισαγωγή

Ο τομέας της αεράμυνας είναι ένας από εκείνους τους τομείς όπου η κατανομή πόρων έχει μεγάλη σημασία. Η έρευνα για το πρόβλημα κατανομής πόρων για στρατιωτικούς σκοπούς χρονολογείται από τις δεκαετίες του 1950 και του 1960 όπου διερευνήθηκαν τα πρώτα ζητήματα μοντελοποίησης για το πρόβλημα Weapon Target Allocation (WTA). Οι ραγδαίες εξελίξεις στο πεδίο της μάχης και η προσοχή στην πρόοδο της τεχνολογίας απειλών τα τελευταία χρόνια, θέτουν σημαντικές προκλήσεις για τους διοικητές των συστημάτων C2 (CCS). Επιπλέον, η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία των σεναρίων εμπλοκής και ο όγκος και η ατελής φύση των δεδομένων που πρόκειται να υποβληθούν σε επεξεργασία υπό κρίσιμες για το χρόνο συνθήκες καθιστούν σοβαρά τα προβλήματα του διοικητή.

Το πρόβλημα WTA είναι ένα πολύ γνωστό ερευνητικό πρόβλημα στρατιωτικών επιχειρήσεων που έχει πολλές πτυχές και χαρακτηριστικά. (α) Είναι ένα δυναμικό πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Αλληλεξαρτώμενες αποφάσεις λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους για την αντιμετώπιση διαφορετικών απειλών. Σε κάθε περίοδο, λαμβάνεται μια απόφαση (για μία ή περισσότερες δεσμεύσεις). Οι συνέπειες ή τα αποτελέσματα των αποφάσεων που λαμβάνονται σε μια δεδομένη περίοδο αλλάζουν τα χαρακτηριστικά του προβλήματος για τις επόμενες περιόδους (π.χ. διαθεσιμότητα πυρομαχικών, συνθήκες απειλών, αλλαγή τακτικής, μείωση της ασάφειας των δεδομένων). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των προβλημάτων δυναμικής λήψης αποφάσεων είναι ότι οι πληροφορίες λαμβάνονται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. (β) Το WTA είναι ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων. Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των πόρων βασίζεται σε αντικρουόμενα κριτήρια. Για παράδειγμα, ελαχιστοποίηση του κινδύνου, μεγιστοποίηση των μέτρων αποτελεσματικότητας και ούτω καθεξής. (γ) Το πρόβλημα κατανομής πόρων υπόκειται σε αβεβαιότητα (π.χ. στοχαστική). Η αβεβαιότητα σχετίζεται με πολλές πτυχές του μοντέλου, όπως η πιθανότητα χτυπήματος των όπλων και τα χαρακτηριστικά των στόχων (π.χ. ελιγμοί, παρακολούθηση, αναγνώριση/ταξινόμηση κ.λπ.). Επομένως, οι συνέπειες της απόφασης είναι αβέβαιες και συνήθως μοντελοποιούνται με πιθανολογικές κατανομές. Στη συνέχεια, μια διαδικασία

αξιολόγησης θανάτωσης ελέγχει το αποτέλεσμα των ενεργειών που εκτελούνται και αναφέρει είτε η απειλή έχει μειωθεί είτε όχι. (δ) Το πρόβλημα της κατανομής των πόρων είναι ένα κρίσιμο για το χρόνο πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων πρέπει να αποφασίζουν και να ενεργούν υπό αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς. Η κατανομή των διαθέσιμων όπλων σε βάσεις προτεραιότητας στους σωστούς στόχους απαιτεί σύνθετους υπολογισμούς σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

Το πυραυλικό σύστημα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των αμυντικών δυνατοτήτων της χώρας. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος πυραύλων εδάφους-αέρος υψηλής ακρίβειας (SAM) είναι μια σημαντική τεχνολογία για την αναχαίτιση κινητών στόχων όπως τα εχθρικά αεροσκάφη και οι βαλλιστικοί πύραυλοι (Naveh and Lorber, 2001). Η επιτυχής εναέρια αναχαίτιση τέτοιων στόχων μπορεί να αποτρέψει σημαντικές απώλειες και να προετοιμαστεί για αντεπίθεση. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια, πολλή δουλειά έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μεθόδων καθοδήγησης, ελέγχου και αξιολόγησης για την αναχαίτιση μεμονωμένων στόχων ελιγμών (Siouris, 2004).

Το να κυνηγηθεί ένας βαλλιστικός στόχος είναι συνήθως πιο δύσκολο από το να κυνηγηθεί ένας στατικός στόχος ή να εκτελεστεί ένα απλό εγχειρίδιο (όπως ένα αεροπλάνο), με αποτέλεσμα την έλλειψη ακριβούς μοντέλου απόδοσης και υψηλό ρυθμό παλινδρόμησης στόχου. Ως εκ τούτου, ακόμη και τα μικρότερα εμπόδια για την καθοδήγηση σφαλμάτων μπορούν να μεταφραστούν σε μεγάλα εύρη ελαττωμάτων για την καταδίωξη βαλλιστικών στόχων. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εκτόξευση ενός μόνο στόχου με πολλαπλούς συντονισμένους πυραύλους για μείωση της απόστασης ελαττώματος. Η χρήση πολλαπλών βλημάτων έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα.

- Η πιθανότητα επίθεσης αυξάνεται με την αύξηση των πυραύλων που στοχεύουν τον εχθρό.
- Οι πύραυλοι μπορούν να συνδυαστούν με μετρήσεις για τη βελτίωση της αξιολόγησης της κατάστασης του στόχου, τη βελτίωση της απόδοσης καθοδήγησης και τη μείωση της απόστασης σφάλματος.

Σύμφωνα με αυτό, οι αρχικές συνθήκες των εκτοξευμένων πυραύλων εξακολουθούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη συνολική απόδοσή τους. Η συνολική ταχύτητα του βαλλιστικού

στόχου είναι συνήθως μεγαλύτερη από την ταχύτητα των αναχαιτιστών. Εξ ου και οι συντεταγμένες εκτόξευσης των Σ.Α.Κ. επηρεάζουν άμεσα την απόσταση αστοχίας. Επιπλέον, η εκκίνηση των οπτικών θέσεων και των γωνιών κατεύθυνσης των SPM είναι επίσης κρίσιμη για τις επιδόσεις καθοδήγησης. Παρόλο που τα σφάλματα σε αυτές τις γωνίες αντισταθμίζονται από τους αυτόματους πιλότους πυραύλων σε μεταγενέστερες φάσεις της πτήσης, λόγω της υψηλής κινητικής ενέργειας του βαλλιστικού στόχου, η απενεργοποίηση 1-2 μοιρών στις αρχικές γωνίες βήματος και κατεύθυνσης των SAMs μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις από την επιθυμητή απόδοση, ακόμη και παρουσία αποκατάστασης των ενεργειών του αυτόματου πιλότου.

Ως εκ τούτου, η επιλογή των συντεταγμένων εκτόξευσης των SAMs μαζί με τις αρχικές γωνίες εκτόξευσης θα πρέπει να προσαρμοστεί προσεκτικά ώστε να αποκτήσει βέλτιστες επιδόσεις παρακολούθησης συνεργατικών πυραύλων. Η κύρια συμβολή αυτού του εγγράφου είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης που οδηγεί τις αρχικές συνθήκες συνεργατικών νόμων καθοδήγησης και εκτίμησης. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι εκτόξευσης πυραύλων και ο αριθμός των εκτοξευμένων πυραύλων επιλέγονται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο πιθανολογικής αναζήτησης, ο οποίος προσπαθεί να βελτιστοποιήσει μια αντικειμενική λειτουργία που ευνοεί την ελάχιστη απόσταση αστοχίας και τη μέγιστη αποτελεσματικότητα στη χρήση των πόρων.

Οι αισθητήρες και τα όπλα είναι δύο σημαντικοί επιχειρησιακοί πόροι που αλληλοσυμπληρώνονται στον σύγχρονο πόλεμο και η ικανότητα συνεργασίας εμπλοκής τους (cooperative engagement capability, CEC) έχει κρίσιμο αντίκτυπο στην ολοκλήρωση των επιχειρησιακών αποστολών. Η Υπηρεσία Πυραυλικής Άμυνας δηλώνει ότι «η διαχείριση πόρων αισθητήρα έχει μελετηθεί εξαντλητικά όταν επιλέγονται όπλα και είναι γνωστό το χρονοδιάγραμμα εμπλοκής» και «η ατομική μελέτη έχει οδηγήσει σε ένα κενό απόδοσης με ανεξάρτητα βελτιστοποιημένα όπλα και αισθητήρες» (Deason and Priestersbach, 2012). Η κοινή προσέγγιση βελτιστοποίησης δεν έχει διερευνηθεί για την αρένα της πυραυλικής άμυνας (Ezra, DeLaurentis and Mockus, 2014). Οι μελλοντικές αεροπορικές επιδρομές έχουν τα χαρακτηριστικά των απειλών πολλαπλών επιπέδων πολλαπλών παρτίδων και πολλαπλών κατευθύνσεων, οι οποίες όχι μόνο παρουσιάζουν νέες προκλήσεις σε παραδοσιακά ζητήματα λήψης αποφάσεων όπως η διαχείριση πόρων αισθητήρων (sensor resource management, SRM) και η ανάθεση όπλων (weapon target assignment, WTA), αλλά και εισάγουν νέες απαιτήσεις για ενσωματωμένες λειτουργίες αισθητήρων/όπλων.

Με την ανεξάρτητη ανάπτυξη των SRM (Krishnamurthy and Djonin, 2007; Zheng et al., 2015; Zhang et al., 2016) και WTA (Lee et al., 2003; Bogdanowicz, 2009; Bogdanowicz et al., 2013; Volle and Rogers, 2018), η οργανική ενοποίηση αυτών των δύο προβλημάτων είναι ζωτικής σημασίας για την αμυντική λειτουργία. Ωστόσο, το ολοκληρωμένο SRM και WTA δεν έχει ενιαία σύνθεση. Λόγω των στόχων του SRM για παρακολούθηση στόχων και καθοδήγηση όπλων για αναχαίτιση στόχων, η κοινή προσέγγιση βελτιστοποίησης για αισθητήρες και όπλα ερευνάται ως παραλλαγή του προβλήματος WTA, δηλαδή Αντιστοίχιση Αισθητήρα/Όπλου-Στόχου (S/WTA). Το μοντέλο S/WTA μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: το ανεξάρτητο S/WTA και το ολοκληρωμένο S/WTA. Η διαφορά μεταξύ του ανεξάρτητου S/WTA και του ενσωματωμένου S/WTA έγκειται στο αν λαμβάνει υπόψη τις αλληλεξαρτήσεις των αισθητήρων και των όπλων με τους στόχους. Ο στόχος βελτιστοποίησης του ανεξάρτητου μοντέλου S/WTA είναι το άθροισμα των πλεονεκτημάτων της ανάθεσης κάθε αισθητήρα σε κάθε στόχο και κάθε όπλου σε κάθε στόχο, και το όφελος στόχου αισθητήρα είναι ανεξάρτητο από το όφελος στόχου όπλου. Για παράδειγμα, οι Bogdanowicz et al. (2007) καθιέρωσαν ένα ανεξάρτητο μοντέλο ζευγών αισθητήρων/όπλου-στόχου και πρότεινε τον αλγόριθμο δημοπρασίας για την επίλυσή του. Οι Zi-fen et al. (2011) παρουσίασαν έναν βελτιωμένο αλγόριθμο Swt-opt για την εκχώρηση του ανεξάρτητου μοντέλου S/WTA. Το ολοκληρωμένο μοντέλο S/WTA, στο οποίο η αποτελεσματικότητα ζημίας των όπλων εξαρτιόταν από την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αισθητήρων, αναπτύσσεται ως η μελλοντική κατεύθυνση του ευφυούς συστήματος Command & Control (C2). Για παράδειγμα, οι Bogdanowicz και Coleman (2008) εισήγαγαν το μοντέλο S/WTA των ζευγών αισθητήρων-όπλων με στόχους σε χρονική διάσταση και σχεδίασαν μια ακριβή βελτιστοποίηση βασισμένη στο στοιχείο Swt\_opt του αλγόριθμου δημοπρασίας. Οι Chen et al. (2012) εξέτασαν την απόδοση όπλου-στόχου ανάλογα με τον προκαθορισμένο αισθητήρα και πρότεινε έναν υβριδικό αλγόριθμο που ενσωματώνει τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO) και τον γενετικό τελεστή. Οι Jian και Chen (2015) παρουσίασαν έναν τροποποιημένο γενετικό αλγόριθμο για την επίλυση του ολοκληρωμένου μοντέλου S/WTA, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά σε τρία στοιχεία της περιοχής αναζήτησης. Οι Xin et al. (2019) δημιούργησαν ένα μοντέλο S/WTA για Δίκτυο-Κεντρικό Πόλεμο (NCW) μοντελοποιώντας την πιθανότητα επιτυχούς αναχαίτισης ως το γινόμενο της πιθανότητας ζημιάς και της πιθανότητας ανίχνευσης και παρουσίασε έναν επικοινωνητικό ευρετικό αλγόριθμο που βασίζεται σε οριακή απόδοση (MRBCH). Οι Li et al. (2019) παρουσίασαν έναν τροποποιημένο γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος ενσωματώνει τους χειριστές αρχικοποίησης και

επιδιόρθωσης πληθυσμού βάσει προηγούμενης γνώσης, για την επίλυση του μοντέλου S/WTa. Οι Mu et al. (2017) καθιέρωσαν το μοντέλο S/WTa για το ευφυές ναρκοπέδιο και εφάρμοσε τον αλγόριθμο κβαντικού αρμονικού ταλαντωτή πολλαπλής κλίμακας σε αυτό. Προφανώς, το ενσωματωμένο μοντέλο S/WTa είναι περισσότερο σύμφωνο με τις απαιτήσεις εργασιών του μελλοντικού συστήματος υποστήριξης αποφάσεων. Το πρόβλημα WTA μπορεί επίσης να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: το στατικό WTA (SWTA) και το δυναμικό WTA (DWTa), και η ανασκόπηση του προβλήματος WTA μπορεί να αναφέρεται στους Kline, Ahner και Hill (2019). Η διαφορά μεταξύ SWTA και DWTa είναι αν ο χρόνος θεωρείται ως διάσταση (Zhang et al., 2019). Οι προαναφερθείσες έρευνες S/WTa ανήκουν στο πρόβλημα SWTA. Ωστόσο, είναι δύσκολο για έναν μεμονωμένο τύπο όπλου να ολοκληρώσει την αμυντική εργασία και πολλοί τύποι όπλων συνήθως εμπλέκονται σε διάφορα στάδια λήψης αποφάσεων.

Στο σενάριο άμυνας εδάφους-αέρος, το πρόβλημα WTA είναι η κρίσιμη υποστήριξη αποφάσεων στο σύστημα Command & Control (C2). Οι Li et al. [20] εξέτασαν το πολυεπίπεδο σύστημα άμυνας βαλλιστικών πυραύλων (BMDS) που εκχωρεί αναχαιτιστές σε πολλαπλά κύματα εισερχόμενων βαλλιστικών πυραύλων και πρότεινε μια τροποποιημένη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων για την επίλυση του μοντέλου σχεδιασμού πόρων. Οι Summers et al. (2020) διατύπωσαν ένα δυναμικό μοντέλο WTA για το πρόβλημα άμυνας βαλλιστικών πυραύλων θεάτρου (TBMD) και χρησιμοποίησε μια προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού κατά προσέγγιση (ADP) για να το λύσει. Οι Kim et al. (2020) καθιέρωσαν το χρονοεξαρτώμενο μοντέλο SWTA για εχθρικούς πυραύλους υψηλής ταχύτητας και παρουσίασε τον αποκεντρωμένο αλγόριθμο λήψης αποφάσεων. Ο Hocaoglu (2019) διατύπωσε την κατανομή των πυραύλων αεράμυνας σε εισερχόμενους εναέριους στόχους επίγειων συστημάτων αεράμυνας. Ωστόσο, οι μεγάλες έρευνες της WTA για την αεράμυνα δεν λαμβάνουν υπόψη το ολοκληρωμένο σύστημα απόφασης αισθητήρων-όπλων και το CEC αισθητήρων και ετερογενών όπλων είναι κρίσιμο για την αποτελεσματικότητα της άμυνας.

Επί του παρόντος, λίγες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στο πρόβλημα S/WTa στην άμυνα εδάφους-αέρος. Οι πραγματικές επιχειρήσεις κατά της διείσδυσης στο έδαφος ακολουθούν τη δυναμική τακτική της «αναχαίτισης όσο το δυνατόν περισσότερο, της κλιμακωτής αντίστασης και της πολυεπίπεδης άμυνας» και υιοθετούν τη διαμόρφωση «υψηλού έξω και χαμηλά μέσα, περισσότερο έξω και λιγότερο μέσα. Για τις δυναμικές και ετερογενείς απαιτήσεις του σεναρίου κατά της διείσδυσης, αυτή η εργασία καθιερώνει ένα πρόβλημα δυναμικού αισθητήρα/ετερογενούς ανάθεσης όπλου-στόχου (DS/HWTa) λαμβάνοντας υπόψη τις

αλληλεξαρτήσεις αισθητήρων και ετερογενών όπλων και προτείνει τον εξελικτικό αλγόριθμο για την απόκτηση των σχεδίων αναχαίτισης για ο λήπτης των αποφάσεων. Οι συνεισφορές αυτής της εργασίας περιγράφονται ως εξής:

1) Για τις επιχειρησιακές απαιτήσεις της αντιδιείσδυσης εδάφους-αέρος, παρουσιάζεται το ετερογενές πρόβλημα συνεργασίας αντιστοίχισης αισθητήρα-όπλου-στόχου και διαμορφώνεται ως μοντέλο δυναμικής ανάθεσης στόχου αισθητήρα/ετερογενούς όπλου σε συνεχή τομέα χρόνου.

2) Ένας νέος εξελικτικός αλγόριθμος για DS/HWTA (EA-DS/HWTA) προτείνεται για την άριστη λήψη των διαδοχικών σχημάτων υποκλοπής. Οι τροποποιημένες προσεγγίσεις αρχικοποίησης πληθυσμού, τελεστής διασταύρωσης και επιλογής περιβάλλοντος έχουν σχεδιαστεί για να εξισορροπούν τη βέλτιστη απόδοση και την απόδοση σε πραγματικό χρόνο.

3) Το πλαίσιο προσομοίωσης δημιουργείται με την ενσωμάτωση των μοντέλων δύο τύπων πυραύλων, στόχου πτήσης και μετάβασης κατάστασης. Τα εκτεταμένα πειράματα δείχνουν ότι οι προτεινόμενες προσεγγίσεις είναι αποτελεσματικές και πολλά υποσχόμενες.

## 2.2. Προηγούμενες εργασίες σχετικά με τη συλλογική εκτίμηση και έλεγχο πυραύλων

Έχει υπάρξει σημαντικός όγκος προηγούμενων εργασιών για τον έλεγχο και την εκτίμηση πολλαπλών πυραύλων. Οι Chen και Speyer (2008) διατύπωσαν το πολλαπλάσιο πρόβλημα συντονισμού πυραύλων ως γραμμικό εκθετικό διαφορικό παιχνίδι Gaussian και εφάρμοσαν τον αλγόριθμό τους στην αναχαίτιση των βαλλιστικών πυραύλων στην τελική φάση και τη φάση ώθησης. Ο Wang και ο Fu (2013) διατύπωσαν το πρόβλημα πολλαπλής αναχαίτισης πυραύλων ως παιχνίδι καταδίωξης και διαφυγής για πολλούς παίκτες και μελέτησαν την αναχαίτιση ενός βαλλιστικού στόχου σε τρεις διαστάσεις. Αναπτύχθηκε ένας νόμος περί αναλογικής ναυσιπλοΐας (PN) που επιτρέπει σε πολλαπλούς πυραύλους να κλείνουν ταυτόχρονα σε έναν στατικό στόχο. Ομοίως, οι Daughtery και Qu (2014) ανέπτυξαν επίσης έναν αλγόριθμο για πολλαπλούς πυραύλους που επιτίθενται ταυτόχρονα σε έναν στόχο και έδειξαν επίσης ότι ο αλγόριθμός τους είναι ισχυρός στις απώλειες επικοινωνίας μεταξύ των πυραύλων.

Οι Shaferman και Oshman (2009) ανέπτυξαν έναν εκτεταμένο αλγόριθμο φίλτρου Kalman (EKF) που συγχωνεύει πληροφορίες που συλλέγονται από πολλαπλά αναχαιτιστικά. Ήταν σε θέση να αποδείξουν ότι η χρήση αλγορίθμων εκτίμησης συνεργασίας αποφέρει



βελτιωμένη καθοδήγηση και απόδοση ελέγχου. Οι Shaferman και Shima (2010) συνδύασαν προσαρμοστικούς νόμους ελέγχου και πολλαπλούς αλγόριθμους φιλτραρίσματος μοντέλων για συνεργατική υποκλοπή. Εξετάστηκε επίσης η χρήση πολλαπλών για τη βελτίωση των επιδόσεων καθοδήγησης. Ειδικότερα, ανακάλυψαν ότι οι επιδόσεις εκτίμησης βελτιώνονται καθώς η σχετική οπτική γραμμή (LOS) μεταξύ δύο πυραύλων αναχαίτισης μεγαλώνει και σχεδίασαν έναν νόμο ελέγχου που επιβάλλει διαχωρισμό μεταξύ δύο πυραύλων. Πρόσφατα, οι Shaferman και Shima (2015) ανέπτυξαν επίσης νόμους καθοδήγησης για την επιβολή σχετικών γωνιών αναχαίτισης.

Αυτές οι προηγούμενες εργασίες έδειξαν ότι η τήξη της διαδικασίας εκτίμησης μεταξύ πολλαπλών πυραύλων σχεδόν σίγουρα οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση ελέγχου και ως εκ τούτου μειωμένη απόσταση αστοχιών. Τα περισσότερα από αυτά τα έργα μελετούν μόνο το σενάριο όπου οι πύραυλοι πρόκειται να κλείσουν τον στόχο. οι συνθήκες εκτόξευσης αγνοούνται σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, όπως εξηγείται στην αρχή αυτού του τμήματος, οι επιδόσεις εκτίμησης και ελέγχου ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά υπό διαφορετικές συνθήκες εκτόξευσης, όπως διαφορετικές αρχικές γωνίες κατεύθυνσης και υψομέτρου των πυραύλων. Επιπλέον, οι συνθήκες εκτόξευσης θα μπορούσαν επίσης να απαιτούν προσαρμογές με βάση τη σχετική κατεύθυνση και την ταχύτητα του βαλλιστικού στόχου. Ειδικότερα, η ευαισθησία της απόστασης αστοχίας με βάση διαφορετικές συνθήκες θα ήταν υψηλότερη για στόχους με υψηλές ταχύτητες, όπως οι βαλλιστικοί πύραυλοι.

### 2.3. Προηγούμενες εργασίες για την κατανομή πυραύλων

Οι υπάρχοντες αλγόριθμοι για πολλαπλή αναχαίτιση πυραύλων υποθέτουν ότι ένας σταθερός αριθμός πυραύλων έχει ανατεθεί για την αναχαίτιση του στόχου. Σε πραγματικά σενάρια, συνήθως ένα μεγαλύτερο σύνολο πυραύλων είναι διαθέσιμο στο έδαφος, και ένα συγκεκριμένο υποσύνολο αυτών των πυραύλων θα πρέπει να διατεθεί και να εκτοξευθεί για αναχαίτιση. Η απόφαση για το ποιοι πύραυλοι θα διατεθούν εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το ύψος και η ταχύτητα του στόχου. Δεδομένου ότι η αύξηση του αριθμού των εκχωρηθέντων πυραύλων βελτιώνει τις επιδόσεις εκτίμησης και, ως εκ τούτου, την πιθανότητα επιτυχούς αναχαίτισης, μπορεί να είναι επιθυμητό να εκτοξευτούν όσο το δυνατόν περισσότεροι πύραυλοι. Ωστόσο, η εκτόξευση περισσότερων πυραύλων από ό,τι είναι απαραίτητο θα οδηγούσε σε αναποτελεσματική χρήση των πόρων.

Απ' όσο γνωρίζουμε, δεν υπάρχουν προηγούμενα έργα που να αντιμετωπίζουν άμεσα το πρόβλημα κατανομής πολλαπλών πυραύλων που χρησιμοποιούν συνεργατικούς αλγόριθμους εκτίμησης και ελέγχου. Ωστόσο, προηγούμενες έρευνες σχετικά με τις μεθόδους κατανομής όπλων και εργασιών είναι ασφαλώς σχετικές με αυτό το πρόβλημα και επανεξετάζονται σε αυτό το υποτόμημα.

Οι αλγόριθμοι κατανομής όπλων και εργασιών γενικά αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εκχώρησης ενός πεπερασμένου αριθμού όπλων σε πολλαπλούς στόχους. Ο χώρος αναζήτησης τέτοιων προβλημάτων είναι συνήθως τεράστιος και οι αντικειμενικές λειτουργίες στερούνται χρήσιμων ιδιοτήτων όπως γραμμικότητα ή κυρτότητα. Ως εκ τούτου, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και οι πιθανολογικές προσεγγίσεις αναζήτησης είναι πολύ δημοφιλείς για αυτά τα προβλήματα. Οι Lee et al. (2003) χρησιμοποίησε έναν γενετικό αλγόριθμο βασισμένο στην άπληστη ευγονική για να λύσει το πρόβλημα ανάθεσης, ενώ οι Teng et al. (2008) χρησιμοποίησε την προσέγγιση βελτιστοποίησης σμήνους μορίων για τη συντονισμένη ανάθεση πυραύλων αερομαχίας. Η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (Wang, Gao, Zhu and Wang, 2010) και η προσομοίωση ανόπτησης (Wang and Zhu, 2010) έχουν επίσης εφαρμοστεί στο πρόβλημα ανάθεσης στόχου. Εκτός από τους γενετικούς αλγορίθμους, οι θεωρητικές θηραμάτων (Wei, Chen, Pham, Blasch and Wu, 2008) και οι βασισμένες σε κανόνες προσεγγίσεις (Xin, Chen, Peng, Dou and Zhang, 2011) έχουν επίσης εφαρμοστεί στα προβλήματα κατανομής πυραύλων.

Αυτά τα υπάρχοντα έργα είτε αγνοούν εντελώς τη δυναμική του οχήματος είτε χρησιμοποιούν απλοποιημένα μοντέλα πυραύλων και στόχων για την επίλυση του προβλήματος κατανομής. Ωστόσο, η χρήση συνεργατικών αλγορίθμων εκτίμησης και ελέγχου είναι αναπόσπαστο μέρος της υποκλοπής του προβλήματος βαλλιστικού στόχου που μελετάται σε αυτό το έγγραφο. Έτσι, η δυναμική των αλγορίθμων εκτίμησης και ελέγχου δεν μπορεί να αγνοηθεί από τον αλγόριθμο κατανομής. Τα υπάρχοντα έργα συνήθως διορθώνουν αυτό το πρόβλημα, αντιστοιχίζοντας μια πιθανότητα επιτυχίας σε κάθε πιθανή ανάθεση. Ωστόσο, η υπερεκτίμηση ή η υποτίμηση αυτών των πιθανοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα επιδόσεων.

## 2.4 Επισκόπηση και συνεισφορές αυτής της εργασίας

Η κύρια ιδέα πίσω από τον αναπτυγμένο αλγόριθμο είναι να μετατρέψει το πρόβλημα εκχώρησης πυραύλων σε ένα υβριδικό μη γραμμικό σχέδιο (MINP), όπου η μεταβλητή



ανάλυσης συμμορφώνεται με την επιλογή των ακτίνων που θα εκτοξευθούν, ενώ οι μεταβλητές συνεχούς απόφασης συμμορφώνονται με τις συνθήκες εκτόξευσης, ως γωνία ανύψωσης και κάθε ακτίνας. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης, αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος λανθάνουσας αναζήτησης που επεκτείνει τον γνωστό αλγόριθμο συνεχούς βελτιστοποίησης (Προσαρμογή Πίνακα Συνδιακύμανσης (CMA) Hansen και Ostermeier 1996) για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν συνεχείς και διαζευκτικές μεταβλητές. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ενσωματώνει επίσης πυραύλους και επεκτείνει το υπάρχοντες συνεργατικοί αλγόριθμοι EKF (7, 10) για λειτουργία σε τρισδιάστατη ρύθμιση. Από τη σκοπιά της σύγχρονης τεχνολογίας, ο αλγόριθμός μας παρέχει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- i. Ο αλγόριθμός μας αυτοματοποιεί τη διαδικασία επιλογής της κατεύθυνσης και της ανύψωσης του βλήματος, η οποία επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της αξιολόγησης και του ελέγχου σε μεταγενέστερα στάδια, μειώνοντας τη μέση απόσταση εμπλοκής.
- ii. Εκτός από τη βελτιστοποίηση των συνθηκών εκτόξευσης, οι προηγμένοι αλγόριθμοι επιλέγουν έναν κλάδο του πυραύλου για την εκτόξευση του πυραύλου εντός της μεγαλύτερης ομάδας διαθέσιμων βλημάτων, λαμβάνοντας υπόψη την αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους εκτόξευσης του πυραύλου και της διαθέσιμης απόστασης μέχρι την κατάρρευση. Αυτή η δυνατότητα είναι ενσωματωμένη στον τύπο MINP, ο οποίος υποδεικνύει ότι οι προηγμένοι αλγόριθμοι παράγουν λιγότερα ελαττωματικά μονοπάτια χρησιμοποιώντας λιγότερα σημεία σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους.
- iii. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εκτελείται με την ανάπτυξη δυναμικών πυραύλων και στόχων εξοπλισμένων με νόμους αξιολόγησης και ελέγχου. Έτσι, σε αντίθεση με τους τρέχοντες αλγόριθμους διανομής πυραύλων, το δυναμικό μοντέλο δεν είναι ούτε ομαλό ούτε κατά προσέγγιση, γεγονός που μετατρέπεται σε καλύτερες προβλέψεις της συνολικής απόδοσης του συστήματος.
- iv. Ως μια μικρή συμβολή, θα ήθελα επίσης να επισημάνω ότι τα περισσότερα από τα υπάρχοντα έγγραφα συνεργασίας για τον έλεγχο πυραύλων αφορούν τις δισδιάστατες (επίπεδες) δυνατότητες πυραύλων και στόχων. Αυτή η εργασία επεκτείνει τη συνεργασία EKF σε 3D. Αυτή είναι μια απλή επέκταση, αλλά η λήψη των αποτελεσμάτων σε 3D οδηγεί σε μια πιο ρεαλιστική απόσταση αποτυχίας, και επομένως μια καλύτερη αξιολόγηση της δυνατότητας εφαρμογής του αναπτυγμένου αλγορίθμου στην πραγματική λειτουργία στο πεδίο της μάχης.

### Κεφάλαιο 3. Διατύπωση προβλήματος και μοντέλο πυραύλων

Αυτή η ενότητα παρέχει μια πλήρη διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης για την αναχαίτιση βαλλιστικών στόχων πολλαπλών πυραύλων. Δεδομένου ότι η εν λόγω διατύπωση περιλαμβάνει τη δυναμική των πυραύλων, αυτή η ενότητα δείχνει επίσης μοντέλα αναχαίτισης πυραύλων και βαλλιστικούς στόχους [51].

#### 3.1. Πρόβλημα αναχαίτισης βαλλιστικών στόχων πολλαπλών πυραύλων

Σύμφωνα με τους Yuksek B. και Ure K.N. (2016), ως  $x_T = [p_T, \dot{p}_T] \in \mathbb{R}^6$  συμβολίζουμε το διάνυσμα κατάστασης του βαλλιστικού στόχου και ως  $x_M^i = [p_M^i, \dot{p}_M^i] \in \mathbb{R}^6$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{SAM}$  δηλώνουν τα διανύσματα κατάστασης των SAM, όπου το  $p$  υποδηλώνει τη θέση, το  $\dot{p}$  την ταχύτητα και το  $N_{SAM}$  τον αριθμό των βλημάτων. Υποτίθεται ότι οι αρχικές θέσεις των SAM είναι σταθερές στο σημείο εκτόξευσης και ο βαλλιστικός στόχος ανιχνεύεται από ένα ραντάρ στην τερματική του φάση. Υποθέτουμε ότι οι αλγόριθμοι καθοδήγησης και ελέγχου κλειστού βρόχου εφαρμόζονται σε SAM και ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων χρειάζεται μόνο να αποφασίσει για τις αρχικές συνθήκες εκκίνησης.

Ως  $\Gamma^0 = \{\gamma^i(0), i = 1, 2, \dots, N_{SAM}\}$  and  $\Psi^0 = \{\psi^i(0), i = 1, 2, \dots, N_{SAM}\}$  υποδηλώνουν το αρχικό βήμα εκτόξευσης και τις γωνίες κατεύθυνσης για κάθε SAM. Έστω  $t_f$  ο τελικός χρόνος για το σενάριο. Η απόσταση αποτυχίας ως

$$\text{miss}(\Gamma^0, \Psi^0) = \min_{i=1, \dots, N_{SAM}, t \in [0, t_f]} \|p_T(t) - p_M^i(t)\|. \quad (1)$$

Με άλλα λόγια, για ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών εκτόξευσης, η απόσταση αποτυχίας υπολογίζεται διαδίδοντας τη δυναμική των SAM και του βαλλιστικού στόχου στον ορίζοντα  $[0, t_f]$  και βρίσκοντας την ελάχιστη απόσταση που επιτυγχάνεται μεταξύ του βαλλιστικού στόχου και όλων των εκτοξευόμενων SAM.

Ο στόχος του προβλήματος αναχαίτισης βαλλιστικού στόχου πολλαπλών πυραύλων είναι η ελαχιστοποίηση της απόστασης αστοχίας βελτιστοποιώντας τις συνθήκες εκτόξευσης  $\Gamma^0, \Psi^0$ :

$$\min_{\Gamma^0, \Psi^0} \{\text{miss}(\Gamma^0, \Psi^0)\},$$

$$\dot{x}_T = f_T(x_T),$$

$$\dot{x}_M^i = f_M(x_T^i), i = 1, \dots, N_{SAM}, \quad (2)$$

όπου τα  $f_T$  και  $f_M$  είναι τα δυναμικά μοντέλα του βαλλιστικού στόχου και των πυραύλων αναχαίτισης. Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι όλα τα SAM μοιράζονται το ίδιο μοντέλο.

Αν και το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης αντανάκλα τον κύριο στόχο της αποστολής, προϋποθέτει ότι όλα τα SAM θα χρησιμοποιηθούν για αναχαίτιση. Ωστόσο, σε πολλά σενάρια μόνο ένα αυστηρό υποσύνολο των διαθέσιμων SAM μπορεί να είναι αρκετό για επιτυχή υποκλοπή. Έτσι, θα πρέπει να τροποποιήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση ώστε να αντικατοπτρίζει το κόστος της εκτόξευσης ενός πυραύλου, προκειμένου να δώσουμε λύσεις που ελαχιστοποιούν την απόσταση αποτυχίας αποφεύγοντας την αναποτελεσματική χρήση των πόρων.

Ως  $z = \{z_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, N_{SAM}\}$  συμβολίζει το δυαδικό διάνυσμα απόφασης, όπου  $z_i = 1$  σημαίνει ότι το SAM  $i$  εκτοξεύεται για την αναχαίτιση του βαλλιστικού στόχου και  $z_i = 0$  σημαίνει ότι το SAM  $i$  δεν εκτοξεύεται και θα παραμείνει στην αρχική του θέση καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Το τροποποιημένο πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως

$$\min_{z, \Gamma^0, \Psi^0} \{ \text{miss}(\Gamma^0, \Psi^0) + \sum_{i=1}^{N_{SAM}} z_i r \},$$

$$\dot{x}_T = f_T(x_T),$$

$$\dot{x}_M^i = f_M(x_T^i), z_i = 1, \quad (3)$$

όπου  $r > 0$  είναι παράμετρος καθορισμένη από το χρήστη που αντικατοπτρίζει το κόστος εκτόξευσης ενός πυραύλου. Οι μεγαλύτερες τιμές του  $r$  ευνοούν την εκτόξευση μικρότερου αριθμού πυραύλων. Δεδομένου ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης στο (3) περιέχει τόσο συνεχείς μεταβλητές  $\Gamma^0, \Psi^0$  όσο και διακριτές μεταβλητές  $z$  και δεδομένου ότι η δυναμική  $f_M$  και  $f_T$  είναι μη γραμμική, μπορεί να ταξινομηθεί ως πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MINP). Το MINP είναι γνωστό ότι είναι πολύ δύσκολο να επιλυθεί και η κύρια συμβολή του χαρτιού είναι η ανάπτυξη μιας πιθανής μεθόδου αναζήτησης (που εξηγείται στην ενότητα 4) για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης στο (3).

Να σημειωθεί ότι μας ενδιαφέρει μόνο να αποφασίσουμε την κατανομή των πυραύλων και των συνθηκών εκτόξευσής τους και δεν απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση της τροχιάς, καθώς θεωρείται ότι τα SAMs έχουν νόμους εκτίμησης και καθοδήγησης κλειστού βρόχου που ενσωματώθηκαν στη δυναμική τους. Αυτοί οι νόμοι εκτίμησης και ελέγχου περιγράφονται περαιτέρω στο τμήμα 3. Ωστόσο, πριν εξετάσουμε τους νόμους ελέγχου, περιγράψουμε τη δυναμική ανοικτού βρόχου των SAMs και του βαλλιστικού στόχου στην επόμενη υποενότητα.

### 3.2. Μοντέλα πυραύλων

#### 3.2.1. Μοντέλο SAM αναχαίτισης

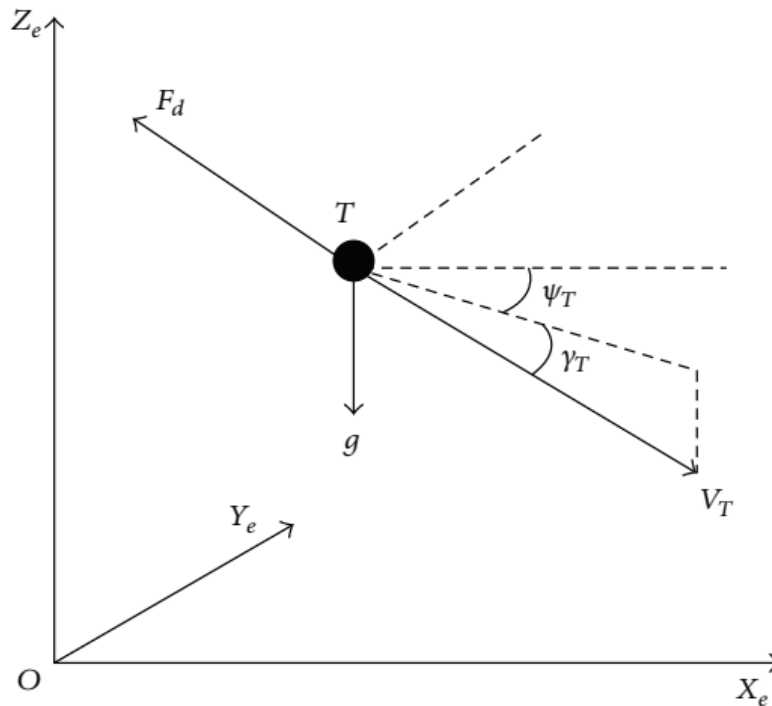
Το αναχαιπιστικό SAM που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη, είναι ένα μοντέλο μάζας σημείου (DoF) ενός πυραύλου, το οποίο ελέγχεται μέσω αεροδυναμικών δυνάμεων που παράγονται από τα πτερύγια [51]. Οι τρισδιάστατες εξισώσεις κίνησης του αναχαιπιστή μπορούν να δηλωθούν όπως φαίνεται στο Siouris (2004):

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V_m \cos \gamma \cos \psi, \\ \dot{y} &= V_m \cos \gamma \sin \psi, \\ \dot{z} &= V_m \sin \gamma, \\ \dot{\gamma} &= (a_{pitch} - \cos \gamma) \frac{g}{V_m}, \\ \dot{\psi} &= \frac{a_{yaw}}{\cos \gamma} \cdot \frac{g}{V_m},\end{aligned}\tag{4}$$

όπου  $x$  είναι η μετατόπιση downrange του SAM,  $y$  είναι η μετατόπιση μεταξύ των βεληνεκών του SAM,  $z$  είναι το υψόμετρο του SAM,  $g$  είναι η επιτάχυνση βαρύτητας,  $\gamma$  είναι η γωνία διαδρομής πτήσης,  $V_m$  είναι sam ταχύτητα, και  $a_{pitch}$ ,  $a_{yaw}$  είναι οι κατακόρυφοι και οριζόντιοι παράγοντες φορτίου.

#### 3.2.2. Βαλλιστικό μοντέλο στόχου

Στο σενάριο 3D αναχαίτισης που χρησιμοποιείται από τους Yuksek B. και Ure K.N. (2016) , ο βαλλιστικός πύραυλος μικρού βεληνεκού SCUD-B (SRBM) χρησιμοποιείται ως εισερχόμενη βαλλιστική απειλή. Η προσομοίωση ξεκινά από ένα δεδομένο απόγειο υψόμετρο, ταχύτητα, γωνία επανεισόδου και κατεύθυνση. Τα αεροδυναμικά δεδομένα του SCUD-B λαμβάνονται χρησιμοποιώντας το λογισμικό Missile DATCOM (Tatas, 2006).



**Σχήμα 1: Δυνάμεις που δρουν στο μοντέλο βαλλιστικού στόχου [51]**

Η δύναμη έλξης και οι συνιστώσες της επιτάχυνσης της βαρύτητας που δρουν στον βαλλιστικό στόχο κατά τη φάση επανεισόδου φαίνονται στο **Σχήμα 1**. Η δύναμη έλξης δρα στην αντίθετη κατεύθυνση του διανύσματος ταχύτητας. Επομένως, εάν η επίδραση της δύναμης έλξης είναι μεγαλύτερη από αυτή της βαρύτητας, ο βαλλιστικός στόχος επιβραδύνεται κατά τη διάρκεια της πτήσης του. Η κατακόρυφη συνιστώσα του διανύσματος επιβράδυνσης στη γραμμή όρασης εμφανίζεται ως ελιγμός στόχος στον καταδιωκτικό αναχαιπιστή. Επομένως, ο νόμος καθοδήγησης αναχαιπιστών πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτόν τον ελιγμό επιβράδυνσης της βαλλιστικής απειλής (Zarchan, 2005). Το κατά προσέγγιση μαθηματικό μοντέλο του στόχου στη φάση επανεισόδου δίνεται στον Zarchan (2005):

$$\dot{V}_{Tx} = \frac{-F_d}{m} \cos \psi_T \cos \gamma_T,$$

$$\dot{V}_{Ty} = \frac{F_d}{m} \sin \psi_T \cos \gamma_T,$$

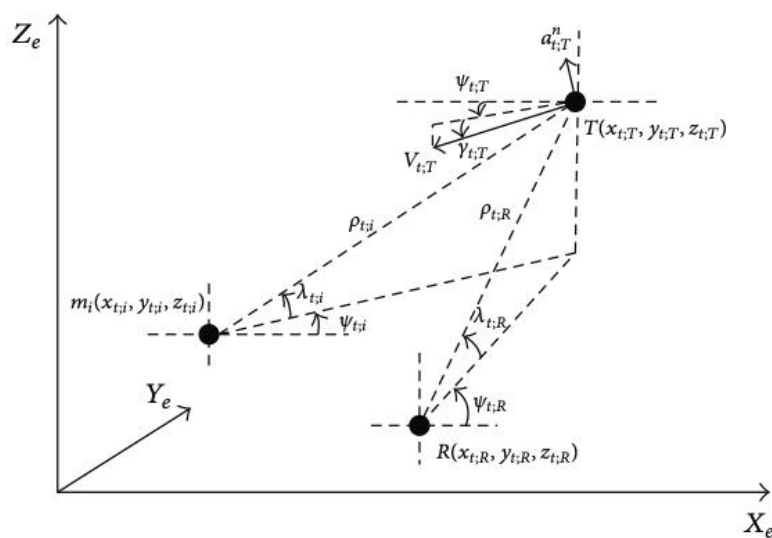
$$\dot{V}_{Tz} = \frac{F_d}{m} \cos \psi_T \sin \gamma_T - g, \quad (5)$$

όπου  $F_d$  είναι η δύναμη έλξης,  $V_{Tx}$ ,  $V_{Ty}$ , και  $V_{Tz}$  είναι τα συστατικά ταχύτητας,  $m$  είναι η μάζα πυραύλων στόχου στη φάση επανεισένωσης,  $g$  είναι η επιτάχυνση βαρύτητας,  $\gamma_T$  είναι η γωνία επανεισένωσης, και το  $\psi_T$  είναι η γωνία κατεύθυνσης.

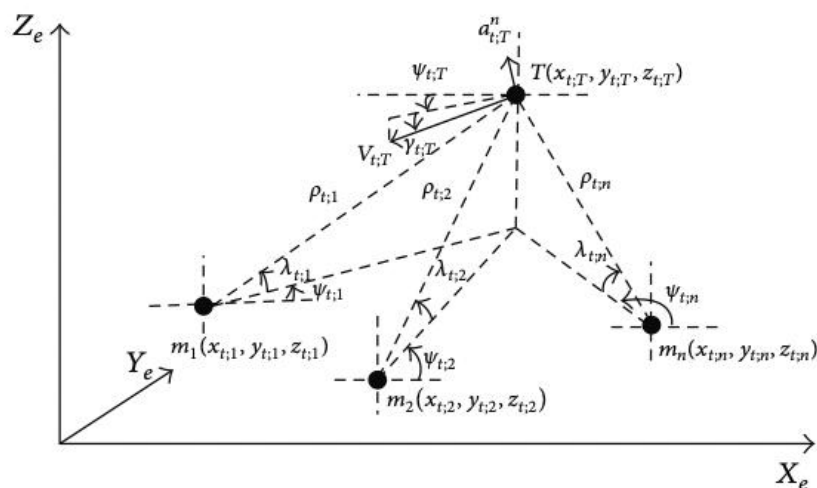
## Κεφάλαιο 4. Αλγόριθμοι ελέγχου και εκτίμησης

### 4.1. Μέτρηση ραντάρ για την προετοιμασία

Για την προετοιμασία των ΕοΜs των πυραύλων και τη διαδικασία εκτίμησης, χρησιμοποιείται ένα ραντάρ εδάφους σύμφωνα με τους Yukse B. και Ure K.N. (2016) . Το ραντάρ είναι σταθερό σε προκαθορισμένη θέση. Σχετικές θέσεις των αναχαιτιστών και του στόχου σύμφωνα με το ραντάρ στον τρισδιάστατο χώρο παρουσιάζονται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Γεωμετρία Radar [51]



Σχήμα 3: Τρισδιάστατη γεωμετρία εμπλοκής [51]

Υποθέτουμε ότι το ραντάρ εκτιμά το διάνυσμα αρχικής κατάστασης  $\hat{x}_{0;R}$  χωρίς κανένα σφάλμα και στέλνει τα δεδομένα αρχικοποίησης στους αναχαιτιστές χωρίς καμία καθυστέρηση:

$$\hat{x}_{0;R} = [\rho_{0;R} \quad \lambda_{0;R} \quad \gamma_{0;T} \quad a_{0;T}]. \quad (6)$$

Η γεωμετρική σχέση μεταξύ του  $i$  ου αναχαιτιστή και του στόχου δίνεται στο (7). Σε αυτή την εργασία, υποτίθεται ότι τα  $\gamma_{0;T}$  και  $a_{0;T}$  υπολογίζονται τέλεια από το ραντάρ:

$$\begin{aligned} \rho_{0;1} &= \sqrt{(x_{0;T} - x_{0;i})^2 + (y_{0;T} - y_{0;i})^2 + (z_{0;T} - z_{0;i})^2}, \\ \lambda_{0;1} &= \tan^{-1} \frac{z_{0;T} - z_{0;i}}{\sqrt{(x_{0;T} - x_{0;i})^2 + (y_{0;T} - y_{0;i})^2}}. \end{aligned} \quad (7)$$



#### 4.2. Σχετική Κινηματική

Η τρισδιάστατη γεωμετρία εμπλοκής μεταξύ του στόχου και των αναχαιτιστών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Θεωρείται ότι κάθε πύραυλος αναχαίτισης μπορεί να μετρήσει το δικό του φορέα αδρανειακής κατάστασης (Yukse B.and Ure K.N. 2016), όπως φαίνεται στο σημείο (8) και οι μετρήσεις είναι ακριβείς

$$\mathbf{x}_{t,i}^I = [x_{t,i} \quad y_{t,i} \quad z_{t,i} \quad \gamma_{t,i} \quad \psi_{t,i}]^T. \quad (8)$$

Ο κρατικός φορέας του  $i$ -οστού πυραύλου σύμφωνα με το στόχο κατά το χρόνο  $t$  δίνεται στο σημείο  $i = 1, 2, \dots, n$ . Στον τρόπο ανταλλαγής πληροφοριών, κάθε πύραυλος θα μπορούσε να μεταδίδει και να λαμβάνει τα εκτιμώμενα δεδομένα-στόχους χωρίς απώλεια και καθυστέρηση:

$$\mathbf{x}_{t,i}^I = [\rho_{t,i} \quad \lambda_{t,i} \quad \gamma_{t,i} \quad a_{t,i}]^T. \quad (9)$$

Σχετική κινηματική μεταξύ των αναχαιτιστών και του βαλλιστικού πυραύλου  $S_{xz}$ ,  $S_{xy}$ , and  $S_{yz}$  τα επίπεδα ορίζονται χρησιμοποιώντας

$$\dot{\rho}_{xz_i} = V_{\rho_{xz}},$$

$$\dot{\lambda}_{xz_i} = \frac{V_{\lambda_{xz}}}{\rho_{xz_i}},$$

$$\dot{\gamma}_{T_{xz}} = -\frac{a_{T_{xz}}}{V_{T_{xz}}},$$

$$\dot{a}_{T_{xz}} = g \frac{a_{T_{xz}}}{V_{T_{xz}}} \sin(\gamma_{T_{xz}}),$$

$$\dot{\rho}_{xy_i} = V_{\rho_{xy}},$$

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_{xy_i} &= \frac{V_{\lambda_{xy}}}{\rho_{xy_i}}, \\
\dot{\gamma}_{T_{xy}} &= 0, \\
\dot{a}_{T_{xy}} &= 0, \\
\dot{\rho}_{yz_i} &= V_{\rho_{yz}}, \\
\dot{\lambda}_{yz_i} &= \frac{V_{\lambda_{yz}}}{\rho_{yz_i}}, \\
\dot{\gamma}_{T_{yz}} &= -\frac{a_{T_{yz}}}{V_{T_{yz}}}, \\
\dot{a}_{T_{yz}} &= g \frac{a_{T_{yz}}}{V_{T_{yz}}} \sin(\gamma_{T_{yz}}), \tag{10}
\end{aligned}$$

ΌΠΟΥ

$$\begin{aligned}
V_{\rho_{xz}} &= -V_{m_{xz}} \cos(\gamma_{m_{xz}} - \lambda_{xz}) + V_{T_{xz}} \cos(\lambda_{xz} - \gamma_{T_{xz}}), \\
V_{\lambda_{xz}} &= -V_{m_{xz}} \sin(\gamma_{m_{xz}} - \lambda_{xz}) - V_{T_{xz}} \sin(\lambda_{xz} - \gamma_{T_{xz}}), \\
V_{\rho_{xy}} &= -V_{m_{xy}} \cos(\gamma_{m_{xy}} - \lambda_{xy}) + V_{T_{xy}} \cos(\lambda_{xy} - \gamma_{T_{xy}}), \\
V_{\lambda_{xy}} &= -V_{m_{xy}} \sin(\gamma_{m_{xy}} - \lambda_{xy}) - V_{T_{xy}} \sin(\lambda_{xy} - \gamma_{T_{xy}}), \\
V_{\rho_{yz}} &= -V_{m_{yz}} \cos(\gamma_{m_{yz}} - \lambda_{yz}) + V_{T_{yz}} \cos(\lambda_{yz} - \gamma_{T_{yz}}),
\end{aligned}$$

$$V_{\lambda_{yz}} = -V_{m_{yz}} \sin(\gamma_{m_{yz}} - \lambda_{yz}) - V_{T_{yz}} \sin(\lambda_{yz} - \gamma_{T_{yz}}). \quad (11)$$

Οι σχετικές κινηματικές εξισώσεις μπορούν να περιγραφούν στον διακριτό χρόνο χρησιμοποιώντας

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}), \quad (12)$$

όπου  $x_k$  είναι διάνυσμα κατάστασης του  $i$ -οστού πυραύλου την ώρα  $tk$  και  $f_{k-1}$  προκύπτει με την ενσωμάτωση των σχετικών κινηματικών ΕοΜ στο (10) (Shaferman and Oshman, 2009).

#### 4.3. Μοντέλο Μέτρησης

Κάθε αναχαιτιστής είναι εξοπλισμένος με τον ανιχνευτή υπέρυθρων που μετρά τη γωνία οπτικής επαφής (LOS)  $\lambda_{k;i}$ . (Yuksek B. and Ure K.N. 2016). Αυτή η μέτρηση έχει μηδενικό μέσο Gaussian, θόρυβο με τυπική απόκλιση  $\sigma_{\lambda i}$ . Οι μετρήσεις της γωνίας LOS εκτελούνται από κάθε βλήμα αναχαίτισης ξεχωριστά. επομένως  $E(V_{k;i}, V_{k;j}) = 0, \forall i \neq j$ . Η  $i$  μέτρηση LOS του πυραύλου είναι

$$z_{k,i} = h_{k,i}(x_k) + v_{k,i}, \quad (13)$$

όπου:

$$v_{k,i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\lambda i}^2). \quad (14)$$

Οι πύραυλοι αναχαίτισης μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο τρόπους λειτουργίας. Η πρώτη λειτουργία είναι η λειτουργία μη κοινής χρήσης πληροφοριών. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, κάθε αναχαιτιστής μετρά μόνο τη δική του γωνία LOS και τη χρησιμοποιεί στη διαδικασία εκτίμησης των σχετικών καταστάσεων. Το διάνυσμα μέτρησης στη λειτουργία μη κοινής χρήσης πληροφοριών δίνεται όπως φαίνεται στο (13). Ο δεύτερος τρόπος είναι ο τρόπος

κοινής χρήσης πληροφοριών στον οποίο κάθε αναχαιτιστής όχι μόνο μετρά τη δική του γωνία LOS αλλά υπολογίζει επίσης τη γωνία LOS των άλλων αναχαιτιστών όπως φαίνεται στο (15) (Shaferman and Oshman, 2009). Επίσης, για να βελτιωθεί η ποιότητα της εκτίμησης, κάθε αναχαιτιστής υπολογίζει την απόσταση εμβέλειας χρησιμοποιώντας δεδομένα θέσης και γωνίας LOS όπως φαίνεται στο (16):

$$z_{\lambda_{i,j}} = \begin{bmatrix} z_{\lambda_{i,1}} \\ z_{\lambda_{i,2}} \\ \vdots \\ z_{\lambda_{i,n}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$z_{\rho_{i,j}} = \begin{bmatrix} z_{\rho_{i,1}} \\ z_{\rho_{i,2}} \\ \vdots \\ z_{\rho_{i,n}} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Εδώ,  $i$  είναι το βλήμα που εκτελεί μέτρηση και  $n$  είναι το βλήμα που παρατηρείται από το βλήμα  $i$ . Η γωνία LOS του βλήματος  $j$  που μετράται από το βλήμα  $i$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας:

$$z_{\lambda_{i,j}} = \tan^{-1} \frac{\rho_i \sin \lambda_i - (z_j - z_i)}{\rho_i \cos \lambda_i + (x_i - x_j)} \quad (17)$$

Επιπλέον, το βεληνεκές του  $j$ th πυραύλου που μετράται με τον  $i$ ο πύραυλο λαμβάνεται με τη χρήση:

$$z_{\rho(i,j)} = \sqrt{[\rho_i \sin \lambda_i - (z_j - z_i)]^2 + [\rho_i \cos \lambda_i + (x_i - x_j)]^2}. \quad (18)$$

Στη λειτουργία κοινής χρήσης πληροφοριών, το μοντέλο μέτρησης δίνεται από:

$$z_{i,j} = h(x_{i,j}) + v_{i,j}, \quad (19)$$

όπου:

.

$$\begin{aligned} z_{i,j} &= [z_{\rho(i,j)} \quad z_{\lambda(i,j)}]^T, \\ v_{i,j} &= [v_{\rho(i,j)} \quad v_{\lambda(i,j)}]^T. \end{aligned} \quad (20)$$

#### 4.4.Εκτεταμένο φίλτρο Kalman.

Λόγω της μη γραμμικής ελαστικής κινηματικής μεταξύ των αναχαιτιστών και του βαλλιστικού στόχου, χρησιμοποιείται ένα εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF) για την εκτίμηση των μη μετρήσιμων δεδομένων και για το φιλτράρισμα των θορυβωδών μετρήσεων γωνίας LOS (Shaferman and Oshman, 2009). Ο πίνακας συνδιακύμανσης σφάλματος πρόβλεψης δίνεται στο:

$$P_{k|k-1} = \varphi_{k|k-1} P_{k-1|k-1} \varphi_{k|k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (21)$$

όπου:

$$\varphi_{k|k-1} = e^{F_{k-1}T} \cong I + F_{k-1}T, \quad (22)$$

είναι ο πίνακας μετάβασης που σχετίζεται με τη σχετική κινηματική, το  $T$  είναι ο χρόνος δειγματοληψίας και ο  $I$  είναι ο πίνακας ταυτότητας με τις κατάλληλες διαστάσεις. Το  $Q_{k-1}$  είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης του ισοδύναμου διακριτού θορύβου διεργασίας και υπολογίζεται όπως φαίνεται στο:

$$Q_{k-1} = \int_0^T \varphi_{k|k-1} Q \varphi_{k|k-1}^T dT. \quad (23)$$

Το  $F_{k-1}$  είναι ο Jacobian πίνακας που σχετίζεται με τη μη γραμμική σχετική κινηματική

$$F_{k-1} = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{k-1}}. \quad (24)$$

Η εκτίμηση κατάστασης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k [z_k - h_k \hat{x}_{k|k-1}], \quad (25)$$

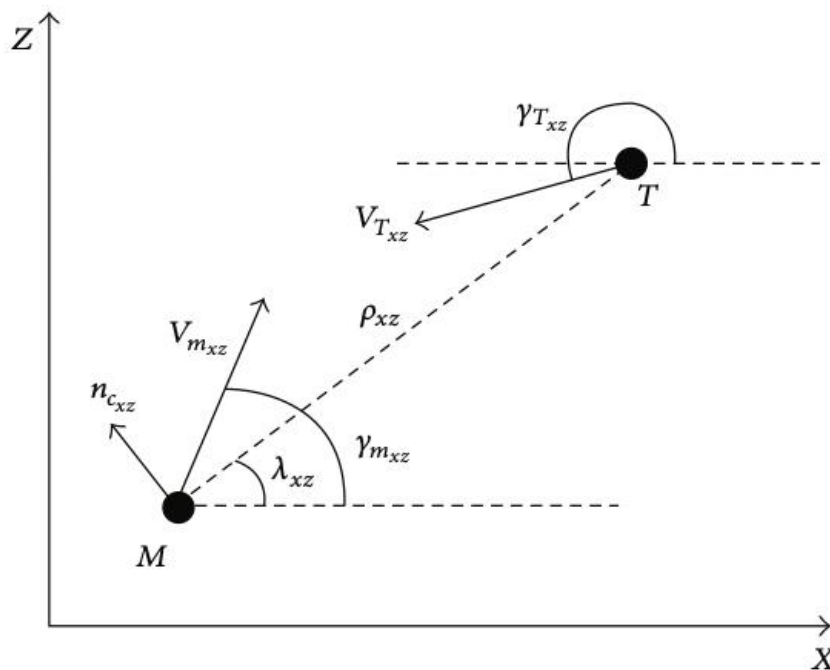
όπου  $\hat{x}_{k|k-1}$  είναι το προβλεπόμενο διάνυσμα κατάστασης και το  $K$  είναι το κέρδος Kalman όπως φαίνεται στο:

$$\hat{x}_{k|k-1} = \varphi_{k|k-1} \hat{x}_{k-1|k-1},$$

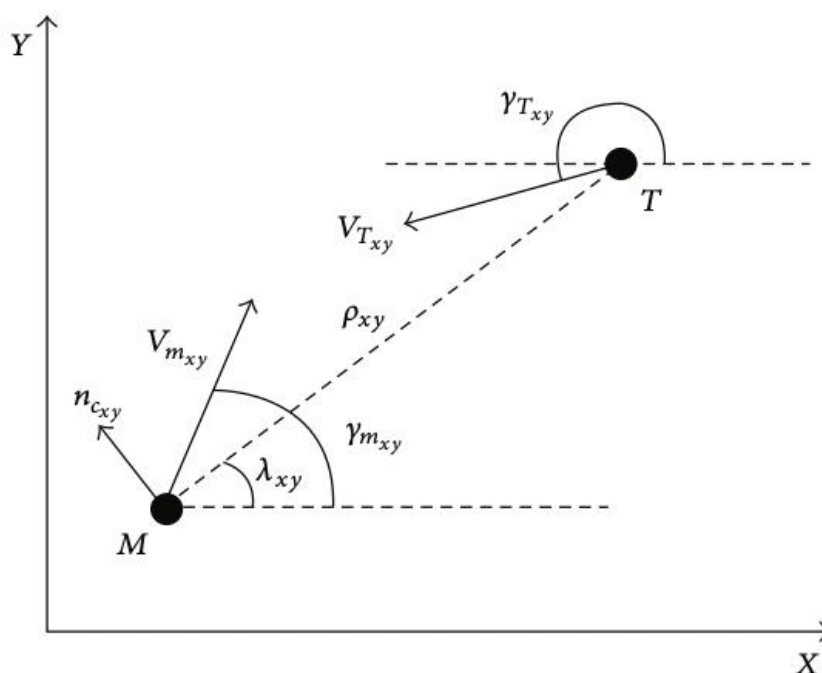
$$K = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k]^{-1}. \quad (26)$$

Εδώ, το  $H_k$  είναι η μήτρα Jacobian μέτρησης και η  $R_k$  είναι η μήτρα συνδιακύμανσης θορύβου μέτρησης. Ο πίνακας συνδιακύμανσης ενημερώνεται όπως φαίνεται στο

$$P_{k|k} = [I - K_k H_k] P_{k|k-1} [I - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T. \quad (27)$$



Σχήμα 4: Σχετική κινηματική σε επίπεδο Sxz [51]



Σχήμα 5: Σχετική κινηματική σε επίπεδο Sxy [51]

#### 4.5. Αλγόριθμος πλοήγησης 3D True Proportional.

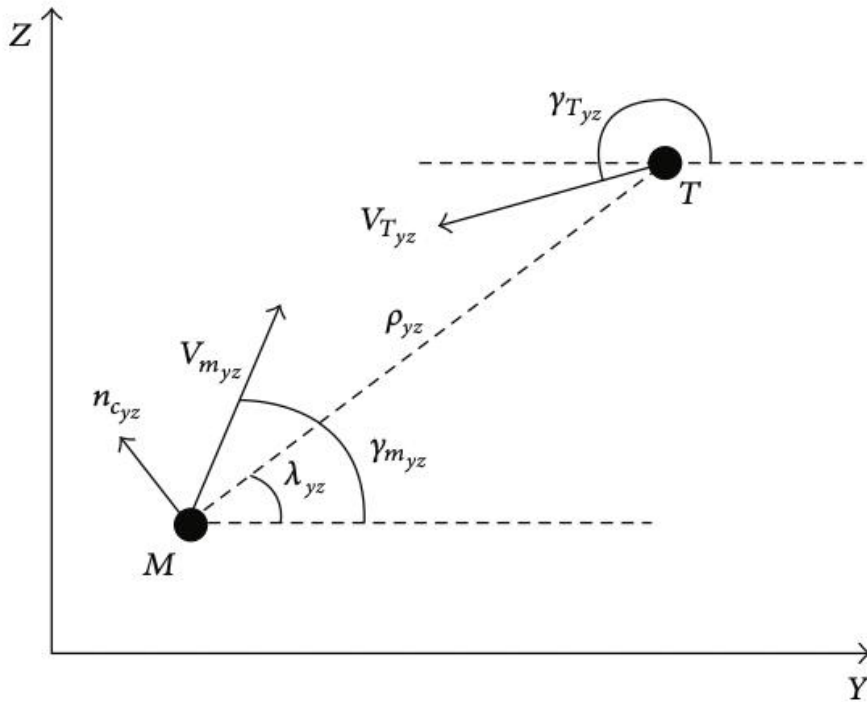
Ο αναλογικός αλγόριθμος σύμφωνα με τους Yukse B. και Ure K.N. (2016) είναι μια από τις πιο κοινές και αποτελεσματικές τεχνικές καθοδήγησης λόγω της απλής δομής και εφαρμογής του. Το σύστημα αληθινής αναλογικής πλοήγησης (TPN) παράγει την εντολή επιτάχυνσης κάθετα στο LOS. Όπως φαίνεται στο (29), η εντολή επιτάχυνσης είναι συνάρτηση της ταχύτητας κλεισίματος  $V_c$  και του ρυθμού LOS  $\lambda$

$$n_c = NV_c \dot{\lambda}, \quad (28)$$

όπου  $n_c$  είναι η εντολή επιτάχυνσης κάθετη στο LOS,  $V_c$  είναι η ταχύτητα κλεισίματος, και  $N$  είναι η αναλογία πλοήγησης που είναι γενικά μεταξύ 3 και 5 [40]. Σε αυτήν την τρισδιάστατη μελέτη υποκλοπής, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος TPN για  $S_{xz}$ ,  $S_{xy}$ , και  $S_{yz}$  αεροπλάνα χωριστά [42]. Η γεωμετρία της σχετικής κινηματικής για κάθε διαφορετικό επίπεδο εμφανίζεται στα Σχήματα 4, 5 και 6. Εντολές επιτάχυνσης σε  $S_{xz}$ ,  $S_{xy}$ , και  $S_{yz}$  λαμβάνονται όπως φαίνεται στο:

$$\begin{aligned} n_{c_{xz}} &= NV_{c_{xz}} \dot{\lambda}_{xz}, \\ n_{c_{xy}} &= NV_{c_{xy}} \dot{\lambda}_{xy}, \\ n_{c_{yz}} &= NV_{c_{yz}} \dot{\lambda}_{yz}, \end{aligned} \quad (29)$$





**Σχήμα 6: Σχετική κινηματική σε επίπεδο Syz [51]**

Τα στοιχεία επιτάχυνσης του αναχαιτιστή στο  $x$ -,  $y$ -, και  $z$ - ( $a_{mx}$ ,  $a_{my}$ ,  $a_{mz}$ ) μπορούν να ληφθούν από το (30) χρησιμοποιώντας τις τριγωνομετρικές σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_{m_x} &= -n_{c_{xy}} \sin \lambda_{xy} - n_{c_{xz}} \sin \lambda_{xz}, \\ a_{m_y} &= -n_{c_{xy}} \sin \lambda_{xy} - n_{c_{yz}} \sin \lambda_{xz}, \\ a_{m_z} &= n_{c_{xz}} \sin \lambda_{xz} - n_{c_{yz}} \sin \lambda_{yz}. \end{aligned} \quad (30)$$

Πριν από την εφαρμογή των εντολών ελέγχου στον αναχαιτιστή, θα πρέπει να υπολογιστούν τα κάθετα και οριζόντια στοιχεία  $a_{pitch}$  και  $a_{yaw}$ . Εδώ, το  $a_{pitch}$  είναι στο επίπεδο του βήματος και είναι κάθετο στο διάνυσμα της ταχύτητας του αναχαιτιστή και το  $a_{yaw}$  είναι κάθετο τόσο στο διάνυσμα ταχύτητας όσο και στο διάνυσμα της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Για το TPN, αυτές οι συνιστώσες επιτάχυνσης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας

$$\begin{aligned} a_{pitch} &= a_{mz} \cos \gamma_m - a_{mx} \sin \gamma_m - g \cos \gamma_m, \\ a_{yaw} &= a_{my} \cos \psi_m - a_{mx} \sin \psi_m. \end{aligned} \quad (31)$$

## Κεφάλαιο 5. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

### 5.1. Αλγόριθμος CMA

Εξετάζεται το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς:

$$\text{Minimize } f(x), f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}. \quad (32)$$

Είναι ευρέως γνωστό ότι όταν το  $f$  διαθέτει μια συγκεκριμένη δομή (όπως είναι συνεχής, γραμμική ή κυρτή), υπάρχει ποικιλία τοπικών αλγορίθμων αναζήτησης που μπορούν να εφαρμοστούν για την αποτελεσματική επίλυση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ωστόσο, όταν το  $f$  δεν διαθέτει αυτές τις επιθυμητές ιδιότητες, οι τοπικές μέθοδοι αναζήτησης είτε αποτυγχάνουν να βρουν απάντηση είτε κολλάνε στα τοπικά ελάχιστα. Οι μέθοδοι καθολικής αναζήτησης (Chong and Stanislaw, 2013) λύνουν αυτό το πρόβλημα γενικεύοντας την αναζήτηση σε ολόκληρο τον χώρο κατάστασης. Αν και οι καθολικές μέθοδοι μπορούν επίσης να εκμεταλλευτούν τη δομή του  $f$ , πολλές καθολικές μέθοδοι αντιμετωπίζουν το  $f$  ως συνάρτηση μαύρου κουτιού, και ως εκ τούτου η λύση βρίσκεται εξ ολοκλήρου με την εξέταση των ζευγών εισόδου-εξόδου  $(x, f(x))$ .

**Input:** Objective Function  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , Number of Samples per Iteration  $\lambda$ , Number of Iterations  $n_{\text{iter}}$ , Weights  $w_1, \dots, w_\mu$   
**Output:** Approximate optimal solution  $\mathbf{x}^*$

// Initialization

- (1)  $\mathbf{m}_0, \sigma_0, \mathbf{C}_0 \leftarrow \mathbf{I}, \mathbf{p}_\sigma, \mathbf{p}_c, k \leftarrow 0, \mu_w \leftarrow 1 / \sum_{j=1}^\mu w_j^2, c_1 \leftarrow 2/n^2, c_\mu \leftarrow \mu_w/n^2, c_\sigma^{-1} \leftarrow n/3, c_c^{-1} \leftarrow n/4, \alpha \leftarrow 1.5, \mu \leftarrow \lambda/2$
- (2) **while**  $k < n_{\text{iter}}$  **do**
- (3)   **for**  $i$  in  $\{1, \dots, \lambda\}$  **do**
- // Sample Candidate Solutions
- (4)    $\mathbf{x}_i \sim \mathcal{N}(\mathbf{m}_k, \sigma_k^2 \mathbf{C}_k), f_i \leftarrow f(\mathbf{x}_i)$
- // Sort the Candidate Solutions Based on Their Cost
- (5)    $\mathbf{x}_{(1)}, \dots, \mathbf{x}_{(l)}$ , such that  $f_{(1)} \leq \dots \leq f_{(l)}$
- // Move the mean to low cost solutions
- (6)    $\mathbf{m}_{k+1} \leftarrow \mathbf{m}_k + \sum_{i=1}^\mu w_i (\mathbf{x}_i - \mathbf{m}_k)$
- // Update Evolution Path Variables
- (7)    $\mathbf{p}_\sigma \leftarrow (1 - c_\sigma) \mathbf{p}_\sigma + \sqrt{1 - (1 - c_\sigma)^2} \sqrt{\mu_w} \mathbf{C}_k^{-1/2} ((\mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_k) / \sigma_k)$
- (8)    $\sigma_{k+1} \leftarrow \sigma_k \times \exp(c_\sigma (\|\mathbf{p}_\sigma\| / \mathbb{E}\|\mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})\| - 1))$
- // Update The Covariance Matrix
- (9)   **if**  $\|\mathbf{p}_\sigma\| < \alpha \sqrt{n}$  **then**
- (10)      $d_k \leftarrow 1$
- (11)   **else**
- (12)      $d_k \leftarrow 0$
- (13)    $c_s \leftarrow (1 - d_k^2) c_1 c_c (2 - c_c)$
- $\mathbf{p}_c \leftarrow (1 - c_c) \mathbf{p}_c + d_k \sqrt{(1 - c_c)^2} \sqrt{\mu_w} \mathbf{C}_k^{-1/2} ((\mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_k) / \sigma_k)$
- (14)    $\mathbf{C}_{k+1} \leftarrow (1 - c_1 - c_\mu + c_s) \mathbf{C}_k + c_1 \mathbf{p}_c \mathbf{p}_c^\top + c_\mu \sum_{i=1}^\mu w_i ((\mathbf{x}_i - \mathbf{m}_k) / \sigma_k) ((\mathbf{x}_i - \mathbf{m}_k) / \sigma_k)^\top$
- (15)    $k \leftarrow k + 1$
- // After the algorithm stops, output the best sample
- (16)  $\mathbf{x}^* \leftarrow \mathbf{x}_{(1)}$

### Αλγόριθμος 1: Προσαρμογή πίνακα συνδιακύμανσης CMA

Η προσαρμογή πινάκων covariance (CMA) (Hansen and Ostermeier, 1996) είναι μια δημοφιλής σφαιρική μέθοδος αναζήτησης που ταξινομεί συνήθως μεταξύ των καλύτερων λύσεων στα παγκόσμια σημεία αναφοράς αναζήτησης (Hansen, Auger, Ros, Finck και Posik, 2010). Η βασική ιδέα πίσω από το CMA είναι να τοποθετήσουμε μια πολυεπίπεδη κανονική κατανομή πάνω από το χώρο αναζήτησης  $\mathbb{R}^n$  και να δοκιμάσουμε υποψήφιες λύσεις ( $\mathbf{x}_i, f(\mathbf{x}_i)$ ) από αυτή τη διανομή. Ο μέσος διανυσματικός πίνακας της κατανομής ενημερώνεται σταδιακά σε κάθε βήμα με βάση τις τιμές των δειγματοληπτικών διαλυμάτων. Ο στόχος είναι τελικά να κατευθύνει το μέσο διάνυσμα στη βέλτιστη λύση  $\mathbf{x}^*$  και να συρρικνώσει τον πίνακα συμπαράγωγής σε πίνακα ταυτότητας. Ως εκ τούτου, στο όριο η κατανομή θα αποδώσει τη βέλτιστη λύση κατά τη δειγματοληψία.

Για πληρότητα, παρέχουμε τον ψευδοκώδικα για τον αλγόριθμο CMA στον αλγόριθμο 1, που λαμβάνεται από τους Hansen, Muller και Koumoutsakos (2003). Ο αλγόριθμος ξεκινά με την προετοιμασία των εσωτερικών παραμέτρων του (Γραμμή (1)). Κατά την επανάληψη  $k$ th, ο αλγόριθμος δειγματίζει τον αριθμό δειγμάτων από μια πολυδιαβακτημένη κατανομή Gaussian με μέση  $m_k$  και covariance  $C_k$  (γραμμή (4)). Στη συνέχεια, τα δείγματα  $x_i$  ταξινομούνται ανάλογα με το κόστος τους  $f_i$ . Ο σταθμισμένος μέσος όρος των κορυφαίων  $\mu$  αριθμό διαλυμάτων υπολογίζεται για να βρεθεί ο μέσος διάνυσμα  $m_{k+1}$  για την επόμενη επανάληψη (Γραμμή (6)), η οποία μετακινεί τον μέσο όρο της κατανομής προς δείγματα με χαμηλότερο κόστος. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ενημερώνει τον πίνακα συμπαραγωγής με τη βοήθεια των μεταβλητών διαδρομής εξέλιξης που είναι  $p_m$  (Γραμμή (7)) και  $P_C$  (Γραμμή (13)), γεγονός που εξασφαλίζει ότι τα βήματα προσαρμογής είναι σε συζυγείς κατευθύνσεις. Μπορούμε να ανατρέξουμε στους Hansen, Muller και Koumoutsakos (2003) για την πλήρη εξαγωγή του αλγορίθμου και τη διαίσθηση για την ενημέρωση των παραμέτρων διαδρομής.

## 5.2. Αλγόριθμος CMA-MV

Δυστυχώς, ο αλγόριθμος CMA ισχύει μόνο για προβλήματα συνεχούς βελτιστοποίησης. Έτσι σύμφωνα με τους Yuksek B. και Ure K.N. (2016), δεν μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να λύσουμε το πρόβλημα ρύθμισης της κατάστασης εκτόξευσης πυραύλων που αναφέρεται στο σημείο (3), δεδομένου ότι η κατανομή των πυραύλων καθορίζεται από τις ακέραιες μεταβλητές.

Για να ξεπεράσουμε αυτό το ζήτημα, αναπτύσσουμε έναν νέο αλγόριθμο που ονομάζεται Covariance Matrix Adaptation με μικτές μεταβλητές (CMA-MV), ο οποίος επεκτείνει τον κλασικό αλγόριθμο CMA για να εργαστεί σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης μικτού ακέραιου. Το γενικό πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού είναι της φόρμας:

$$f(x, z), f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{Z}^d \rightarrow \mathbb{R}, \quad (33)$$

όπου  $Z$  το σύνολο των ακεραίων. Η ειδική περίπτωση που μας ενδιαφέρει είναι το πρόβλημα όπου η διακριτή μεταβλητή  $z$  είναι ένα δυαδικό διάνυσμα. αυτό είναι,  $z \in \{0,1\}^d$ .

Αυτό ισχύει επίσης για το πρόβλημα κατανομής πυραύλων στο (3), όπου το  $z_i = 1$  αναφέρεται στην εκτόξευση βλήματος  $i$ . Η κύρια ιδέα πίσω από τον αλγόριθμο CMA-MV είναι ο καθορισμός δύο κατανομών πιθανοτήτων για τη δειγματοληψία συνεχών και διακριτών μεταβλητών. Για τα συνεχή  $x$ , χρησιμοποιούμε μια πολυεπίπεδη κανονική κατανομή και χρησιμοποιούμε ακριβώς την ίδια διαδικασία που ακολουθείται στον αλγόριθμο CMA (Αλγόριθμος 1) για να ενημερώσουμε τη μέση χρήση της κατανομής. Για τις διακριτές μεταβλητές, χρησιμοποιούμε μια κατανομή Bernoulli και ενημερώνουμε τον μέσο όρο αυτής της κατανομής με βάση το κόστος των μεταβλητών του δείγματος.

```

Input: Mean  $\mathbf{m}' \in [0, 1]^d$ , Covariance  $\mathbf{C}'$ 
Output: Sample  $\mathbf{z} \in \{0, 1\}^d$ 
// Compute the corresponding multivariate Normal distribution
(1) for  $i$  in  $\{1, \dots, d\}$  do
(2)    $\gamma_i \leftarrow \Phi^{-1}(m'_i)$ 
(3)   for  $j$  in  $\{1, \dots, d\}$  do
(4)     if  $i \neq j$  then
(5)        $\Lambda_{ij} \leftarrow \text{Solve } \mathbf{C}'_{ij} - \Psi(\gamma_i, \gamma_j, \Lambda_{ij}) = 0$ 
(6)     else
(7)        $\Lambda_{ij} = 1$ 
// Sample from the corresponding multivariate Normal distribution and transform the results
(8)  $\mathbf{u} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\Lambda})$ 
(9) for  $l$  in  $\{1, \dots, d\}$  do
(10)  if  $u_l > 0$  then
(11)     $z_l \leftarrow 1$ 
(12)  else
(13)     $z_l \leftarrow 0$ 

```

## Αλγόριθμος 2: Δείγμα από πολυμεταβλητή κατανομή Bernoulli

Ωστόσο, η δειγματοληψία από την κατανομή Bernoulli δεν είναι τόσο απλή όσο η δειγματοληψία από κανονική κατανομή. Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο που περιγράφεται στους Macke, Berens, Ecker, Tolias και Bethge (2009) για το σκοπό αυτό. Ο ψευδοκώδικας για τη διαδικασία δειγματοληψίας δίνεται στον αλγόριθμο 2. Ο αλγόριθμος λαμβάνει το δεδομένο μέσο διανυσματικό  $\mathbf{m}'$  και τον πίνακα συμπαραγωγής για  $\mathbf{C}'$  και υπολογίζει μια αντίστοιχη πολυμεταβλητή κατανομή με μέση  $\boldsymbol{\gamma}$  και covariance  $\boldsymbol{\Lambda}$  με την επίλυση των εξισώσεων που δίνονται στις γραμμές (2) και (4). Σε αυτές τις εξισώσεις  $\Phi$  είναι η αθροιστική κατανομή μιας μη κανονικής μεταβλητής με μηδενική μέση και διακύμανση μονάδας,  $\Pi(x, y, z) = \Phi_2(x, y, z) - \Phi(x)\Phi(y)$ , όπου  $\Phi_2(x, y, z)$  είναι η αθροιστική κατανομή μιας διπολικής κανονικής μεταβλητής με μέση  $[x, y]$  και συσχέτιση  $z$ . Μετά την επίλυση αυτών των εξισώσεων χρησιμοποιώντας αριθμητικές τεχνικές, συμπεραίνουμε την κανονική μεταβλητή στη γραμμή (8). Στη συνέχεια, περιστρέφουμε τα συστατικά του δείγματος και ορίζεται  $z_l = 1$  εάν τα συστατικά είναι θετικά και

$z_l = 0$  διαφορετικά. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το πολυεπίπεδο δείγμα που παράγεται μέσω αυτού του μόδας προέρχεται από μια διανομή με πρώτες και δεύτερες στιγμές,  $m$  και  $C$ , αντίστοιχα.

Ο ψευδοκώδικας για τον πλήρη αλγόριθμο CMA-MV δίνεται στον Αλγόριθμο 3. Στην  $k$  επανάληψη, ο αλγόριθμος καθορίζει την τιμή των διακριτών μεταβλητών και ως εκ τούτου ανακτά τη συνάρτηση  $\tilde{f}(x) = f(x, z_k)$ . Σημειώστε ότι το  $\tilde{f}$  είναι συνάρτηση μιας συνεχούς μεταβλητής. Γι' αυτό το λόγο, μπορούμε να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο CMA (Αλγόριθμος 1) για να λάβουμε μια λύση (Γραμμή (3)). Στη συνέχεια, καθορίζουμε την τιμή της συνεχούς μεταβλητής σε  $x_{k+1}$  για να ανακτηθεί η λειτουργία  $f(z) = f(x_{k+1}, z)$ . Στη συνέχεια ως  $\lambda$ , υποψήφιες λύσεις από την κατανομή Bernoulli με μέσο όρο  $m, k$  και  $C, k$  χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο δειγματοληψίας που δίνεται στον Αλγόριθμο 2 (Γραμμή (5)). Έπειτα, ταξινομούμε τη λύση από το χαμηλότερο στο υψηλότερο κόστος (Γραμμή (6)). Μετά, χρησιμοποιούμε έναν σταθμισμένο μέσο όρο των λύσεων χαμηλού κόστους για να υπολογίσουμε τον ενημερωμένο μέσο όρο  $m_{k+1}$  της κατανομής Bernoulli (Γραμμή (7)). Ομοίως, χρησιμοποιούμε τη σταθμισμένη εκτίμηση συνδιακύμανσης του δείγματος των υποψηφίων λύσεων χαμηλού κόστους για να υπολογίσουμε τον ενημερωμένο πίνακα συνδιακύμανσης  $C, k+1$ . Μετά από κάθε ενημέρωση, η διανομή δίνει μεγαλύτερη μάζα στις υποψήφιες λύσεις χαμηλού κόστους και ως εκ τούτου με κάθε επανάληψη η πιθανότητα δειγματοληψίας αυξάνεται η βέλτιστη λύση.

## Κεφάλαιο 6 . Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σε αυτή την ενότητα ασχολούμαστε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης (Αλγόριθμος 3) με τις μεθόδους ελέγχου και εκτίμησης που δίνονται στο Τμήμα 3 για να δημιουργήσουμε μια ολοκληρωμένη λύση για την πολλαπλή κατανομή και έλεγχο πυραύλων για την αναχαίτιση βαλλιστικών στόχων (Yukse B.and Ure K.N. 2016). Πρώτα δίνουμε λεπτομερή αποτελέσματα για δύο συγκεκριμένες αποστολές προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα πώς λειτουργεί ο αλγόριθμος και στη συνέχεια αποδεικνύουμε την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου συγκρίνοντας την απόδοσή του με μεθόδους σε προσομοιώσεις monte-Carlo.

Σε όλα τα πειράματα, χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες παραμέτρους για το αμυντικό σύστημα SAM:

- i) Ο αριθμός των SM NSAM είναι 5 και είναι διατεταγμένα σε δύο παράλληλες γραμμές με την πίσω γραμμή που περιέχει 3 SAMs και την πρώτη γραμμή που περιέχει 2 SAMs. Η διάταξη φαίνεται στις επάνω αριστερές γωνίες των σχήματων 7 και 9. Το ραντάρ τοποθετείται μπροστά από την πρώτη γραμμή.
- ii) Η ταχύτητα SAM έχει οριστεί 3.5.
- iii) Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για CMA-MV ορίζεται σε 50. Ο αριθμός των δειγμάτων ορίζεται σε 100 τόσο για συνεχείς όσο και για διακριτές μεταβλητές. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι συντονισμένες με μη αυτόματο τρόπο.

### 6.1. Αποτελέσματα για στόχο μεγάλου υψομέτρου-χαμηλής ταχύτητας

Αρχικά εξετάζουμε μια αποστολή όπου ο βαλλιστικός στόχος έχει σχετικά χαμηλή κινητική ενέργεια (Yukse B. and Ure K.N. 2016). Οι αρχικές συνθήκες του βαλλιστικού στόχου έχουν οριστεί στα 80000 μέτρα υψόμετρο και ταχύτητα ισοδύναμη με 5. Αυτό είναι ένα λιγότερο δύσκολο σενάριο, καθώς η βαλλιστική απειλή έχει σχετικά μεγαλύτερο χρόνο μέχρι να χτυπήσει στο έδαφος, δίνοντας αρκετό χρόνο για τα φίλτρα του Σύστημα άμυνας SAM για σύγκλιση. Η προκύπτουσα τροχιά του στόχου και του εκτοξευόμενου πυραύλου φαίνεται στο Σχήμα 7. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναγνωρίζει επίσης ότι τα φίλτρα έχουν αρκετό χρόνο για να συγκλίνουν σε αυτή την περίπτωση και εκτοξεύει μόνο έναν πύραυλο. Ο πύραυλος αναχαιτίζει τη βαλλιστική απειλή με απόσταση αστοχίας μικρότερη από 1 μέτρο.

**Input:** Objective Function  $f: \mathbb{R}^n \times \{0, 1\}^d \rightarrow \mathbb{R}$ ,  
 Number of Continuous Samples per Iteration  $\lambda$ ,  
 Number of Discrete Samples per Iteration  $\lambda'$ ,  
 Number of Iterations  $n_{\text{iter}}$ , Weights for continuous samples  $w_1, \dots, w_\mu$ , Weights for discrete samples  $w'_1, \dots, w'_{\mu'}$ , Initial guess  $\mathbf{x}^0, \mathbf{z}^0$

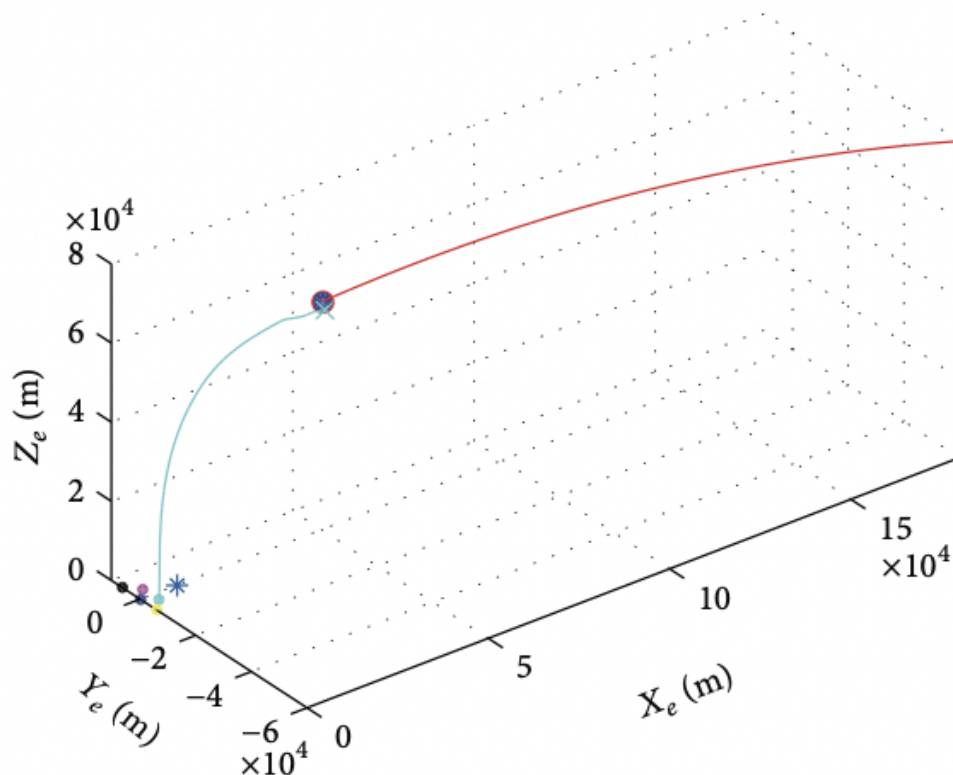
**Output:** Approximate optimal solution  $\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*$

// Initialization

- (1)  $\mathbf{m}_0, \sigma_0, \mathbf{C}_0 \leftarrow \mathbf{I}, \mathbf{p}_\sigma, \mathbf{p}_c, k \leftarrow 0, \mu_w \leftarrow 1 / \sum_{j=1}^{\mu} w_j^2$
- (2) **while**  $k < n_{\text{iter}}$  **do**  
 // Fix the discrete variables to  $\mathbf{z}^k$  and use CMA to solve for  $\mathbf{x}$   
 (3)  $\mathbf{x}^{k+1} \leftarrow$  Call CMA (Algorithm 1) with  $\tilde{f}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}, \mathbf{z}^k)$   
 // Fix the continuous variables and sample from the multivariate Bernoulli distribution  
 (4) **for**  $i$  in  $\{1, \dots, \lambda'\}$  **do**  
 // Sample  
 (5)  $\mathbf{z}_i \sim \mathcal{B}(\mathbf{m}'_k, \mathbf{C}'_k)$  using Algorithm 2  $\hat{f}_i \leftarrow f(\mathbf{x}^{k+1}, \mathbf{z}_i)$   
 // Sort the candidate Solutions Based on Their Cost  
 (6)  $\mathbf{z}_{1, \dots, \lambda'} \leftarrow \mathbf{z}_{t(1)}, \dots, \mathbf{z}_{t(\lambda')}$ , such that  $\hat{f}_{t(1)} \leq \dots \leq \hat{f}_{t(\lambda')}$   
 // Move the mean to low cost solutions  
 (7)  $\mathbf{m}'_{k+1} \leftarrow \sum_{i=1}^{\lambda'} w'_i \mathbf{z}_i$   
 // Update The Covariance Matrix  
 (8)  $\mathbf{C}'_{k+1} \leftarrow \frac{1}{\lambda' - 1} \sum_{i=1}^{\lambda'} w'_i (\mathbf{z}_i - \mathbf{m}'_{k+1})(\mathbf{z}_i - \mathbf{m}'_{k+1})^\top$   
 (9)  $\mathbf{z}^{k+1} \leftarrow \mathbf{z}^k_{t(1)}$   
 (10)  $k \leftarrow k + 1$   
 // After the algorithm stops, output the best sample  
 (11)  $\mathbf{x}^* \leftarrow \mathbf{x}^k_{t(1)}, \mathbf{z}^* \leftarrow \mathbf{z}^k_{t(1)}$

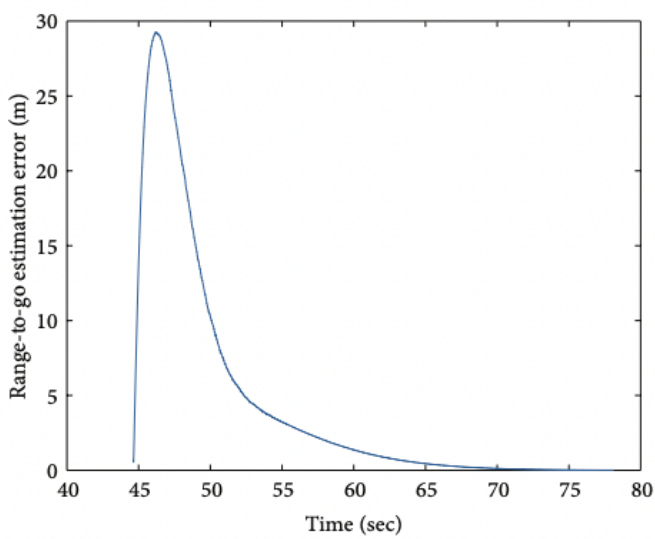
### Αλγόριθμος 3: Προσαρμογή πίνακα συνδιακύμανσης με μικτές μεταβλητές CMA - MV



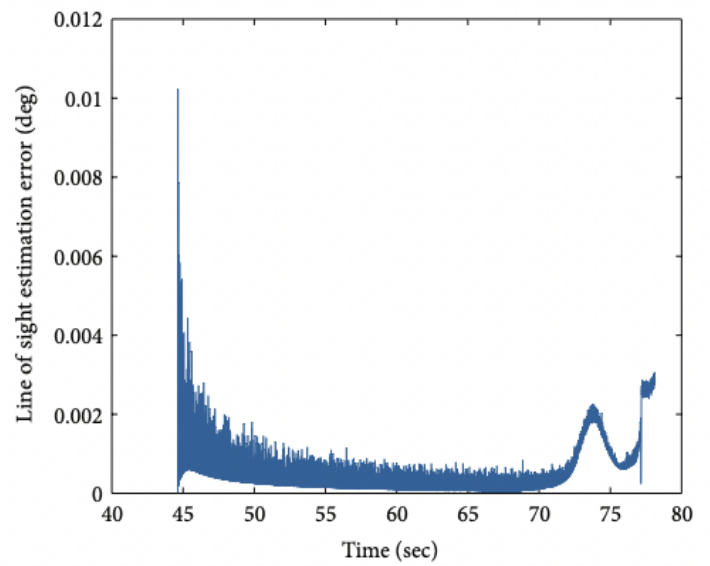


**Σχήμα 7: Αναχαίτιση βαλλιστικού στόχου μεγάλου υψομέτρου-χαμηλής ταχύτητας. Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την τροχιά του βαλλιστικού στόχου. Ο αλγόριθμος επιλέγει μόνο 1 βλήμα για αναχαίτιση [51].**

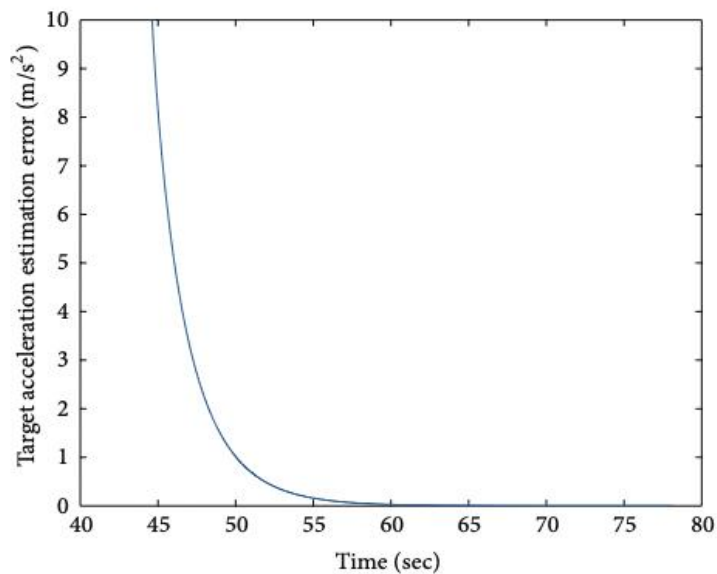
Τα σχήματα 8(α), 8(β) και 8(γ) δείχνουν την απόδοση εκτίμησης του φίλτρου του πυραύλου, για εκτιμήσεις εμβέλειας, οπτικής επαφής και επιτάχυνσης στόχου. Μπορεί να φανεί ότι τα φίλτρα συνέκλιναν γρήγορα στην τερματική φάση της αποστολής. Αυτά τα σχέδια δικαιολογούν την απόφαση του αλγορίθμου να εκτοξεύσει μόνο έναν πύραυλο. Σε αυτή την περίπτωση, ο αλγόριθμος αναγνώρισε ότι ένα μόνο φίλτρο θα απέδιδε επαρκή απόδοση και δεν επέλεξε να διαθέσει περισσότερους πυραύλους, προκειμένου να διατηρήσει το κόστος όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ελάχιστο. Να σημειωθεί επίσης ότι δεν εκτελείται συνεργατικό φιλτράρισμα σε αυτή την αποστολή, καθώς εκτοξεύεται μόνο ένας πύραυλος.



**(α) Κανόνας του σφάλματος εκτίμησης εμβέλειας προς μετάβαση σε σχέση με τον χρόνο στην τερματική φάση**



**(β) Κανόνας σφάλματος εκτίμησης οπτικής επαφής σε σχέση με το χρόνο στην τερματική φάση**



**(γ) Κανόνας του σφάλματος εκτίμησης της επιτάχυνσης στόχου σε σχέση με το χρόνο στην τερματική φάση**

**Σχήμα 8: Απόδοση φίλτρου σε σχέση με το χρόνο στην τερματική φάση για την αναχαίτιση στόχου μεγάλου υψομέτρου-χαμηλής ταχύτητας [51].**

## 6.2. Αποτελέσματα για στόχο ταχύτητας χαμηλού υψομέτρου

Για να συμπεράνουμε τα αποτελέσματα της προηγούμενης υποενότητας όπως αναφέρεται στο (Yukse B. και Ure K.N. 2016) , εξετάζουμε μια αποστολή που αντιστοιχεί στον στόχο της υψηλής κινητικής ενέργειας. Για την προσομοίωση αυτή οι αρχικές συνθήκες του βαλλιστικού στόχου ορίζονται σε 60000 μέτρα ύψους και ταχύτητας ισοδύναμης με 7. Αυτό το σενάριο είναι πολύ πιο δύσκολο, καθώς ο καθιερωμένος χρόνος πρόσκρουσης του στόχου είναι πολύ μικρότερος. Η προκύπτουσα τροχιά του στόχου και του εκτοξευόμενου πυραύλου παρουσιάζεται στο σχήμα 9. Σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι ο αλγόριθμος εκτοξεύει 3 συνεργατικούς πυραύλους για να αναχαιτίσει τον στόχο. Η αναχαίτιση επιτυγχάνεται με απόσταση αστοχίας περίπου 1 μέτρο.

Τα σχήματα 10α, 10β και 10γ δείχνουν την εκτίμηση της διαμόρφωσης του φίλτρου των πυραύλων, για τις εκτιμήσεις βεληνεκούς, οπτικής γραμμής και επιτάχυνσης στόχου κατά μέσο όρο κατά τη διάρκεια των 3 εκτοξευμένων πυραύλων. Για σύγκριση, η απόδοση των μεμονωμένων φίλτρων σχεδιάζεται επίσης σε αυτά τα στοιχεία. Αυτές οι μεμονωμένες επιδόσεις φίλτρων αντιστοιχούν στην περίπτωση που οι πύραυλοι δεν συνεργάζονται· και έτσι, δεν κοινοποιούνται πληροφορίες μεταξύ τους. Η εξέταση αυτών των πλοκών μας δίνει μια καλή εικόνα για την απόφαση του αλγορίθμου να εκτοξεύσει 3 πυραύλους. Φαίνεται ότι τα μεμονωμένα φίλτρα δεν είχαν αρκετό χρόνο για να συγκλίνουν για αυτόν τον υψηλό στόχο κινητικής ενέργειας. Εξαιτίας αυτού, η εκτόξευση ενός ή και δύο πυραύλων θα είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες αποστάσεις αστοχιών. Ο αλγόριθμος έκανε την απαραίτητη ανάλυση συμβιβασμού και ανακάλυψε ότι η εκτόξευση 3 συνεργατικών πυραύλων θα δημιουργούσε αρκετή ροή πληροφοριών για να συγκλίνουν οι εκτιμητές.

## 6.3. Αποτελέσματα Μόντε Κάρλο για πολλαπλά σενάρια

Τα προηγούμενα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι ο αλγόριθμος παράγει σωστές αποφάσεις σε επιλεγμένα σενάρια σύμφωνα με τους Yukse B. και Ure K.N. (2016). Ωστόσο, προκειμένου να αξιολογηθεί πραγματικά η απόδοση του αλγορίθμου, ένα ευρύ φάσμα αρχικών συνθηκών που θα πρέπει να αναλυθεί η βαλλιστική απειλή. Επίσης, πρέπει να συγκρίνουμε την απόδοση του αλγορίθμου με εναλλακτικές μεθόδους. Για το

σκοπό αυτό πραγματοποιήσαμε μια δοκιμή Monte-Carlo πάνω από 100 τυχαία δειγματοληπτικές αρχικές συνθήκες για τον βαλλιστικό στόχο.

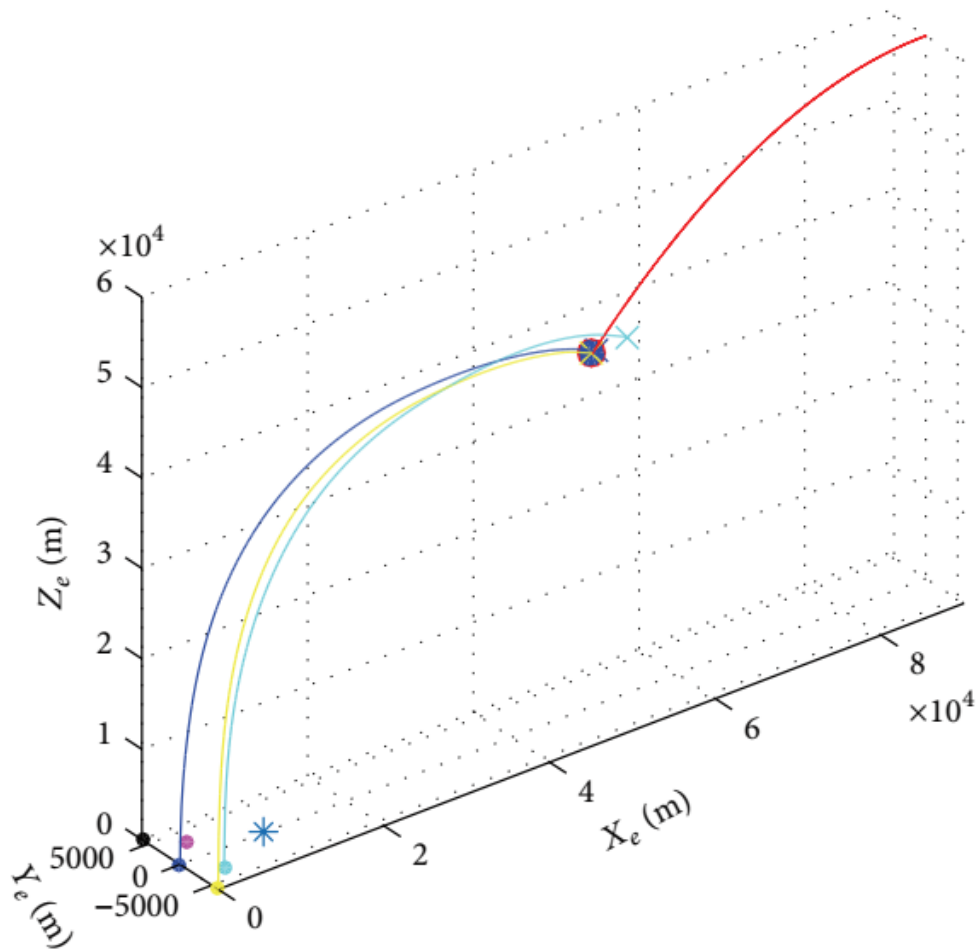
Συγκρίνονται οι ακόλουθες εναλλακτικές μεθοδολογίες:

- Ευρετική Συνεργατική Υποκλοπή. Σε αυτόν τον απλό αλγόριθμο δεν διεξάγεται καμία κατάσταση εκτόξευσης ή βελτιστοποίησης πυραύλων. Αυτή η μέθοδος εκτοξεύει πάντα τον ίδιο αριθμό πυραύλων που βρίσκονται πιο κοντά στον βαλλιστικό στόχο στην αρχή της προσομοίωσης. Οι συνθήκες εκτόξευσης των πυραύλων είναι πάντα καθορισμένες σε 0 κατεύθυνση και 90 μοίρες γωνίας βήματος. Οι πύραυλοι χρησιμοποιούν συνεργατικό φιλτράρισμα για αναχαίτιση.
- Βελτιστοποιημένη μη συνεργάσιμη υποκλοπή. Σε αυτόν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης μεθοδολογίας χρησιμοποιείται CMA-MV για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών εκτόξευσης και την κατανομή των πυραύλων. Ωστόσο, οι πύραυλοι δεν εκτελούν συνεργατικούς αλγορίθμους φιλτραρίσματος επί του σκάφους.
- Βελτιστοποιημένη συνεργατική υποκλοπή. Αυτή είναι η προσέγγιση που αναπτύχθηκε σε αυτό το έγγραφο. Ο αλγόριθμος CMA-MV (Αλγόριθμος 3) χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών εκτόξευσης και της κατανομής πυραύλων και οι πύραυλοι εκτελούν συνεργατικούς αλγορίθμους φιλτραρίσματος.

Ο πίνακας 1 απεικονίζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης του Μόντε Κάρλο. Βλέπουμε ότι η απόδοση της ευρετικής μεθόδου βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πυραύλων που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο. Αυτό αναμένεται, καθώς ο αυξημένος αριθμός πυραύλων μεταφράζεται σε βελτιωμένη απόδοση εκτίμησης. Ωστόσο, ακόμη και η χρήση 3 πυραύλων για όλες τις συνθήκες δεν μειώνει σημαντικά τη μέση απόσταση αστοχιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ευρετική μέθοδος δεν βελτιστοποιεί τις συνθήκες εκτόξευσης. Ως εκ τούτου, οι αυτόματοι πιλότοι πυραύλων δεν έχουν αρκετό χρόνο για να επαναφέρουν τους πυραύλους στις επιθυμητές τροχιές στην τελική φάση. Από την άλλη, η βελτιστοποιημένη μη συνεργάσιμη μέθοδος παράγει σημαντικά χαμηλότερες αποστάσεις αστοχιών από τις ευρετικές μεθόδους που χρησιμοποιούν 1 ή 2 πυραύλους, ενώ εκτοξεύουν μόνο 1,05 πυραύλους κατά μέσο όρο. Αυτό συμβαίνει επειδή η

βελτιστοποιημένη μη συνεργάσιμη μέθοδος βελτιστοποιεί τις συνθήκες εκτόξευσης για τους πυραύλους, γεγονός που οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση αναχαίτισης. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος υπερτερεί της ευρετικής μεθόδου που χρησιμοποιεί 3 πυραύλους, επειδή η βελτιστοποιημένη μη συνεργάσιμη μέθοδος δεν χρησιμοποιεί συνεργατικά φίλτρα. Ως εκ τούτου, ο αλγόριθμος δεν μπορεί να επωφεληθεί από τη βελτιωμένη απόδοση εκτίμησης που αποκτήθηκε με την εκτόξευση πολλαπλών πυραύλων έναντι βαλλιστικών στόχων υψηλής κινητικής ενέργειας.

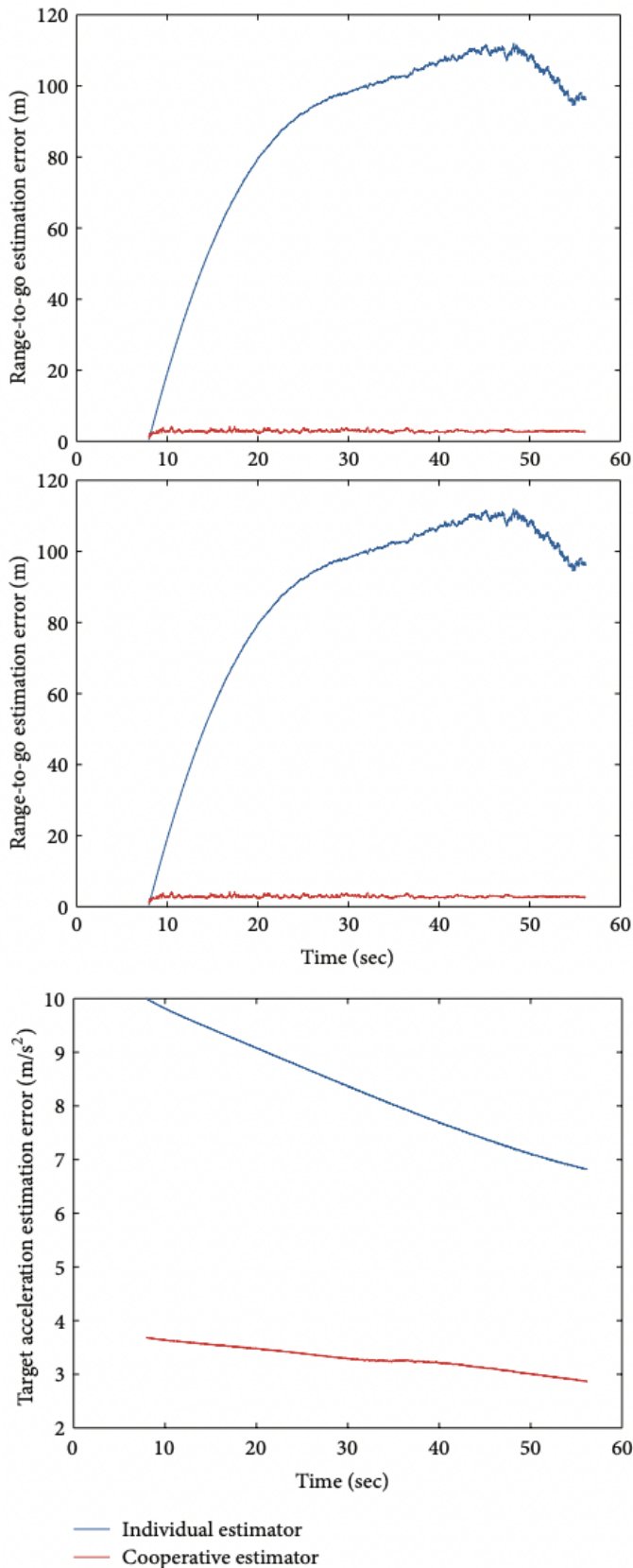
Τέλος, σύμφωνα και με τους Yuksek B. και Ure K.N. (2016) παρατηρούμε ότι η προσέγγιση που αναπτύχθηκε, η βελτιστοποιημένη συνεργατική μέθοδος, υπερτερεί των συγκρίσεων όσον αφορά τόσο την αποδοτικότητα διαχείρισης των πόρων όσο και την απόσταση αστοχίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με τις συγκριθείς προσεγγίσεις, η αναπτυγμένη μέθοδος βελτιστοποιεί ταυτόχρονα τις συνθήκες εκτόξευσης και την κατανομή πυραύλων και, έτσι, είναι σε θέση να αξιολογήσει τη σωστή αντιστάθμιση μεταξύ του αριθμού των πυραύλων που εκτοξεύονται και της εφικτής απόστασης αστοχίας.



**Σχήμα 9:** Αναχαίτιση βαλλιστικού στόχου χαμηλού υψομέτρου-υψηλής ταχύτητας. Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την τροχιά του βαλλιστικού στόχου. Ο αλγόριθμος εκτοξεύει 3 βλήματα για να αναχαιτίσει τον στόχο [51].

	Average number of missiles launched	Average miss distance (m)
Heuristic method 1 missile	1	$5020.78 \pm 600.21$
Heuristic method 2 missiles collaborative	2	$490.22 \pm 41.08$
Heuristic method 3 missiles collaborative	3	$60.55 \pm 11.2$
Optimized noncollaborative	$1.05 \pm 0.23$	$320.55 \pm 50.77$
Optimized collaborative	$1.56 \pm 0.34$	$1.43 \pm 0.22$

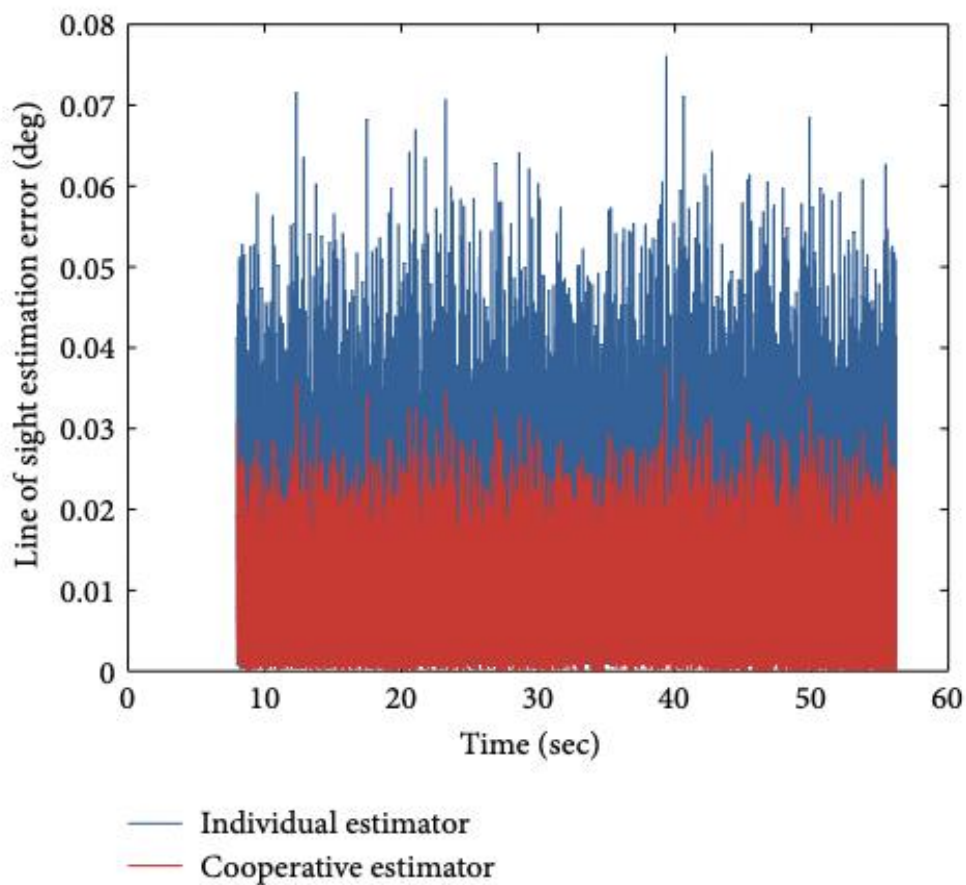
**Πίνακας 1:** Μέσος αριθμός πυραύλων και μέση απόσταση αστοχίας που λήφθηκαν με διαφορετικές μεθόδους, με μέσο όρο πάνω από 100 τυχαίες αρχικές συνθήκες του βαλλιστικού στόχου [51].



(α) Μέσος κανόνας του σφάλματος εκτίμησης εμβέλειας σε σχέση με το χρόνο στην τελική φάση για μεμονωμένους και συνεργαζόμενους εκτιμητές

(β) Μέσος κανόνας του σφάλματος εκτίμησης οπτικής επαφής έναντι του χρόνου στην τελική φάση για μεμονωμένους και συνεργατικούς εκτιμητές

(γ) Μέσος κανόνας του σφάλματος εκτίμησης επιτάχυνσης στόχου έναντι του χρόνου στην τερματική φάση για μεμονωμένους και συνεργαζόμενους εκτιμητές



Σχήμα 10: Απόδοση φίλτρου σε σχέση με το χρόνο στην τερματική φάση για την αναχαίτιση στόχου χαμηλού υψομέτρου-υψηλής ταχύτητας [51].



## Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία έχει αναπτυχθεί ένας νέος αλγόριθμος πιθανολογικής αναζήτησης για τη βελτιστοποίηση της κατάστασης κατανομής και εκτόξευσης πολλαπλών πυραύλων που αναχαιτίζουν έναν βαλλιστικό στόχο. Μέσω μελετών προσομοίωσης, έχουμε επαληθεύσει ότι ο αλγόριθμος λαμβάνει σωστές αποφάσεις και αποδίδει πιο αποτελεσματική διαχείριση πόρων και χαμηλότερη απόσταση αστοχιών σε σύγκριση με εναλλακτικές προσεγγίσεις (Yukse B.and Ure K.N. 2016).

Προς το παρόν, οι περισσότερες από τις έρευνες για την εκχώρηση αισθητήρων/όπλων-στόχων είναι στατικές και ασθενούς περιορισμούς. Αυτό το έγγραφο προτείνει πρώτα ένα δυναμικό πρόβλημα αντιστοίχισης με αισθητήρα/ετερογενή όπλο, βελτιώνοντας τους κρίσιμους παράγοντες τυπικών σεναρίων κατά της διείσδυσης εδάφους-αέρος. Με στόχο τα χαρακτηριστικά του καθιερωμένου μοντέλου DS/HWTA, σχεδιάζεται και επαληθεύεται με προσομοίωση ένας αλγόριθμος επίλυσης βασισμένος στο εξελικτικό πλαίσιο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το μοντέλο DS/HWTA μπορεί πραγματικά να αντικατοπτρίζει τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της αποστολής των επιχειρήσεων αντιδιείσδυσης εδάφους-αέρος και το σχεδιασμένο EA-DS/HWTA μπορεί να αποκτήσει τη βέλτιστη λύση για το σχήμα αναχαίτισης σε πραγματικό χρόνο. Ο αλγόριθμος αρχικοποίησης αποδεδειγμένου πληθυσμού που βασίζεται στην κωδικοποίηση τύπου I διασφαλίζει τη σκοπιμότητα του αρχικού πληθυσμού, ο οποίος ευνοεί τη σύγκλιση των περιορισμών. Ο χειριστής MPBX με βάση την κωδικοποίηση τύπου II κάνει τις λύσεις απογόνων κοντά στην εφικτή περιοχή, γεγονός που βελτιώνει την ποιότητα του πληθυσμού. Η στρατηγική άπληστης φυσικής κατάστασης που βασίζεται στην κωδικοποίηση τύπου III βελτιώνει αποτελεσματικά την ατομική φυσική κατάσταση και ενισχύει την αποτελεσματικότητα αναζήτησης.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όταν υπάρχει η ζώνη κενού ισχύος πυρός, η παράδοση όπλων μεσαίου και κοντινού βεληνεκούς είναι ένας ουσιαστικός παράγοντας που επηρεάζει τους χρόνους αναχαίτισης και την ολοκλήρωση της αποστολής. Αυτό το άρθρο εισάγει τη στρατηγική καθυστερημένων αποφάσεων για τον έλεγχο της παράδοσης ισχύος πυρός. Η μικρότερη παράμετρος χρόνου καθυστέρησης δεν ευνοεί την αναζήτηση της συνολικής βέλτιστης λύσης και η μεγαλύτερη παράμετρος χρόνου καθυστέρησης παραβιάζει την απαίτηση αποστολής της «αναχαίτισης όσο το δυνατόν

συντομότερα». Ο τρόπος λήψης του χρόνου απόφασης στην παράδοση ισχύος πυρός είναι μια μελλοντική πρόκληση για μας.

Επίσης, έγινε ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στον τομέα του συστήματος WTA με έμφαση στις προσεγγίσεις μοντελοποίησης και επίλυσης. Με βάση τις προσεγγίσεις μοντελοποίησης η βιβλιογραφία έχει ταξινομηθεί σε δύο ομάδες. Η πρώτη κατηγορία προσεγγίσεων κατανέμει τις αμυντικές πηγές σε στόχους χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά της αντίπαλης πλευράς. Η δεύτερη κατηγορία προσεγγίσεων εξετάζει τις κινήσεις της αντίπαλης πλευράς καθώς και τις αμυντικές κινήσεις. Στο δεύτερο μέρος, ανασκοπούνται τα σημαντικά χαρακτηριστικά για τα μοντέλα WTA και η διαδικασία λύσης για την επίλυση του προβλήματος WTA. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι αλγόριθμοι επίλυσης, όπως και πολλά άλλα προβλήματα, μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: αριθμητικές τεχνικές (δηλαδή ακριβείς ή εξαντλητικές μέθοδοι), ευρετικές/προσεγγιστικές τεχνικές και μετα-ευρετικές.

## Βιβλιογραφία

- [1] B.-Z. Naveh and A. Lorber, "Theater ballistic missile defense," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, vol. 192, pp. 1-397, 2001.
- [2] D. Deason and K. Spriestersbach, "Asset pairing for battle management," Dept. Defense, Missile Defense Agency, Washington, DC, USA, Tech. Rep. MDA12-004, 2012.
- [3] K. L. Ezra, D. A. DeLaurentis, and L. Mockus, "Comparative solution methods for the integrated problem of sensors, weapons, and targets," in *Proc. AIAA Modeling Simulation Technol. Conf.*, Jun. 2014, p. 2082.
- [4] G. M. Siouris, *Missile Guidance and Control Systems*, Springer, New York, NY, USA, 2004.
- [5] V. Krishnamurthy and D. V. Djonin, "Structured threshold policies for dynamic sensor scheduling—A partially observed Markov decision process approach," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 10, pp. 4938–4957, Oct. 2007.
- [6] R. H. Chen and J. L. Speyery, "Terminal and boost phase intercept of ballistic missile defense," in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Honolulu, Hawaii, USA, August 2008.
- [7] Y. Zheng, N. Cao, T. Wimalajeewa, and P. K. Varshney, "Compressive sensing based probabilistic sensor management for target tracking in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 22, pp. 6049–6060, Nov. 2015.
- [8] T.-K. Wang and L.-C. Fu, "A guidance strategy for multi-player pursuit and evasion game in maneuvering target interception," in *Proceedings of the 9th Asian Control Conference (ASCC '13)*, June 2013.
- [9] D. Zhang, Z. Chen, M. K. Awad, N. Zhang, H. Zhou, and X. S. Shen, "Utility-optimal resource management and allocation algorithm for energy harvesting cognitive radio sensor networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 12, pp. 3552–3565, Dec. 2016.
- [10] I.-S. Jeon, J.-I. Lee, and M.-J. Tahk, "Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 33, no. 1, pp. 275-280, 2010.
- [11] Z.-J. Lee, S.-F. Su, and C.-Y. Lee, "Efficiently solving general weapon target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 33, no. 1, pp. 113–121, Feb. 2003.

- [12] E. Daughtery and Z. Qu, "Optimal design of cooperative guidance law for simultaneous strike," in *Proceedings of the 53rd IEEE Annual Conference on Decision and Control (CDC '14)*, pp. 988-993, Los Angeles, Calif, USA, December 2014.
- [13] Z. R. Bogdanowicz, "A new efficient algorithm for optimal assignment of smart weapons to targets," *Comput. Math. Appl.*, vol. 58, no. 10, pp. 1965–1969, Nov. 2009.
- [14] V. Shaferman and Y. Oshman, "Cooperative interception in a multi-missile engagement," in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Chicago, Ill, USA, August 2009.
- [15] Z. R. Bogdanowicz, A. Tolano, K. Patel, and N. P. Coleman, "Optimization of weapon–target pairings based on kill probabilities," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 43, no. 6, pp. 1835–1844, Dec. 2013.
- [16] V. Shaferman and T. Shima, "Cooperative multiple-model adaptive guidance for an aircraft defending missile," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 33, no. 6, pp. 1801-1813, 2010.
- [17] K. Volle and J. Rogers, "Weapon–target assignment algorithm for simultaneous and sequenced arrival," *J. Guid., Control, Dyn.*, vol. 41, no. 11, pp. 2361–2373, Nov. 2018.
- [18] Y. Liu, N. Qi, and J. Shan, "Cooperative interception with double-line-of-sight measuring," in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Boston, Mass, USA, August 2013.
- [19] Z. R. Bogdanowicz and N. P. Coleman, "Sensor-target and weapon-target pairings based on auction algorithm," in *Proc. 11th WSEAS Int. Conf. Appl. Math.* Stevens Point, WI, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society, 2007, pp. 92–96.
- [20] V. Shaferman and T. Shima, "Cooperative optimal guidance laws for imposing a relative intercept angle," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 38, no. 8, pp. 1395-1408, 2015.
- [21] L. Zi-Fen, L. Xiang-Min, D. Jin-Jin, C. Jin-Zhu, and Z. Feng-Xia, "Sensorweapon-target assignment based on improved SWT-opt algorithm," in *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. Comput., Control Ind. Eng.*, vol. 2, Aug. 2011, pp. 25–28.
- [22] L. Wang, H. Fenghua, and Y. Yu, "Guidance law design for two flight vehicles cooperative interception," in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Kissimmee, Fla, USA, January 2015.

- [23] Z. Bogdanowicz and N. Coleman, “Advanced algorithm for optimal sensor-target and weapon-target pairings in dynamic collaborative engagement,” Army Armament Res. Develop. Eng. Center, Picatinny Arsenal, NJ, USA, Tech. Rep. 0704-0188, 2008.
- [24] Z.-J. Lee, S.-F. Su, and C.-Y. Lee, “Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 33, no. 1, pp. 113-121, 2003.
- [25] H. Chen, Z. Liu, Y. Sun, and Y. Li, “Particle swarm optimization based on genetic operators for sensor-weapon-target assignment,” in *Proc. 5th Int. Symp. Comput. Intell. Design*, vol. 2, Oct. 2012, pp. 170–173.
- [26] P. Teng, H. Lv, J. Huang, and L. Sun, “Improved particle swarm optimization algorithm and its application in coordinated air combat missile-target assignment,” in *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA '08)*, pp. 2833-2837, IEEE, Chongqing, China, June 2008.
- [27] W. Jian and C. Chen, “Sensor-weapon joint management based on improved genetic algorithm,” in *Proc. 34th Chin. Control Conf. (CCC)*, Jul. 2015, pp. 2738–2742.
- [28] J. Wang, X.-G. Gao, Y.-W. Zhu, and H. Wang, “A solving algorithm for target assignment optimization model based on ACO,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Natural Computation (ICNC '10)*, vol. 7, pp. 3753–3757, IEEE, Yantai, China, August 2010.
- [29] B. Xin, Y. Wang, and J. Chen, “An efficient marginal-return-based constructive heuristic to solve the sensor-weapon-target assignment problem,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst.*, vol. 49, no. 12, pp. 2536–2547, Dec. 2019.
- [30] J. Wang and Y.-W. Zhu, “A solving algorithm for target assignment optimization model based on SA,” in *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI '10)*, pp. 489-493, Sanya, China, October 2010.
- [31] X. Li, D. Zhou, Z. Yang, Q. Pan, and J. Huang, “A novel genetic algorithm for the synthetical sensor-weapon-target assignment problem,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, p. 3803, Sep. 2019.
- [32] M. Wei, G. Chen, K. Pham, E. Blasch, and Y. Wu, “Game theoretic target assignment approach in ballistic missile defense,” in *Proceedings of the SPIE Defense and Security Symposium*, International Society for Optics and Photonics, 2008.

- [33] L. Mu, X. Qu, and P. Wang, "Application of sensor/weapon-target assignment based on multi-scale quantum harmonic oscillator algorithm," in *Proc. 2nd Int. Conf. Image, Vis. Comput. (ICIVC)*, Jun. 2017, pp. 1147–1151.
- [34] B. Xin, J. Chen, Z. Peng, L. Dou, and J. Zhang, "An efficient rule- based constructive heuristic to solve dynamic weapon-target assignment problem," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans*, vol. 41, no. 3, pp. 598-606, 2011.
- [35] A. Kline, D. Ahner, and R. Hill, "The weapon-target assignment problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 105, pp. 226–236, May 2019.
- [36] N. Hansen and A. Ostermeier, "Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: the covariance matrix adaptation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '96)*, pp. 312-317, May 1996.
- [37] K. Zhang, D. Zhou, Z. Yang, Q. Pan, and W. Kong, "Constrained multiobjective weapon target assignment for area targets by efficient evolutionary algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 176339–176360, 2019.
- [38] Z. B. Tatas, *Modeling and autopilot design for a SCUD Type ballistic missile [M.S. thesis]*, Department of Electrical Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey, 2006.
- [39] L. Li, F. Liu, G. Long, P. Guo, and X. Bie, "Modified particle swarm optimization for BMDS interceptor resource planning," *Int. J. Speech Technol.*, vol. 44, no. 3, pp. 471–488, Apr. 2016.
- [40] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, vol. 199 of *Progress in Aeronautics and Astronautics*, AIAA, 4th edition, 2002.
- [41] D. S. Summers, M. J. Robbins, and B. J. Lunday, "An approximate dynamic programming approach for comparing firing policies in a networked air defense environment," *Comput. Oper. Res.*, vol. 117, May 2020, Art. no. 104890.
- [42] I. Moran and D. T. Altılar, "Three plane approach for 3D true proportional navigation," in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, San Francisco, Calif, USA, August 2005.
- [43] J. Kim, W.-C. Lee, D.-H. Cho, J. Song, and H.-L. Choi, "Decentralized weapon target assignment against high-speed enemy missiles," in *Proc. AIAA Scitech Forum*, Jan. 2020, p. 0657.

- [44] E. K. P. Chong and H. Stanislaw, *An Introduction to Optimization*, vol. 76, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2013.
- [45] M. F. Hocaoglu, "Weapon target assignment optimization for land based multi-air defense systems: A goal programming approach," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 128, pp. 681–689, Feb. 2019.
- [46] N. Hansen, A. Auger, R. Ros, S. Finck, and P. Posik, "Comparing results of 31 algorithms from the black-box optimization benchmarking BBOB-2009," in *Proceedings of the 12th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO '10)*, ACM, July 2010.
- [47] K. Yue, S. Chen, and C. Shu, "Calculation of aircraft target's singlepulse detection probability," *J. Aerosp. Technol. Manage.*, vol. 7, no. 3, pp. 314–322, Sep. 2015.
- [48] N. Hansen, S. D. Müller, and P. Koumoutsakos, "Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES)," *Evolutionary Computation*, vol. 11, no. 1, pp. 1-18, 2003.
- [49] J. Ochodnický, Z. Matousek, M. Babjak, and J. Kurty, "Drone detection by Ku-band battlefield radar," in *Proc. Int. Conf. Mil. Technol. (ICMT)*, May 2017, pp. 613–616.
- [50] J. H. Macke, P. Berens, A. S. Ecker, A. S. Tolias, and M. Bethge, "Generating spike trains with specified correlation coefficients," *Neural Computation*, vol. 21, no. 2, pp. 397-423, 2009.
- [51] Yuksek B. and Ure K.N. (2016), Optimization of Allocation and Launch Conditions of Multiple Missiles for Three-Dimensional Collaborative Interception of Ballistic Targets, *International Journal of Aerospace Engineering*.