מסמך תכנון מערכת: עקיבה והיתוך מידע מרובה סנסורים (Tracking & Sensor Fusion)

1. ארכיטקטורת המערכת ורכיבי ליבה

מודרני. היא מממשת C++-קפדנית ב (OOP) המערכת מתוכננת על בסיס פרדיגמת תכנות מונחה עצמים כדי להתמודד עם הטבע הא-סינכרוני **ארכיטקטורה מונחית-אירועים (Event-Driven Architecture)** במקום לעבד נתונים בלולאות זמן קבועות, המערכת. (מצלמת EO 10-ב-Hz, מכ"ם ב-1Hz) של הסנסורים כרונולוגי אחיד של כל המדידות הנכנסות, ומעבדת אותן ברצף. (Priority Queue) מתחזקת תור עדיפויות פעולות האלגברה הליניארית ממומשות בצורה יעילה באמצעות ספריית **Eigen3**.

הארכיטקטורה מחולקת למודולים הבאים, המופרדים באופן ברור (Decoupled):

- **`Measurement` (שכבת הנתונים):** מחלקת בסיס פולימורפית המחזיקה את חותמת הזמן (`timestamp`) וסוג הסנסור. המחלקות היורשות ממנה כוללות את `RadarMeasurement` (מחזיקה טווח, אזימוט, הגבהה, מהירות רדיאלית) ו- `EOMeasurement` (מחזיקה אזימוט והגבהה). המרכזי לעבד מידע מסנסורים שונים בצורה חלקה Tracker-אבסטרקציה זו מאפשרת ל.
- **`EKF` (המנוע המתמטי):** עוטף את הפעולות המתמטיות הטהורות של מסנן קלמן המורחב (Extended Kalman Filter). X הוא מחזיק את וקטור המצב ואת מטריצת השונות המשותפת P (Covariance). הוא מספק מתודות לחיזוי `predict(dt)` ופונקציות עדכון ייעודיות (`updateRadar` , `updateEO`), אשר מחשבות פנימית את מטריצות היעקוביאן (H) הנדרשות להתמרות הלא-ליניאריות ממערכת צירים קרטזית לספרית.
- **`Track` (שכבת הישויות):** מייצג מטרה בודדת בעולם האמיתי. כל אובייקט כזה מחזיק מופע פרטי של `EKF` . הוא מנהל את תכונות מחזור החיים של המטרה, כולל מזהה ייחודי (`track_id`), גיל ואת הסטטוס הנוכחי, (פספוסים רצופים של מדידות) `coast_cycles` המסלול, מונה צליפות (`TENTATIVE` , `CONFIRMED` , `COASTING`).
- **`DataAssociation` (מנוע הלוגיקה):** מודול (Stateless) האחראי על שיוך המדידות החדשות למסלולים קיימים. הוא משתמש ב**מרחק מהלנוביס (Mahalanobis Distance)** כדי לבנות מטריצת עלויות (Cost Matrix), ומיישם אסטרטגיית שכן קרוב גלובלי (GNN - Global Nearest Neighbor) לביצוע ההשמה.
- **`TrackerManager` (המוח):** האורקסטרטור המרכזי. הוא צורך את תור המדידות הכרונולוגי ומבצע את לולאת העקיבה הראשית: Predict -> Associate -> Update -> Track Management (אתחול/מחיקה).

2. הנחות ופישוטים

הונחו ההנחות הפיזיקליות והסטטיסטיות הבאות (Baseline), כדי לשמור על מערכת בסיס יציבה:

- במערכת צירים **(Constant Velocity - CV) מודל קינמטי:** המערכת מניחה מודל **מהירות קבועה** (Q) קרטזית תלת-מימדית. תאוצות או תמרונים מכוונים מטופלים כרעש תהליך.
- **רעש מדידה:** קיימת הנחה ששגיאות הסנסורים מתפלגות נורמלית סביב תוחלת אפס (Zero-mean Gaussian), ומיוצגות במדויק על ידי מטריצת הקוואריאנס של המדידה ®.
- **פיזור התראות שווא (Clutter):** מניחים שהתראות שווא מפוזרות בצורה אחידה במרחב הגיאומטרי, ועוקבות אחר התפלגות פואסון בציר הזמן.
- **עולם שטוח:** במסגרת התרחיש הנוכחי של עקיבה תלת-מימדית גנרית, עקמומיות כדור הארץ ואפקט קוריוליס נחשבים זניחים ואינם מחושבים.

3. החלטות תכנוניות ופשרות (Trade-offs)

- **וקטור מצב קרטזי לעומת מצב ספרי:**
  - *החלטה:* X = [x, y, z, vx, vy, vz]. וקטור המצב מיוצג בקואורדינטות קרטזיות
  - *התפשרות:* למרות שהמדידות מגיעות בקואורדינטות ספריות (מה שהופך וקטור מצב ספרי לאטרקטיבי לעדכונים פשוטים), מטרות בעולם האמיתי נעות בצורה ליניארית במרחב הקרטזי. מצב קרטזי מאפשר שלב חיזוי (Predict) ליניארי לחלוטין וזול חישובית (מטריצה F), המחייב יעקוביאנים לא-ליניאריים בשלב העדכון (H). EKF-במחיר של שימוש ב
- **היתוך טורי (Sequential) לעומת היתוך מרוכז (Batch):**
  - *החלטה:* המדידות מותכות באופן טורי מיד עם הגעתן. אם מדידת מכ"ם ו-EO חולקות את אותה חותמת זמן בדיוק, הפילטר יבצע חיזוי (dt=0 עם), ומיד לאחר מכן, יתעדכן מול המכ"ם, ה-EO יעדכן את הסטייט החדש מול.
  - *התפשרות:* היתוך טורי שקול מתמטית להיתוך מרוכז (בהנחה שרעשי הסנסורים בלתי תלויים), אך הוא פשוט משמעותית למימוש, אינו דורש חוצצי סנכרון זמן מורכבים, ופותר בטבעיות את סוגיית קצבי הדגימה השונים (1Hz מול 10Hz).
- **Multiple Hypothesis Tracking (MHT) לעומת GNN:**
  - *החלטה:* שיוך הנתונים (Data Association) מנוהל על ידי GNN עם סינון Mahalanobis (Gating).
  - *התפשרות:* GNN הוא אלגוריתם סופר-יעיל חישובית ומספק לחלוטין בסביבות דלילות עד בינוניות מבחינת רעש. מימוש של JPDA או MHT היה מספק רציפות מסלול טובה יותר בתרחישי הצטלבות קיצוניים, אך מכניס תקורה חישובית כבדה (גידול אקספוננציאלי בזיכרון) ומורכבות שחורגת מתכולת מערכת עקיבה בזמן אמת בסיסית.
- **מדיניות אתחול מסלולים (Track Initiation):**
  - *החלטה:* EO מסלולים חדשים מאותחלים **אך ורק** על ידי מדידות מכ"ם לא-משויכות. מדידות שאינן משויכות נזרקות.
  - *התפשרות:* סנסור EO הוא פסיבי (זוויות בלבד) וחסר יכולת תצפית על הטווח (Depth observability). ניסיון לאתחל מסלול קרטזי תלת-מימדי מקרן דו-מימדית בודדת מכניס חוסר ודאות אינסופי בציר העומק. המתנה לזיהוי מכ"ם מבטיחה שהמסלול יאותר עם מיקום 3D תחום וניתן לצפייה במלואו.

4. מגבלות ידועות ותרחישי כשל

ההחלטות הארכיטקטוניות מקבלות על עצמן במודע את המגבלות הבאות:

- **High-G: תמרוני** מטרה שמבצעת פניית בזק (CV), מסתמך על מודל מהירות קבועה EKF-מכיוון שה של מהלנוביס בטרם מטריצת השונות Gating-(כמו מטוס קרב) עלולה לצאת מחוץ לסף ה (Track) הספיקה להתנפח. הדבר יוביל לאובדן או שבירה של המסלול (P) המשותפת Fragmentation). *פתרון אפשרי לשדרוג:* מימוש פילטר IMM (Interacting Multiple Model) למעבר דינמי בין מודל CV למודל CTRV.
- **קרבה מתמשכת (Ghosting / ID Switch):** אם שתי מטרות טסות במקביל באותה מהירות בדיוק, עשוי לבצע החלפת GNN-ובתוך אותו "תא רזולוציה" של המכ"ם למשך זמן ממושך, אלגוריתם ה זהויות (ID Switching) או למזג בטעות את שני המסלולים.
- **בלבד EO הסתמכות ממושכת על (Coasting):** במידה והמכ"ם נחסם או נופל לחלוטין, המער