



טכנולוגיית מכ"ם: מגמות מפתח בעיצוב 2025

« ד"ר עדי וגרהוף, מנהלת קלינית במעבדת SAMPL

זו תהיה בעלת ערך במיוחד במגזרים הדורשים שיפורים מתמשכים, כגון הגנה וכלי רכב אוטונומיים. לדוגמה, נאס"א הטמיעה SDR במשימות התצפית על כדור הארץ המבוססות על מכ"ם², המאפשרת התאמות בזמן אמת לתנאים משתנים.

מערכות רדאר רב תפקודיות ומקושרות Multi-Function and Networked Radar Systems

מסתמן שינוי לעבר מערכות מכ"ם רב-פונקציונליות, שבהן פלטפורמת מכ"ם אחת יכולה לבצע מספר תפקידים, כגון מעקב, ניטור מזג אוויר וסיוע בניווט. בנוסף, מערכות מכ"ם ברשת, המשתפות נתונים על פני מספר יחידות, הופכות נפוצות יותר. זה מאפשר שיפור במודעות למצב, שכן מכ"מים מחוברים יוצרים תמונה מקיפה יותר של סביבה נתונה. דוגמה מצוינת היא יכולת ההתקשרות השיתופית של הצי האמריקאי (CEC)⁴, המאפשרת לספינות וכלי טיס מצוידים במכ"ם לשתף נתוני מעקב בזמן אמת לתיאום טוב יותר בהגנה מפני טילים.

אלגוריתמים מונעי בינה מלאכותית משפרים את זיהוי מטרות, דיוק מעקב וזיהוי חריגות. בשנת 2025, נראה יותר יישומי מכ"ם המופעלים על ידי בינה מלאכותית, הפחתת אזעקות שווא והגברת היעילות במערכות צבאיות ואזרחיות כאחד. לדוגמה, מערכת נהיגה עצמית מלאה (FSD)¹ של טסלה מסתמכת יותר ויותר על מכ"ם משופר בינה מלאכותית כדי לשפר את בטיחות הרכב, בעוד שיישומי הגנה כמו מכ"ם AN/TPQ-53² של צבא ארה"ב נהנים מזיהוי איומים מונע בינה מלאכותית.

עליית הרדאר המוגדר בתוכנה (SDR) The Rise of Software-Defined Radar

מכ"ם מוגדר תוכנה תופס תאוצה ככל שארגונים מחפשים פתרונות מותאמים וחסכוניים יותר. בניגוד למערכות מכ"ם מסורתיות מבוססות חומרה, SDR מאפשר גמישות רבה יותר באמצעות עדכוני תוכנה, המאפשרים שיפורים בביצועים ללא צורך בחומרה חדשה. טכנולוגיה

טכנולוגיית המכ"ם מתפתחת במהירות, ומשפיעה על מגוון רחב של תעשיות כולל ביטחון, רכב, תעופה ומטאורולוגיה. השנה הקרובה מבטיחה התקדמות ואתגרים משמעותיים כאשר התעשייה מסתגלת לדרישות חדשות, דרישות רגולטוריות ופריצות דרך טכנולוגיות. במעבדתה של פרופ' יונינה אלדר, SAMPL LAB, מהפקולטה למתמטיקה ומדעי המחשב, מכון וייצמן, טכנולוגיות אלו נחקרות ומפותחות. המעבדה מתמקדת בדחיפת גבולות ביצועי המכ"ם באמצעות חידושים בעיבוד אותות, תקשורת, עיצוב חומרה ושילוב של בינה מלאכותית - הן ליסודות תיאורטיים והן ליישומים בעולם האמיתי. להלן המגמות המרכזיות הצפויות להגדיר את טכנולוגיית המכ"ם ב-2025.

שילוב מוגבר של AI במערכות מכ"ם Increased Integration of AI in Radar Systems

ינה מלאכותית (AI) מהווה תפקיד מכריע בשיפור יכולות המכ"ם.



תמונה: ניטור נשימה במעבדתה של פרופ' אלדר אל מול המכשיר הסטנדרטי קרדיט: רונן אהרוני

מכ"מים קוגניטיביים ולמידת מכונה Cognitive and Machine Learning-Enabled Radars

מערכות מכ"ם מודרניות משלבות יותר ויותר יכולות קוגניטיביות ואלגוריתמים של למידת מכונה. כוח החישוב המוגבר של רכיבי FPGA מודרניים מאפשר שילוב של טכניקות למידת מכונה במערכות מכ"ם. זה מאפשר מכ"מים קוגניטיביים שיכולים להתאים אוטומטית את פרמטרי הפעולה שלהם ולספק יכולות מתקדמות כמו זיהוי מטרות אוטומטי. לדוגמה, תוכנית ה-Adaptive Radar Countermeasures (ARC) של DARPA מפתחת מערכות מכ"ם המאפשרות למידת מכונה שיכולות לזהות ולסווג איומים בזמן אמת.

אנטנות קטנות וחכמות יותר Smaller, Smarter Antennas

אנטנות מתפתחות לצד טכנולוגיית המכ"ם, עם מגמה של מזעור ואינטליגנציה מוגברת. אנטנות קטנות יותר מפותחות כדי להתאים למכשירים קומפקטיים כמו ציוד לביש, חישה IoT, ואפילו בתוך מבנה הבגדים.

מכ"ם חשאיים, קוואנטים ומבוססי חלל Stealth, Quantum, and Space-Based Radar

טכנולוגיית המכ"ם מתפתחת כדי לזהות מטרות חמקניות עם רגישות משופרת, רוחבי פס רחב יותר ואלגוריתמים מתקדמים לעיבוד אותות. השילוב של מכ"ם קוונטי זוכה לתשומת לב בזכות הפוטנציאל שלו לחולל מהפכה בשיטות הגילוי. מכ"ם קוונטי מבטיח רגישות ורזולוציה משופרים, כמו גם אבטחה משופרת באמצעות טכניקות הצפנה קוונטית. המחקר בתחום זה נמשך, תוך התמקדות בהתגברות על אתגרים טכניים והגדלת מערכות מכ"ם קוונטיות.

בנוסף, מערכות מכ"ם מבוססות חלל צוברות תאוצה, מספקות כיסוי עולמי ויכולות ניטור מתמשכות למעקב, ניטור סביבתי וניהול אסונות. ההתקדמות בטכנולוגיית לווין, מזעור מכ"ם ויכולות שיגור מניעה את הפיתוח של מכ"ם מבוסס חלל עם רזולוציה משופרת, קצבי ביקור חוזר וכיסוי. סוכנות החלל האירופית (ESA) ונאס"א משקיעות שתיהן במכ"ם הנישא בחלל מהדור הבא לתצפית על כדור הארץ ולניטור אקלים.

מה עוד כדאי לדעת על מכ"ם?

מכ"מים ואנטנות הולכים יד ביד - ללא אנטנה, מכ"ם הוא חסר תועלת. עיצובים מסוימים של מכ"ם משתמשים במספר מערכי אנטנות ניחים במקום אנטנה מסתובבת אחת, אך הם עדיין דורשים אנטנות כדי לשדר ולקבל אותות. הביצועים של מערכת מכ"ם תלויים במידה רבה ביכולת של האנטנה שלה לזהות את הכיוון המדויק של עצם. אנטנות ארוכות יותר מייצרות אלומות צרות יותר שיכולות להבחין טוב יותר בין עצמים קרובים, ולשפר את הדיוק. אנטנות מכ"ם פועלות על ידי העברת גלים אלקטרומגנטיים פועמים אל הסביבה, בדרך כלל בתחום המיקרוגל. גלים אלה נעים החוצה, משקפים אובייקטים ויוצרים הדים. אותה אנטנה קולטת אז את ההדים הללו, ומאפשרת לרדאר לחשב את המרחק והכיוון של עצמים שזוהו. אנטנות מערך מדורג מתקדמות, כמו אלו המשמשות במכ"ם AN/SPY-6, על משחתות של חיל הים האמריקני, משפרות משמעותית את יכולות הזיהוי, ומאפשרות שיפור זיהוי האיומים וזמני התגובה.

ביקוש לרצועות רזולוציה ותדרים גבוהים יותר Demand for Higher Resolution and Frequency Bands

הדרשה להדמיית מכ"ם ברזולוציה גבוהה הולכת וגוברת, במיוחד ביישומים כמו נהיגה אוטונומית ונשק מונחה מדויק. התקדמות חדשה במכ"ם גלי מילימטר ובתדרי תדר טרה-הרץ מאפשרים רמות חסרות תקדים של פירוט. מגמה זו מניעה מחקר נוסף על חומרים וחומרה שיכולים לתמוך בפעולות בתדר גבוה יותר מבלי לוותר על אמינות. לדוגמה, הטכנולוגיה לנהיגה עצמית של Waymo⁶ משלבת מכ"ם ברזולוציה גבוהה לתפיסה משופרת בתנאי מזג אוויר מאתגרים, ויישומים צבאיים רואים את עלייתם של מכ"מים Active Electronically Scanned Array (AESA) ליכולות מעקב מעולות.

באופן דומה, מכ"ם ממלא תפקיד בחקלאות, שם הוא עוזר לנטר את תנאי היבול ולמטב את ההשקיה. פתרונות החקלאות החכמים של גיון דיר משלבים זיהוי לחות קרקע מבוסס מכ"ם כדי לשפר את החקלאות המדויקת.

כיצד מכ"ם מאפשר את עתיד שירותי הבריאות המרוחקים והאוטונומיים

המכ"ם פותח במקור עבור יישומים בטחוניים, תעופה וחלל ובטיחות רכב אך הדרישה לפתרונות חכמים בעולמות הבריאות, במיוחד כאשר מערכות הבריאות העולמיות מתמודדות עם עומסי חולים עולים, אוכלוסיות מזדקנות ומורכבות הולכת וגוברת של ניהול מחלות כרוניות הביאה את המכ"ם לכיוון תפקיד בלתי צפוי אך חיוני בניטור רפואי. פריצת דרך זו מציעה מעקב בריאות רציף בזמן אמת ללא צורך במגע פיזי, פתיחת אפשרויות חדשות לטיפול בחולים מרוחק, אוטומציה של בתי חולים ואפילו טיפול חכם בבית. במעבדתה של פרופ' יונינה אלדר, SAMPL LAB, הממוקמת בקולטה למתמטיקה ומדעי המחשב במכון ויצמן, עובדים על ניטור סימנים חיוניים ללא מגע מבוסס מכ"ם (NCVSM) המציע ניטור חלק בזמן אמת ללא כל מגע פיזי.

הטכנולוגיה שפותחה במעבדתה של פרופ' אלדר מציגה גישה פורצת דרך לניטור מטופלים: ניטור של סממנים חיוניים ללא מגע - Non-Contact Vital Signs Monitoring (NCVSM) המופעל על ידי מכ"ם גל מתמשך (FMCW). מערכת זו יכולה לזהות את התנועות האנושיות הקלות ביותר - כמו פעימות לב ודפוסי נשימה - אפילו דרך בגדים ומצעים. בנוסף, הוא יכול לנטר מספר אנשים בו-זמנית באותו חלל, יכולת שמכשירים לבישים מסורתיים וצגים ליד המיטה פשוט לא יכולים להציע.

על ידי רתימת הרגישות של הרדאר לתנועות מיקרו - כמו העלייה והצניחה העדינה של בית החזה או השינויים הקטנים של פעימות הלב - הטכנולוגיה הזו משנה את אופן מדידת הסימנים החיוניים. זה לא דורש חיישנים פיזיים, לא מגע עם העור,

חישה ותקשורת משולבת

חישה ותקשורת משולבת, הידועה גם כרדאר ותקשורת דו-פונקציונלית (DFRC- Dual-function Radar and Communication), מתגלה כמאפשר מרכזי במערכות המכ"ם- הדור הבא התומכות בתחבורה חכמה, ערים חכמות וייצור מתקדם. על ידי שילוב של פונקציות מכ"ם ותקשורת למסגרת מאוחדת, ISAC מאפשר שימוש משותף במשאבי ספקטרום, מפחית את טביעת הרגל של החומרה ומפחית את צריכת החשמל. במעבדתה של פרופ' אלדר, אנו חוקרים באופן פעיל את ISAC מנקודת המבט של המשדר והמקלט. בצד המשדר, אנו חוקרים כיצד להטמיע תקשורת דיגיטלית במערכות מכ"ם זריזות באמצעות אפנון אינדקס ותכנון מקדים מותאמים לשירות משותף של משתמשי מכ"ם ותקשורת. בצד המקלט, אנו מפתחים אלגוריתמים לעיבוד אותות המבוססים על למידה בייסיאנית דלילה כדי להעריך בו-זמנית מטרות מכ"ם ולפענח אותות תקשורת באמינות גבוהה. עבודתנו שואפת להתמודד עם אתגרי דו-קיום תוך דחיפה של גבולות הביצועים של ISAC.

יעילות אנרגטית וקיימות בפעילות מכ"ם Energy Efficiency and Sustainability in Radar Operations

דאגות סביבתיות עושות את דרכן לתעשיית המכ"ם. אמצעים רגולטוריים חדשים ומודעות ציבורית לצריכת אנרגיה דוחפים את היצרנים לתכנן מערכות מכ"ם יעילות יותר באנרגיה. טכנולוגיות כגון מוליכים למחצה גליום ניטריד (GaN) עוזרות להפחית את צריכת החשמל תוך שמירה על ביצועים גבוהים. בנוסף, מערכות מכ"ם מסוימות עוברות אופטימיזציה לפעול עם מקורות אנרגיה מתחדשים במידת האפשר. לדוגמה, יוזמת שדה התעופה בת-קיימא החדשה של גרמניה משלבת טכנולוגיית מכ"ם חסכונית באנרגיה לניטור תעבורה אווירית תוך מזעור טביעת הרגל הפחמנית שלה.

אנטנות מערך אדפטיביות, משפרות את יכולות המכ"ם על ידי התאמה דינמית של דפוסי קרינה כדי לייעל את הביצועים, להפחית הפרעות ולשפר את איכות האות. טכנולוגיות כגון עיצובים בהשראת מטא-חומר, משטחי עכבה תגובתית וחומרים דיאלקטריים גבוהים תורמים למזעור האנטנה. לדוגמה, חומרים בעלי קבוע דיאלקטרי גבוה מאפשרים אנטנות קטנות יותר תוך שמירה על ביצועים. אנטנות חכמות גם משפרות את היכולות של שירותי מיקום גיאוגרפי, אבטחה משופרת והפחתת הפרעות, מה שהופך אותן לחלק חיוני במערכות מכ"ם מודרניות.

אתגרי רגולציה ותאימות Regulatory and Compliance Challenges

ככל שטכנולוגיית המכ"ם מתקדמת, מסגרות הרגולציה חייבות לעמוד בקצב. ממשלות וארגונים בינלאומיים פועלים לקביעת סטנדרטים להקצאת תדרים, שיתוף ספקטרום ודאגות לפרטיות. עמידה בתקנות המתפתחות הללו תהיה מוקד מרכזי עבור חברות בשנת 2025, שכן הן מנווטות בנוף משפטי מורכב יותר ויותר. מינהל התעופה הפדרלי (FAA) והסוכנות לבטיחות תעופה של האיחוד האירופי (EASA) פועלים לפיתוח תקנים חדשים למערכות מכ"ם של מזל"טים, המבטיחים שילוב בטוח במרחב האווירי.

אמצעי אבטחה ומניעת חסימה משופרים Enhanced Security and Anti-Jamming Measures

ככל שטכנולוגיית הרדאר משתכללת, כך גם האיומים נגדה הולכים וגדלים. טכניקות לוחמה אלקטרונית ושיבוש אותות מתקדמות, ומחייבות מערכות מכ"ם לשלב פרוטוקולי אבטחה חזקים יותר. בשנת 2025, אנו מצפים להשקעה מוגברת בטכנולוגיות נגד שיבוש, כגון דילוג תדר ומערכות מכ"ם קוגניטיביות שיכולות להסתגל להפרעות בזמן אמת. מפציץ חמקני B-21 Raider של חיל האוויר האמריקני, למשל, צפוי להפעיל מערכות מכ"ם מתקדמות נגד שיבוש כדי להתמודד עם איומי לוחמה אלקטרונית המתפתחים.



תמונה: סימולציה של ניטור למספר מטופלים בו זמנית במעבדתה של פרופ' אלדר קרדיט: רונן אהרוני



פרופ' יונינה אלדר, SAMPL LAB, מהפקולטה למתמטיקה ומדעי המחשב, מכון ויצמן קרדיט: רונן אהרוני

התפתחויות בבינה מלאכותית, שימוש בפסי תדרים גבוהים יותר, דגש גובר על אבטחה ואימוץ הדרגתי של מערכות מכ"ם מוגדרות תוכנה. בעוד שהטרנדים הללו מתחילים לעצב את כיוון התעשייה, השפעתן המלאה עדיין מתגלה. חברות וחוקרים כאחד בודקים כיצד להסתגל ליכולות טכנולוגיות משתנות ולנופים רגולטוריים חדשים. בשנים הקרובות אנו נראה מערכות מכ"ם הממלאות תפקידים מגוונים יותר ויותר בתעשייה ובחזית הנוף המתפתח הזה, המעבדה שלנו חוקרת באופן פעיל גישות חדשות לחישה ללא מגע ולעיבוד מכ"ם בשיתוף עם תקשורת חכמה, התורמות לדור הבא של טכנולוגיות מכ"ם.



ולא גורם לאי נוחות למטופל, מאפשר ניטור מדויק. מערכות קונבנציונליות מסתמכות על חיישני מגע ישיר כגון רצועות חזה, מדבקות א.ק.ג או מדי דופק, כל אלו מהווים אתגרים: גירוי בעור, אי נוחות, כיול תכוף וניידות מטופלים מוגבלת. נושאים אלו קריטיים במיוחד ביחידות לטיפול נמרץ (ICU), במחלקות ילודים או בהחלמה לאחר ניתוח, שבה יש צורך במעקב נוח ללא הפרעה. NCVSM מבוסס מכ"ם מתגבר על מגבלות אלו. הוא מאפשר ניטור רציף וללא מגע של מטופלים מרובים - אפילו דרך סדינים או על פני חדרים - מה שהופך אותו לאידיאלי עבור מחלקות חירום, מתקני טיפול קשישים ושירותי בריאות ביתיים.

הכוח האמיתי של המכ"ם מופיע בשילוב עם ניתוח נתונים מונע בינה מלאכותית. בניגוד לניטור קונבנציונלי, שפשוט מתעד סימנים חיוניים, מערכות מבוססות מכ"ם לומדות דפוסים, מזהות חריגות ומנבאות הידרדרות בריאותית לפני שהתסמינים הופכים קריטיים. לדוגמה: אי סדירות נשימה של מטופל עשויה להצביע על סימנים מוקדמים של מצוקה נשימתית, שינויים עדינים בקצב הלב עלולים לאותת על אירוע לבבי מתקרב והפרעות שינה בחולים קשישים עלולות לרמוז על הופעת הפרעות נוירולוגיות. הפוטנציאל של ניטור בריאות מבוסס מכ"ם חורג הרבה מעבר לבתי חולים, לדוג', בתים חכמים ודיור מוגן - ניתן לעקוב אחר קשישים, להפחית את סיכוני הנפילה ולהבטיח גילוי מוקדם של חששות בריאותיים.

לסיכום

שנת תציון תקופה טרנספורמטיבית עבור טכנולוגיית המכ"ם, בהשפעת

¹ https://www.google.com/search?q=%D7%90%D7%A7%D7%93%D7%9A%D7%A9+FSD&rlz=1C1GCEA_enIL1110IL1110&oq=%D7%90%D7%A7%D7%93%D7%9A%D7%A9+FS&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIJCAEQABgNGIAEMg8IAhAAGA0YgWYsQMYGAQyCQgDEAAyDRiABDIJCAQQABgNGIAEMgkIBRAAGA0YgAQyCQgGEAAyDRiABDIJCAcQABgNGIAEMgkICBAAGA0YgAQyCQgJEAAYDRiABNIBCDQwODdqMGo0qAIAsAIA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#fpstate=ive&vld=cid:128a77a5,vid:blkAdj6cA5c,st:0

² <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/tpq-53.html>

³ <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150004418/downloads/20150004418.pdf>

⁴ <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2166802/cec-cooperative-engagement-capability/>

⁵ <https://waymo.com/>

⁶ <https://www.prnewswire.com/news-releases/kapta-space-launches-out-of-stealth-mode-to-develop-the-next-generation-of-advanced-spaceborne-radar-systems-302382016.html>

⁷ <https://www.darpa.mil/research/programs/adaptive-radar-countermeasures>