

כיצד הארכנו את "האוזניים של המדינה" הרחק מעבר לגבולותינו

אלי שבילי

כתבה 28 בסדרת כתבות על תולדות רפאל בעריכת ד"ר ראובן אשל

בגובה של כ-7,000 מטר מעל פני הים? במטוסים הותקנו אנטנות ספירליות, שהוצמדו לחלונות במטוסים, בהתאם לכיוון הטיסה (הקליטה בוצעה בניצב לכיוון הטיסה). בעזרת מקלטים רגישים האזינו למקורות שונים. מטוסים כאלה ניתן היה להשיג טווחי האזנה אפקטיביים של כ-360 ק"מ למקורות שעל פני הקרקע בגובה פני הים ולטווחים גדולים יותר בהתאם לגובה מעל פני הים. מספר החיילים/טכנאים שהפעילו את הציוד במטוסים הוגבל בשל מגבלות המקום לציוד ולחיילים (עד ל-12 חיילים עסקו בהאזנה למקורות מתוך מאות מקורות שפעלו בזירה). עלות תפעולם הגבוהה של המטוסים באוויר (24 שעות ביממה 365 ימים בשנה) הגבילה את הפעלתם באופן רצוף. נוסף לכך, מטוס הטס במקביל לגבול המצרי יצא, מדי פעם, מתוך אונות השידור של מקורות האויב - דבר שפגע ברציפות הקליטה. חיסרון נוסף - המטוס נחשף למכ"ם האויב ולאפשרויות היירוט ועלול היה לסכן את המטוס על חיי החיילים הטסים בו.

נשק "רדיולוגי" בלתי קונבנציונלי. כתוצאה מכך נכנסה קהילת המודיעין הישראלית לתהליך מואץ של טיפול בבעיות, שנראו לדרג המדיני בישראל כמטרידות ביותר.

ב-1963 מונה אל"מ אלי זעירא לראש מערך האיסוף באמ"ן. במהלך 1964 הצטברו פערי מידע בזירת מצרים, שנתפסו בישראל כמאיימים על קיומה של המדינה. זוהה קושי גדול בהשגת מודיעין "בזמן אמת" על פעילות הצבא המצרי ותנועותיו - מידע שניתן היה להשגה בעזרת האזנה לערוצי הקשר של הצבא המצרי בסיני ומעבר לתעלה.

חיפוש פתרון לבעיית ההאזנה מרחוק

כדי לקלוט את תשדורות האויב ברמה הטקטית היה צורך ב"קו-ראייה רדיו אפקטיבי" לעומק שטח האויב. הפתרון שנבחר על-ידי אמ"ן התבסס על מטוסי-תובלה קלים של חיל האוויר,

האיום המצרי

ב-5 ביולי 1961 שוגרה לחלל רקטת מחקר ישראלית - "שביט 2" - מונעת בדלק מוצק. פעולה זו ננקטה על ידי ישראל במטרה להקדים שיגור של רקטות מחקר, שנרכשו בקנדה, מאדמת מצרים ביום "המהפכה" במצרים. כתוצאה משיגור "שביט 2" ביטלו המצרים את השיגור המיועד שלהם שנקבע ל-23 ביולי 1961 (יום המהפכה). ביולי 1962 פורסמה ידיעה על ניסוי טילי קרקע-קרקע במצרים, ששמותיהם "אל-קאהר" ו"אל-זעפר" והטווחים שלהם מגיעים עד "דרומה מביירות". ב-23 ביולי 1962, במסגרת המצעד הצבאי שנערך בקהיר, הוסעו טילים על גוררות. מצרים פרסמה כי טילים אלה הם מתוצרתה.

בספטמבר 1962 החלו להתפרסם ידיעות כי טילים מצריים מפותחים בעזרת מדענים גרמניים. יתרה מכך, מדען גרמני, שהגיע למשלחת השילומים הישראלית בגרמניה, סיפר כי מדענים גרמניים מפתחים במצרים

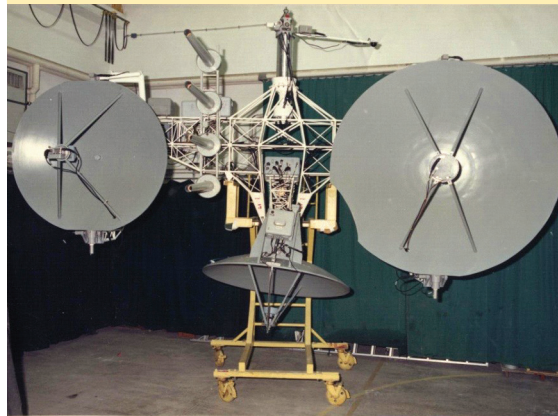
איור 2: בלון "יערית", בקוטר 20 מ' ואורך 60 מ', מעוגן לבסיס ההפרחה



מה למגדל פיזה בישראל?

לאחר גיבוש התפיסה החלה עבודה במקביל: רפאל - מימשה מכלולים טכניים, בראשות אברהם סעד, ואמ"ן - למדו את נושא הבלונאות, בראשות סא"ל יעקב שני. לאחר ניסוי מתואם שערכו השניים בציוד אשר הותקן על בלון שנרכש (בנפח של כ-80,000 רגל מעוקבים), התברר כי ניתן לקלוט אותות ממקורות קרינה שנמצאו בעומק השטח המצרי. לאחר הניסוי הושלמה והופעלה בשנת 1968 מערכת "פיזה" (כך כונתה המערכת על ידי ד"ר יעקב זיו בשל נטיית כבל העגינה לקרקע שהזכירה את מגדל פיזה באיטליה). לאחר הצלחת הניסוי בהאזנה לשני מקורות, החלה העבודה על מכלולי "פיזה-ב", בה הוכפל מספר המקלטים לארבעה - האזנה לארבע משימות בו-זמנית. בעוד שברפאל עסקו בפיתוח המכלולים האלקטרוניים, התמודדו באמ"ן עם הנושאים הבאים: (א) הכרת נושא הבלונאות, כולל אפיון הבלון, מבנהו והתנהגותו האווירודינמית במשטר רוחות משתנה בקרבת הקרקע. (ב) כתיבת מפרט טכני ואיתור יצרן מתאים. (ג) שיטות לרתימת הבלון לקרקע, בקרבת הקרקע לצורך תחזוקה. (ד) הקמת בסיס לתפעול הבלון, מערכות הפעלתו ויחידת ההאזנה על הקרקע.

בפני המתכננים ברפאל עמדו מספר אתגרים: (א) פיתוח שיטה לפיקוד מרחוק על תדרי הקליטה. (ב) שמירת כיוון אנטנות הקליטה במרחב בנוכחות תנודות הבלון. (ג) העברת האותות הנקלטים מהבלון לבסיס הקרקעי מבלי שיתגלו על ידי האויב. (ד) אספקת אנרגיה לבלון להפעלת מערכות הקליטה והשליטה מרחוק.



איור 3: מערך אנטנות ההאזנה ואנטנת השידור לקרקע שהותקנו בבועה שב"יערית"

בתחילת 1967 נוצר קשר ישיר בין ד"ר יעקב זיו, אז ראש שטח קומוניקציה ברפאל, לבין אל"מ אלי זעירא, שהציג את הבעיה המבצעית - האזנה לאותות רדיו מעומק סיני ומצרים.

ההזדמנות להפוך את החלום למציאות נקרתה בתום מלחמת ששת הימים. כוחותינו נפרסו לאורך תעלת סואץ וטווחי ההאזנה התקצרו משמעותית. אלי זעירא העלה מחדש את הרעיון להתקין מערכת האזנה על בלון העולה לגובה של כ-2,000 מטר ומשדר את האותות הנקלטים לקרקע לפיענוח. לשימוש בבלונים להאזנה אלקטרונית לא היה משפט קיום לפני שהופעל על ידינו.

טווחי ההאזנה מתחנות קרקעיות בנגב היו מוגבלים בשל גובהן - דבר שלא אפשר האזנה לטווחים שמעבר לתעלת סואץ. הרעיון להשתמש בבלונים לצורך הגבהת אנטנות הקליטה הועלה לראשונה על-ידי אל"מ אלי זעירא. על מנת לבחון את מימוש הרעיון, הוא הטיל על יהודה מורג מאמ"ן ללמוד את נושא הבלונים עם חיל התותחנים. בחיפושיו הגיע מורג לחברות שעסקו בחו"ל בבלונים גדולים במלחמת העולם השנייה (להגנת שמי לונדון מתקיפות הגרמנים). החיפושים ארכו מספר חודשים עד שנמצא יצרן, שסיפק בלון המסוגל להרים לגובה של כשני ק"מ מטען במשקל עשרות ק"ג - מקלטי האזנה זעירים, אנטנות מתאימות ומצברים שסיפקו אנרגיה לכשבוע ימים.



איור 4: מערך השליטה והבקרה הקרקעי של "יערית"

גודל של טון ציוד; גובה הריחוף עלה מכ-8,000 רגל במערכות "פיזה" לכ-12,000 רגל ב"תמי" במרכז סיני, ולכ-20,000 רגל ב"יערית". נוסף לכך, הקירבה של בסיס ההאזנה לתחנות שידור ומסרים שונים בתוך ישראל יצרה בעיה של פוטנציאל הפרעות משמעותיות להאזנה למקורות שמעבר לתעלת סואץ. הבעיות נצפו מראש ב-1975. החוקרים בשטח מחקר קומוניקציה פיתחו מעגלים מסתגלים (הנחיתו אותות חזקים בספקטרום עד כדי 1/7,000 מעוצמתם המקורית בעוד האותות החלשים בסביבתם לא נפגעו כלל). לכל אחד מתחומי המסרים שב"יערית" הותאמו מעגלים מסתגלים שאפשרו האזנה נקייה מהפרעות!

במהלך השנים שולבו בפיתוח מיטב העובדים מ-12 מוקדי ידע שונים בכל חטיבות רפא"ל. ניהול הפרויקט, במבנה מטריצה, בוצע בכישרון רב על ידי ראובן רגב. בזכות תרומתם של מובילי הידע במוקדים אלה הגענו למכלול הביצועים שתוארו לעיל.

צוות פרויקט "פיזה-א" זכה בציון לשבח במסגרת פרס ביטחון ישראל 1973; צוות פרויקט "תמי" זכה בפרס ביטחון ישראל 1981. לצוות פרויקט "יערית" הוענק פרס רפא"ל לשנת 1989.

ברגעים של שיא הפעילות ישבו מאות אנשי בינה רשתית בבסיס ההאזנה הקרקעי והאזינו למאות מקורות - מהרמה הטקטית עד לרמה האסטרטגית - אשר סיפקו בזמן אמת מידע שלא סולא בפז!

לקרקע את כל משימות ההאזנה בתחום שנבחר במקביל. בתחנה הקרקעית פוצל הסרט הרחב למספר רב של אותות להם האזינו חיילי הבינה-הרשתית, שאפשרו האזנה לכל המשימות בו-זמנית - פריצת הדרך הושגה! "פיזה-ג" החלה לפעול בקיץ 1973, כארבעה חדשים לפני פרוץ מלחמת יוה"כ, ותרומתה לכושר היירוט של חיל האוויר הייתה משמעותית ביותר - בסוף מלחמת ההתשה ובמהלך מלחמת יוה"כ.

היכולות הגלומות בטכנולוגיה רחבת-הסרט הגבירו את התיאבון באמ"ן. נדרשנו להגדיר ולפתח מערך האזנה למספר תחומי תדר רחבים, שנקרא בשם "תמי". הצעה הטכנית גובשה על ידי עודד מלץ ועודד זך. המערך כלל מספר תחומים רחבי-סרט, שלקליטתם נדרשו מספר קטן של ממסרים רחבי-סרט - רוחב הגבוה בהם הגיע ל-2 ג'יגה-הרץ. כך מוצתה יכולת מימוש הטכנולוגיות שפותחה בהנהגת עודד מלץ בשטח מחקר קומוניקציה/חטיבת אלקטרוניקה. פיתוח "תמי" דרש שילוב יכולות מקצועיות בין-חטיבתיות נוספות, שסייעו בהן כל החטיבות ברפא"ל. במהלך הפרויקט עברה הובלתו למיכאל מנור (שהיה עד אז ראש שטח). לאחר מכן התקבל לעבודה ברפא"ל עודד זך, שסיים את שירותו באמ"ן, כרמ"ח פיתוח, והתמנה לראש הפרויקט ב-1980. שלב נוסף חל כאשר התקבל ראובן רגב לעבודה ברפא"ל והוצב בראש פרויקט הדור הבא "יערית" - כיסוי תחומי תדר מ-20 מגה-הרץ עד 10 ג'יגה-הרץ (!). "יערית" החלה לפעול בשנת 1985 והמשיכה לפעול עד 2005.

גבוה יותר - רחוק יותר

האתגרים בפני מפתחי "יערית" הושפעו מאוד מהעובדה, שדובר בבסיס האזנה בתוך גבולות המדינה. טווחי ההאזנה ליעדים במצרים גדלו ולשם כך נדרש בלון גדול שירים מטען מסדר

על-מנת לאפשר רצף האזנה הוקם בסיס קליטה עם שני בלונים: אחד בהאזנה ושני מעוגן לקרקע כגיבוי ולתחזוקה.

עם האוכל גדל התיאבון

מייד לאחר ההצלחות בהפעלת "פיזה-ב", גבר "התיאבון" באמ"ן, שהגיש דרישה להגדלה של יכולות ההאזנה לארבעים משימות בו-זמנית! ההובלה הטכנית ברפא"ל עברה מאברהם סעד, שהתכונן לצאת להשתלמות בארה"ב, לעודד מלץ. בפני המתכננים עמדו בעיות מימוש ששילובן נראה קשה להשגה: א) כיצד להעביר 40 אותות מהבלון לקרקע ללא הפרעות הדדיות? ב) איך לעמוד בתוספת המשקל? ג) הגדלת ערוצי הפיקוד מרחוק פי 40! ד) עלות גבוהה של המערכת ותחזוקה מורכבת. ה) כיצד להתמודד עם אותות חזקים, בתחום תדרי ההאזנה, מבלי להכניס את הממסר לרוויה?

פריצת דרך טכנולוגית

באותם ימים הגיעה חזית הידע במימוש מגברים-ליניאריים רחבי סרט (מאות מגה-הרץ) והספק מוצא מתאים במצב מוצק, בתנאי שלא יהיו בתחום אותות חזקים, שיעוותו את האותות הרצויים. בשלב זה השתמשו המפתחים במסננים דו-תדר חדים על מנת להתגבר על הבעיה. מכיוון שהיה ברור כי בעתיד יידרשו פתרונות גמישים יותר, הנחה ראש השטח את החוקרים בתחום רכיבים ומעגלים ללמוד טכניקה חדשה - מעגלים-מסתגלים - בעלי שתי תפוקות: באחת כל התחום פרט לאות החזק, ובשנייה האות החזק בלבד. בהתבסס על חזית הידע, גיבשו עודד מלץ מרפא"ל ועודד זך מאמ"ן הצעה חדשנית - לפתח ממסר רחב-סרט אחד לכל רוחב התחום של "פיזה-ב". הפתרון שנבחר כונה בשם "פיזה-ג". במקום עשרות רבות של מקלטים צרי-סרט והורדת המידע מכל אחד מהם לקרקע נבנה ממסר רחב סרט אחד, ששידר

1. ראובן אשל "פיתוח רקטות מטאורולוגיות ברפא"ל", רפאל שלנו, גיליון 20, אפריל 2012, עמודים 40-41.
 2. את אופק הרדיו ניתן לחשב בקירוב טוב על ידי הנוסחה: $d = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ כאשר h_1 ו- h_2 גובה אנטנות הקליטה ו- d האורך מעל פני הים ניתן במטרים, מתקבל d טווח קו-הראייה האפקטיבי בק"מ - הטווח שממנו ניתן היה להאזין ממקום בגובה h_2 למקורות שידור בגובה h_1 מעל פני הקרקע.