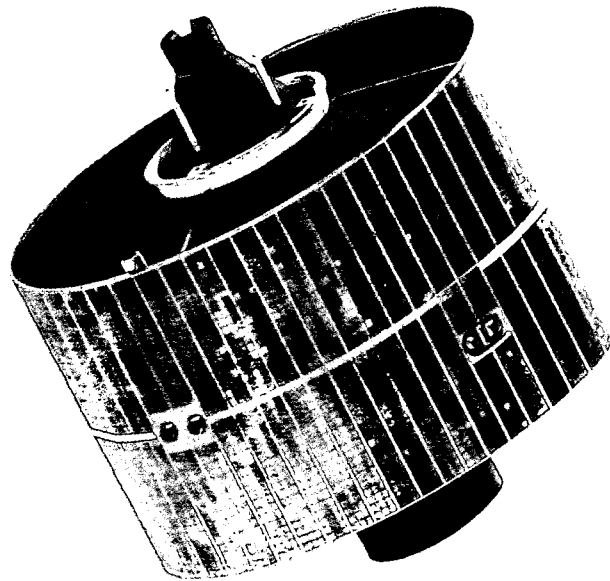


# לוינים צבאיים

ד"ר יונתן מס



## הקדמה

מזה שנים מוציאות ממשלות ארצות-הברית וברית-המועצות כספים רבים לפיתוח טכנולוגיית החלל, ובעשותן כן, ודאי לא נעלמו מעיניהן האפשרויות הצבאיות החשובות הטמונות בתחום זה. אין זו רק שאלה של יוקרה לאומית, אף שגם לזו האחרונה נודעת חשיבות כממריצה להשקעת מאמצים, כי אם גם פעולה בעלת תכלית צבאית.

הצעות רבות הועלו עד כה לניצול החלל לצרכים צבאיים. מן הדמיוניות יותר נזכיר את ההצעה להציב מראה ענקית במסלול סינכרוני מעל נקודה מסוימת של קו-המשווה, ולנצלה לשריפת אזורים נבחרים בעזרת קרני השמש, או לתאורת-קרב בלילה. הצעה מרחיקת-לכת אחרת היא לנצל את פני הירח לביצוע ניסויים בפצצות-ענק גרעיניות מבלי לסכן את כדור הארץ. לעומת כל ההצעות הללו לעתיד הרחוק, מתגבשות והולכות תכניות אחדות ממשיות יותר, ובעיקר — שימוש בלוינים לצרכים הבאים:

- תצפית והאזנה מעל שטח האויב.
- תקשורת בינלאומית בלתי-מופרעת.
- ניווט אניות, מטוסים וצוללות.

לאחרונה הודיעו האמריקנים כי הרוסים עומדים לנצל את הלוינים גם לצורכי הפצה, ולהלן נעסוק בפרוטרוט גם בנושא זה.

פיתוח טכנולוגיית החלל נעשה בארצות-הברית במס-

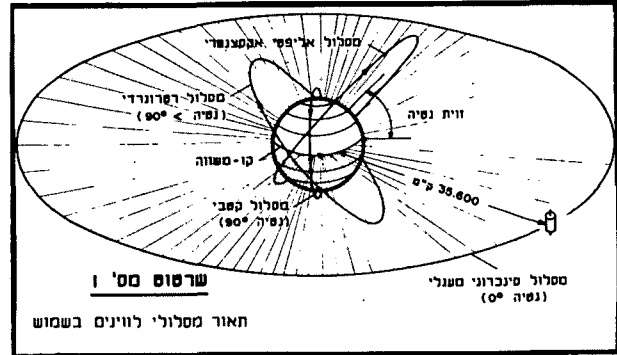
גרת רשות לאומית מיוחדת, שתפקידה — פיתוח רקטות ענקיות, אמצעי שיגור, חקר האטמוספירה והחלל, פיתוח הלוינים המדעיים והמאויישים עצמם, וכן עריכת מבצעי-החלל הכלליים; רשות זו היא NASA (National Aeronautics and Space Administration), שהוקמה לאחר שהוברר כי לצורך מחקר החלל וכיבוש הירח דרושות רקטות גדולות יותר מאלה הדרושות לשימושים הצבאיים הטהורים, וכן בשל השאיפה לבסס את מחקר החלל במידת האפשר על בסיס גלוי ובינלאומי. לצורך ביצוע הפרויקטים הצבאיים הוקמה במקביל רשות אחרת ARPA (Advanced Research Projects Agency), המנהלת את חקר החלל של הזרועות השונות של צבא ארה"ב, והמתבססת על אמצעי NASA לביצוע השיגורים.

אחת התכניות ארוכות-הטווח של ARPA היא הקמת תחנת-חלל מאויישת שתחוג במסלול קוטבי לצורכי תצפית והאזנה. על תחנה זו להיות גדולה די הצורך להכלת צוות בן 3 אנשים לפחות, אשר יוחלף מדי כשבועיים באמצעות רקטות-קשר מיוחדות. נראה כי תכנית זו נגנזה לזמן רב, אולי גם הודות להצלחת לויני-הסיור הבלתי מאויישים — אך הפעילות בקשר אליה חודשה במסגרת התכניות של „לאחר אפולו” — דהיינו, לאחר הנחיתה על הירח.

להלן נדון בעיקר באותם שימושים ללוינים צבאיים, המופעלים כבר כיום — לויני הסיור, לויני התק-שורת והניווט והפצצות הלויניות.

## מסלולי לויינים

לשם הבנת המושגים היסודיים הכרוכים בחקר הלויינים בכלל, נעניין בציור מס' 1 בו מתוארות צורות המסלול השונות.



ידוע כי מסלולו של לויין בשדה-הכובד של כדור הארץ הוא בדרך כלל אליפסה, שאחד משני מוקדיה במרכז הארץ. כאשר מהירות הלויין גדולה מדי, הופכת האליפסה לפרבולה או להיפרבולה, אך במקרה זה אין לדבר על מסלול לוייני. תקופת הקפתו של הלויין תלויה בגודל הציר הגדול של האליפסה (ולא באקסצנטריות) — ועומדת ביחס ישר לחזקה  $1\frac{1}{2}$  של גודל הציר. מי שור המסלול האליפטי יציב כמעט במרחב הכוכבי, ונוטה אך להיסחף באטיות ממצבו ההתחלתי על-ידי השפעות משניות שונות. למביט במערכת השמש מן החוץ נראה כדור-הארץ כמו מסתובב סביב צירו כאשר מישור הלויינים המקיפים אותו נשאר יציב. הואיל וגם ציר הסיבוב של כדור הארץ שומר על מצבו בחלל, נשארת גם הזווית בין מישור מסלולו של לויין כלשהו לציר כדור-הארץ, קבועה, והיא הזווית המשלימה ל"זווית הנטייה" של המסלול למישור קו-המשווה.

כאשר גבוה יותר המסלול הלוייני גדלה תקופת ההקפה. כאמור בגובה של 35,600 ק"מ בערך מעל פני כדור-הארץ תשוה תקופת ההקפה ליום כוכבי אחד (23 שעות ו-56 דקות). אם כיוון הסיבוב של הלויין גם הוא ממערב למזרח כאילו מסתובב הלויין יחד עם כדור-הארץ, והמסלול נקרא — מסלול סיני-כרוני. במסלול סיני-כרוני-מגלי (האקסצנטריות — אפס) שזווית נטייתו אפס, נמצא הלויין בקביעות מעל נקודה מסויימת של קו-המשווה.

מסלולי הלויינים הם נמוכים או גבוהים, מעגליים או אליפטיים מאוד, לפי הצורך. יש ונטייתם קטנה, ואז ססים הם מעל אזורים קרובים לקו-המשווה בלבד, ויש שהם קוטביים, ואז מכסים הם את כל אזורי כדור-הארץ. כאשר נטיית מישור המסלול גדולה מ-90°, מסתובב הלויין בניגוד לכיוון סיבובו של כדור-הארץ, והמסלול קרוי רטרוגרדי. במסלול כזה מבזזות אנרגיה הדרושה לשיגור, אך לעתים נעשה בו שימוש מבחינת הנוחות במקום השיגור או מבחינת מהירות הכיסוי של שטח כדור-הארץ. כאשר יש עניין כי הלויין יטוס, לצורכי תצפית, מעל נקודה מסויימת של הארץ, בקו-הרוחב 50°, דרך משל, כדאי יותר לקבוע למסלול נטייה של 55° בערך, ובמקרה זה יעבור הלויין את האיזור המעניין בטיסה ממערב למזרח, ויחזור על כך כ-4 פעמים רצופות — כלומר, יינתן כיסוי טוב יותר לנקודות שבסביבות קצה הנטייה של המסלול. בדבר זה ניתן להיווכח בחישוב גיאומטרי פשוט.

## לוייני-סיוור

מיד עם תחילתו של עידן הלויינים הועלו הן במערב והן במזרח הצעות לנצלם לצורכי סיוור מעל ארצות הגוש היריב. מרחב האוויר מעל למדינה כלשהי הוא לפי המשפט הבינ-לאומי — בתחום שלטונה הריבוני, מה שאין כן ביחס לחלל החיצון, המתחיל בערך בגובה 100 ק"מ. ישנם אמנם חילוקי-דעות ניכרים באשר לגבול המדוייק בגובה, אך לדעת כל המומחים הגובה שבו סבים הלויינים אינו יכול להימצא ברי-בונותה של שום מדינה שהיא. נראה איפוא, כי אפשר לנצל את החלל החיצון לצורכי תצפית והאזנה מעל לארצו של יריב פוטנציאלי.

המפתח לפתרון בעיית הסיוור מן החלל היה טמון בפיתוח אמצעים להחזרת לויינים לכדור-הארץ, כך שאפשר יהיה לפתח את הסרטים שצולמו מן החלל. האמריקנים ערכו סדרת ניסוי-נות להחזרת לויינים על-ידי הצנחה; לראשונה הצליחו בכך עם החזרת "Discoverer 13", בנובמבר 1960. טכניקת ההחזרה איפשרה לא רק את ביצוע טיסות-החלל המאויישות, אלא גם את פיתוחם של לוייני-סיוור, לצילום ולתצפית אלקטרונית מעל שטחי האויב. מן הספרות המקצועית, המגלה טפח ומכסה טפחיים, ידוע רק על תחילת העבודה בתחום זה על-ידי ארה"ב, ואילו על הנעשה בברה"מ לא ידוע דבר. עם זאת ניתן לשער, מתוך ההקבלה בפיתוח טכנולוגיית החלל אצל שתי המעצמות, כי גם ברוסיה מתפתחת הטכניקה בקיום דומים.

## תכנית MIDAS (Missile Defense Airborne System)

כחלק ממערכת הגנה והתראה מפני טילים בליסטיים, ניסו האמריקנים שיטה לגילוי המראתו של טיל אויב על-ידי גילוי הקרינה התת-אדומה הנפלטת מלהבת המנוע הרקטי, בעת יציאת הטיל מן האטמוספירה. אפשר לגלות קרינה זו על-ידי מדידי אור תת-אדום, המותקנים בלויין וצופים כלפי מטה. יש להניח כי משתמשים בקליטת אורכי-גל הנבלעים בחזקה באטמוספירה התחתונה, דווקא, כך שהמדידים לא ימדדו מקור-קרינה כלשהו שעל-פני הארץ, כי אם אך ורק מקורות הנמצאים מעל לאטמוספירה הצפופה. בעירתו של טיל בליסטי מסתיימת רק בגובה 50 ק"מ בערך, ומהווה בכך אובייקט בודד וברור למדיד מתאים בלויין שכן מבחינת הבליעה האופטית ניתן לומר כי האטמוספירה, "מסתיימת" למעשה בגובה כ-30 ק"מ, בו צפיפות-האוויר היא 1% מזו הקיימת על פני כדור-הארץ. שיקול נוסף הוא, בוודאי, בחירת אורך-גל שבו קרינת השמש חלשה, שכן בגובה רב מורגשת בחזקה החזרת קרני השמש מן האטמוספירה. המראת טיל בליסטי גורמת גם להפרעות ניכרות אחרות באטמוספירה העליונה בהשאירה — למעשה — "חור" ביוספירה, היא השכבה המחושמלת שראשיתה בגובה כ-100 ק"מ, וכן נגרמות הפרעות רדיו אופייניות באורכי-גל גדולים מאוד. יתכן שלוייני "מידאס" או צאצאיהם מנצלים גם תופעות-רדיו אלה כדי לגלות או לזהות המראת טילים בצד הרוסי.

לוייני "מידאס" ניסיוניים גילו לראשונה המראת טיל אמריקני במאי 1960. אלה הם לויינים גדולים שמשקלם מגיע ל-2 טונות בערך. לאחר הצלחת הניסויים הראשונים תוכנן שיגור סדרה בת 12—15 לויינים מסוג זה, שיחוגו סביב לכדור-הארץ במסלול



לוויין מידאס

לווייני „סאמוס“ הראשונים נעו בדרך זו בגובה של כ-160 עד כ-480 ק"מ מעל כדור-הארץ. לאחרונה נרמז, כי הועלה הרעיון של לווייני-תצפית במסלול „סינכרוני“, שהוא מסלול גבוה מאוד (36.000 ק"מ), אשר יתרונו הגדול בכך, שהלוויין במסלול זה נמצא בקביעות מעל לנקודה מסוימת על-פני כדור-הארץ (וליתר דיוק, מעל לנקודה בקו-המשווה). גובה רב זה מקשה, אמנם, במידה רבה על הדרישות האופטיות — אך לעומת זאת מקל מבחינות אחרות, ומאפשר תצפית קבועה, יומם ולילה, על איזור מסויים בכדור-הארץ.

### שיקולים אופטיים

בעריכת תצפית אופטית על כדור-הארץ מגובה רב מעוניינים להשיג כושר-הפרדה גבוה, כלומר, לראות בתמונה עצמים קטנים ככל האפשר. „כושר-הפרדה“ פירושו, הכושר להבדיל בין שתי נקודות כהות קרובות זו לזו. השאיפה בתצלומי-האוויר המקובלים לצורכי סיור היא להגיע לכושר-הפרדה של מחצית המטר לערך.

השגת כושר-הפרדה גבוה מותנית בגורמים רבים, הקשורים באטמוספירה ובתנאי התאורה, ביציבות המערכת האופטית ובטיבה.

האטמוספירה עצמה גורמת לטשטוש התמונה בגלל ערבול האוויר, גם כאשר אין הפרעות כלשהן מעננים או ערפילים. בכך יכול להיווכח כל הצופה במשקפת שהגברתה כ-20 פעמים, על עצמים הנמצאים במרחק קילומטרים אחדים. אך הפרעה זו קטנה ביחס לתופעה אחרת האופיינית להסתכלות מגובה רב, היא הקטנת הקונטרסט, כלומר הקטנת ההבדל בין שחור ללבן, עקב הסינוור מן האור המפוזר על-ידי האטמוספירה עצמה. הואיל ואור מפוזר זה כחול בעיקרו, משתמשים במסננות המסלקות את האור הכחול.

בליעת האור הבא מן הקרקע בתוך האטמוספירה אינה חמורה בתנאי-ראות טובים. העובי שוה-הערך של האטמוספירה כולה הוא כ-7 ק"מ אויר בגובה פני הים, ולא קשה להיווכח, כי נבנהים רגילים ובהסתכלות אופקית ניתן בקלות לצפות במשקפת למרחק של 7 ק"מ.

קוטבי, ו„יכסר“ יחדיו את פני כדור-הארץ במלואם. מובן שלא די בהתראה הניתנת על-ידי לוויין „מידאס“ ויש לוודא את אופיו של הגוף המשוגר על-ידי האויב (אם הוא טיל או לוויין), וכן את כיוונו ומסרתו; דבר זה ניתן להיעשות על-ידי מכ"מים ארוכי-טווח, המגלים את מסלול הגוף שהמריא לאחר שכבר הגיע לגובה מאות ק"מ.

### לווייני תצפית „סאמוס“ (SAMOS)

לווייני-סיור אלה נועדו לתצפית אופטית של שטחי-האויב. מבחינת גודלם ומסלולם דומים הם מן הסתם ללווייני „מידאס“, גם משקלם כ-2 טונות, וגם להם מערכות אופטיות משובכללות, המכוונות בדיוק רב כלפי כדור-הארץ. לוויין „סאמוס“ הראשון הוכנס למסלול בינואר 1961, וכנראה הוחל בשימוש מבצעי במערכת זו ב-1963. מאז לא פירסמו האמריקנים דבר על התפתחותם של לווייני-הסיור, אך יש להניח כי בעקבות ההתפתחות הגדולה שחלה לאחרונה במערכות האופטיות והאלקטרוניות, השתפרו גם ביצועיהם של הלוויינים מסוג זה. בדגם הראשון של „סאמוס“ הותקנו מצלמות בעלות טלאובייקטיבים ענקיים אשר צילמו על גבי סרט, וכן מצלמות טלוויזיה אשר שידרו את התמונות שצולמו והוקלטו בהן — מעל שטח ארצות-הברית. מצלמות הטלוויזיה סיפקו תמונה בלתי-חדה, להסתכלות ראשונית, ורק עם החזרת הלוויין לכדור-הארץ פותחו הסרטים המאפשרים הסתכלות מדוייקת ככל שמאפשרת הטכניקה.

עם זאת, יש להניח, כי עם התפתחות הטכנולוגיה, בדגמים הבאים, פותחו גם שיטות לשידור תמונות בטלוויזיה באיכות שאינה נופלת במידה רבה מן האיכות המושגת בצילום. אם מסתפקים בשידור טלוויזיוני אין, כמובן, צורך להחזיר את הלוויין להוצאת הסרטים ובכך מושג חסכון ניכר. לוויין-סיור טלוויזיוני יוכל להישאר פעיל במסלולו שנים אחדות לפני שיתקלקל ויצא מכלל שימוש.

יש יסוד להניח, כי בלווייני „סאמוס“ הראשונים נוסתה גם האפשרות לניצול הלוויינים לשם קליטת שידוריהן של תחנות מכ"מ ותחנות קשר בתג"מ (תדר גבוה מאוד) של האויב, כלומר — לשם „מודיעין אלקטרוני“. ב-1963 נשמעו רמזים על פיתוח לוויינים מיוחדים לצורך זה בשם „פרט“ (FERRET), אך בוודאי הושגה גם בתחום זה התקדמות רבה מאז הורד מסך הסודיות על לווייני-סיור למיניהם.

### גובה לווייני-סיור

כדי לצפות על פני כדור-הארץ, יש לוודא כי הלוויינים יטושו במסלול נמוך ככל האפשר מעל הארץ. הגבול התחתון נקבע על-ידי האטמוספירה, הגורמת לחיכוך ולהפלת הלוויין בטווח נמוך מדי. בגובה 150 ק"מ יהיה „זמן-החיים“ של לוויין במסלול כ-10 ימים בלבד, עד שיצולל וישרף באטמוספירה; ואילו בגובה 350 ק"מ מגיע „זמן-החיים“ ל-3 שנים בערך. פשרה אפשרית בין הדרישות ל„זמן-חיים“ ארוך וגובה-טיסה נמוך היא בחירת מסלול אליפטי אשר יביא את הלוויין לגובה נמוך מעל לחצי-הכדור הצפוני, שבו נמצאות המטרות הנצפות, ולגובה רב מעל לחצי-הכדור הדרומי, שהעניין בו מועט יותר.

## לויינים נושאי-פצצות

לאחרונה הודיע משרד ההגנה האמריקני, כי ברה"מ מפתח לויינים נושאי פצצות אטומיות, בעלי "הקפה חלקית" (Fractional Orbit Bombing System). ב-17 באוקטובר 1963 קיבלה עצרת האו"ם החלטה הקוראת לכל המדינות להימנע מהכניס למסלול לוייני כלי נשק גרעיני או נשק אחר להשמדה המונית. ב-19 בדצמבר 1966 קיבלה העצרת הצעת אמנה בינלאומית בדבר הפעילות בחלל-החיצון, שלפי סעיף IV בה מתחייבות המדינות, "לא לקבוע במסלול, להתקין על גופים שמימיים או למקם בחלל החיצון בכל צורה שהיא — התקנים נושאי נשק גרעיני או נשק אחר להשמדה המונית". תושם אל לב העובדה, כי אין המדובר על אי-שימוש בחלל להפעלת נשק בכלל, כי אם רק נשק השמדה המוני ממוקם (Stationed) בחלל. יש, על כן, שתי הסתייגויות: השמדה המונית ומיקום בחלל — ובוודאי היו סיבות לניסוח מסתייג זה.

רוברט מקנמרה, שר ההגנה האמריקני לשעבר, אמר כי הרוינים מתכוננים לפתח מערכת הפצצה גרעינית, שבה יוכנסו הפצצות למסלול לוייני נמוך, בגובה כ-150 ק"מ, וכאשר ישלימו חלק מהקפת כדור-הארץ ויגיעו לקרבת מטרותן המיועדות, יופלו ארצה בדרך דומה להחזרת הלויינים המאווישים לפני הארץ, כלומר — מבחינת החוק אין כאן מיקום בחלל. לצורת הפצצה זו חסרונות טכניים ניכרים, אך יש בה יתרונות מבחינת האפשרות ליירוט על-ידי טילים נגד טילים. חסרונותיה הבולטים הם:

א. לשם הכנסת מטען למסלול לוייני דרושה אנרגיה גדולה במידה רבה מזו הדרושה להכנסתו למסלול בליסטי, המביא אותו מנקודה אחת על פני הארץ אל נקודה שניה בלבד. כן דרושה אנרגיה נוספת לפעולת הבלימה והחזרת המטען לאטמוספירה. בזבוז זה מתבטא בצורך ברקטות גדולות ויקרות במידה רבה לאותו מטען. יתכן כי הרקטות הצבאיות הענקיות שהוצגו במצעד יום המהפכה במוסקבה הן נושאות הפצצות הלוייניות מסוג זה.

ב. דיוק הפגיעה בחזרה ממסלול לוייני קטן מאשר בטיל בליסטי, עקב השפעתו של אי הדיוק בכיוון הפעלתו של רקטות הבלימה וכן בגלל השינויים הגדולים בצפיפות האטמוספירה העליונה. מושג מה מן הדיוק הניתן להשגה, אפשר לקבל מדיוק הפגיעה של הלויינים המאווישים בחזרה לכדור-הארץ, שהוא בסדר-גודל של 10 ק"מ. הדיוק המשוער של טיל בליסטי בין-יבשתי הוא כ-2 ק"מ.

לעומת חסרונות ניכרים אלה, ניתן למנות גם יתרונות אחדים:

א. טיסה נמוכה יותר של הראש נושא הפצצה מאשר בטיל הבליסטי. במסלול לוייני אפשר לטוס בגובה 100—150 ק"מ, בעוד שטיל בליסטי בין-יבשתי עולה בשיא טיסתו לגובה רב כדי 1/6 מן הטווח שאליו הוא מכוון (לטווח 6000 ק"מ — גובה שיא של כ-1000 ק"מ).

יתרונה של הטיסה הנמוכה טמון בכך שהיא מקשה על גילוי הלויין על-ידי מכ"ם הנמצא במרחק רב מסביב לכדור-הארץ, והמגלה את הפצצה רק בהופיעה מעל לאופק (ראה ציור מס' 2).

ב. בניגוד לטיל הבליסטי, כשהמדובר במסלול לוייני אין

מבחינת הפרעות האטמוספירה אין הבדל של ממש בין תצלום ממטוס-סיור בגובה שמעל ל-10 ק"מ, לבין תצלום מלויין בגובה 250 ק"מ. לעומת זאת קיימים הבדלים ניכרים מבחינת הייצוב המכני והמערכת האופטית. כך, אם רוצים להשיג כושר-הפרדה של מטר אחד על פני הקרקע מלויין הנמצא בגובה 200 ק"מ, יש לוודא כי במשך הצילום (1:500 שניה דרך משל) לא יסטה ציר המצלמה בזווית גדולה מ-1:200,000 רדיאנים, שהם שניית זווית אחת, שכן אחרת תגרום התנועה הזוויתית עצמה לטשטוש התמונה ביותר ממטר אחד. בצילום ממטוס, הטס בגובה נמוך פי 20, אפשר להרשות, כמובן, תנועה זוויתית גדולה פי 20. אגב, דיוק זוויתי של שניית-זווית אחת הוא הדיוק הנדרש גם מן הלויינים האסטרונומיים. אלה הם הלויינים הנושאים טלסקופים אסטרונומיים לצפייה בכוכבים בלא הפרעות אטמוספיריות. לדוגמה לויין כזה הוא OAO-2 (Astronomical Observatory) שהוכנס למסלול בדצמבר 1968. בעיית טשטוש אחרת נובעת מהירותו הקטנה של הלויין במסלולו, שהיא כ-7,000 מטר בשניה ביחס לנקודה שעל פני כדור-הארץ. גם אילו היה הציר האופטי של המצלמה שומר על מצבו הזוויתי במדויק, היה מתקבל טשטוש של 14 מטרים על פני כדור-הארץ, עקב התקדמותו הקטנה של הלויין במרחק זה ב-1:500 שניה. מלויין יש לצלם איפוא במהירות גדולה יותר, דבר המקשה על האופטיקה, או להתקין אמצעים מסובכים כדי לבטל, בעזרת תנועה זוויתית נגדית, את התנועה הקטנה קדימה.

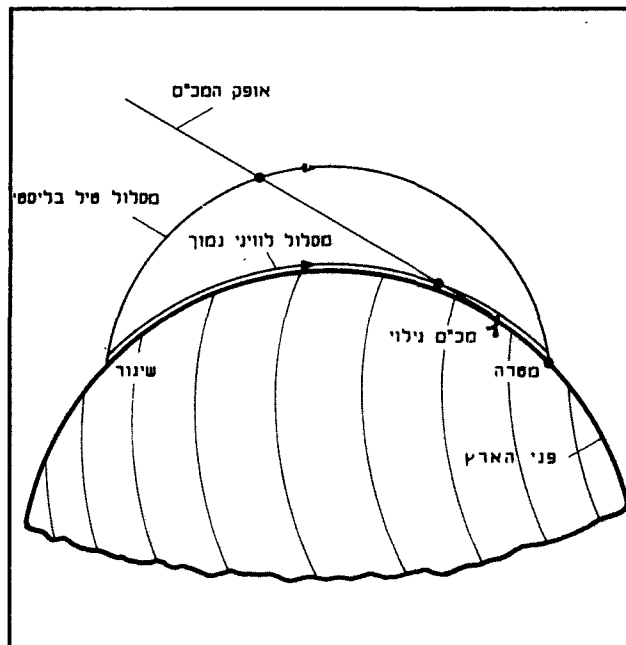
הבעיה האופטית היא החמורה ביותר. נתחיל בטרט (שיקולים דומים פועלים לגבי טלוויזיה). הסרטים הרגישים ביותר משיגים כושר-הפרדה של 200 קוים/ל"מ סרט, כלומר, המרחק בין שתי נקודות שחורות על הסרט שאפשר להפריד ביניהן הוא 1:200 מ"מ. חישובים גיאומטריים פשוטים יוכיחו כי על-מנת להשיג כושר-הפרדה של 1 מ' על הקרקע מגובה 200 ק"מ, יש להשתמש בעדשות שאורך מוקדן מטר אחד  $(\frac{1}{200000} = \frac{1}{1000})$ . כדי לאפשר צילום מהיר ולהימנע מבעיות דיפרקציה, יש להשתמש לאורך-מוקד מעין זה בעדשות שקוט-רן מחצית-המטר לפחות. ידוע כי בלוייני-הצילום משתמשים אף בעדשות גדולות מאלה, שתכנונן הוא מהישגי הטכניקה האופטית המודרנית.

הצילום שיתקבל על סרט בגודל 200 × 200 מ"מ בתנאים שבדוגמה, יכסה שטח של 40 × 40 ק"מ. לשם כיסוי קבוע של השטח שמתחת ללויין בפס שרוחבו 40 ק"מ, יש לצלם צילום אחד מדי 6 שניות לערך (7:40).

השימוש בטלוויזיה במקום צילום מקל במידה ניכרת על התצפית מן הלויין, באשר הוא חוסך את החזרת הלויין לארץ. ביצוע שידור טלוויזיוני מדויק די הצורך טעון, כנראה, צילום מדויק ופיתוח אוטומטי, ואחר כך ניתוח הצילום והעברתו בשידור ארצה בקצב אטי. פעולה דומה לזו עשו בלוייני "אורביטר" (ORBITER), שצילמו את פני הירח ממסלול לוייני סביבו. צילומים אלה פורסמו ברבים. כושר-ההפרדה שהושג בהם הוא מטרים אחדים. יתכן אמנם כי בינתיים פותחו גם מצלמות-טלוויזיה רגישות ובעלות כושר-ההפרדה גבוה, לשידור ישיר; אך הישג כזה היה נשמר, מן הסתם, בסודיות רבה.

## שרטוט מס' 2

ציור בקנה מידה נכון להסבר ההבדל בין מסלול טיל בליסטי למסלול פצצה לוויינית. המכ"ם מגלה את הטיל הבליסטי מוקדם יותר.



הוא כ-20 ק"מ בלבד, ובמרחק אלכסוני דומה מן המטרה. מובן כי פיצוץ מימני, גם בגובה זה, עלול לגרום נזקים רבים — אך לא הרס מוחלט באיזור המטרה. יתרונה של מערכת ה"ספרינט" טמון בכך שהיא מיועדת להבחין גם בין הראש הקרבי האמיתי הכבד, לבין ראשי ההטעיה הקלים יותר, שרישומם באטמוספירה בעת הכניסה שונה מבחינות חשובות רבות. ההאטה עקב חיכוך חיימום הגוף ושובל האוויר המחומם המזדנב אחריו. באשר לשימוש בטילי "ספרינט", אין כנראה הבדל בין פצצה במסלול בליסטי לפצצה במסלול לווייני.

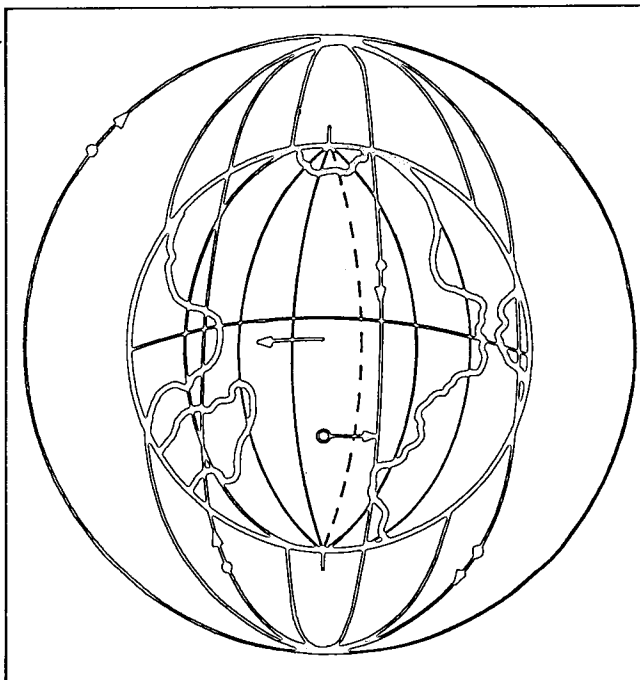
כל השיקולים המבוססים על כך שפצצות לווייניות מקשות על פעולת ההגנה נגד-טילים, לא יתקיימו אם ידבקו האמריקנים בתיזה היסודית, כי אין כל תועלת במערכת טילי-הגנה נגד טילים. הנחה זו אומרת כי זול יותר להוסיף טילי-התקפה, מאשר לבנות טילי-הגנה נגד טילים, ולכן יעדיף האויב תמיד לייצר טיל-התקפה אחד נוסף נוכח כל טיל-הגנה שייבנה כנגדו. לאחרונה הוחלט בכל זאת להקים רשות-הגנה נגד-טילית דלילה (כלומר לא צפופה), שתגן על אזורי שילוח הטילים בלבד, וכמובן כי יהא צורך להתחשב בסכנת הפצצות הלווייניות. זאת ועוד — יעשה האויב כל שביכולתו, מכל מקום מובטחת לו מהלומה חוזרת אנושה, אשר תהרוס את ארצו לחלוטין, דבר שירתיעו מההתקפה. זוהי "היכולת למכה שניה" המפורסמת, שעליה שומרת ארה"ב בקפדנות על-ידי הגנת הטילים במתקנים תת-קרקעיים, התקנת טילים בצוללות הנעות במקומות שונים ברחבי האוקיינוסים ומתחת למעטה הקרח בציר הצפוני ופצצות המותקנות במטוסים הנמצאים באויר בניידות מתמדת. לכל המערך דרושה כמובן גם מערכת שליטה ובקרה מורכבת, למניעת התקפה בשוגג — וגם כדי להבטיח כי אם תיערך התקפה כוללת על ארה"ב, אכן תופעל המכה הנגדית. יתכן כי ניסיון פגיעה במערך שליטה זה קל יותר מניסיון להגן על בריה"מ בעזרת מערך טילים נגדיים ואולי חושבים הרוסים בכיוון זה בפיתוח הפצצות הלווייניות.

האויב יכול לקבוע בוודאות מהי המטרה אליה מיועדת הפצצה מעת המראתה וגילויה. כאשר מתגלית פצצה במסלול לווייני אפשר רק לקבוע את קו המטרות האפשריות, שהן מתחת למסלול, אך אין לדעת מראש היכן יפעל מנגנון הבלימה בפצצה, כדי להחזירה מן המסלול הלווייני. אי-ידיעה זו מקשה על האויב את הפעלת אמצעי-ההגנה הסבילים (אזעקה, פינוי), ואת הפעלת הטילים-נגד-טילים ארוכי-הטווח מסוג "ספרטן" (SPARTAN), שהם חלק ממערך נייק-X (NIKE-X).

ג. בעזרת פצצות לווייניות אפשר לתקוף מטרות גם מכיוון נגדי לכיוונים של טילים בליסטיים, שכן אפשר להטילן לעבר המטרה על גבי מסלול מעגלי, בכיוון הפוך לכיוון המטרה. דבר זה נוח במיוחד לגבי טילים רוסיים המכוונים למטרות בארה"ב, שכן המסלול המעגלי ההפוך במקרה זה הוא בכיוון סיבובו של כדור-הארץ, והכניסה למסלול המעגלי דורשת אנרגיה קטנה יותר (יחסית לכיוון הישיר, שהוא מסלול רטורגרדי).

אפשרות ההתקפה מכיוון הפוך תחייב את האמריקנים להפנות את אמצעי ההתראה וההגנה שלהם גם לעבר האוקיינוס השקט, שכן גם משם עשויות לבוא פצצות לווייניות. משמתגלה טיל בליסטי רגיל, על-ידי לוויין סיוור, והעיקוב אחריו מתחיל בעזרת מכ"מים ברשת BMEWS (Ballistic Missile Early Warning System), אפשר לחשב בדיוק את מסלולו ואת מטרתו, מרגע יציאתו מן האטמוספירה בשלבי-טיסתו הראשונים. דבר זה נותן שהות להפעיל טיל נגדי היוצא ופוגש אותו בגובה רם, הרחק מאיזור המטרה. כאמור, פעולה זו נעשית קשה יותר — אף כי לא בלתי-אפשרית — כאשר המסלול לווייני. בפיתוח מערכת "נייק X" מדובר גם על טיל נגדי נוסף, קצר-טווח, אשר יטפל באותם ראשים שהצליחו לחדור מבעד למסך הטילים ארוכי-הטווח. הטילים קצרי-הטווח מסוג "ספרינט" (SPRINT) מיועדים לתקיפת הראשים לאחר שאלה כבר האטו את מעופם בהיכנסם לאטמוספירה העליונה. גובה המפגש

תיאור המערכת ללויני ניווט (Tranet) של הצי האמריקני. לויניים במסלולים קוטביים בגובה כ-1000 ק"מ נותנים כיסוי של כל כדור-הארץ מדי 1½ שעות.



### לויני-ניווט

בשנת 1960 החל הצי האמריקני לשגר ולהכניס למסלול לויני-ניווט מיוחדים, ששידרו ב-56, 162, וכן ב-324 מגהרץ, ונערכו בהם ניסויים למציאת השיטה האופטימלית לשימוש בלויניים לצורכי ניווט. במהרה הסתבר כי למעשה המגבלה טמונה ביציבות מסלולו של הלויין, המשתנה במעט מהקפה להקפה עקב השפעות שונות. על התגליות החשובות בתקופה זו, תוך כדי חיפוש אחר מקור השגיאות, נמנית הטריאקסאליות של כדור הארץ, כלומר — כי כדור-הארץ אינו בצורת כדור פחוס בקטביו, כפי שסברו עד עתה, אלא אף קר-המשווה אינו מעגל מושלם, ויש בו אליפטיות המתבטאת בהבדל של כ-30 מטרים בין קוטרה הגדול לקוטרה הקטן.

לאחר מכן עמד הצי האמריקני להפעיל מערכת לויניים לניווט „טראנט“ (TRANET), שמרבית ביצועיה נשמרים בסודיות, מטעמי ביטחון, אך ידוע כי המדובר בסדרה בת 4 לויניים לפחות, בעלי מסלולים קוטביים, בגובה כ-1.000 ק"מ (ראה ציור 3). במערכת זו 8 נקודות-מעבר מעל לקר-המשווה, ואם מחלקים אותן בשווה לאורך קו המשווה, מקבלים חיתוך בכל 45 מעלות אורך, כלומר שום אניה לא תמצא במרחק העולה על 22.5 מעלות אורך מנקודת החיתוך של מסלול-לויין. דבר זה מאפשר כיסוי לצורכי ניווט של כל מקום בעולם אחת לשעה ומחצית השעה לערך (שעה ומחצה, בקירוב, הוא זמן הקפה אחת של לויין).

בנוסף לצפוף הקבוע לצורך פענוח אפקט דופלר משדרים לויני הניווט גם נתונים על תיקוני המסלול שלהם עצמם, המועברים אליהם בשידור מן הקרקע מדי עברם מעל ארה"ב, לפי מדידה מדויקת הנערכת שם.

שיטת הניווט בלויני הצי האמריקני מבוססת על מדידת השפעתו של אפקט דופלר, על שידור קבוע המשודר מן הלויין. אפקט זה מתבטא בהזזת התדר הנמדד, עקב מהירותו היחסית של הלויין ביחס למקלט שעל פני כדור-הארץ. התדר הנקלט,

גבוה מזה המשודר בהתקרב הלויין, ונמוך מזה המשודר עם התרחקותו. מדידה מדויקת של מהירות שינוי התדר בחלוף הלויין בקרבת המקלט, מאפשרת את קביעת מרחק חליפתו של הלויין. וברור כי כאשר ידוע בדיוק מסלול הלויין, ניתן לקבוע את מקום התחנה הקולטת על הארץ, על-פי מרחק זה והזמן שבו חלף הלויין, כדי לבטל את השפעת השגיאות במדידה הנובעות משבירת גלי הרדיו ביונוספירה, מודדים את אפקט דופלר בשני תדרים שונים.

המדידה באניה נערכת על-ידי ספירת תדר הדופלר בשלושה עד חמישה מרווחים בני 3 דקות, על-ידי חישוב הפרשי המרחקים נקבעים בדיוק רב האורך והרוחב הגיאוגרפי. בניסויים נמצא, כי אם נושאת האניה ציוד הפועל בתדר יחיד מקבלים דיוק בן 2 ק"מ במיקומה. אם נמצא בה ציוד משוכלל יותר, הכולל קליטה בשני תדרים לתיקון השבירה, מתקבל דיוק של 500 מטרים, המספיק גם לצרכים הצבאיים של צוללות „פולריס“. הסטיות הנותרות נובעות מאי-דיוקו של מסלול הלויין, ולא מן המכשירים, שדיוקם הוא כדי 100 מטרים.

### הצעות חדשות ללויני ניווט

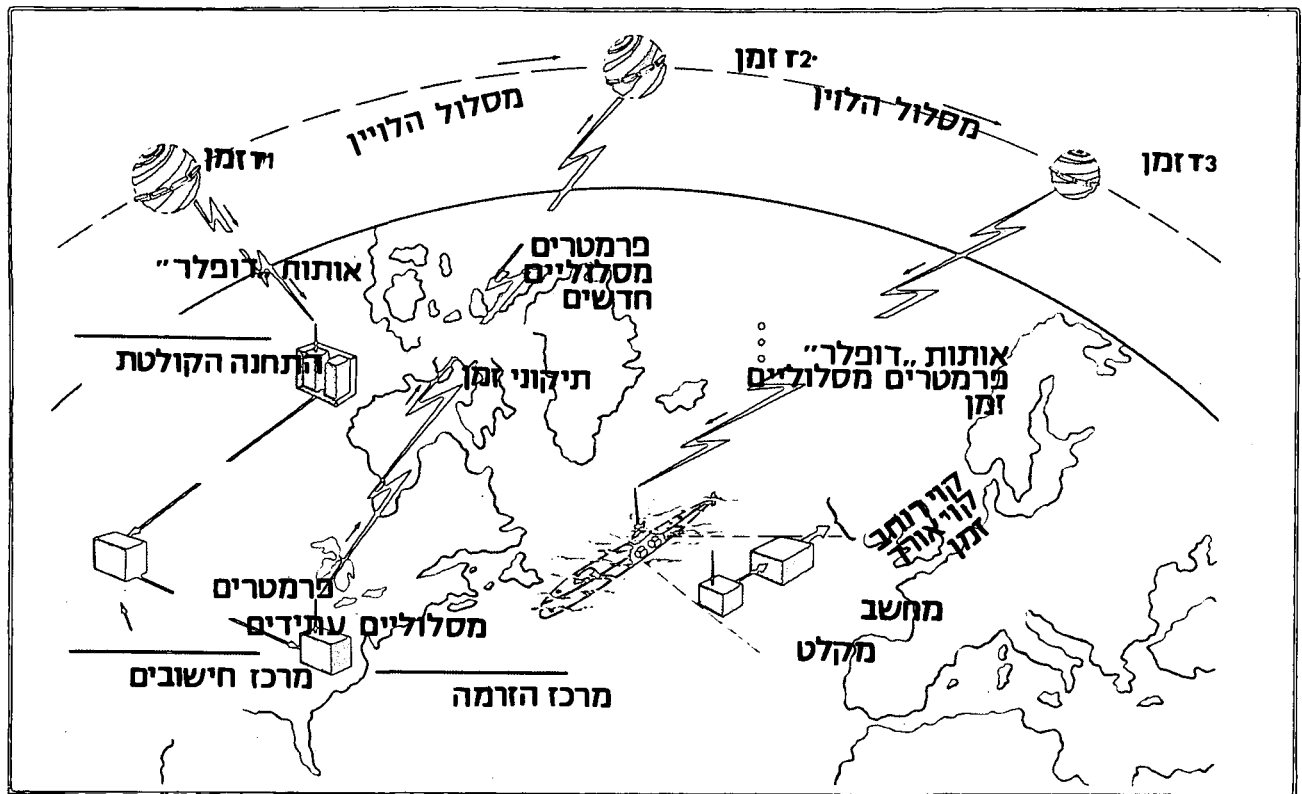
לאחרונה הועלו הצעות חדשות לניווט בלביים בעזרת לויניים סינכרוניים.

לויניים קבועים מעין אלה עשויים לשמש נקודות-שידור מצוינות לשידורי משואה (Beacon) לאניות בלב ים.

האפשרויות המוצעות לניצול לויניים „קבועים“ הן שתיים:

1. הלויין מהווה מקור לשידור רדיו בלבד, שאת הכיוון אליו מודדים מן האניות, ממש כשם שמודדים את גובה הכוכב בים בעזרת סקסטנט.

2. שלושה לויניים כאלה משמשים בסיס לרשת-ניווט היפר-בולית, בדומה לרשתות-הניווט ההיפרבוליות הקיימות המבר-ססות על תחנות-חוף משדרות (מערכות DECCA, LORAN וכדומה). בלויניים ניתן, כמובן, להשתמש בשידורים בתדר



ציור מס' 4

תפעול מערכות לווייני ניווט

גבוה מאוד, שאינו מושפע כמעט מבעיית הפרופגציה ממנה מושפעים שידוריהן של תחנות-החוף הנזכרות. כיום מדובר גם על מערכת לוויינים דו-תכליתיים לניווט ולתקשורת בשירות אניות ומטוסים בלב-ים.

### לווייני תקשורת

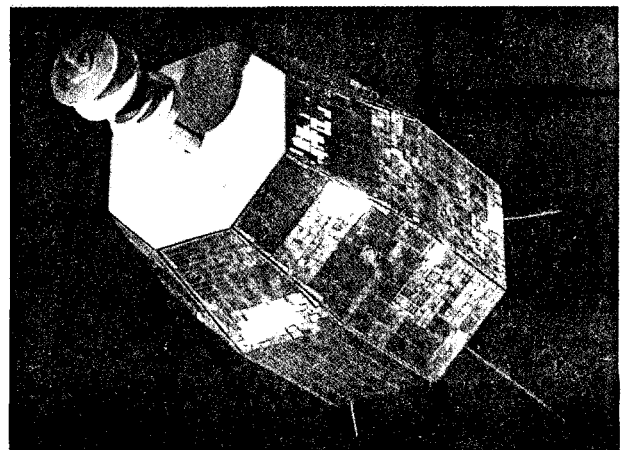
נושא זה נתון עתה בהתפתחות מהירה, ונראה כי הוא כשלעצמו יוכל, בעתיד הלא רחוק, להצדיק את כל ההשקעות שהושקעו עד כה בחקר החלל. התפתחותם של לווייני-התקשורת מהירה עד כדי כך שהיא נראית יוצאת-דופן אף בהשוואה להישגיו העצומים של המדע המודרני. עוד לפני עשר שנים היה השם „לוויין תקשורת“ כרוך בצלצל מוזר של מדע דמיוני — ואילו כיום פועלות לפחות 4 מערכות לווייני-תקשורת, המכילות כ-50 לוויינים פעילים, רובם במסלולים סינכרוניים. מלבד ארה"ב ובריה"מ מתכננות גם צרפת ובריטניה מערכות לווייני-תקשורת, ודיון בנושא מתנהל גם באיטליה, בגרמניה וביפן.

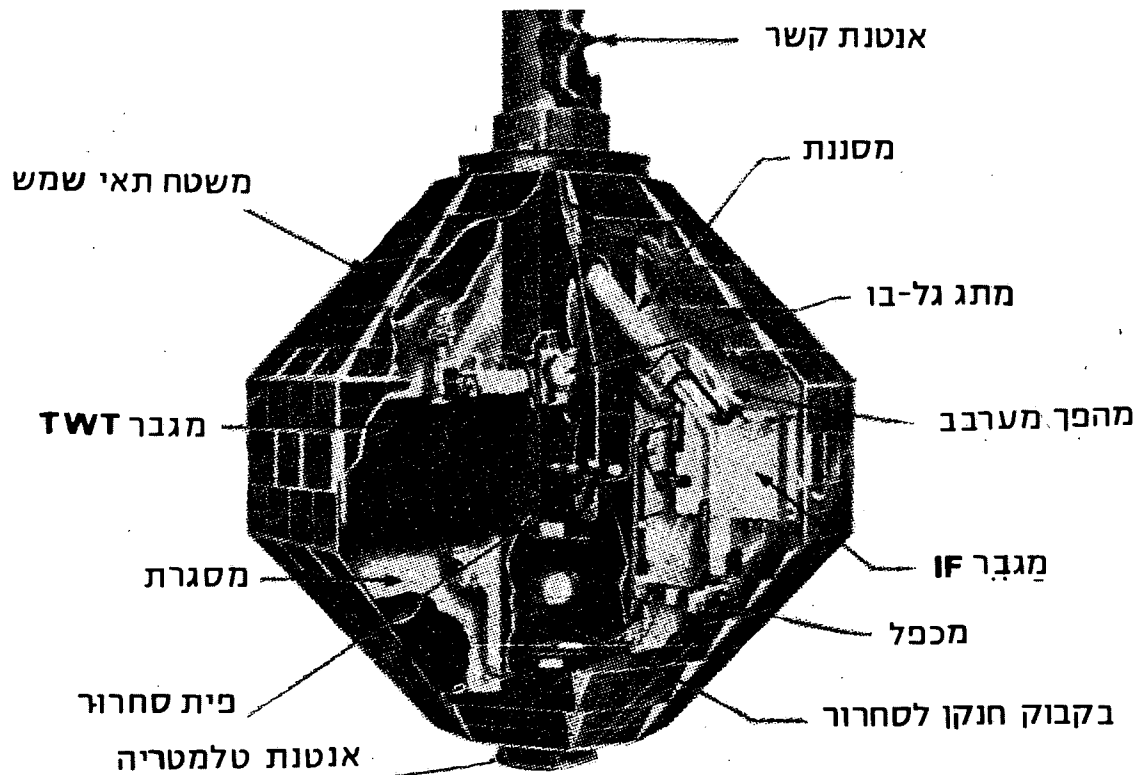
ייחודו של הלוויין בתחום השימוש כתחנת-ביניים לתקשורת טמון בהיותו בקו-ראיה לחלקים רבים של כדור-הארץ בעת ובעונה אחת, וביחוד בטווח בגובה רב מאוד, בו „רואה“ הוא כמעט את מחצית כדור-הארץ בעת ובעונה אחת. כידוע מתפשט טים גלי הרדיו בקוים ישרים, ותחנת-ממסר בלוויין יכולה איפוא לשמש לגישור בין מקומות רחוקים בכדור-הארץ.

ההתקדמות בטכנולוגיה של לווייני התקשורת היתה תלויה גם בהתפתחותן של רקטות ההמראה. לפני שנים אחדות עדיין ניטשו בעיתונות המקצועית ויכוחים רבים על השיטה הטובה ביותר ליישום לוויין לצורכי תקשורת. האפשרויות הטכניות הבסיסיות הן רבות:

ציור מס' 5

לייני ממסר (Relay)





לויין תקשורת מסוג IDCS של הצבא האמריקני. לויינים אלה שוגרו בקבוצות של 8 ו-15 מהם נמצאים כבר במסלול.

דיבור דו-צדדי, בגלל המגבלה של מהירות האור. 3. הגובה הדרוש מביא את הלויין לתוך שכבת הקרינה של ון-אלן, ולפיכך יש לבנותו כך שיעמוד בתנאי הקרינה הקשים יותר. כבר בסוף 1958 שודרה ברכה מפיו של הנשיא אייזנהאור, מוקלטת על סרט מגנטי, מלויין במסלול נמוך שכונה „סקור“. היה זה הניסיון הראשון לשידור דיבור מן החלל. ב-1962 כבר נמצא במסלול נמוך הלויין „ריילי“ של נאס״א, ומיד לאחריו — „טלסטאר“ של חברת הטלפונים „אטט“.

ב-1963 נעשו הניסויים הראשונים להעברת שידורי טלוויזיה מארה״ב לאירופה וחזרה בעזרת „טלסטאר“. ב-1960 נעשה ניסיון ראשון של שימוש בלויין פסיבי, „אקו-1“, שאינו אלא כדור מנופח שקוטרו 30 (!) מטרים מחומר פלסטי ומצופה בחומר מוליך. כדור זה נראה עד עצם היום הזה גם לעין הבלתי-מזויינת בהתנוצצו בשמש השוקעת. בינתיים הצטרף אליו ב-1964 כדור שני, „אקו-2“, שקוטרו 40 מטרים, ואף הוא נראה היטב לעין ככוכב בגודל 0, כלומר — ככוכבים הבהירים ביותר. כמעט ערב-ערב ניתן לראות „כוכב“ זה בישראל ב„שוטו“ בין הכוכבים ובעברו את מרבית כיפת הרקיע ב-15 דקות לערך. שני לויינים פסיביים אלה שימשו לניסויים בהעברת שידורי-רדיו מיבשת ליבשת. נעשה גם ניסיון נועז, שנודע בכינויו Project West-Ford, לשימוש בחגורת מחטים דקות מסביב לכדור-הארץ. גם רעיון זה כרוך בעיקרון לפיו פועל לויין-תקשורת פסיבי. חסרונן של השיטות הפסיביות עד כה הוא בהגבלת ההספק הניתן להעברה, ובכך גם הגבלת הכושר להעביר כמות-מידע גדולה.

עם התקדמות הטכנולוגיה הרקטית, ולאחר הצלחת מסעי החלל המאווישים הצליחו האמריקנים ב-1963 להכניס לויין-תקשורת

- א. לויינים פסיביים המשמשים כרפלקטורים.
  - ב. לויינים אקטיביים הנושאים מקלט, משדר, אנטנות וספקי-כוח.
  - ג. לויינים במסלול נמוך (500—2,000 ק״מ מעל הארץ).
  - ד. לויינים במסלול סינכרוני (בגובה 36,000 ק״מ).
  - ה. לויינים במסלול אליפטי או בגובה בינוני.
- נוספים לכך, כמובן, כל הציורופים בין אפשרויות א—ב לאפשר-ריות ג—ד—ה.

בתחילת התפתחותה של טכנולוגיית החלל לא היו בנמצא רקטות כדי לשגר באמצעותן לויינים כבדים ומשוכללים כל-כך לגובה רב. הלויינים הראשונים, ששוגרו לניסויי תקשורת, היו איפוא בעלי מסלול נמוך — כגון „ריילי“ או „טלסטאר“ שהם לויינים אקטיביים, או לוייני „אקו“, שהם לויינים פסיביים. חסרונם של לויינים בעלי מסלול נמוך טמון בראש וראשונה בכך שהם מכסים שטח קטן יחסית של פני כדור-הארץ, ולצורך כיסוי גלובלי יש, לפיכך, צורך במספר גדול של לויינים (בגובה 1,000 ק״מ — כ-10 במספר). כן נעים הלויינים הנמוכים במהירות רבה יותר, ועל תחנות-קרקע העוקבות אחריהם להפנות את האנטנות הענקיות שלהן ולסובבן בקצב מהיר, כדי שלא לאבד את הלויין מן הקרן, דבר המייקר את האנטנות, ואת מערכת בקרת הקרקע בכלל.

בלויינים הסינכרוניים לא נמצא את שני החסרונות הללו של הלויינים הנמוכים (כיסוי מוגבל, מהירות גבוהה יחסית), ואפשר לקלטם באנטנות קבועות למעשה, המכוונות לנקודה מסויימת בשמים. יש להם, לעומת זאת מגרעות אחרות: 1. קשה יותר להכניסם למסלול, עקב הגובה הרב — ולכן מחירים גבוהים יותר. 2. נגרם פיגור-זמן של כשתי עשיריות-השניה בקשר-



מן הקרקע, ומאפשר את הפעלתו הזדונית על-ידי האויב. ב. מבחינת המהימנות — אם מתקלקל לויין אחד או שניים אין הרעה ניכרת בסיכויי התקשורת, ונותר זמן די הצורך לשיגור לויין חדש במקום המקולקל. חישובו, למשל, כי הקשר וויינגטון-לונדון אפשרי 95.8% מן הזמן במערכת של 24 לויינים, ובמשך 92.1% מן הזמן במערכת של 16 לויינים.

משקלם של לוייני IDCS הוא כ-50 ק"ג בלבד, ובהם מקלט בתדר 8000 מגהרץ, ומשדר בתדר 7275 מגהרץ. הספק השידור מן הלויין הוא 3 ווט בלבד. מערכת הלויינים ובה 27 תחנות-קרקע ניידות ו-6 תחנות באניות עלתה לאמריקנים בסך-הכל כ-150 מיליון דולר.

לתחנות-הקרקע הגדולות יותר, אנטנות-צלחת שקוטרן כ-12 מטרים ושבעזרתן ניתן להעביר דרך הלויין 2 שיחות טלפון או 690 ערוצי טלקס. משקל התחנה — כ-50 טונות. משקל התחנות הקטנות יותר כ-10 טונות. הן ניתנות להובלה אווירית, וקוטר האנטנה שלהן — 4.5 מטרים. אפשר להעביר בהן רק שיחת-טלפון אחת באיכות נמוכה, או 100 ערוצי טלקס. בתחנות-הקשר באניות משמשות אנטנות בקוטר 2 מטרים בלבד, ומשום כך אפשר להעביר באמצעותן רק 13 ערוצי טלקס. כל התחנות הללו היו אמורות להיכנס לפעולה עד פברואר 1968.

לדעת מהנדסי הצבא האמריקני מבטיחה רשת-תקשורת ראשונית זו קשר מהימן בין ארצות-הברית לכוחותיה הצבאיים והימיים בכל רחבי תבל. קשר זה אינו תלוי בתנאי היונוספירה כמו קשר הת"ג הבינלאומי הרגיל, ואין האויב מסוגל לשבשו. שני יתרונות חשובים אלה מצדיקים, כמובן, את ההוצאות הגדולות והניסויים המסובכים הכרוכים בפיתוחו.

גם בריטניה החלה בפיתוח תחנות-קשר ניידות לשימוש בלויי-ינים צבאיים, וכן בפיתוח לויין-תקשורת צבאי, אשר יוכנס למסלול בעזרת ארצות-הברית, תוך שימוש ברקטות אמריקניות. לבריטניה חשוב הלויין לקיום הקשר בדרך יעילה זו עם בעלות-בריתה בדומיניונים הבריטיים ועם אניות הצי שלה.

אקטיבי ראשון למסלול סינכרוני — הריהו „סינקום“, שהוצב על-ידי פקודת מן הקרקע מעל לאוקינוס השקט, בקו-המשוה. בלויין זה, שהוא קטן יחסית (משקלו כ-40 ק"ג), נוסתה טכניקה זו בהצלחה גדולה, ונפתרו בעיות-היסוד בשימוש בלויינים סינכרוניים — ובעיקר בעיית הייצוב במסלול ובעיית הפיגור בשידור, שמקורו במהירות התפשטותו של האור. הצלחתו של „סינקום“ פתחה את הדרך לתכניות „קוסמאט“ ו„אינטלאסט“, שהם הארגונים הבינלאומיים המפעילים את מערכת לוייני-התקשורת האזרחיים המודרניים.

הלויינים לתקשורת צבאית כלל-עולמית נמצאים עתה בפיתוח מזורו בארצות-הברית, בה הופעלה מערכת-תקשורת ראשונית, בת 15 לויינים אקטיביים, במסלולים „כמעט סינכרוניים“, שתקופתם 22.5 שעות. כינוי המערכת — IDCS Initial Defense Communication Satellite Program של — תכנית לוייני-תקשורת להגנה ראשונית (ראה ציור 4).

במערכת צבאית ראשונית זו הוכנסו למסלול פעמיים, 8 לויינים בבת אחת, ופרט ללויין אחד, שיועד לצרכי ניסוי בתחום אחר, פועלים עתה 15 לויינים מסוג זה. עקב מסלולם ה„כמעט סינכרוני“, הריהם זזים ביחס לכדור-הארץ במהירות כ-30° ביממה (ממערב למזרח), אך לא כולם במהירות שוה. מצב הלויינים בכל רגע ביחס לכדור-הארץ הוא כעין פיזור אקראי לאורך קו-המשוה. אם נביא בחשבון כי לאמיתו של דבר נחוצים רק 3 לויינים, הממוקמים נכונה במרחק 120° זה מזה, כדי „לכסות“ את כל פני הארץ (פרט לקטבים), הנה אותם 15 לויינים המפוזרים באורח אקראי נותנים סיכוי מצויין כי בכל עת ייראה מכל מקום על-פני כדור-הארץ לפחות אחד מהם, ובוודאי הרבה למעלה מזה. בינתיים הוכנסו עוד כ-20 לויינים מסוג זה למסלול „כמעט סינכרוני“.

מדוע נבחר מסלול „כמעט סינכרוני“ לשימוש צבאי? התשובה לכך כפולה: א. הרצון למנוע את הסיבוך הנובע ממיקום לויין סינכרוני באורח מדוייק ושמירה על מיקומו בעזרת מערכת סילונים, דבר שהיה מצריך הקמת מערכת פיקוד ובקרה

