

נדרשה מערכת ניווט בעלת דיוק רב אשר תוכל לפעול בכל תנאי מזג אוויר. אז הוחל בפיתוח „מערכת ניווט-רדיו לטווח ארוך“ Long-range radio navi- — LORAN gation על פי רעיון שהועלה במעבדות המ- כון הטכנולוגי של מסצ'וסטס בארה"ב.

מערכות ניווט היפרבוליות

כדי למצוא את מצבו של גוף נע ביחס לעצם על פני כדור הארץ, דרוש אפיק קישור בין הגוף לבין כדור הארץ. בשיטות ניווט אס- טרונומיות, כגון הניווט באמצעות סקסטנט, הקישור נעשה באמצעות האופק. בניווט אינרציאלי נעשה הקישור על ידי שימוש בגירוסקופ ואפיק הקישור הוא כיוון כוח המשיכה של כדור הארץ. שתי מערכות אלה הן מערכות עצמיות, כלומר מערכות, בהן כל הציוד המשתתף במדידה מותקן בגוף המנווט. מגבלתן של מערכות אלה היא שדיוקן נמוך יחסית ושחלקן אינו מאפשר ניווט בכל תנאי מזג אוויר. בסוג אחר של מערכות ניווט, מערכות עם אות ייחוס חיצוני, הקישור לכדור הארץ נעשה באמצעות גלים, בדרך כלל גלי רדיו, המשודרים ממתקנים שמקומם ידוע. גלי הרדיו מתפשטים בחלל במהירות של כ- 300,000 ק"מ לשנייה ובמהירות זו עובר גל הרדיו מרחק של מייל ימי בזמן של כ-6 מיליוניות השנייה (מיקרושנייה).

נניח כי ברגע מסוים נשדר אות ממשרד א' (ראה מרשם 1). הוא יגיע לנקודה 1 הנמ- צאת בריחוק של 150 מייל ימיים ממנו, אחר 900 מיקרושנייה ($150 \times 6 = 900$). אם אחר 1800 מיקרושניות משידור האות הראשון נשדר אות ממשרד ב', הוא יגיע לנקודה 1 לאחר 1200 מיקרושניות נוספות, כלומר 2100 מיקרושניות אחר קליטת האות שש- דר ממשרד א' ($2100 = 900 + 1200$). נעבור עתה לנקודה 2. האות של משרד א' יעבור את המרחק של 200 מייל ב-1200 מיקרושניה ואילו האות של משרד ב' יגיע לנקודה 2 גם הוא בפיגור של 2100 מיקרו- שניות אחר האות ממשרד א' ($1800 + 250 \times 6 = 2100$). הקו המחבר את כל הנקו- דות אשר יקלטו את אותות שתי התחנות בהפרש של 2100 מיקרושניה נקרא בשם היפרבולה וניתן לצייר עבור כל שתי תחנות משפחת היפרבולות אשר כל אחת מהן תאופיין בהפרש זמן נתון בין מועדי הקליטה של שני האותות. קוי המיקום ההיפרבוליים קבועים ונקבעים אך ורק על ידי מיקום תחנות המשדרים. אם נפעיל משרד שלישי, אשר גם הוא ישדר בהפרש זמן נתון אחר משרד א', נקבל גם עבור הזוג א' ו-ג סדרה של קוי מיקום היפרבוליים. זהו העי- קרון הבסיסי של כל מערכת ניווט היפר- בולית.

מערכת „לוראן“

מערכת „לוראן“ (ראה מרשם 2) מורכבת משלושה משדרים: משרד-אב (Master) ושני משרדי-משנה (Slaves). האותות המש-



„לוראן“ מערכת ניווט חדשה

אל"מ י. בעל-שם

שוכללו מאז לאין ערוך, ממשיכים עדיין לציין מהירותן של ספינות ב„קשר“, השווה למייל ימי בשעה*.

דיוק הניווט שופר במידה ניכרת במאה ה-18 עם פיתוחם של הסקסטנט והכרונומטר. הסקסטנט איפשר מדידת הזווית שבין קו האופק לבין גורמים שמיימיים. כיוון שכוכב הצפון נמצא בזווית מעל האופק השווה לקו הרוחב, ניתן היה לימאי לקבוע את קו הרו- חב בו הוא נמצא על ידי מדידת הזווית שבין קו האופק לבין כוכב הצפון. לשם מדידת קו האורך נסתייעו הימאים בכרונומטר, אשר איפשר לקבוע את מיקומם היחסי של גרמי השמיים כלפי האדמה. עתה יכול היה הימאי להפליג לטווחים ארוכים, תוך ביטחון לניווט דרכו למחוז הנווט ושיוכל לחזור אל נקודת המוצא שלו. בסוף המאה ה-19 ובמאה ה-20 שופרו אמצעי הניווט, תוך שימוש במצפן הגירוסקופי, בשידור אותות זמן ברדיו, במגלי כיוון אלקטרומגנטיים, במכ"מ ועוד. בשנים האחרונות הוחל בשימוש בלוויינים למטרות ניווט.

עם תחילת מלחמת העולם השנייה, הכירו כל הצדדים הלוחמים בצורך באמצעי ניווט מהימן יותר מאלה שהיו מצויים עד אז, הן לטיסות ארוכות-טווח והן לצרכי ניווט ימי ולעיתים גם יבשתי (במדבריות אפריקה ניווטו הכוחות היבשתיים בניווט אסטרונ- מי — כמו בים).

* מייל ימי (=1852 מ') שווה לאורך קשת בזווית של דקה אחת ($1/60$ של מעלה). על קו המשווה ועל כל קו אורך.

מלחמות מודרניות מאופיינות, בין היתר, בטווחי הלחימה הארוכים, במהירות הגבוהה של תנועת הכוחות ובשיתוף הפעולה ההדוק בין זרועות האוויר, הים והיבשה. כל אלה מחייבים שכל הכוחות המשתתפים בלחימה יוכלו לניווט את דרכם ולאכן את מיקומם במהירות רבה ובדיוק רב. אחד מאמצעי הניווט האלקטרומגנטיים הטקטיים הנפוצים כיום בעולם הוא מערכת הניווט ההיפרבו- לית מסוג „לוראן“.

התפתחות אמצעי הניווט

בתקופה הקדומה, נזקקו רק הימאים לאמ- צעי ניווט כדי למצוא את דרכם. ניווטה של ספינה בימים נחשב אמנות יותר מאשר למדע ורק ימאים בודדים העזו להסתכן ולשוט אל מעבר לטווח הראיה של סימני חוף מוכרים. היו אלה הסינים שגילו, במאה הראשונה לספ"ג לערך, כי גוש של עפרת ברזל הצף על פני המים מצביע תמיד לכיוון צפון. המצפנים אשר פותחו כתוצאה מגילוי זה הובאו למערב על ידי הערבים, אך רק במאה ה-12 החלו ימאי אירופה להשתמש במצפן במסעותיהם. המצפן איפשר לקבוע את כיוון הנסיעה. כדי למדוד את מהירות השייט השתמשו ב„קורה“ ובשעון חול. ה„קורה“ היא מוט המחובר לחבל, שעליו סומנו קש- רים ברווחים קבועים. כאשר יזרק המוט לים מירכתי האניה, תהיה מהירות התרת החבל, הנמדדת באמצעות שעון החול ועל ידי ספי- רת מספר הקשרים, יחסית למהירותה של הספינה. למרות שאמצעי מדידת המהירות

העולם השני ומיד לאחריה (Loran A) פעלו בתחום תדרים של 2 מגהרץ ושדרו אותות שמשכן היה 40 מיקרושנייה. מערכות אלה התאימו בעיקר לניווט ימי. כל מערכת איפשרה ניווט בדיוק של 700 עד 900 מייל ימי (1300 עד 1700 ק"מ). כדי לתת כיסוי מתאים לכל נתיבי השיט הוקמו קבוצות משדרים רבות, שנבדלו זו מזו בצירופי האותות ששדרו. בסוף מלחמת העולם השנייה פעלו כ-70 משדרי לוראן, אשר כיסו כשליש מפני כדור הארץ. מגבלותיהן העיקריות של מערכות אלה נבעו מהדיוק הנמוך של האיכון שנתקבל, שהיה דיוק של 1 עד 5 מייל ימיים ומהחזרת הגלים משכבות היונוספירה (ראה מרשם 3). החזרות אלה גרמו לכך שגל אחד באותו תדר נקלט מספר פעמים, בהפרשי זמן שונים — פעם כשהוא מתפשט כגל קרקע ופעם כשהוא מוחזר על ידי שכבות הרקיע. בשנות החמישים פותחה מערכת לוראן חד-שה (Loran C) הפועלת בתחום תדרים של 100 קילוהרץ. גלי הרדיו בתחום זה של תדרים מתפשטים כמעט רק כגלי קרקע ובעיות ההחזרה משכבות היונוספירה מועטות ביותר. הטווח של מערכת זו גדל ל-1000 עד 1500 מייל ימיים (1850 עד 2800 ק"מ) ודיוק האיכון שופר עד לשני מייל לכל היותר. אולם מערכת זו מחייבת משדרים רבי עצמה עם עמודי אנטנה שגבהם 200 עד 400 מ'. ציוד זה ניתן למתקן רק במתקנים נייחים והוא מותאם בעיקר לסייע לתנועה האווירית והימית. בארה"ב הוחל לאחרונה בהסבת מערכות לוראן מהסוג הישן (Loran A) למערכות מהסוג החדש (Loran C) ובשנים 1977 עד 1979 מתכננים להקים חמש תחנות חדשות בחוף המערבי ועוד שש תחנות במפרץ מסצ'וסט.

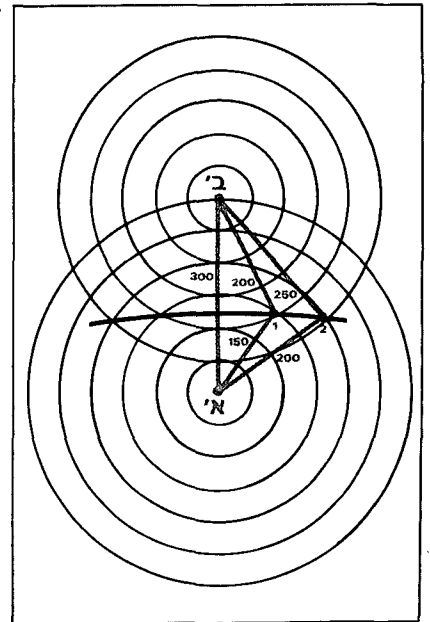
מצב מוצק לבניית המשדרים והמקלטים ועל ניצול טכנולוגיות מחשבויות. משדרי מערכת זו הם יבילים, בעלי הספק של 3 קילוואט ואילו תרני האנטנה הם בגובה של 100 מטר בלבד. מערכת זו הקרויה Loran C/D נועדה בעיקר לצרכי כוחות היבשה ונדרש ממנה לאפשר איכון בדיוק של 200 מטר. אחד מיעודיה של מערכת לוראן הטקטית היה לצרכי הפצצה וסיוע אוויר לכוחות יבשה ועל כן היא תוכננה כמערכת תואמת למערכת הנייחת (Loran C). המטוס מנווט את דרכו באמצעות המערכת הנייחת ובהתקרבו למטרה הוא עובר למערכת הטקטית הנבדלת מהנייחת בקצב שידוריה (מערכת Loran C משדרת קבוצות של 8 דפקים ואילו המערכת הטקטית משדרת קבוצות של 16 דפקים). המערכת הטקטית הופעלה על ידי האמריקאים במלחמת וייטנאם ונראה כי כמה מהמשדרים והמקלטים נפלו בידי הסובייטים. עצמתם הנמוכה יחסית של משדרי המערכת הטקטית והעובדה כי ציוד מסוג זה נמצא בידי שני הצדדים עושים אותה נוחה לחסימה וצבא ארה"ב כבר פירסם כי בתקופה האחרונה מערכות הלוראן שלו באירופה מופרעות בהפרעות מכוונות. קיימת מגמה לתחכם את המערכות כך שתהיינה פחות רגישות להפרעות מכוונות.

סיכום

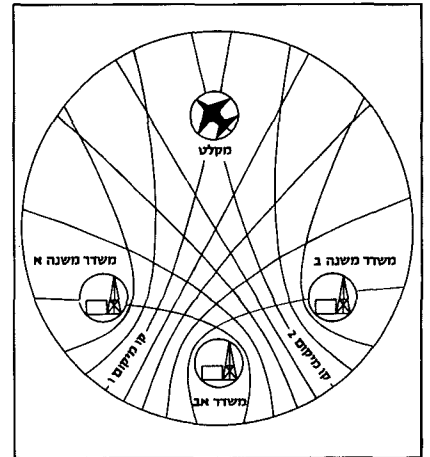
מערכת הניווט ההיפרבולית מסוג לוראן היא מערכת המאפשרת ניווט ואיכון באוויר, בים וביבשה בדיוק גבוה יחסית. קיימות מערכות ניווט היפרבוליות נוספות בעלות דיוקים נמוכים יותר, כגון מערכת „אומגה“ (OMEGA) הפועלת בתדר נמוך מאד ולכן משמשת גם לצרכי ניווט תת-ימיים ומערכת „דקה“ (DECCA) המשמשת בעיקר לניווט במקורי ים ונמלים. כיום עוסקים, בעיקר בארה"ב, בפיתוח מערכות ניווט בעלות תכונות משופרות, המבוססות על שימוש בלוויינים.

מערכת לוראן טקטית

בתחילת שנות ה-70 הוחל בפיתוח מערכת לוראן טקטית, המבוססת על שימוש ברכיבי

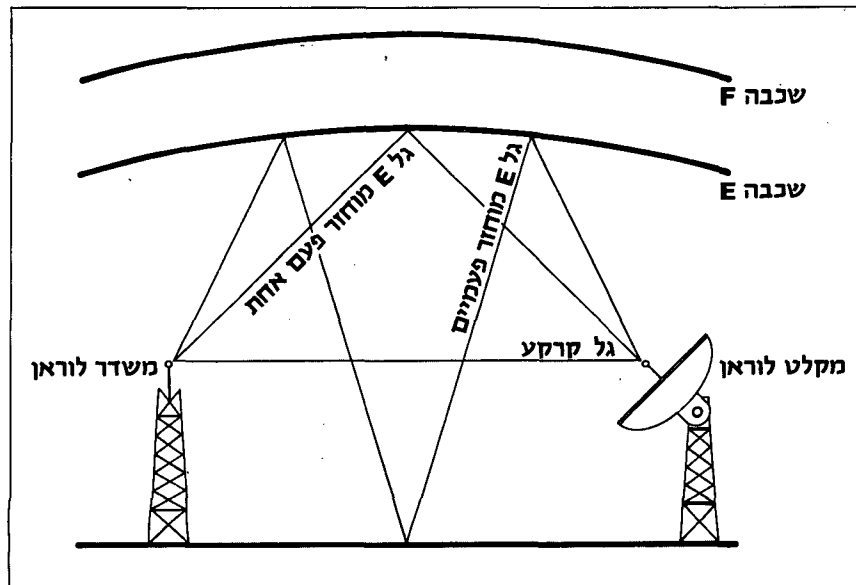


מרשם 1



מרשם 2

מרשם 3



דרים על-ידי משדרי המשנה זהים לאותות משדר האב אך משודרים בהפרש זמן קבוע אחר שידור האות ממשדר האב. הפרש זמן זה נקרא בשם „השהיית הקידוד“ (Coding delay). מעשית נעשה הדבר על ידי כך שהאות הנשדר על ידי משדר האב נקלט בתחנות משדרי המשנה, מושהה להשלמת השהיית הקידוד שנקבעה למערכת ואז הוא משודר חזרה על ידי משדר המשנה. במטוס או בספינה נמצא מקלט, הקולט את האותות של שלוש המשדרים. המקלטים הראשיים שונים חייבו עריכת חישובים על ידי המפעיל לצרכי איכון מקומו, תוך שימוש במפות וגרפים מוכנים מראש. במקלטים חדישים יותר שפותחו בשנים האחרונות משתמשים במיקרומחשבים לחישוב נקודת החיתוך של שתי ההיפרבולות ולהשלכתה על פני מפה גיאוגרפית ואז מוצגים נתוני האיכון בצורת מספרים על פני הצג או אף מועברים, אם יש צורך, למחשב הספינה או כלי הטיס. מערכות הלוראן שנבנו בתקופת מלחמת