

חשיבות כיוול מקלטי GPS

מאת: ד"ר נדיה גולדובסקי, ד"ר איליה קוסלמן
 המעבדה הלאומית לפיזיקה, בנין דנציגר א', האוניברסיטה העברית, גבעת-רם, ירושלים 91904,
 טל': 02-6536534, פקס: 02-6520797, e-mail: nadya.go@moital.gov.il

תקציר

בזמן האחרון הפך מקלט ה-GPS למכשיר מאוד יישומי בתחומים שונים כגון: תעשייה, ניווט, גיאודזיה, תחזית מזג האוויר, מטרולוגיה של הזמן והתדר. אי-וודאות בתוצאות המדידה של מקלטי GPS מסחריים משתנה בתחום רחב מ- 10^{-11} עד 10^{-13} לתדר, ו מ-200 ns עד 50 ns לזמן. בעקבות העיצוב השונה ייתכן ששני מכשירי GPS שונים נותנים תוצאות שונות אפילו אם הם נמצאים באותו מקום ומחוברים לאותה אנטנה. לכן לא כל מקלט GPS יכול לשמש כסטנדרט לתדר וזמן וכיוולו חשוב.

מבוא

מערכת לוויינית לניווט (GPS) ידועה כאמצעי להתמצאות ולהעברת זמן ותדר בעל דיוק גבוה. חברות רבות מוכרות היום מקלטי GPS והרבה יצרנים מצהירים שמוצרם משמש כסטנדרט לתדר וזמן. התכונות המטרולוגיות של מקלטי GPS תלויות מאוד בעיצובם וביישומם. קיימים כמה סוגי מקלטי GPS : מקלטי GPS מסחריים המיועדים לניווט מטוסים, אוניות ומכוניות [1], וכאלה המיועדים למטרולוגיה של הזמן והתדר [2].

מקלטי ה-GPS המיועדים לניווט נותנים קואורדינטות (Z, Y, X) של מיקומם על פני כדור הארץ. הדיוק של מקלטים אלה, המשמשים לניווט מטוסים, נדרש בתחום 100 – 10 m [1]. במקלטי ה-GPS הדומים לאלה משתמשים במכוניות לניווט בנסיעה וגם להעברת נתוני התמצאות למשטרה במקרה גניבה. מקלטים יותר מדויקים משתמשים בגיאודזיה מאפשרים התמצאות עד כמה סנטימטרים.

מקלטי GPS המיועדים למדידות הזמן מספקים אות השוואתי - אימפולס אחד בשניה (1 pps) שמשמש לסינכרוניזציה זמן בכל מקום בעולם ומספק יחוס זמן לטלקומוניקציה ולשרת אינטרנט. רוב המקלטים מסוג זה משתמשים בקוד מיוחד שנקרא קוד C/A שהוא משמש לסינכרוניזציה זמן עם דיוק נמוך יחסית. בנוסף לקוד C/A קיים קוד מדויק - קוד P שמשמש לסינכרוניזציה זמן בעלת דיוק גבוה יותר. הקוד C/A משודר בתדר 1.57542 GHz שמסמנים אותו בטרמינולוגיה GPS כ-L1. הקוד P משודר בשני תדרים: אחד L1 והשני 1.2276 GHz, שמסמנים אותו כ-L2.

קיים גם סוג שלישי של מקלטי GPS הידוע כמתנד מכוון באמצעות מערכת לוויינית GPS [3]. סוג זה מספק תדירויות סטנדרטיות של 5 MHz ו/ או 10 MHz, ולפעמים תדירויות של 1.544 MHz או

2.048 MHz המשתמשים בהן לטלקומוניקציה. הדרישה לאי-וודאות בתחום הטלקומוניקציה היא ברמה 10^{-11} על מנת להשיג את האיכות לשירות לקוחות הגבוהה ביותר, לטובת הלקוחות [2,4].

בשני הסוגים הנוספים של מקלטי GPS משתמשים למדידות יותר מדויקות: למדידות באופן השקפה משותפת (common-view), ולמדידות של פזה נושאת (carrier-phase) [2]. מדידות בהשקפה משותפת מתבצעות בשתי מעבדות שונות שיכולות להתמקם רחוק זו מזו ומודדות אותו אות מאותו לוויין באופן בו-זמני. לאחר המדידות המעבדות מחליפות ביניהן את תוצאות המדידות. מקלט GPS מסוג זה מהווה מערכת מורכבת שכוללת מקלט GPS סטנדרטי למדידות הזמן, מיקרו מעבד עם חמרה ותוכנה שלו, ומערכת קליטה. מקלט GPS מסוג זה מאפשר לבצע מדידות עם סדרת הלוויינים אחד אחרי השני ולאסוף נתונים לעיבוד עקבי. מקלטים מסוג זה משמשים להשוואות בינלאומיות בין סטנדרטים לאומיים במדינות שונות.

מקלט GPS מסוג פזה נושאת משמש בגיאודזיה, גיאולוגיה, בשירות תחזית מזג האוויר, ובעריכת מפות של כדור הארץ. מקלט מסוג זה יקר יחסית ליתר הסוגים. מקלט זה מבצע מדידות פזה נושאת של L1 ו/או L2 וגם משתמש בקוד מדויק P. דיוק מקלט מסוג זה הוא גבוה ביותר מכל המקלטי ה-GPS, אי-וודאות בהתמצאות מהווה רק כמה סנטימטרים או אפילו כמה מילימטרים בלבד [2].

למרות שמערכת לווייני GPS מטופלת ומבוקרת על ידי מכון לאומי לסטנדרטים וטכנולוגיה בארצות הברית (NIST, USA), לא בכל מקלט GPS ניתן להשתמש כסטנדרט עקבי לתדר וזמן. במאמר אנו דנים בחשיבות של כיוול מקלטי GPS וגם שיטת הכיוול שלהם במעבדה הלאומית לפיזיקה בישראל – מל"פ (INPL).

חשיבות הכיוול של מקלטי ה-GPS

קיימים שני איפיונים עיקריים שמשותפים לכל מקלט ה-GPS ומגדירים את יציבותם ודיוקם: (1) איכות המתנד הפנימי של ה-GPS, (2) איכות התוכנה המעבדת את הנתונים המתקבלים מהלוויינים [3].

רוב מקלטי GPS מאופיינים ע"י אי-וודאות של התדר לטווח זמן קצר (1 - 1000 s) שהיא גדולה יחסית (10^{-10} - 10^{-11}) [4]. דגמי ה-GPS עם יציבות מקסימלית בנויים על מתנד קוורץ עם ערך מיוצב של טמפרטורה או מתנד אטומי מסוג תא-Rb שהתדר שלהם מתואם לתדר המתקבל מהמערכת הלוויינית GPS (GPS disciplined oscillator). יציבות התדר של מקלטי ה-GPS אלו פחות טובה בהשוואה ליציבות של השעון האטומי Cs. שני שעונים מסוג זה נמצאים ברשות המל"פ ומהווים סטנדרט לאומי ישראלי של זמן ותדר [5-8].

ישנו מספר גדול של מקלטי ה-GPS שתדר המתנד הפנימי שלהם לא מתואם לתדר המתקבל ממערכת לוינית GPS. כדי לתאם את התדרים קודם מחלקים את התדר של קוורץ לתדר נמוך 1 pps ואז התדר הנמוך הזה מתואם לאימפולס 1 pps המתקבל מהמערכת לוינית. כתוצאה מכך היציבות לטווח זמן קצר עבור מקלטים מסוג זה נמוכה מאוד (בסביבות 10^{-9}).

רוב מקלטי GPS בוחרים באופן אוטומטי בלוינים לצורכי השוואות הזמן. אומנם האלגוריתמים המשמשים לבחירת לוינים שונים זה מזה במקלטים שונים. לכל מקלט קיים סף רגישות שלו שלפיו הוא מחליט להקליט, או להתעלם מהלווין. מקלטים שונים מקליטים מספר שונה של לוינים. יש כאלה שמקליטים רק לווין אחד או כמה לוינים (עד 4), ויש כאלה שמקליטים 12 לוינים על מנת לספק נתונים להגדרת מקום וזמן. בגלל נסיבות אלה ייתכן ששני סוגי מקלטים GPS שונים נותנים תוצאות שונות אפילו אם הם נמצאים באותו מקום ומחוברים לאותה אנטנה.

מכיוון שכל לווין נמצא במקום שאפשר להשיג אותו רק זמן מוגבל, מקלטי ה-GPS צריכים לפרקים להחליף לוינים בקבוצה שמתחשבת להגדרת הזמן והתדר מדויק. לעיתים קרובות החלפת לוינים בקבוצה גורמת לשינויים בתדר סופי שמתקבל על ידי מקלט GPS.

מקלטי ה-GPS השונים מתחשבים בשיבושים של שידורי תקשורת בצורה שונה. לאחדים יש תוכנה שמתעלמת מהשיבושים, ולאחרים אין תוכנה כזאת. יתרה מזה, יש תנאים שבהם כל מקלט GPS יכול לאבד את המעקב אחרי הלווין, לדוגמה בשל שיבושים חריפים ביונוספירה.

אי-וודאות התדר של רוב מקלטי ה-GPS המסחריים משתנת בתחום רחב מ- 10^{-11} עד 10^{-13} לאורך הזמן של שבועיים [4]. אי-וודאות התדר של שעון Cs של מל"פ מהווה ערך 10^{-14} גם לאורך הזמן של שבועיים. דיוק כזה גבוה מאפשר לבצע כיול של מקלטי ה-GPS מול השעון האטומי Cs של מל"פ.

דרישות עקיבות למדידות בתחום זמן ותדר

לפי המילון הבינלאומי [9] עקיבות היא תכונה של תוצאת מדידה, שבאמצעותה ניתן לייחס את תוצאת המדידה לסטנדרט מדידה מתאים, בד"כ סטנדרט מדידה בינלאומי, או לאומי, דרך שרשרת רציפה של כיולים או השוואות בעלות אותן אי-וודאויות. השרשרת הרציפה של השוואות (כיולים) נקראת שרשרת עקיבות.

שרשרת עקיבות למדידות בתחום הזמן והתדר מוצגת בתרשים מס' 1, [4]. שרשרת עקיבות מתחילה ממכשיר המדידה. קשר בחוליה A (ראה תרשים 1) מתבצע בין מכשיר המדידה לבין מקלט ה-GPS

של הלקוח. מקלט GPS מקליט אות של מערכת לוויינית (GPS-signal) שניתן להשתמש אותו לצורך כיוול מכשירי המדידה שונים.

אי-וודאות של חוליה A כוללת מרכיבים הבאים: אי-וודאות מקלט ה-GPS עצמו, אי-וודאות של שעונים הנמצאים בלוויינים, אי-וודאות בזמן העיכוב באטמוספירה, שגיאות בחישובים של מסלולי הלוויינים, אי-וודאות הכיוול, וגם כן שגיאות בהשפעות של הגורם האנושי. אי-וודאות של מקלט ה-GPS עצמו כוללת רעש אלקטרוני, אי-יציבות של מתנד פנימי, שגיאות תוכנה המעבדת נתונים המתקבלים מהלוויינים, ואי-וודאות בזמן עיכוב באנטנה, בקבלים של אנטנה ובמקלט ה-GPS.

מטרות של הכיוול מקלטי ה-GPS הן: (1) להגדיר את האי-וודאויות של התדרים וסטייתם מערך הנומינלי, (2) סטיית שניה אחת שלהם מהשניה אחת בסולם SI, (3) סטיית סקאלה זמן שלהם מהסקאלה של זמן הבינלאומי UTC. סטיית סקאלה הזמן של המקלט ה-GPS מהסקאלה UTC יכולה להיות יחסית גדולה (כמה מיקרו שניות) והיא תלויה בזמן העיכוב במקלט ה-GPS, באנטנה של ה-GPS, בקבלים של האנטנה, וגם בשגיאות החישוב של זמן העיכוב באטמוספירה. לכן כיוול מקלטי ה-GPS מול אב המידה של השניה (שהוא שעון אטומי Cs עקיב ל-UTC) הוא חשוב מאוד.

זמן יקום המתואם UTC המהווה סטנדרט בינלאומי לזמן מחושב על ידי המשרד הבינלאומי למשקלות ולמידות בפריס (BIPM). סקאלת הזמן UTC היא סקאלה תיאורטית ווירטואלית. מערכת לוויינית לניווט (GPS) משתמשת בסקאלת זמן ריאלית שנקראה זמן-GPS (GPS-time).

משרד ההגנה של ארצות הברית (United States Department of Defense) מבצע את הפיקוח והביקורת על מערכת הלוויינים. הטיפול במערכת מתחיל מתיקון סקאלות של שעוני Rb ו-Cs הנמצאים בלוויינים. שעונים האלה מספקים את הסקאלת זמן ה-GPS שמשמש כזמן ההשוואתי ללקוחות שונים. ההפרש בין סקאלות הזמן ה-UTC והזמן GPS ניתן לרשום בצורה הבאה:

$$[\text{UTC} - \text{GPS time}] = -13 \text{ s} + C_0 \quad (1)$$

הערך של מקדם C_0 משתנה לאורך הזמן בתחום: $\pm 20 \text{ ns}$. חישובים של מקדם C_0 מתבצעים ב-BIPM. נתונים עבור ערכי C_0 לכול יום לשעת חצות UTC ניתן לקבל באתר אינטרנט: <http://www.bipm.org>. אי-וודאות מורחבת של C_0 מהווה 10 ns.

קשר בחוליה B מתבצע בין מקלט ה-GPS של הלקוח לבין הזמן-GPS משודר דרך מערכת לוויינית לניווט. השגיאות בחוליה זו נובעות ממעבר הגל האלקטרומגנטי מלווין למקלט ה-GPS דרך שכבות שונות של אטמוספירה. אי-וודאות בחוליה זו כוללת מרכיבים הבאים: שגיאות בחישוב מסלולי הלוויינים בחלל, בחישוב המרחק בין לוויין לבין מקלט GPS, בחישוב זמן עיכוב ביונוספירה,

טרופוספירה, וסטרטוספירה, שגיאה שנקראת multipath error, שקשורה להחזרת של גל אלקטרומגנטי מהמכשולים השונים בכדור הארץ. קיימות כמה סוכנויות בינלאומיות שמבצעות חישובים של מסלולי הלוויינים, תיקונים של זמן עיכוב ביונוספירה, בטרופוספירה ובסטרטוספירה. שמות הסוכנויות הם:

The International GPS Service, Center for Orbit Determination in Europe. השגיאות הגדולות ביותר בין כל אלה שהוזכרו לעיל הן שגיאות בזמן עיכוב בשכבות שונות של אטמוספירה, שיכולות להשיג עד כמה מאות ns.

קשר בחוליה C מתבצע בין מערכת הלוויינית GPS לבין המכון הלאומי למטרולוגיה NMI (בארץ זה מל"פ). במל"פ מתבצעות השוואות בין זמן-GPS לבין זמן הלאומי הישראלי UTC(INPL) שמבוסס על שעון אטומי – Cs.

קשר בחוליה D מתבצע בין הסטנדרט הלאומי לזמן UTC(NMI) לבין הסטנדרט הבינלאומי לזמן – UTC. בישראל סטנדרט הלאומי לזמן הוא UTC(INPL) שמטופל במל"פ לפי חוק קביעת הזמן הלאומי משנת-1992. את האי-וודאות של זמן לאומי ישראלי UTC(INPL) אפשר לקבל בסיוע החוברת Circular-T שנותנת ההפרשים בין סקאלות הזמן הלאומיות לבין סקאלת הזמן הבינלאומית: UTC–UTC(NMI).

סקאלת זמן UTC מהווה תוצאת חישוב נתוני מדידות של 230 שעוני האטומיים שמטופלים ב-50 מעבדות לאומיות במדינות שונות. מעבדות לאומיות מקיימות קשר בין סקאלות הזמן שלהם לבין סקאלה UTC באופן קבוע ומספקות עקיבות של הזמן הלאומי UTC(NMI) לסטנדרט הבינלאומי UTC.

יחידת השניה (second) היא יחידה הבסיסית במערכת היחידות הבינלאומית (SI). ערך של השניה מוגדר כזמן שבתוכו מתרחשים 9,192,631,770 מחזורים של קרינה אטומית הקשורה למעבר ספציפי באטום Cs. תדר הוא יחידת נגזרת מהיחידת הזמן ושווה לכמות המחזורים שמתרחשים תוך שניה אחת. לפיכך מקלט GPS לא יכול לשמש כאב המידה לזמן ולתדר, הוא יכול לשמש רק כסטנדרט משני.

אי-וודאות בשרשרת עקיבות מוצגת בתרשים 1 הולכת ופוחתת בכיוון העקיבות: זאת אומרת שאי-וודאות בחוליה D הרבה יותר קטנה מאשר אי-וודאות בחוליה A.

כיוול מקלטי GPS במעבדה הלאומית לפיזיקה

משנת 2003 לפי הסכם הכרה הדדית [10] סטנדרט UTC(INPL) ותעודות כיוול ומדידה שמונפקות במל"פ מקובלות בכל 51 המדינות שחתמו על ההסכם.

במל"פ מתבצעים כיוולים של מקלטי GPS מול שעון אטומי Cs עם אי-וודאות לתדר ברמה 10^{-14} ולזמן – ns 10. תרשים של מערכת כיוול מוצג בציור 2, והוא כולל: סטנדרט אטומי Cs עקיב לסטנדרט בינלאומי UTC, מערכת לוונית להשוואות בין סקאלה UTC וסקאלה UTC(INPL) שכוללת מקלט GPS של INPL מסוג השקפה משותפת (common-view), אנטנה לוונית, מיקרו-מעבד לעיבוד נתונים המתקבלים מהלווינים עם תוכנה שלו ועם מסך ומדפסת, מקלט GPS מכויל (UUT), מונה מרווחי זמן (Time Interval Counter), גרטור אימפולסים 1 pps, מגבר-מפלג אימפולסים 1 pps (1 pps Distribution-Amplifier), מחשב אישי לעיבוד נתונים ההשוואות בינלאומיות PC1, מקלט למדידות זמן עיכוב של GPS-signal ביונספירה (ICR) עם אנטנה לוונית שלו, מחשב אישי לעיבוד נתוני הכיוול (PC2), ומגבר-מפלג אותות של תדר גבוה 5 MHz (5 MHz Distribution-Amplifier) [11,12].

כיוול של המקלט GPS מתבצע דרך השוואה בין אחד מהאותות שלו: 1 pps, 5 MHz, 10 MHz, לבין אותו אות של השעון האטומי Cs. מונה מרווחי הזמן מודד הפרש זמן בין שני אותות הבאים: אות של GPS ואות של סטנדרט Cs. שיטת חישוב של הזמן הלאומי הישראלי UTC(INPL) פותחה בעבודות [5-8]. שיטת כיוול ושיטת השוואות בינלאומיות הוצגה בעבודות [11,12].

לגבי מקורות תדר שונים קיימות תכונות מטרולוגיות ספציפיות שמגדירות את יציבותם [13-15]:

❖ סטיית התדר יחסית (y) שמוגדרת בסיוע הנוסחה (2):

$$y = (f_{UUT} - f_{REF}) / f_{REF}, \quad (2)$$

מכאן f_{UUT} הוא התדר של מכשיר מכויל (UUT), f_{REF} הוא התדר ההשוואתי של שעון אטומי Cs של המל"פ.

❖ שונות של Allan – $\sigma_y^2(\tau)$, שהערך שלה מוגדר על ידי המשוואה הבאה:

$$\sigma_y^2(\tau) = (1/2) (N-1)^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} (y_{k+1} - y_k)^2 = (1/2) (N-1)^{-1} \tau^{-2} \sum_{k=1}^{N-1} (x_k - 2x_{k+1} + x_{k+2})^2, \quad (3)$$

מכאן N הוא מספר של מדידות, x הוא הפרשי הזמן בין המכשיר המכויל (UUT) לבין השעון האטומי Cs, τ הוא הזמן בין שתי מדידות עקביות.

❖ סטיית של Allan – $\sigma_y(\tau)$, שערכה הוא שורש מהשונות של Allan (3):

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{[(1/2) (N-1)^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} (y_{k+1} - y_k)^2]} \quad (4)$$

ערך הממוצע של סטיית התדר y (2) של GPS המכויל מגדירים כשיפוע של קו רגרסיה עבור הגרף של נתוני ההשוואות $x(t)$ בין הסטנדרט האטומי Cs לבין מקלט ה-GPS המכויל. מספר נקודות המדידה N הנצברות עבור הפרשי הזמן x במשך הכיול הוא בתחום 20,000–32,000.

להגדרת תכונות מטרולוגיות של מקלט ה-GPS המכויל יחסית לסטנדרט הבינלאומי UTC צריך לקחת בחשבון תכונות מטרולוגיות של הסטנדרט הלאומי של מל"פ יחסית ל-UTC. לכן סטיית התדר של מקלט ה-GPS מכויל יחסית ל-UTC מגדירים לפי נוסחה הבאה:

$$y_{[UUT-UTC]} = y_{[UUT-INPL]} + y_{REF}, \quad (5)$$

מכאן $y_{[UUT-INPL]}$ היא סטיית התדר של ה-GPS המכויל יחסית לשעון האטומי Cs של מל"פ, y_{REF} היא סטיית התדר של השעון האטומי Cs של מל"פ יחסית לסטנדרט הבינלאומי UTC. את הסטייה ה- y_{REF} מקבלים מהתוצאות של ההשוואות הבינלאומיות שמתפרסמות בחוברת של BIPM בשם Circular-T וניתן לקבל אותן באתר אינטרנט: www.bipm.fr.

את האי-וודאות המורחבת של $y_{[UUT-UTC]}$ (נוסחה 5) יחסית לסטנדרט הבינלאומי UTC מגדירים לפי הנוסחה הבאה:

$$U_{[UUT-UTC]} = k (u_{[UUT-INPL]}^2 + u_{REF}^2)^{1/2}, \quad (6)$$

מכאן $u_{[UUT-INPL]}$ היא אי-וודאות סטנדרטית של התדר המכשיר מכויל יחסית לייחוס התדר של המל"פ,

u_{REF} היא אי-וודאות סטנדרטית של ייחוס התדר של מל"פ יחסית לסטנדרט הבינלאומי UTC, k הוא מקדם מכסה ($k=2$ להסתברות 95%).

אי-וודאות מורחבת של ייחוס התדר מגדירים לפי הנוסחה הבאה:

$$U_{REF} = k \sigma_y(\tau) / \sqrt{N}, \quad (7)$$

מכאן $\sigma_y(\tau)$ היא סטיית Allan של ייחוס התדר של מל"פ.

כמקובל האי-וודאות של השעון האטומי Cs של מל"פ מהווה 10^{-14} לאורך זמן שבוע אחד, ואי-וודאות התדר של המקלט ה-GPS יחסית לשעון אטומי Cs של מל"פ מהווה 10^{-11} – 10^{-13} לאותו אורך הזמן.

מסקנות

מקלטי ה-GPS הם שונים מאוד זה מזה, אומנם ישנם שני גורמים העיקריים המשותפים, שמשפיעים על הדיוק שלהם: איכות המתנד הפנימי ואיכות התוכנה המעבדת נתונים המתקבלים מהלוויין. בעקבות העיצוב השונה ייתכן ששני מכשירי GPS שונים נותנים תוצאות שונות, אפילו אם הם

נמצאים באותו מקום ומחוברים לאותה אנטנה. סטיית סקאלה זמן של המקלט ה-GPS מהסקאלה הזמו הבינלאומי UTC יכולה להיות יחסית גדולה (כמה מיקרו שניות) והיא תלויה בזמן העיכוב במקלט ה-GPS, באנטנה של ה-GPS, ובקבלים של האנטנה, ותלויה גם בשגיאות החישוב של זמן העיכוב בשכבות שונות של האטמוספירה.

אי-וודאות של התדר עבור מקלטי ה-GPS יותר גדולה מאשר של שעון האטומי Cs גם לטווח זמן קצר (1–1000 s) וגם לטווח זמן של שבועיים.

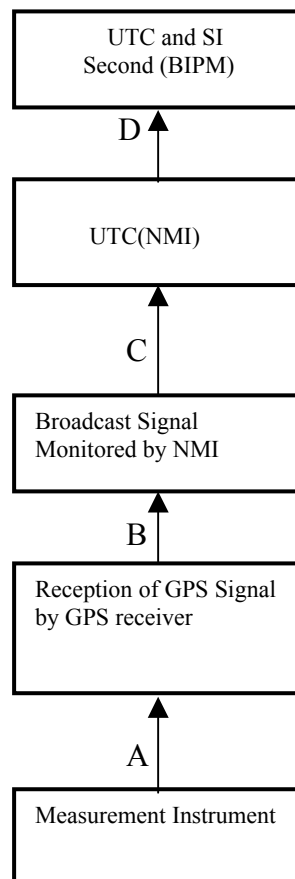
לכן כיוול מקלטי ה-GPS מול אב המידה של השניה (שהוא שעון אטומי Cs עקיב ל-UTC) הוא חשוב מאוד. מקלט ה-GPS לא יכול לשמש כאב המידה לתדר וזמן, הוא יכול לשמש כסטנדרט משני בלבד.

כיוול מקלטי GPS המסחריים מתבצע במעבדה הלאומית לפיזיקה מול אב המידה לזמן שעון אטומי Cs. תעודות הכיוול שמונפקות ע"י המל"פ מספקות עקיבות לסטנדרט הבינלאומי לזמן ולתדר.

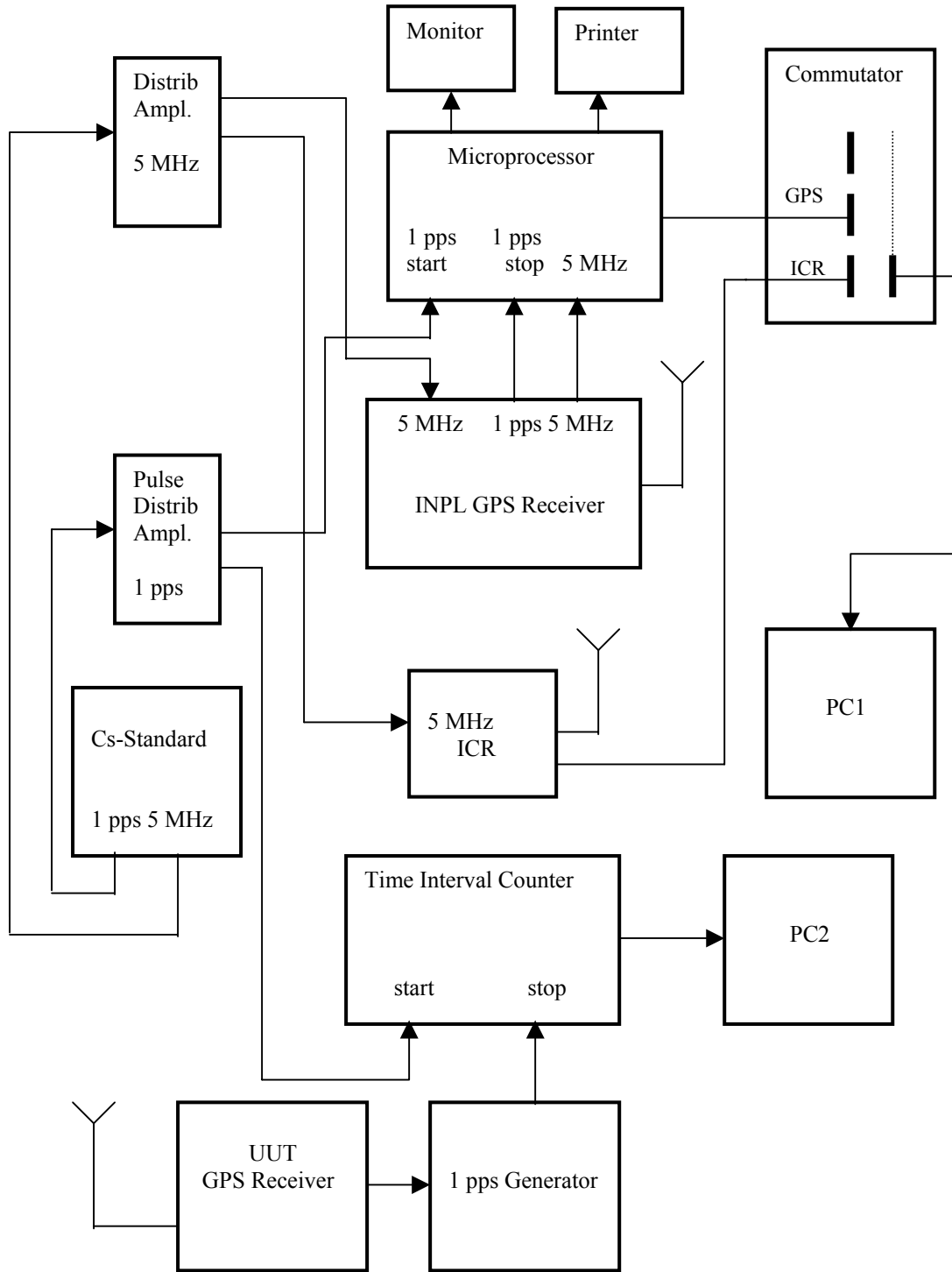
רשימה ביבליוגרפיות

1. <http://ares.redsword.com/GPS/apps/general/receivers.htm>
2. M.A. Lombardi, L.M. Nelson, A.N. Novick, V.S.Zhang, Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System, Cal. Lab. (Int. Jour. of Metrology), July-September 2001, pp. 26-33.
3. <http://www.boulder.nist.gov/timefreq/service/gpscal.htm>
4. M.A. Lombardi, Traceability in Time and Frequency Metrology, Cal. Lab. (Int. Jour. of Metrology), September-October 1999, pp. 33-40.
5. A. Lepek, A. Shenhar and D.W. Allan, UTC(INPL) – a virtual time scale, Metrologia, 1995/96, 32, pp. 245-252.
6. A. Lepek, A. Shenhar, M. Bezalel, The UTC(INPL) time scale, Proceedings of Ninth International Conference of the ISQA, 1992, pp. 502-506.
7. A. Lepek, Atomic scale based on optimum linear prediction, IEEE Frequency Control Symposium, 1997, pp.382-387.
8. A. Lepek, Clock prediction and characterization, Metrologia, 1997, 34, pp.379-386.
9. International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, Draft, 2004.
10. Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates Issued by National Metrology Institutes, BIPM, Paris, 1999.
11. N. Goldovsky, M. Luria, Frequency Standard and Oscillators Calibration at the National Physical Laboratory of Israel, Proceedings of the 14-th International Conference on the Israel Society for Quality, Jerusalem, November 2002, pp. 394-399.

12. N. Goldovsky, M. Luria, Ionospheric delay contribution to the uncertainty of time and frequency measurement by one-way satellite time transfer method, *Measurement*, 35, 2004, pp. 353-362.
13. D.W. Allan, Statistics of Atomic Frequency Standards, *Proc. IEEE*, vol. 54, February 1966, pp. 221-230.
14. D.W. Allan, The Measurement of Frequency and Frequency Stability of Precision Oscillators, *NBS Tech. Note 669*, July 1975.
15. F.L. Walls and D.W. Allan, Measurements of Frequency Stability, *Proc. of the IEEE*, vol. 74, №1, January 1986, pp. 162-168.



ציור 1. שרשרת עקיבות למדידות בתחום זמן ותדר



ציור 2. תרשים של מערכת כיוול של מקלטי GPS