

# Timing Jitter

תדריך ניסוי לסטודנט

מהדורה 1.5.1

יולי, 2022

מחברים: יבגני חכמוביץ, עמית ברמן, עידו דיוקמן

חומר עזר: ברלב משה, אולג גרינברג

## תוכן העניינים

2	.....	תוכן העניינים
4	.....	ניסוי TIMING JITTER
4	.....	1. ארגון ומטרות הניסוי
4	.....	1.1.1. מטרת הניסוי
4	.....	1.1.2. מהלך הניסוי
4	.....	1.1.3. דרישות
5	.....	חלק א': תופעת JITTER – מבוא ומושגים
5	.....	2. מבוא והכרת מושגים – TIMING JITTER
5	.....	2.1.1. הגדרת Jitter
6	.....	2.1.2. מדידה בסיסית של תופעת Jitter
7	.....	2.1.3. Period Jitter
8	.....	2.1.4. Cycle-Cycle Jitter
8	.....	2.1.5. Time Interval Error (TIE)
9	.....	2.1.6. מרכיבי Jitter
9	.....	2.1.7. (RJ) Random Jitter
10	.....	2.1.8. (DJ) Deterministic Jitter
12	.....	2.1.9. (PJ) Periodic Jitter
12	.....	2.1.10. Bounded Uncorrelated Jitter
12	.....	2.1.11. Data-Dependent Jitter
12	.....	2.1.12. דיאגרמת עין ("Eye Diagram")
15	.....	2.1.13. ביבליוגרפיה
16	.....	2.1.14. הכנה
17	.....	2.1.15. מהלך הניסוי
17	.....	2.1.16. פרמטרים להערכת תופעת Jitter
17	.....	2.1.17. הצגת דיאגרמת עין
20	.....	2.1.18. הצגת היסטוגרמת הסיגנל
22	.....	2.1.19. מדידות וניתוח סטטיסטי של תופעת Jitter
22	.....	2.1.20. הצגת שיטות שונות למדידת Jitter
23	.....	2.1.21. סיכום
24	.....	חלק ב': השפעת תופעת ה-JITTER על קצב השגיאות (BIT ERROR RATE)
24	.....	3. מבוא
27	.....	3.1.1. הכנה
28	.....	3.1.2. אבחון וניתוח Jitter
28	.....	3.1.3. חישוב DJ ע"י גל מאופקן

ניסוי Timing Jitter	המעבדה למערכות ספרתיות מהירות, הפקולטה להנדסת חשמל, טכניון
---------------------	--

30	ביצוע מדידות במישור התדר	3.1.4.
31	מדידה ע"י התמרת פורייה	3.1.5.
32	ממד BER – קצב השגיאות לביט (bit error rate)	3.1.6.
32	עקומת אמבטיה (bathtub curve)	3.1.7.
34	הפרדת רכיבי DJ,RJ בתרשים עקומת אמבטיה (bathtub curve)	3.1.8.
37	ניתוח תוצאות מדידת Jitter באמצעות עקומת אמבטיה (bath.curve)	3.1.9.
38	מדידות נוספות באמצעות עקומת האמבטיה (bathtub curve)	3.1.10.
39	3.1.11 תרגיל סיכום – אנליזה של סיגנל לא ידוע	
39	סיכום	4.
40	<b>נספח 1 – הנחיות לשימוש ב-WW2571A TABOR WAVEFORM GENERATOR</b>	
40	יצירת גל רגיל (לא מאופנן)	1.
41	יצירת גל מאופנן	2.
43	<b>נספח 2 – אוסילוסקופ</b>	
45	<b>נספח 3 – הסבר לשימוש באמפליטודה נמוכה בניסוי</b>	
46	<b>נספח 4 – פרמטרים של עקומת אמבטיה ברעש גאوسی</b>	

**ניסוי Timing Jitter****1. ארגון ומטרות הניסוי****1.1.1 מטרת הניסוי**

ניסוי זה עוסק בהכרת תופעת ה-Timing Jitter, הכרת מודל המדידה של תופעה זו, חישוב פרמטרים סטטיסטיים המאפיינים תופעה זו ובהינתן השפעת ה-Jitter על קצב השגיאות במערכת. הניסוי יבוצע תוך שימוש במחוללי אותות של חברת tabor electronics ובמכשירי דגימה (אוסילוסקופ) של חברת Agilent. במהלך הניסוי נדון באתגרי התכנון הנובעים מתופעה זו, כמו גם על שיקולי תכן שונים המגדירים את אפקטיביות הפצת האותות כתוצאה מתופעה ה-Jitter. נבחן את השפעת שיקולי התכן אלו על ביצועי המערכת.

**1.1.2 מהלך הניסוי**

הניסוי מתחלק לשני חלקים. כל חלק יהווה מפגש בן 4 שעות. בשני חלקי הניסוי נשתמש במכשור מעבדתי: מחוללי אותות של חברת tabor electronics ומכשירי דגימה (אוסילוסקופ) של חברת Agilent.

**1.1.3 דרישות**

- לפני ביצוע כל אחד משני חלקי הניסוי במעבדה, יש לקרוא בעיון את החלק הרלוונטי. יש להגיש למדריך דו"ח הכנה ובו תשובות לכל שאלות ההכנה.
- בסיום שני חלקי הניסוי יש לתאם עם המדריך הגשת דו"ח מסכם הכולל:
  - תוצאות המדידות, השוואה למודל אנליטי תיאורטי וניתוח תמציתי של ההשוואה.
  - תשובות לשאלות הניסוי, מסקנות.

**חלק א': תופעת Jitter – מבוא ומושגים**

בחלק זה של הניסוי נדון בהגדרה ומושגים שונים של תופעת ה-Jitter.

**2. מבוא והכרת מושגים – Timing Jitter**

תופעת ה-Timing Jitter הינה תופעה לא רצויה הנמצאת בכל מערכת אלקטרונית המשתמשת בשינויי רמות מתח על מנת לייצג מידע מתוזמן. באופן היסטורי, תופעת ה-Jitter הייתה שולית בשל שימוש בתדר מעגל נמוך באופן יחסי, וכתוצאה מכך, שגיאות לוגיות כתוצאה מתופעת ה-Jitter היו נדירות. כיום מערכות ספרתיות מהירות מחייבות תכן מערכתי המתחשב בתופעת ה-Jitter כבר בשלבים המוקדמים של הפיתוח.

מערכות ספרתיות מהירות מודרניות פועלות בתדר בסדר גודל של 1Ghz ויותר, ובו בעת, בעלות מתח אספקה הקטן בהתמדה לשם חיסכון בהספק. בתנאים אלה, תופעת ה-Jitter הופכת משמעותית ומשפיעה על מרווח האיתות. במקרה זה, תופעת ה-Jitter מהווה צוואר בקבוק לביצועי המערכת. לפיכך, הכרת ה-Jitter ואפיונו הינו צעד נדרש בתכנון מערכות ספרתיות מודרניות.

באופן עקרוני, Jitter מוגדר כסטייה של דרבון האות המתוזמן (עלייה או ירידה) מהערך האידיאלי. במערכות סינכרוניות, Jitter הוא הסימן המובהק לאי-אידיאליות של המערכת. תופעת ה-Jitter היא רעש, אשר הינו תהליך אקראי וצריך להיות מאופיין ע"י סטטיסטיקה של מדידות.

על מנת לצמצם את תופעת ה-Jitter למינימום האפשרי, יש לבצע ניתוח מעמיק ומערכתי ולבודד את הגורמים המשפיעים על התופעה. אנליזה זו כוללת ויזואליזציה ופירוק ספקטראלי של תופעת ה-Jitter.

תופעת Jitter מבוססת בצורה שונה במערכות אלקטרוניות ובמערכות אופטיות, בעיקר מבחינת אפיון וניתוח. ניסוי זה ידון בתופעות Jitter במערכות אלקטרוניות.

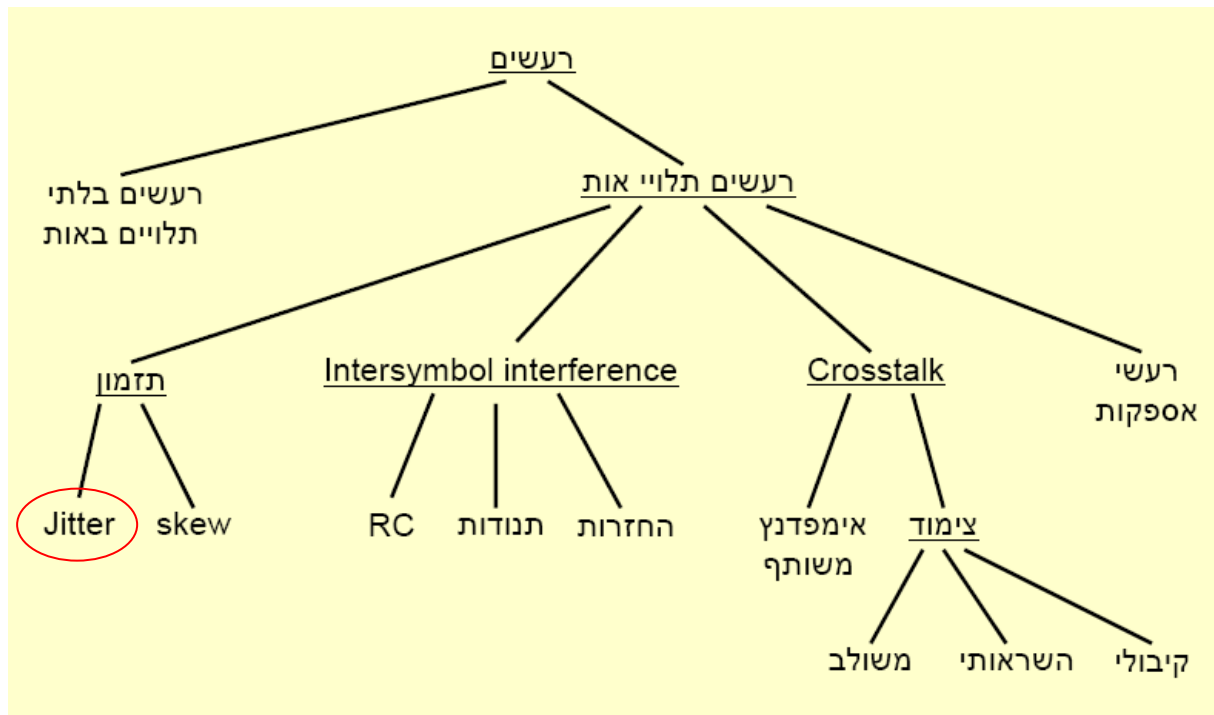
**2.1.1 הגדרת Jitter**

הגדרה: Jitter הוא שינוי קצר-טווח של אות ספרתי מערכו האידיאלי בזמן.

על מנת לחדד הגדרה זו, ננסה בצורה כמותית את המשמעות של קצר-טווח בהקשר זה. באופן עקרוני, וריאציות בתזמון אותות בזמן נחלקות לשני קטגוריות: Jitter ו-Wander, המבוססות על אנליזה ספקטראלית (פירוק פורייה) של וריאציות אלה. וריאציות הנובעות מתדרים הנמוכים מ-1KHz משויכות לתופעת Wander בעוד שוריאציות הנובעות מתדרים גבוהים יותר מ-1KHz משויכות לתופעת ה-Jitter. הסיבה לחלוקה זו היא תכנון מערכות פרקטיות, בהן רעשי Wander הינם כמעט חסרי-השפעה על תקשורת טורית, מכיוון ששעון המערכת הינו בעל יכולת אפקטיבית (Clock Recovery) להנחית רעשים אלה. חלוקה זו אינה קשיחה והינה תלויה אפליקציה ופרוטוקול.

תופעת Jitter מהווה סוג רעש במערכת ספרתיות, כפי שמתואר באיור הבא.





איור 1: רעשים במערכות ספרתיות

תופעת ה-Jitter מתגברת בתדרים גבוהים. להלן דוגמאות לתדר הדגימה במערכות שונות:

1 Hz : temperature

10 Hz – 1 kHz : speed, acceleration

5 kHz : MRI

20 kHz : accoustics

75 MHz : VGA

100 MHz : Laser distance measurement

200 MHz : RF communication Band-Width

1 Ghz : DSP components

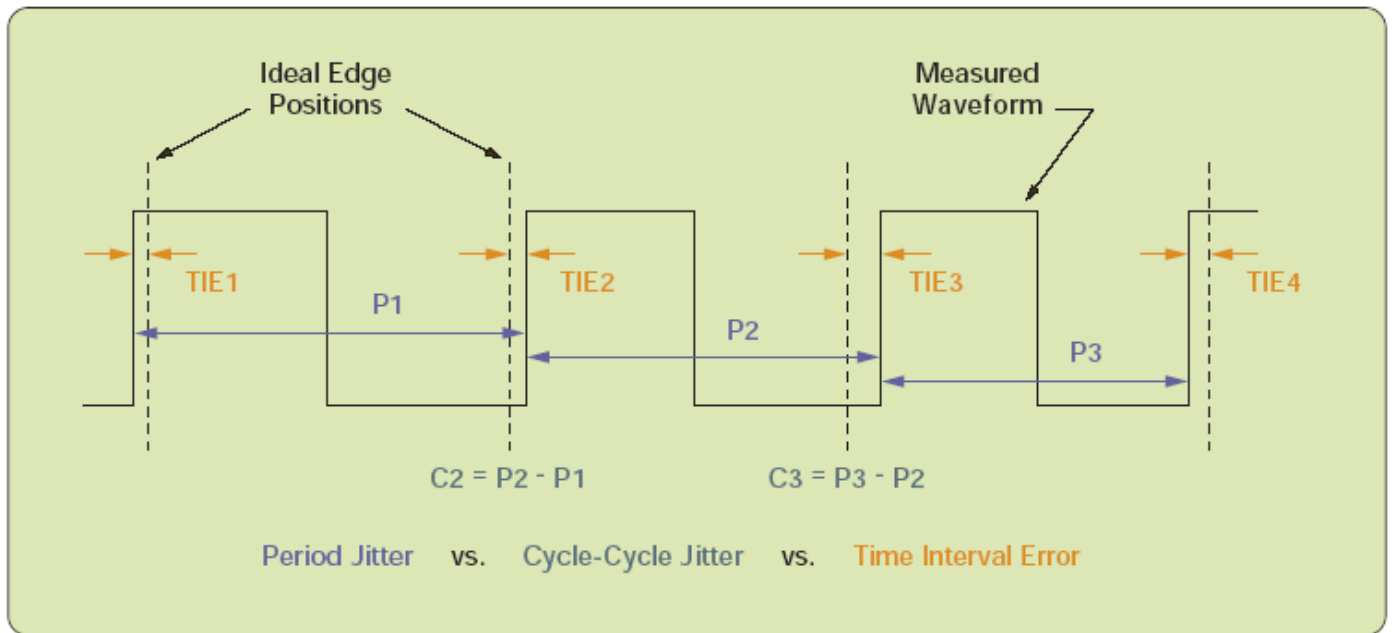
3 GHz : Modern Processors

בחלק הבא נתאר טכניקות מדידה לכימות ואנליזה של תופעת ה-Jitter.

## 2.1.2 מדידה בסיסית של תופעת Jitter

ישנם מספר דרכים למדידת Jitter בהסתמך על תצוגת גל אחת. דרכי מדידה אלה מכונות Period Jitter Cycle ו-Time interval error (TIE) Cycle Jitter. דרכי המדידה קשורות הדדית כפי שנראה בהמשך.

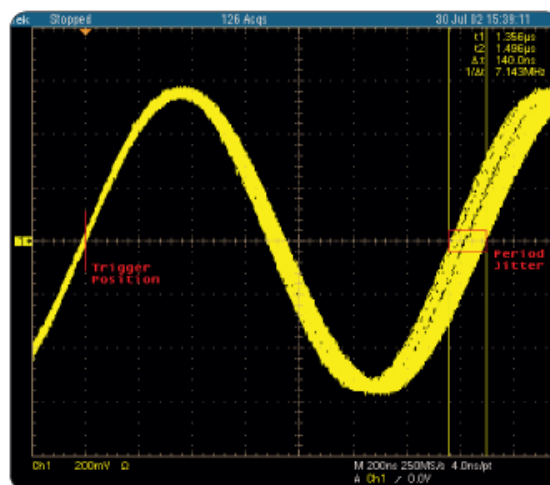
איור 2 מציג בצורה גרפית את דרכי המדידה השונות. האיור מציג את דמוי שעון עם Jitter, כאשר הקו המקווקו מראה את מיקום עליית השעון האידיאלית, ללא Jitter. הקו הרציף מראה את האות המעשי הנמדד.



איור 2: רעשים במערכות ספרתיות

### 2.1.3 Period Jitter

מדידה ע"פ שיטת Period Jitter (PJ), מסומנת ע"י הקווים הכחולים P1, P2, P3, באיור 2, מבטאת את מדידת זמן המחזור של כל מחזור שעון בתצורת הגל, כאשר ה jitter הוא ההפרש ממחזור השעון הנדרש. בשיטת מדידה זו לא נדרש מידע על תצורת מחזור השעון האידיאלי. זוהי הצורה הקלה והישירה ביותר למדידה. ניתן כמו כן, לכוון את מדידות האוסילוסקופ כך שהמדידות נפרשות בשכבות כפי שמתואר באיור הבא:



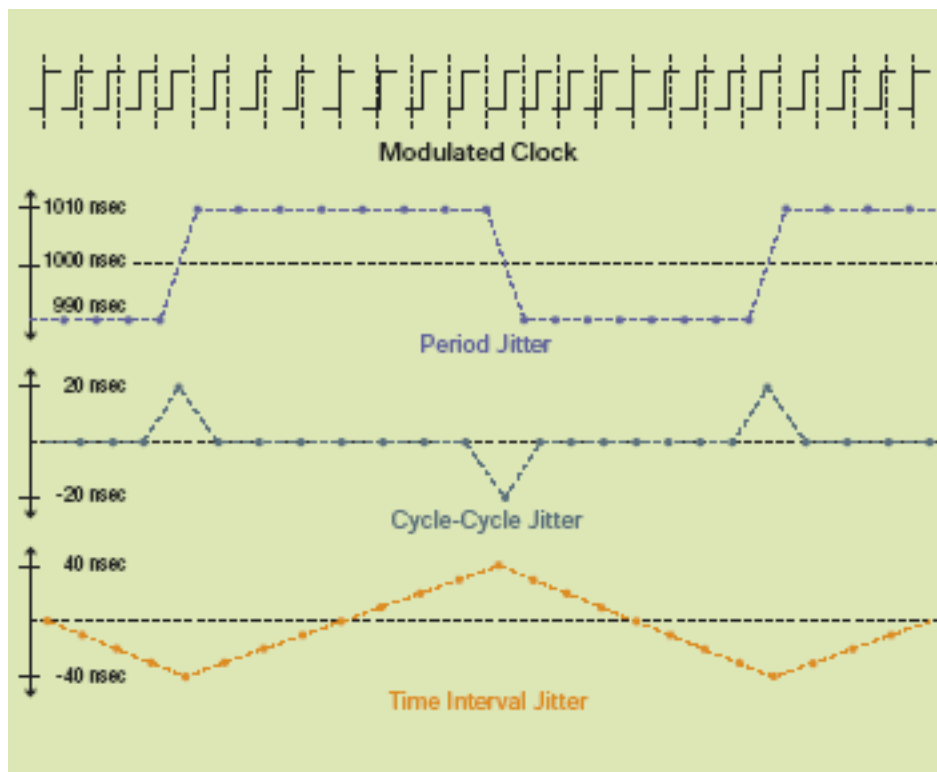
איור 3: מספר מדידות של PJ

### 2.1.4 Cycle-Cycle Jitter

מדידה ע"פ שיטת Cycle-Cycle Jitter (CCJ), מסומנת ע"י C2, C3 באיור 2, מבטאת את מידת השינוי בזמן מחזור השעון בין מחזורי השעון, ע"י מדידה הפרשית של PJ. בשיטת מדידה זו, כמו ב-PJ, לא נדרש מידע על תצורת מחזור השעון האידיאלי.

### 2.1.5 Time Interval Error (TIE)

מדידה ע"פ שיטת TIE, מסומנת ע"י T1, T2, T3, T4 באיור 2 (צבע צהוב), ומבטאת את מידת השינוי של דרבון (edge) שעון מדרבון שעון אידיאלי. על מנת לבצע מדידת Jitter בשיטה זו, יש צורך במידע על מחזור השעון האידיאלי. מסיבה זו, מדידה זו הינה בדר"כ קשה לביצוע, מכיוון שיש לבצע השוואה מדויקת בין צורות גל שונות, בניגוד לשיטות הקודמות PJ, CCJ, שבהן מספיקה צורת גל יחידה על מנת למדוד Jitter. מדידת TIE יכולה להתבצע ע"י אינטגרציה של PJ כפי שמתואר באיור 4.



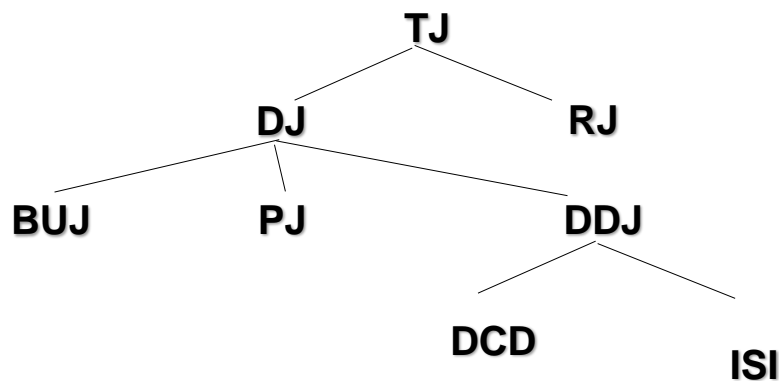
איור 4: דוגמאות: PJ, CCJ, TIE



ניתן לנתח את חסינות המערכת לשגיאות ע"י ניתוח TIE: מדידת TIE מראה את ההשפעה המצטברת של תופעת Jitter, כאשר ערך TIE עובר את סף  $\pm 0.5$  יחידת אינטרוול בין דרבון, תיווצר שגיאת תזמון. איור 4 מתאר דוגמא בה צורת הגל האידיאלית בעלת זמן מחזור של  $1 \mu\text{sec}$ , אבל זמן המחזור המעשי שנמדד הוא 8 מחזורי שעון של 990 nsec ולאחריהם 8 מחזורי שעון נוספים של 1010 nsec.

### 2.1.6 מרכיבי Jitter

תופעת Jitter נובעת ממספר גורמים, לדוגמא סטיות של המתנד (אוצילטור) כתוצאה משונות בייצור, זמן תגובה של ממיר אות אנלוגי לדיגיטלי (ADC), אדוות מתח במתנד וב-ADC. על מנת לנתח את הגורמים יש לבצע פירוק של Jitter למרכיביו. פירוק Total Jitter (TJ) למרכיביו מודגם באיור 5.



איור 5: מרכיבי Jitter

נדון בפירוט במרכיבי ה-Jitter :

### 2.1.7 (RJ) Random Jitter

גורם RJ הינו רעש אקראי בלתי תלוי ששניתן למידול ע"י פילוג גאوسي. רכיב זה מאופיין ע"י RMS שערכו זהה לסטיית תקן אחת ( $1\sigma$ ) של הפילוג הגאوسي. גודלו של רכיב זה נקבע ע"י גורמים אקראיים הקשורים במעגל האלקטרוני, ולכן ערך הגורם למעשה אינו מוגבל ועלול לגרום לשגיאות באמצעות תופעות כגון:

- Shot noise

רעש זה נובע מהאופי המקובץ של החלקיקים המרכיבים את הזרם. עוצמת הרעש פרופורציונלית לשורש עוצמת האות, לכן רעש זה בעייתי בעיקר באותות חלשים.

- רעש תרמי

רעש זה נגרם עקב טמפרטורה הגורמת למעבר אנרגיה בין אלקטרונים חופשיים ויונים במוליך למחצה.

- **Flicker noise**

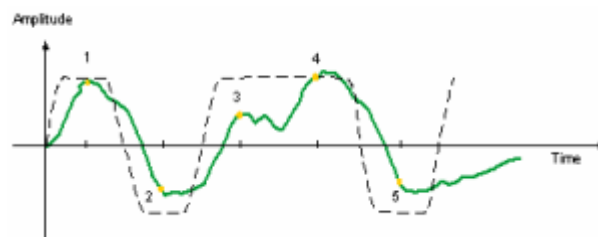
רעש זה נגרם עקב אפקט מצע בשל פלקטואציות בצפיפות נושאי המטען, אלקטרונים הנופלים למלכודות Oxide במוליך למחצה. רעש זה פרופורציונלי ל- $1/f$ .

## 2.1.8 (DJ) Deterministic Jitter

גורם DJ הינו רעש סטטיסטי בעל התפלגות שאינה גאוסית ואשר חסומה בערכיה. ניתן לשייך את התכונות הסטטיסטיות של ההתפלגות לתכונות פיסיקליות כפי שנראה בדוגמאות בהמשך.

הגורמים העיקריים ל-DJ הם ISI, רעשי מתח ו SSO, רעשי Crosstalk ו EMI. נדון במאפייני הגורמים העיקריים:

- **ISI – (Inter Symbol Interference)** רעש זה נגרם עקב השפעה של ביטים שכנים על הביט הנוכחי הנדגם. (הסבר מפורט ניתן למצוא בחוברת של הניסוי ערוצי תקשורת מהירים). הסבר סכמטי יתן באיור 6.



איור 6: ISI

- **Power noise**

הערך הלוגי של הסיגנל תמיד מיוחס למתח האספקה. מתח האספקה יכול לרעוש כתוצאה מגורמים חיצוניים כגון ספק רועש, רכיבים שכנים, סיגנלים שכנים מרעשים, או כתוצאה מהאות עצמו – SSO (Simultaneous Switching Outputs).

- **SSO**

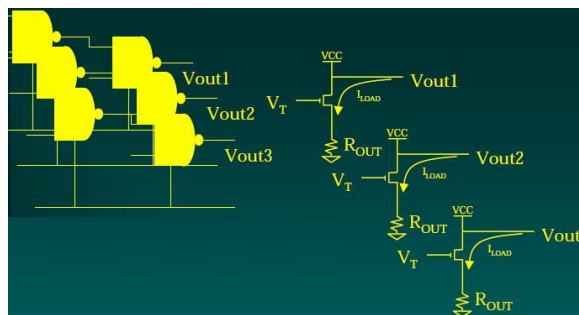
רעש זה נגרם ע"י מיתוג כל פיני היציאה למצב זהה, הגורם לזרם רגעי גבוה. מכיוון שמסלול הזרם מהאספקה הוא מסלול השראותי

נקבל שינוי במתח האספקה

השינוי המהיר בזרם הרגעי

במתח הייחוס ולשגיאה

באיור 7.



לפי  $\Delta V = L \frac{dI}{dt}$  ולכן

עלול לגרום לשינוי בערך הלוגי, כמתואר

איור 7: SSO

### • Cross talk

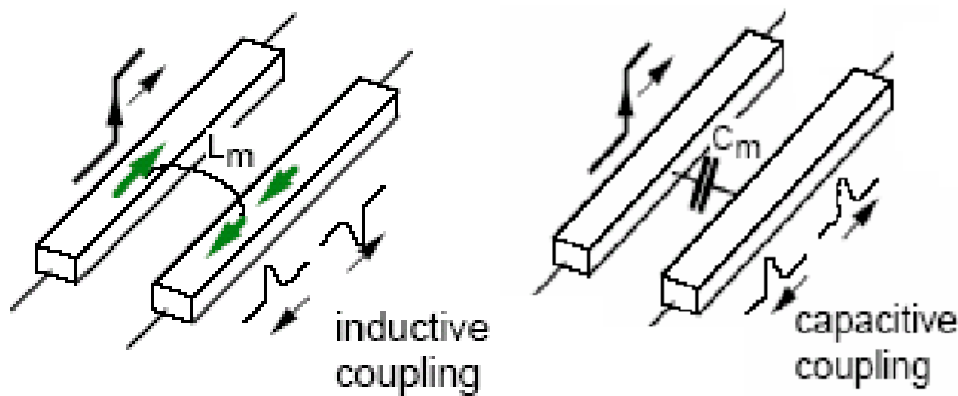
כאשר קווי מוליך קרובים אחד לשני, שניי זרם/מתח בקו אחד משרים זרם/מתח בקו השני.

הקו בו עובר האות החשמלי נקרא **תוקפן (Aggressor)**.

הקו בו מושרה הזרם נקרא **קורבן (Victim)**.

תופעת ה-Crosstalk נגרמת עקב זליגת זרם דרך הקיבול ההדדי וזליגת מתח עקב ההשראות הדדית בין

התוקפן לקורבן. כפי שמתואר באיור 8.

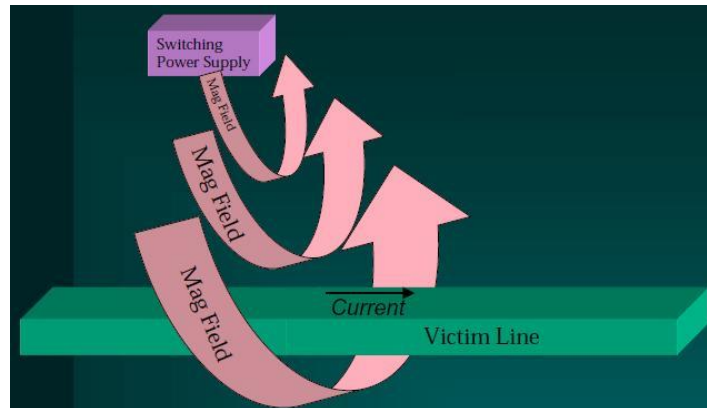


איור 8: Crosstalk

### • EMI

הפרעה אלקטרומגנטית נגרמת ע"י השדה המגנטי המושרה ע"י מקור כגון מקור אספקה, קו אספקת AC, מקור

אות RF. ההפרעה מתבטאת בשינויי זרם בקו הקורבן, כפי שמתואר באיור 9.



איור 9: EMI

### 2.1.9 (PJ) Periodic Jitter

סוג jitter זה מאופיין ע"י פילוג ספקטראלי בעל רכיבי תדר דיסקרטיים מסוימים. הסיבות להיווצרותו הם מקורות רעש בעלי תדר מוגדר, כגון אותות שעון שכנים, EMI בתדר מסוים (לדוג' פלפונים) ו SSO וכו'.

### 2.1.10 Bounded Uncorrelated Jitter

גורם זה הינו רעש אקראי בלתי מתואם באותות המועברים על הקווים, אך בשונה מ-RJ, ניתן להגדיר חסמים ברורים על ההתפלגות הסטטיסטית של גורם זה. רעש זה נגרם בד"כ ע"י Crosstalk מסיגנלים שכנים ולכן אינו תלוי באות על הקו. מכיוון שאנרגיית האות המרעיש חסומה גם כמות ה jitter שנוצר תהיה חסומה.

### 2.1.11 Data-Dependent Jitter

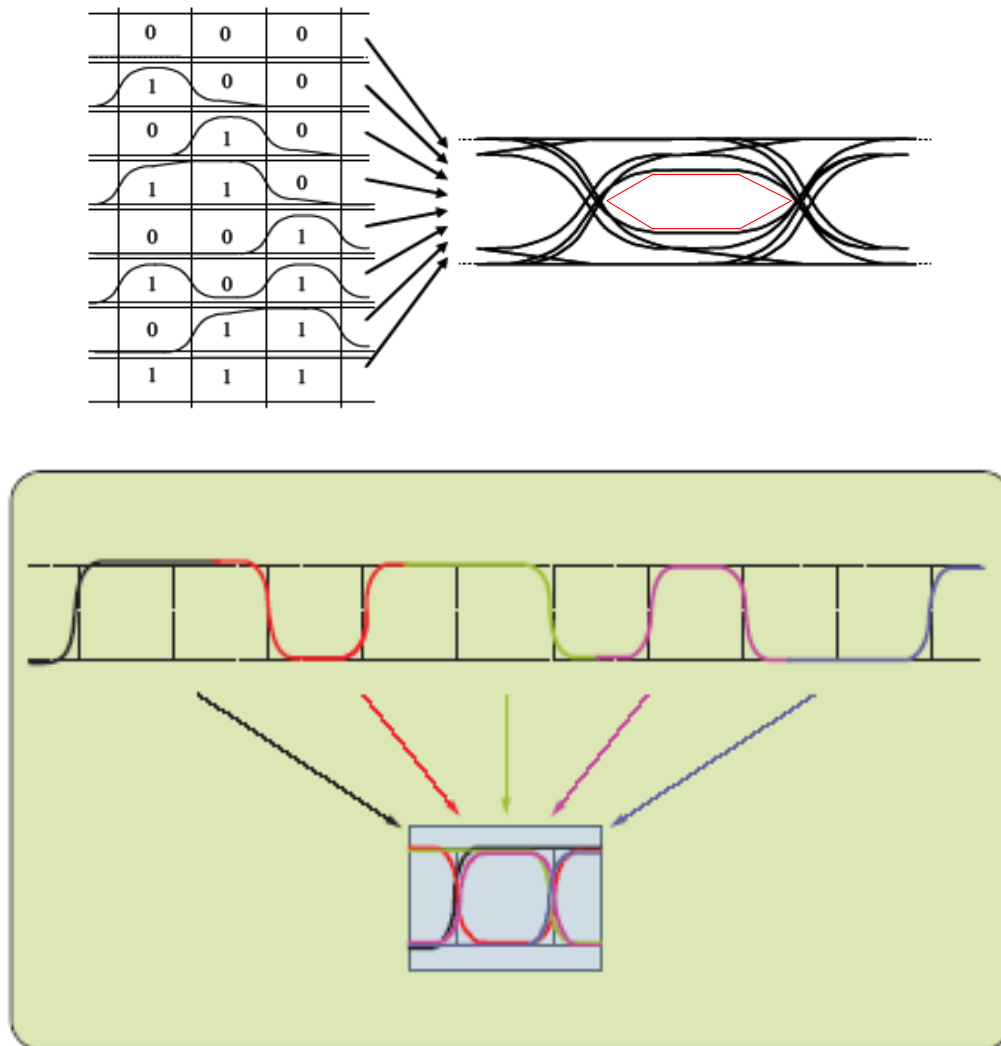
גורם זה מושפע מהאות המסוים שמשודר בערוץ. הוא מתחלק ל ISI שהוסבר בסעיף 2.3.2 ול DCD (Duty Cycle Disorder) – גורם זה נובע בד"כ משוני בין עליה וירידה של השעון ולכן לחריגה מהשעון האידיאלי.

### 2.1.12 דיאגראמת עין ("Eye Diagram")

דיאגראמת עין הינה דרך וויזואלית להצגת מרווח הרעש של רצף אותות המשודרים בקו מסוים הן בתחום הזמן והן באמפליטודה. הדיאגראמה נבנית ע"י הצגה של מספר רב של מקטעים חופפים של צורת הגל של האות. אורך כל מקטע הוא מספר מחזורי שעון, בד"כ בין 1.5 ל-2 מחזורי שעון. כל המקטעים מוצגים בצורה חופפת אחד על גבי השני, וכך ניתן לבחון ויזואלית, בצורה מרוכזת, את התנהגות האות לאורך מחזור השעון, כאשר הזמן החשוב הוא זמן דגימת האות.

האיור הבא מדגים את אופן בניית הדיאגראמה:



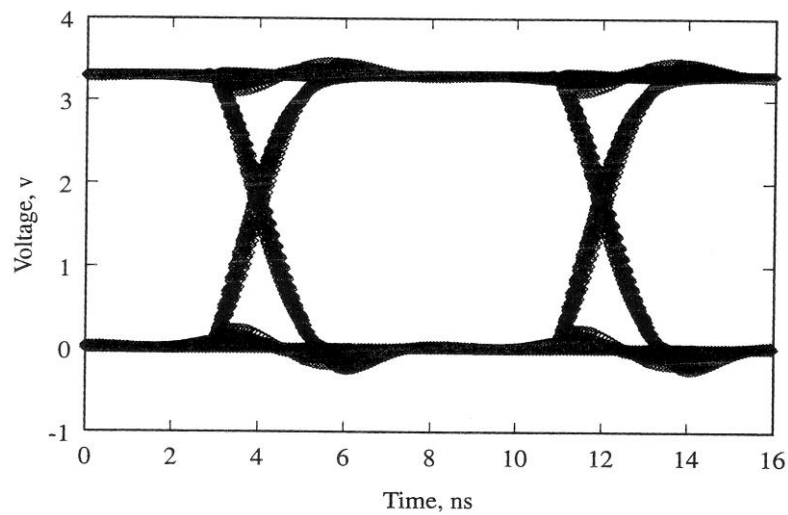


איור 9 : דיאגרמת עין

- **גובה העין** הוא אינדיקציה לרעש המתח במעגל.
- **רוחב העין** הוא אינדיקציה לרעש של הזמן במעגל (Jitter).
- הסט מתח קבוע, שאינו תלוי אות, יקבע את ההסחה האנכית של העין.
- הסט קבוע בזמן (Skew) יקבע את ההסחה האופקית של העין.
- גודל **פתיחת העין** במרכז מציין את גודל מרחב הביטחון בזמן ובמתח בו ניתן לדגום ללא שגיאה את האות.
- ניתן להתפשר על מרחב הביטחון בזמן ובמתח תמורת העלאת תדר השעון ולהפך.

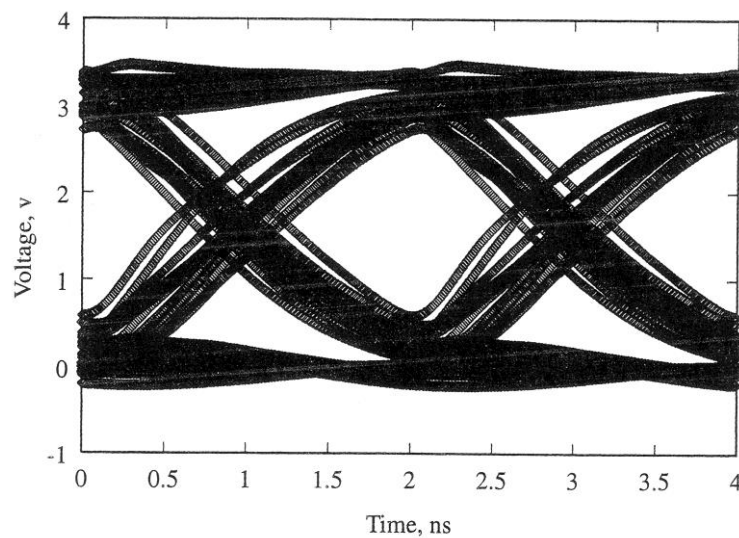
- בד"כ יעשה "קיפול" האות ע"י השעון האמיתי במערכת שגם בוא מופרע ע"י jitter. בצורה זו בדיאגרמת העין נראה את ה jitter על השעון ועל האות בו זמנית.

האיור הבא מכיל דוגמה אופיינית לדיאגרמת עין, עבור אות בתדר של 125Mhz:



איור 9: דיאגרמת עין, דוגמא (1)

האיור הבא מכיל דוגמה אופיינית לדיאגרמת עין, עבור אותו המעגל, עבור אות בתדר של 500Mhz:



איור 10: דיאגרמת עין, דוגמא (2)

### 2.1.13. ביבליוגרפיה

- [1] Bell Communications Research, Inc (Bellcore), “*Synchrouous Optical Network (SONET) Transport Systems: Common GenericCriteria, TR-253-CORE*”, Issue 2, Rev No. 1, December 1997
- [2] ITU-T Recommendation G.810 (08/96) “*Definitions and Terminology for Synchronization Networks*”, G.810, Aug. 1996..
- [3] Papoulis: “*Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, Second Edition*”, McGraw-Hill, 1984
- [4] Davenport and Root: “*An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise*”, IEEE Press, 1987

## 2.1.14. הכנה

קראי את המבוא ומהלך הניסוי לחלק א' (שים לב חלק מהרקע הנחוץ לשאלות ניתן בחלק של מהלך הניסוי) וענה\י על השאלות. יש לקרוא את הנספח בנוגע לשימוש במכשור המעבדתי הנחוץ לניסוי.

### שאלות הכנה חלק א':

1. מצאו את הקשר המתמטי בין סוגי מדידות ה jitter השונות. ובין השונות של כל אחת מהם.
2. נתון אות שעון בתדר של 1GHZ עם זמן עליה שווה לזמן ירידה שווה ל 100 פיקו שניות. בהנתן שאמפליטודת האות שווה ל 1V ובמערכת רעש מתח בעל אמפליטודה של 100mV כמה jitter ייווצר על אות השעון? כיצד ישתנה ה jitter אם נקטין את אמפליטודת השעון ל 0.5V? אילו מהאותות רגיש יותר לרעש? כיצד ניתן לטפל בבעיה זו?
3. תוכנן כרטיס עם 6 מקורות שעון של 1GHZ עם זמן עליה שווה לזמן ירידה שווה ל 100 פיקו שניות ואמפליטודה של 1V. המקורות מוזנים מאספקה בעלת השראות של 1nH וצורכים כל אחד 10mA מה רעש ה SSO המכסימלי שיכול להיגרם? כמה jitter יגרום רעש ה SSO? האם במערכת עם דוגם אידיאלי נקבל שגיאה?
4. נוסף לכרטיס מעגל שעון נוסף בעל נתונים זהים אבל מוזן יחסית לשאר השעונים בפאזה כלשהי. האם החמרנו את בעיית ה SSO? איזה בעיה אחרת עלולה להיווצר? עבור תזוזה של איזה פאזה הבעיה תהיה הקשה ביותר?

### הערות לביצוע הניסוי:

- בין כל שתי מדידות שונות יש ללחוץ על הלחצן Clear Display לשם ניקוי הזכרון מהמדידות הקודמות
- בכל שינוי פרמטרים במחולל האותות אנא בדקו כי הסיגנל בסקופ נראה בבירור ותופס כ-80% מגובה התצוגה, כך תקבלו תוצאות מדויקות יותר



## 2.1.15. מהלך הניסוי

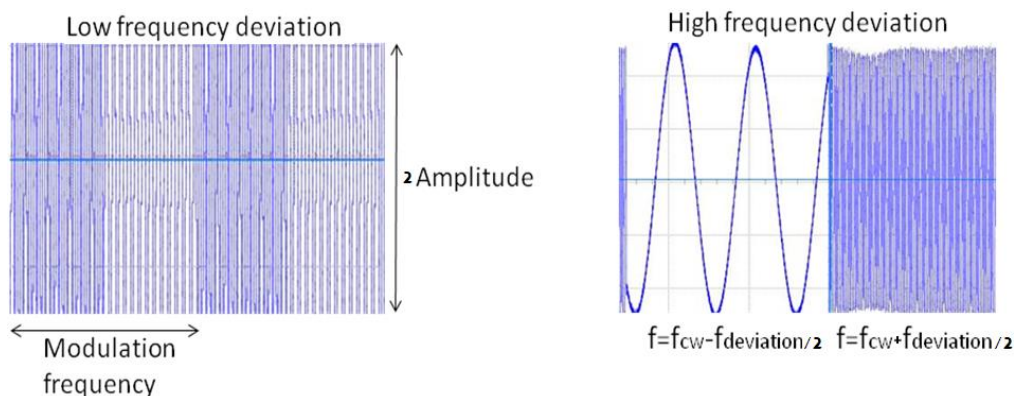
## 2.1.16. פרמטרים להערכת תופעת Jitter

## 2.1.17. הצגת דיאגרמת עין

בניסוי הזה תופעת ה-Jitter נוצרת ע"י אפנון FM (Frequency Modulation). אפנון זה, המתבצע ע"י סיגנל מחזורי, מאפשר לנו ליצור הפרעה מחזורית בסיגנל ובכך להדגים את תופעת ה-Periodic Jitter שהוא אחד מסוגי ה-Deterministic Jitter (DJ).

בחלק זה נבחן השפעת האפנון על ה-Jitter ע"י השוואה בין סיגנל מאופנן FM לסיגנל לא מאופנן תוך שמירה על שאר פרמטרי הסיגנל זהים.

להלן דוגמא של אפנון FM ע"י גל מאפנן ריבועי באפנון חזק (תמונה ימנית) ואפנון חלש (תמונה שמאלית) ע"י שינוי ה-frequency deviation:

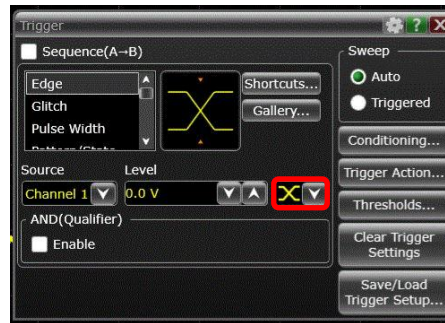


### מדידת סיגנל ללא אפנון:

שדר גל סינוסי (לא מאופנן) בתדר של 10MHz ובאמפליטודה של 250mV ([הנחיות ליצירת גל בנספח 1, חלק 1](#))

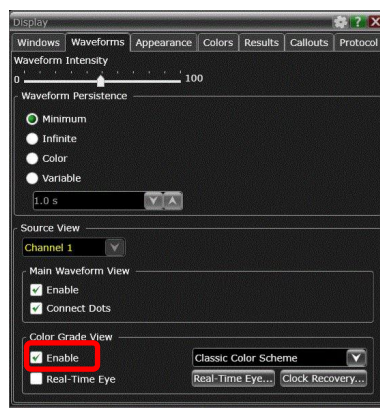
כוון את המדידה בסקופ באופן הבא כדי להקל על הערכת ה-Jitter

- אפשר Trigger בעליית ובירידת שעון  
Choose: Setup ⇒ Trigger ⇒ trigger window open ⇒ from drop down chose X ⇒ Close



- אפשר הצגה משולבת של כל הסיגנלים שנדגמו (ככל שעובר הזמן נדגמים ומוצגים יותר סיגנלים). צורת הצגה זו מאפשרת לראות את סטטיסטיקת הסיגנל ע"פ הצבע שלו

Choose: Setup ⇒ Display ⇒ chose tab Wavformes ⇒ Mark V on Color grade view enabled ⇒ Close



- הצג על מסך הסקופ כ-10 מחזורי שעון כדי לקבל הערכה טובה של עוצמת ה-Jitter

**שאלה 1.** האם ניתן להבחין ב-Jitter? למה? הערך את כמות ה-Jitter בסיגנל. הצג בדו"ח תמונת מסך של כ-10 מחזורי שעון.

### מדידת סיגנל עם אפנון FM חזק:

שדר גל (סינוסי) בתדר של 10MHz (carrier frequency) המאופנן באפנון FM ע"י גל מאפנן סינוסי עם הפרמטרים הבאים:

Frequency deviation = **500 kHz** (עוצמת האפנון)

Modulation frequency = 25 kHz (משך מחזור האפנון)

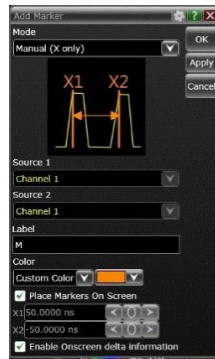
ובאמפליטודה של 250mV ([הנחיות ליצירת גל מאופנן בנספח 1, חלק 2](#))

הסקופ נשאר באותו setup אך יש לנקות את המדידות ע"י שימוש בכפתור ה-clear display

**שאלה 2.** האם ניתן להבחין ב-Jitter? מדוד את ה-  $Jitter_{p-p}$  עבור המחזור השני והרביעי מנקודת ה- trigger (נקודת הזמן אפס) ע"י שימוש בסמנים (markers) והגדלת המסך המתאימה (zoom). הצג בדו"ח תמונות מסך של כ-10 מחזורי שעון ושל מדידת ה- Jitter במחזור הרביעי.

שימוש בסמנים (markers) מתבצע ע"י בחירה ב:

Measure  $\Rightarrow$  Add Markers  $\Rightarrow$  Manual Placement



ולאחר מכן הזזת הסמנים למיקום הרצוי בעזרת העכבר

### מדידת סיגנל עם אפנון FM חלש:

חזור על המדידה תוך יצירת אפנון חלש יותר. שדר גל (סינוסי) בתדר של 10MHz (carrier frequency) המאופנ באפנון FM ע"י גל מאפנ סינוסי עם הפרמטרים הבאים:

Frequency deviation = **150 kHz** (עוצמת האפנון)

Modulation frequency = 25 kHz (משך מחזור האפנון)

ובאמפליטודה של 250mV ([הנחיות ליצירת גל מאופנ בספח 1, חלק 2](#))

הסקופ נשאר באותו setup אך יש לנקות את המדידות ע"י שימוש בכפתור ה-clear display

**שאלה 3.** מדוד את ה-  $Jitter_{p-p}$  עבור המחזור השני והרביעי מנקודת ה- trigger (נקודת הזמן אפס) ע"י שימוש בסמנים (markers) והגדלת המסך המתאימה (zoom). הצג בדו"ח תמונות מסך של כ-10 מחזורי שעון ושל מדידת ה- Jitter במחזור הרביעי.

**שאלה 4.** מה ההבדלים ב-Jitter בין שלושת המדידות (FM חזק, FM חלש וללא אפנון)? מדוע?

## 2.1.18. הצגת היסטוגרמת הסיגנל

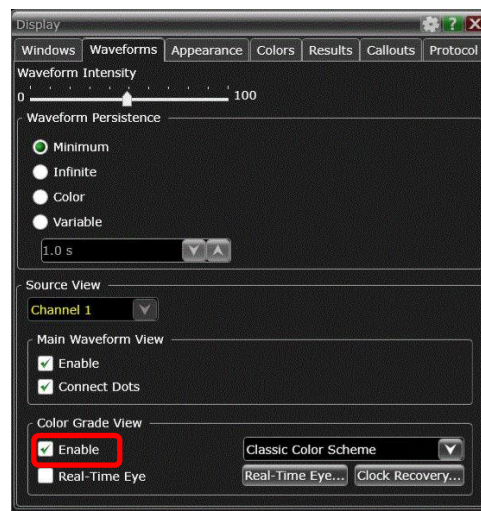
בחלק הזה נלמד מה היא ההיסטוגרמה, נשתמש בה לזיהוי פילוג המתח ופילוג ה-Jitter עבור מספר צורות מדידה.

### היסטוגרמת מתח

שדר גל סינוסי (לא מאופנן) בתדר של 10MHz ובאמפליטודה 250mV (הנחיות ליצירת גל בנספח 1, חלק 1) כוון את המדידה בסקופ באופן הבא כדי לקבל את היסטוגרמת המתח:

- בטל את ה-color grade מהסעיף הקודם

Choose: Setup ⇒ Display ⇒ chose tab Waveforms ⇒ Mark V on Color grade view enabled ⇒ Close



- הפעל את ההיסטוגרמת מתח

Choose: Analyze ⇒ Histogram ⇒ Default Window

הצג היסטוגרמה בציר ה-y, ע"י כיוון הסקופ לפי האיור הבא:



(שים לב שגבולות המתח הנמדד בציר ה-y כוללים בתוכם את כל הסיגנל, הסיגנל שלנו באמפליטודה של 250mV והטווח מדידה שלנו הוא 300mV)

- הצג מספר רב של מחזורים על צג הסקופ

**שאלה 5.** הצג היסטוגרמה מתקבלת בדו"ח. הסבר מה מייצגת ההיסטוגרמה במקרה זה. חזור על המדידה עבור גל ריבועי וגל משולש. הצג את ההיסטוגרמות שהתקבלו (זכור לנקות את הזכרון של הסקופ בין המדידות). איזה מידע היא נותנת ההיסטוגרמה לגבי האות? הצג בדו"ח את שלושת ההיסטוגרמות המתקבלות.

### היסטוגרמת Jitter

בסעיף הזה נלמד את השימוש בהיסטוגרמה בהקשר של Jitter, הנוצר כאמור ע"י שימוש באות מאופנן. שדר גל (סינוסי) בתדר של 10MHz (carrier frequency) המאופנן באפנון FM ע"י גל מאפנן ריבועי עם הפרמטרים הבאים:

Frequency deviation = 1000 kHz (עוצמת האפנון)

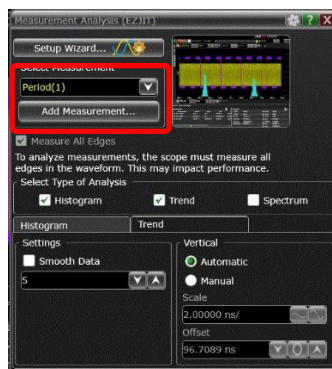
Modulation frequency = 10 kHz (משך מחזור האפנון)

ובאמפליטודה של 250mV ([הנחיות ליצירת גל מאופנן בנספח 1, חלק 2](#))

אפס את הקונפיגורציה של הסקופ על ידי לחיצה על כפתור Default Setup

כוון את הסקופ כך שימדוד Jitter, יציג את ההיסטוגרמה של המדידות הנ"ל וגם את המדידות כפונקציה של הזמן באופן הבא:

Choose: Analyze ⇒ Measurement Analysis (EZJIT) ⇒ Add Measurements ⇒ Clock ⇒ Period ⇒ OK ⇒ Add Measurements ⇒ Clock ⇒ period - period ⇒ OK ⇒ Add Measurements ⇒ Clock ⇒ Clock TIE ⇒ OK ⇒ V on Histogram and Trend ⇒ V on Measure All Edges (ע"פ התמונה הבאה)



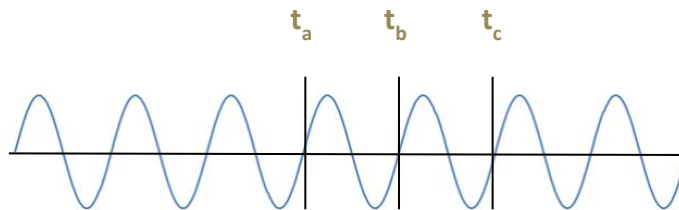
**שאלה 6.** א. הצג בדו"ח היסטוגרמה ו-Jitter(time) עבור סוגי ה-Jitter השונים (Period, Cyc-Cyc, TIE).  
הצג הרבה מחזוריים בציר הזמן (האופקי) לשם קבלת תוצאה יותר מדויקת.  
ב. הסבר את הגרפים המתקבלים לשלושת סוגי ה-Jitter.

## 2.1.19. מדידות וניתוח סטטיסטי של תופעת Jitter

בסעיף זה, נציג את הקשר המתמטי בין השונות של סוגי ה-Jitter.

תזכורת מהסתברות:  $X \sim N(0, \sigma_X^2), Y \sim N(0, \sigma_Y^2) \Rightarrow Z = X \pm Y \sim N(0, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2)$

נניח כי דגימות עליית השעון (דרבון) הם  $t_a, t_b, t_c$ , בהתאמה, כמוצג באיור הבא.



כפי שהנחנו הפילוג של כל עליית שעון מפולג גאוסית עם שונות  $\sigma$  בהתאם להגדרת סוגי Jitter, נקבל:

$$T_{\text{Period}} = t_a - t_b \rightarrow \sigma_{\text{Period}}^2 = \sigma_{t_a}^2 + \sigma_{t_b}^2$$

$$\text{and for: } t_a, t_b \sim N(0, \sigma^2) \rightarrow \sigma_{\text{Period}} = \sqrt{2}\sigma$$

$$T_{C2C} = (t_c - t_b) - (t_b - t_a) = t_c - 2t_b + t_a \rightarrow \sigma_{C2C}^2 = \sigma_{t_a}^2 + 4\sigma_{t_b}^2 + \sigma_{t_c}^2$$

$$\text{and for: } t_a, t_b, t_c \sim N(0, \sigma^2) \rightarrow \sigma_{C2C} = \sqrt{6}\sigma$$

$$T_{\text{TIE}} = t_a - t_{\text{Ideal}} \rightarrow \sigma_{\text{TIE}}^2 = \sigma_{t_a}^2$$

$$\text{and for: } t_a \sim N(0, \sigma^2) \rightarrow \sigma_{\text{TIE}} = \sigma$$

$$\sigma_{C2C} = \sqrt{3}\sigma_{\text{period}} \quad \text{נובע גם כי}$$

## 2.1.20. הצגת שיטות שונות למדידת Jitter

בסעיף זה נבחן את הקשר המתמטי שהוצג בין שלושת צורת המדידה של ה-Jitter. לשם כך שדר גל סינוסי (לא

מאופנן) בתדר של 10MHz ובאמפליטודה של 20mV ([הנחיות ליצירת גל בנספח 1, חלק 1](#)). זהו שעון בעל

JITTER מפולג גאוסית כפי שראינו בפיתוח התאורטי, בעיקר בזכות אמפליטודת הסיגנל הנמוכה (הסבר לחשיבות

האמפליטודה מופיע בנספח 3).

בסקופ מדוד את השונות לכל אחת משיטות המדידה (ה-STD DEV מופיע במדידות בתחתית המסך ויש להזיז עם

החץ כדי להגיע למידע הנ"ל).

Measurements							
Measurement	Current	Mean	Min	Max	Range (Max-Min)	Std Dev	Count
1 5Per - Per(1)	-30.7 ps	-4 fs	-1.2129 ns	1.3001 ns	2.5129 ns	254.080 ps	654381
2 Period(1)	100.1090 ns	99.999965 ns	99.3488 ns	100.6859 ns	1.3371 ns	145.764 ps	113686
3 Clock TIE(1)	-498.8 ps	-0.0 s	-1.6956 ns	1.3618 ns	3.0575 ns	258.301 ps	255536

**שאלה 7.** הצג בדו"ח את השונות לשלושת צורות המדידה המדוברות. חשב את היחס בין השונות השווה לצפויות מהפיתוח התאורטי.

הבחירה בסוג ה Jitter שמאפיין את המערכת תלוי בסוג המערכת בה אנו עוסקים. לדוגמה במערכות עם ערוצי מידע טוריים ובאפיון מקורות שעון נרצה למדוד את ה TIE, לעומת זאת עבור מערכות בהם השעון משודר במקביל ל- data (כמו שקורה בדר"כ ב-bus מקבילי) אין חשיבות לסטייה מהשעון האידיאלי ולכן נתעניין ב C2C ו Period jitter.

## 2.1.21. סיכום

יש לכתוב תקציר מסקנות ותשובות לשאלות בגוף הניסוי.



**חלק ב': השפעת תופעת ה-Jitter על קצב השגיאות (Bit Error Rate)****3. מבוא****מתודולוגיה להפרדת רכיבי Jitter**

שתי שיטות עיקריות משמשות להפרדת DJ ו-RJ: שיטת Tail-Fit ושיטה העושה שימוש במאפייני תדר הגל הנדגם.

**שיטת Tail-fit**

ה-Jitter הכולל בכל מערכת יהיה שילוב של RJ ו-DJ ונתון ע"י הקשר הכללי הבא בין הפונקציות צפיפות של סוגי ה-Jitter:

$$\begin{cases} TJ(x) = RJ(x) * DJ(x) \\ RJ(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases}$$

תחת ההנחה ש RJ מפולג בצורה גאוסית.

לכן ביטוי עבור TJ היינו

$$TJ(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int DJ(m) \exp\left(\frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) dm$$

תכונות אסימפטוטיות של המודל הן

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} TJ(x) = A \exp\left(\frac{-(x-\xi_L)^2}{2\sigma^2}\right) \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} TJ(x) = A \exp\left(\frac{-(x-\xi_R)^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases}$$

כאשר  $\xi_L$  ו- $\xi_R$  הינם קבועים התלויים ב-DJ(x).



## מודל Dual Dirac

בדר"כ אנחנו מעוניינים למצוא את כמות ה jitter הכוללת (TJ) עבור BER יותר גבוהה מהנמדד, לשם כך נוכל להשתמש במודל מתמטי מופשט ל DJ אשר יחליף את הפילוג המורכב האמיתי של ה DJ אבל יתאר נכונה את ההסתברות לקבלת TJ בזנבות כמו המודל המלא, מודל מופשט זה נקרא מודל Dual Dirac ובו מתקיים  $\xi_R = \mu_R$   $\xi_L = \mu_L$  and והוא מתאר נכון את הפילוג בקצוות שמשמש למציאת ה-RJ ואת האיזור המרכזי של הפילוג שנשלט בעיקר ע"י ה-DJ הוא ממדל כשתי פונקציות דלתא המשקפות את הטווח ערכים האפשריים של ה-DJ.

מודל DJ ע"פ Dual Dirac, הוא שתי פונקציות דלתא ומסומן ע"י  $DJ(\delta\delta)$ . הפילוג האמיתי הפיסיקלי נתון ע"י  $DJ(p-p)$  - מדידה פיזית של DJ, peak-to-peak, בעוד  $DJ(\delta\delta)$  יכול להיות מחושב בכל עת,  $DJ(p-p)$  יכול להימדד רק במקרים אחדים. ולכן נוהג להשתמש במודל זה.

באופן כללי ניתן להניח  $DJ(\delta\delta) < DJ(p-p)$ .

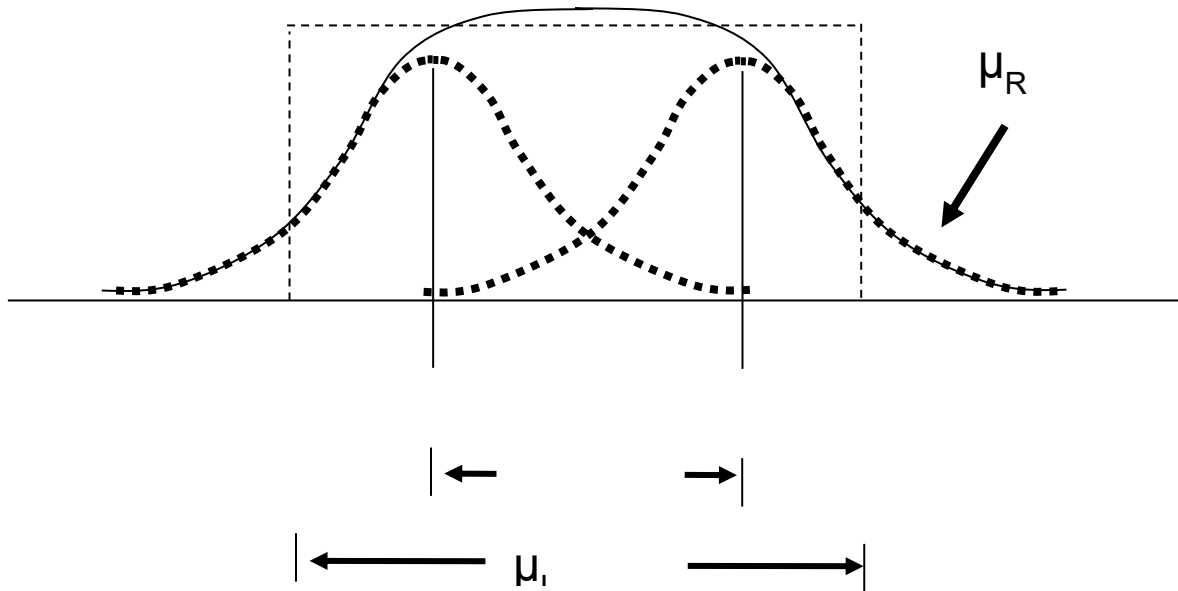
$$[\delta(x - \mu_L) + \delta(x - \mu_R)] * \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] = \exp\left[-\frac{(x - \mu_L)^2}{2\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(x - \mu_R)^2}{2\sigma^2}\right]$$

### מודל dual Dirac להפרדת סוגי Jitter

מודל Dual-Dirac מספק את ההתפלגות הפשוטה ביותר האפשרית: כפי שמתואר באיור הנקודות מופרדות לפונקציות דלתא-דיראק בערכי  $\mu_L$  ו- $\mu_R$  כאשר DJ דומיננטי והיווצרות זנבות ע"י RJ. מידול DJ באמצעות Dual Dirac הוא  $DJ(\delta\delta) = |\mu_L - \mu_R|$ .

כפי שניתן לראות ההתנהגות האסימפטוטית מתפלגת באופן גאוסי ולכן נסיק כי קצוות פונקציית פילוג ההסתברות בעלת רכיבי RJ

בלבד. עקב מסקנה זו, המתודולוגיה הנוכחית מודדת את ההתפלגות במרחק מספק מן האיזור המושפע ע"י DJ (זנבות PDF), כפי שניתן לראות באיור הבא:



לכן במודל זה ע"מ לחשב את כמות ה Jitter בזנבות נוכל להשתמש בנוסחא הבאה:

$$TJ(BER) \approx 2Q(BER) \cdot \sigma + DJ(\delta\delta)$$

כלומר ה jitter הכולל מורכב מהתרומה הדטרמיניסטית + התרומה הרנדומלית בנפרד.

מכיוון ש RJ מפולג גאוסי ואינו חסום חייבים לציין באיזו הסתברות אנחנו רוצים למדוד ובהתאם נספור  $x \cdot \sigma$  לפי המתואר בנספח 4.

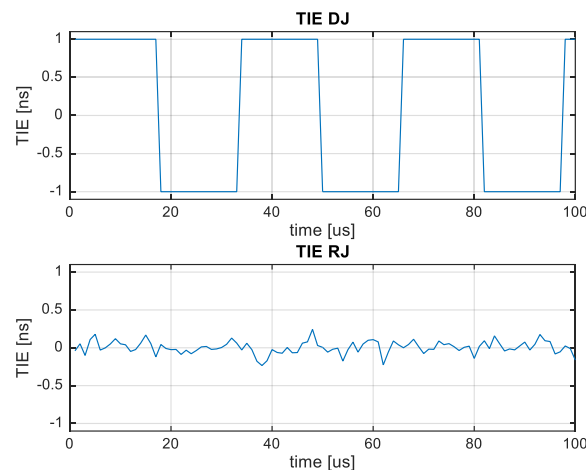
מודל זה אינו מתאים כאשר הפילוג של ה DJ כולל ארועים בעלי הסתברות נמוכה אשר יכולים "להתחזות" ל RJ ולכן יובילו לטעות ב- tail fit.

### 3.1.1 הכנה

קראי את המבוא ומהלך הניסוי לחלק ב' (שים לב חלק מהרקע הנחוץ לשאלות ניתן בחלק של מהלך הניסוי) וענה/י על השאלות. יש לקרוא את הנספח בנוגע לשימוש במכשור המעבדתי הנחוץ לניסוי.

#### שאלות הכנה חלק ב:

1. נתון Jitter דטרמיניסטי ריבועי כפונקציה של זמן ו-Jitter רנדומלי מפולג גאוסית כפונקציה של הזמן המוצגים בתמונה הבאה. צייר כיצד יראה ה TIE Jitter הכולל (TJ) כפונקציה של הזמן. חזור על הפעולה עבור Jitter דטרמיניסטי משולש.



2. בהנתן אות שעון בתדר של 1GHZ ורעש רנדומלי (RJ) מאופיין גאוסית עם סטיית תקן של 100 פיקו שניות מה ההסתברות לשגיאה בדגימת השעון בהינתן דוגם אידיאלי שדוגם במרכז הביט.
3. כיצד תשתנה התשובה בשאלה הקודמת עבור דוגם בעל jitter רנדומלי מאופיין גאוסית עם שונות של 100 פיקו שניות? הסבר. (הנח חוסר קורלציה בין הדוגם לשעון)
4. במדידת jitter משני סקופים שונים עבור BER של  $10^{-7}$  נמדד TJ זהה של 150ps אך ערכי DJ שונים של 50ps, 70ps. אנו מעוניינים לשערך את כמות ה TJ עבור BER של  $10^{-12}$ , מה יהיה ההבדל ב TJ בין הסיקופים?

**הערה לביצוע הניסוי:** לשם מניעת טעויות של שינוי סקלה

אוטומטי באוסילוסקופ קבע את תדר הדגימה של האוסילוסקופ

לערך קבוע של 250 מגה דגימות לשניה באופן הבא:

Setup  $\Rightarrow$  Acquisition  $\Rightarrow$  Analog Sampling rate = 250MSa/s

### 3.1.2 אבחון וניתוח Jitter

### 3.1.3 חישוב DJ ע"י גל מאופנן

כפי שתואר בחלקים הקודמים, TIE Jitter עבור גל מאופנן ריבועי הינו גל משולש כאשר בחצי המחזור הראשון הינו עולה (ומעלה את סיכוי השגיאה) ובחציו השני יורד (ומוריד את הסתברות השגיאה), כאשר שגיאה peak-to-peak מסתכמת עבור חצי מהגל המאופנן. במקרה בו DJ יותר דומיננטי מאשר RJ (ובמקרה שלנו אמפליטודה גבוהה יותר עבור הגל) סיכום השגיאה הוא DJ.

על מנת לחשב את DJ הכולל עלינו לחשב כמה תורם (גורם  $\delta T$ ) כל מחזור שגיאה של הגל המאופנן לסה"כ השגיאה הנמדדת:

$$\delta T = \left| \frac{1}{f_{CW} - f_{Dev}/2} - \frac{1}{f_{CW}} \right|$$

סה"כ זמן בו השגיאה גוברת:

$$T_{error} = \frac{T_{Mod}}{2} = \frac{1}{2f_{Mod}}$$

מחזור שגיאה אחד הינו:

$$T_{cycle} = \frac{1}{f_{CW} - f_{Dev}}$$

ונקבל:

$$DJ_{p-p} = \frac{T_{error}}{T_{cycle}} \cdot \delta T = \frac{f_{CW} - f_{Dev}}{2f_{Mod}} \cdot \delta T$$

### מדידות DJ

בדוק את המשוואות הנ"ל ע"י מדידות.

שדר גל (סינוסי) בתדר של 10MHz (carrier frequency) המאופנן באפנון FM ע"י גל מאפנן ריבועי עם הפרמטרים הבאים:

Frequency deviation = 10 kHz (עוצמת האפנון)

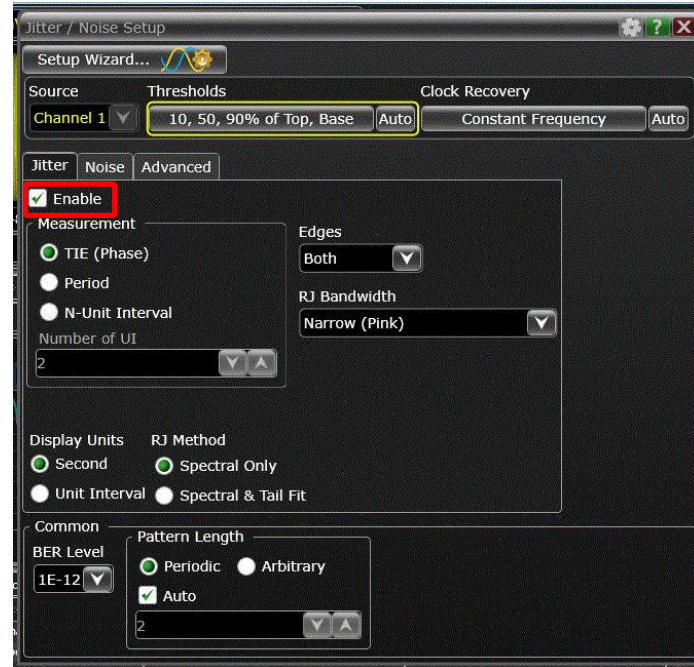
Modulation frequency = 25 kHz (משך מחזור האפנון)

ובאמפליטודה של 250mV (הנחיות ליצירת גל מאופנן בנספח 1, חלק 2)



בסקופ הכנס כמות גדולה של מחזורים למסך. הפעל את הכלי לאנליזת Jitter ומדוד בעזרתו את ה-DJ המתקבל עבור האות הנ"ל.

Choose: Analyze ⇒ Jitter/Noise ⇒ Enable



שאלה 1. רשמו את ה DJ המתקבל מהמדידה של הסקופ והשוו לזה המתקבל מהחשוב התיאורטי. הסברו הבדלים בין שתי התוצאות במידה ויש.

שאלה 2. האם תוצאה זו היא כללית או ספציפית לסוג אפנון זה בלבד (בהנחה שאנחנו משדרים אות שעון מאופנון)? הסבירו.

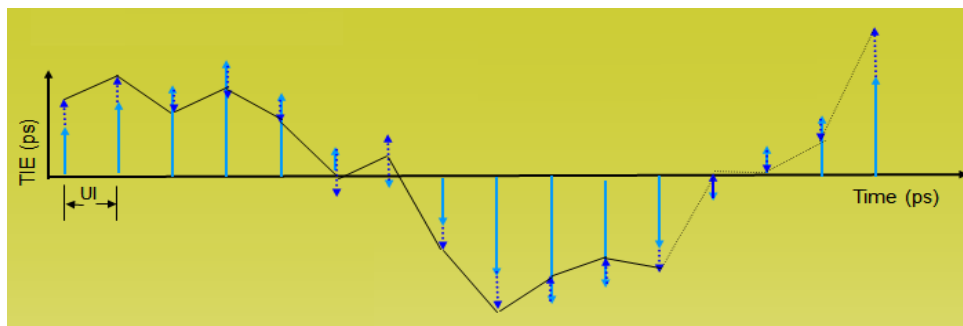
### 3.1.4 ביצוע מדידות במישור התדר

בסעיף זה נדון בשיטות לאבחנה ומדידת רכיבי Jitter במישור התדר.

כפי שראינו בשיטת Tail Feet, רכיב RJ ניתן להערכה ולחישוב ע"י בחינת STD של זנב פונקציית הנרמול PDF. בסעיף זה, נחשב את רכיב ה-RJ באמצעות שימוש במסננים שונים במישור התדר על רכיב DJ.

#### דוגמא

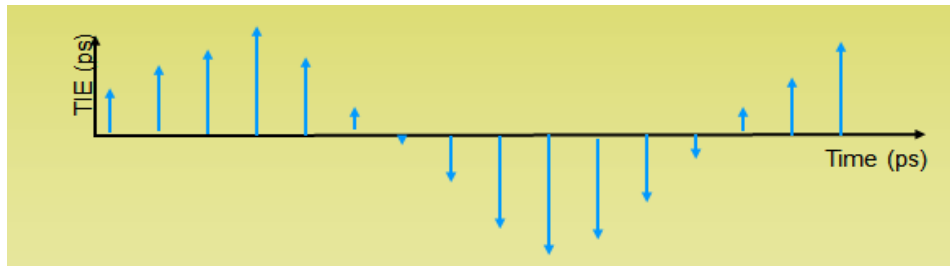
נניח כי התקבלה מדידת TIE הנתונה באיור הבא. גודל TIE מתקבל כפונקציה התלויה בזמן אשר כידוע, הינה צירוף של RJ, DJ.



ניתן לראות כי האות שהתקבל אינו מחזורי כפי שמצופה לגבי DJ (למשל, כזכור צורת גל משולש מחזורי אשר התקבל כ-TIE של גל מאופנן ריבועי). לפיכך, הווקטורים המקווקים באיור מייצגים את תרומת RJ, אשר באופן עקרוני נחשב לרעש. התמרת מדידת TIE למישור התדר מצידה הפרדה בין רכיבי DJ, RJ כפי שמתואר באיור הבא:



כפי שניתן לראות, הווקטורים בעלי הגודל המשמעותי שייכים ל-DJ. כדי לחשב את תרומת ה-DJ בלבד יש לבודד את רכיביו באמצעות מסננים מתאימים ובאמצעות התמרת פורייה הפוכה, כפי שמודגם באיור הבא:



לבסוף, כדי לחשב את RJ עלינו לחסר את מדידות DJ ממדידות TJ.

הבעיה בשיטה זו היא כיצד לקבוע מהו הסף המבדיל בין רכיבים בעלי גודל משמעותי לרעש. לכן כאשר יש לנו רכיבי DJ בעלי פילוג ספקטרלי רחב ונמוך (מאפיין בדר"כ את רכיב ה BUJ שהוזכר במבוא לחלק א') חלק מה DJ ימצא מתחת לסף ויחשב בטעות כ RJ.

### 3.1.5 מדידה ע"י התמרת פורייה

נתנסה בשימוש ב-FFT להפרדת רכיבי ה-Jitter.

שדר גל (סינוסי) בתדר של 10MHz (carrier frequency) המאופנ באפנון FM ע"י גל מאפנן סינוסי עם הפרמטרים הבאים:

Frequency deviation = 10 kHz (עוצמת האפנון)

Modulation frequency = 25 kHz (משך מחזור האפנון)

ובאמפליטודה של 250mV ([הנחיות ליצירת גל מאופנן בנספח 1, חלק 2](#))

בסקופ לחצו על לשונית Graphs ובתפריט שנפתח לחצו על Rj Pj Spectrom. שנו את ה ZOOM בעזרת העכבר

**שאלה 3.** בחן את ספקטרום ה-Jitter. באיזה תדר מתקבל השיא? מה האמפליטודה המקסימלית (בקירוב)? מה הקשר בין ערכי המדידה לפרמטרי האפנון.

### 3.1.6 מדד BER – קצב השגיאות לביט (bit error rate)

הגדרת ה-BER נתונה ע"י הנוסחה הבאה:

$$BER(x, V) \equiv \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{N_{err}(x, V)}{N}$$

כאשר:  $(x, V)$  הוא מיקום נקודת הדגימה

$N_{err}(x, V)$  מספר השגיאות שהתקבל ע"י שידור  $N$  ביטים

בניסוי זה נניח כי השגיאות מתקבלות ע"י Jitter בלבד, לכן ניתן לאבחן ולמדוד שגיאות בציר הזמן בלבד ללא

התייחסות לאמפליטודה. ייצוג BER מסוים ע"י גודל  $\sigma$  ניתן בנספח 4.

השימוש בהקשר שלנו ב-BER הוא באופן הבא: קבע BER מסוים ול-BER זה תוכל למדוד/לחשב את ה-Jitter

שהמערכת שלך מייצרת – Jitter(BER)

### 3.1.7 עקומת אמבטיה (bathtub curve)

עקומת האמבטיה הינה כלי סטטיסטי המשמש לניתוח תופעת Jitter עבור BER מסוים.

אלגוריתם שרטוט עקומת אמבטיה

1. צור היסטוגרמה של ערכי Jitter.

2. צור PDF- Probability distribution function ע"י נרמול ההיסטוגרמה. זאת פונ' הצפיפות של ה-TJ

$$Area = \int_{-\infty}^{\infty} Hist.values \quad PDF(x) = \frac{Hist(x)}{Area}$$

3. צור Cumulative distribution function CDF ע"י אינטגרל (סכימת ערכים) PDF. זאת פונ'

ההסתברות של ה-TJ

$$CDF(x) = \int_{-\infty}^x PDF(\tau) d\tau$$

4. המשך יצירת CDF עד הגעה ליעד BER רצוי.

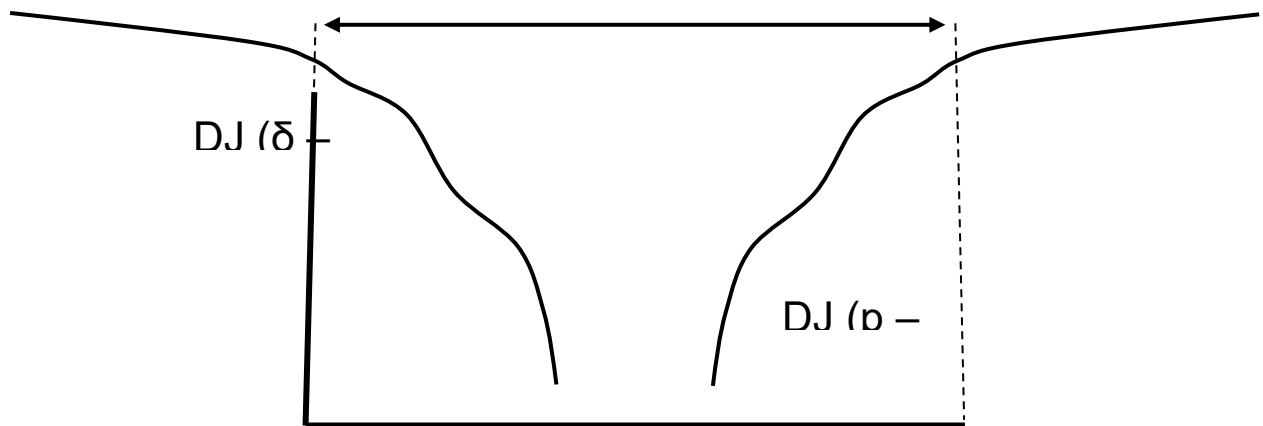
5. צור גרף CDF כאשר ציר Y הינו ערכי BER כפי שמתואר באיור הבא (לפירוט נוסף ראה נספח 3).

(CDF אחד ממוקם בצד אחד ו-CDF שני ממוקם בהיפוך בצד השני של), ביחד הם מהווים מדד לסגירת

העין בציר האופקי לאורך זמן – יותר זמן מדידה מקביל ל-BER יותר גבוה ומקביל לירידה בגרף הבא

בציר האנכי.





גודל UI פחות ההפרש בין שני CDF עבור BER מסויים מייצג את גודל ה-TJ.

הגדרות ומסקנות סטטיסטיות באמצעות עקומת האמבטיה

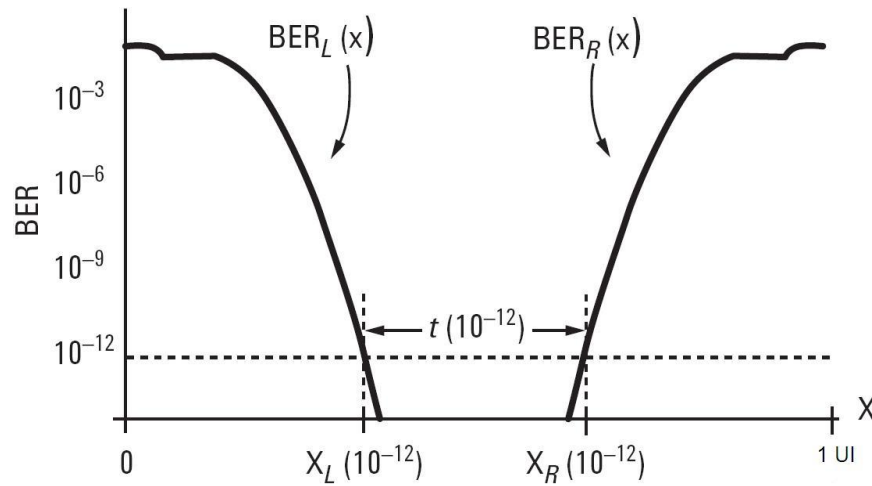
הגדרות:

- $x_L(BER)$ ,  $x_R(BER)$  - X values for a given BER at the right and the left CDF's
- $t(BER)$  - Eye opening at a given BER
- $TJ(BER)$  - TJ at a given BER

מסקנות:

- $t(BER) = x_R(BER) - x_L(BER)$
- $TJ(BER) = 1_{UI} - t(BER)$

**Bathtub curve - eye opening measurement**



הסבר נוסף בנושא ניתן למצוא במדריך הבא - [LINK](#)

### 3.1.8 הפרדת רכיבי DJ, RJ בתרשים עקומת אמבטיה (bathtub curve)

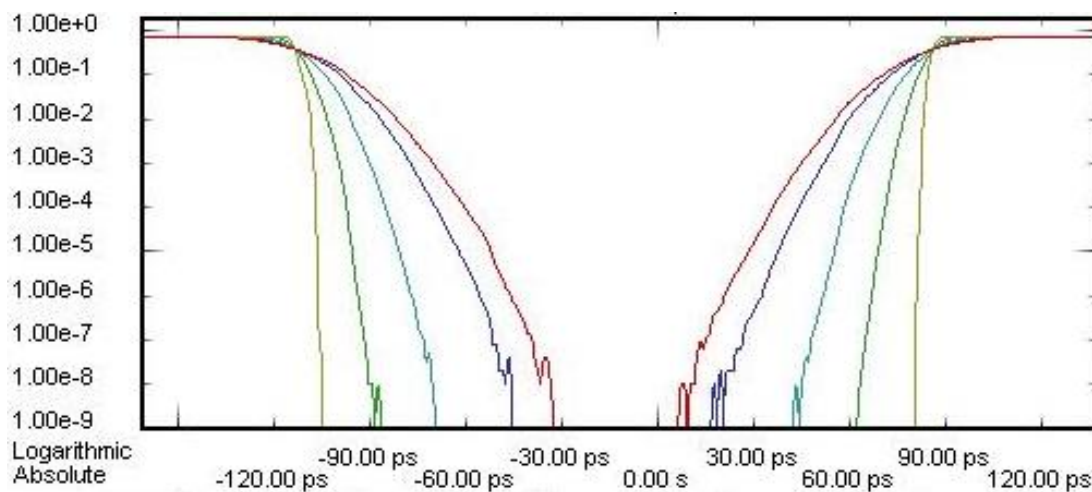
Jitter העונה על הנחות מודל Dual-Dirac ניתן לתיאור:

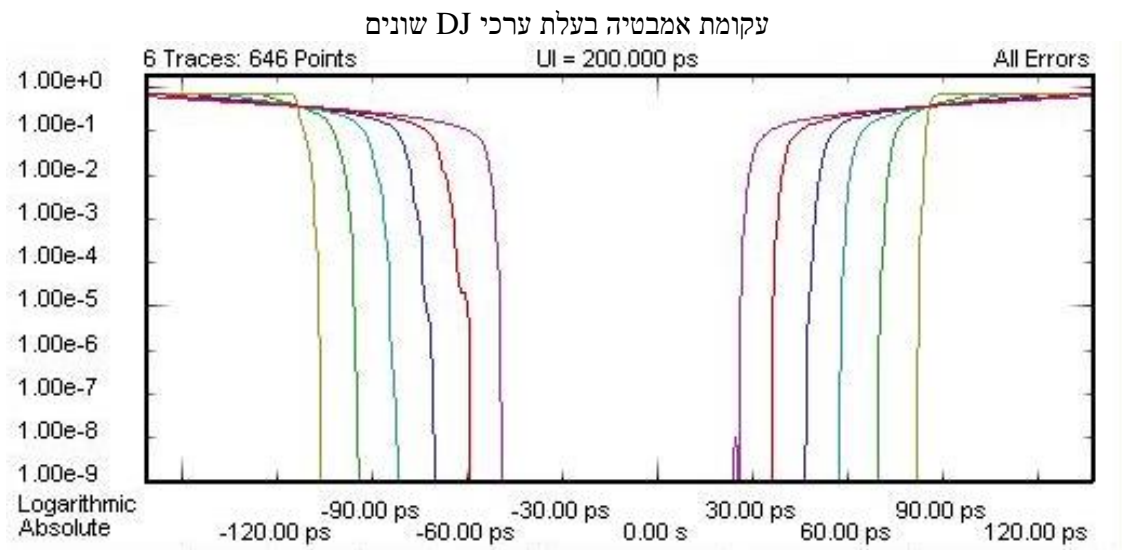
$$TJ(BER) \approx 2Q(BER) \cdot \sigma + DJ(\delta\delta)$$

- דיוק תלוי ראשית בסדר ראשון ב-RJ ובסדר שני ב-DJ.
- ערכי  $2Q(BER)$  ניתנים בנספח 3.

ערכי RJ, DJ באים לידי ביטוי בצורות שונות בעקומת האמבטיה, כפי שמתואר באיורים הבאים:

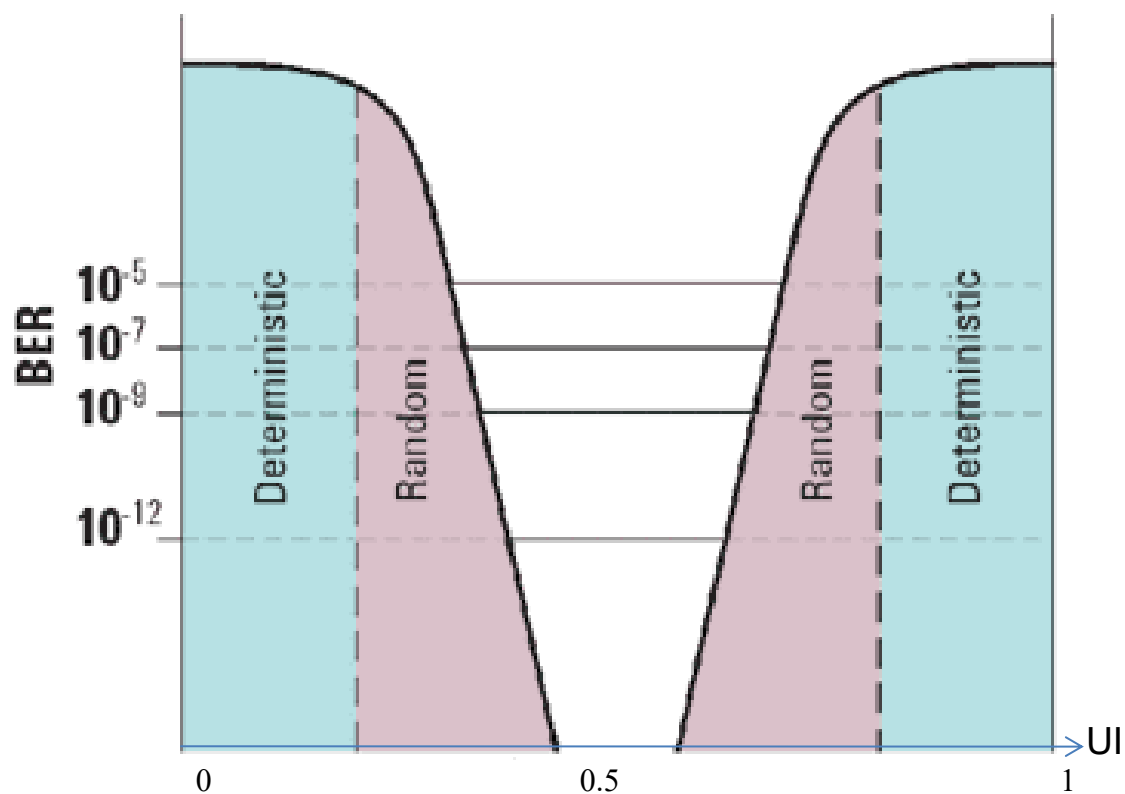
עקומת אמבטיה בעלת ערכי RJ שונים





### הסבר

רכיב DJ חסום בפונקציית הנרמול PDF, ולכן סכימת CDF תהיה אפס עד אשר נגיע לאיזור השפעתו – אשר מתואר במודל Dual-Dirac בפרמטר  $\mu_L$ . לכן, נראה עקומה חדה בקצוות עקומת אמבטיה הנבנית עבור ערכי DJ שונים. באופן דומה, RJ אינו חסום ולכן עקומה האמבטיה נסגרת עבור BER נמוך מספיק. הערכת גודל TJ, הנוצר ע"י DJ, RJ ניתן לראות באופן עקרוני באיור הבא:



### 3.1.9 ניתוח תוצאות מדידת Jitter באמצעות עקומת אמבטיה (bath.curve)

כעת ננתח את ההשפעות ה-RJ וה-DJ על עקומת האמבטיה. לשם כך נבחן שני מקרים השונים בכמות ה-RJ. לכל אחד מהם נשנה את ה-DJ עד לסגירת העין ב-BER הרצוי. את השליטה ב-RJ נבצע באמצעות יצירה של סיגנל מאופנן עם רעש במטלב ושידור בעזרת מחולל האותות. זאת כדי לאפשר שליטה טובה על רמת ה-RJ.

דגש לשאלות הבאות: זכור ללחוץ Clear Display לאחר כל שינוי בגל המשודר

**שאלה 4.** צור אות עם אפנון FM חלש ו-RJ חזק ע"י שימוש בסקריפט Part2\_Q4\_7.m ושימוש

$$\sigma_N = 0.6, \text{ freq\_dev} = 10_{\text{kHz}}$$

בחן את התוצאות המתקבלות בעקומת האמבטיה (BER Bathtub). חזור מספר פעמים על הרצת הסקריפט תוך הגדלת מידת הסטייה בתדר (frequency deviation) וצפה בשפעתה על עקומת האמבטיה (אין לשנות את שונות הרעש). מדוד את מידת הסטייה בתדר שמביאה לסגירת העין ב- $BER = 10^{-12}$  וב- $BER = 10^{-6}$ . הצג בדוח את הערכים של מידת הסטייה בתדר שסוגרים את העין ב- $BER = 10^{-12}$  וב- $BER = 10^{-6}$  ותצלומי מסך של שני המקרים הנ"ל.

**שאלה 5.** הסבר את הקשר בין האפנון ל-Jitter ולסגירת העין בעקומת האמבט.

**שאלה 6.** חזור על המדידות עבור  $\sigma_N = 0.2$  והצג בדוח את הערכים של מידת הסטייה בתדר (frequency deviation) שסוגרים את העין ב- $BER = 10^{-12}$  וב- $BER = 10^{-6}$  ותצלומי מסך של שני המקרים הנ"ל

**שאלה 7.** הסבר את השוני בין התוצאות. מה משפיע על סגירת העין בשני המקרים?



### 3.1.10. מדידות נוספות באמצעות עקומת האמבטיה (bathtub curve)

בסעיף זה נמדוד את חלון הדגימה של המערכת.

שדר גל (סינוסי) בתדר של 10MHz (carrier frequency) המאופנן באפנון FM ע"י גל מאפנן סינוסי עם הפרמטרים הבאים:

Frequency deviation = 50 kHz (עוצמת האפנון)

Modulation frequency = 25 kHz (משך מחזור האפנון)

ובאמפליטודה של 250mV ([הנחיות ליצירת גל מאופנן בנספח 1, חלק 2](#))

בסקופ פתח את הכלי של ניתוח Jitter ושם פתח את ה-BER Bathtub.

במידה והיית מנסה לדגום את הסיגנל הנ"ל במערכת דגימה אמיתית עם Jitter בדגימה של  $TJ(10^{-12}) = 7_{ns}$ .  
בסעיפים הבאים נבדוק את תפקוד המעגל בתנאים אלו, ונמדוד את השוליים (margin) המתקבלים.

**שאלה 8.** חשב את סה"כ ה Jitter כתוצאה מהשעון הדוגם והאפנון ב-  $BER=10^{-12}$ .

**שאלה 9.** מה חלון הדגימה (MARGIN) הנותר ב-UI ב-  $BER=10^{-12}$ ? הערך את תפקוד המעגל בתנאים שהתקבלו. האם ניתן יהיה לדגום מידע אמין?

### 3.1.11 תרגיל סיכום – אנליזה של סיגנל לא ידוע

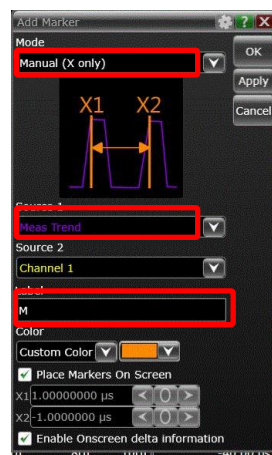
בחלק מסכם זה נבדוק איזה מידע ניתן לקבל מהסיגנל ע"י כלים של ניתוח Jitter שלמדנו.

אפס את הגדרות הסקופ ע"י לחיצה על הלחצן Default Setup תכבה את דגימת הערוץ הראשון בסקופ ע"י לחיצה על המקש 1 (המקש המואר על הסקופ, ליד נקודת חיבור של הכבל לסקופ).

בקש מהמדריך מספר סיגנל לחלק זה של הניסוי. טען את הסיגנל הנבחר באופן הבא:

Choose: File ⇒ Open ⇒ Waveform ⇒ Chose file from the "Waves" folder (\*.wfm)

- בשאלה הבאה מומלץ להיעזר ב-zoom וב-markers כדי לענות על חלק מהסעיפים
  - בצע זום ע"י סימון האזור הרצוי במסך ע"י העכבר ובטל זום ע"י לחיצה על undo
  - ניתן לבחור את הסיגנל עליו ממוקמים הסמנים. לדוגמא, מיקום סמנים על גרף ה-TIE(time):



שאלה 10.

בהתאם לידע הנרכש במעבדה זו נתח את הסיגנל שנשען והצג בדו"ח את הנתונים הבאים:

0. מספר הסיגנל שקיבלת
1. מאפייני הגל הנושא (carrier wave): תדר, אמפליטודה וצורת הגל וצילום מסך של המדידה
2. מאפייני ה-TIE(time): תדר, אמפליטודה וצורת הגל וצילום מסך של המדידה
3. הסטוגרמה של TIE
4. כמה DJ, RJ ו-TJ ב- $BER = 10^{-12}$  יש לסיגנל? וב- $BER = 10^{-3}$ ?
5. Jitter bathtub curve של ה-Jitter
6. צריך לדגום סיגנל זה ע"י מערכת דגימה ולהישאר עם margin של 20ns ב- $BER = 10^{-12}$  לאחר הדגימה. האם הדבר אפשרי? אם כן, מהו ה-Jitter המרבי שיכול להיות לשעון הדוגם כדי לאפשר זאת?

## 4. סיכום

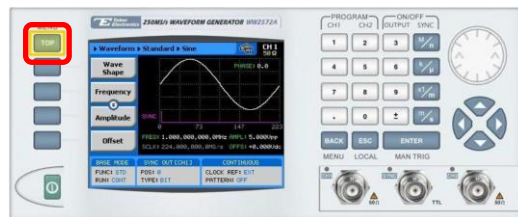
יש לכתוב תקציר מסקנות הנובע מתוצאות המדידה בניסוי.

## נספח 1 – הנחיות לשימוש ב-WW2571A Tabor Waveform Generator

יש לעקוב אחר ההוראות הבאות כדי לשדר את הגל הרצוי מתוך מחולל האותות. הפרמטרים המסומנים באפור הם הפרמטרים שיש לקבוע בהתאם לסעיפי הניסוי.

### 1. יצירת גל רגיל (לא מאופנן)

1. התחל מהמסך הראשי ע"י לחיצה על המקש TOP



2. בחר שידור גל סטנדרטי ואת צורת גל (גל ריבועי / סינוסי וכו')

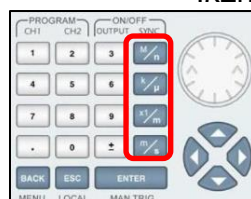
Choose: Waveform  $\Rightarrow$  Standard  $\Rightarrow$  WaveShape  $\Rightarrow$  Chose Shape using arrows  $\Rightarrow$  ENTER



3. בחר תדר גל

Choose Frequency  $\Rightarrow$  Signal frequency [Units]  $\Rightarrow$  ENTER

בחירת היחידות מתבצעת ע"י הלחצנים באזור הבא:

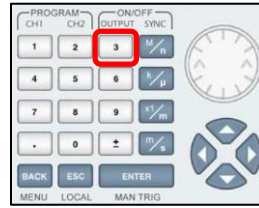


4. בחר אמפליטודה לסיגנל ( $V_p-p$ )

Choose Amplitude  $\Rightarrow$  Signal amplitude [Units]  $\Rightarrow$  ENTER

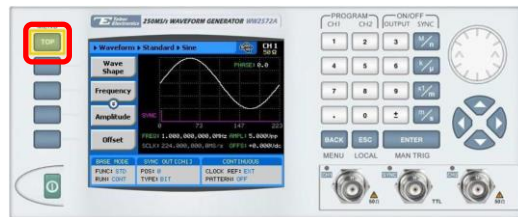
5. התחל את שידור הסיגנל ע"י לחיצה על הלחצן Output (משמש גם כספרה 3)





## 2. יצירת גל מאופנן

1. התחל מהמסך הראשי ע"י לחיצה על המקש TOP



2. בחר שידור גל מאופנן

Choose: Waveform  $\Rightarrow$  Modulated  $\Rightarrow$  Modulation Type  $\Rightarrow$  Chose **FM** using arrows  $\Rightarrow$  ENTER

3. בחר צורת גל מאפנן

Choose: Modulation Shape  $\Rightarrow$  Chose **modulation shape** using arrows  $\Rightarrow$  ENTER

4. בחר תדר גל נושא (תדר הגל המאופנן)

Choose: CW Frequency  $\Rightarrow$  **Carrier frequency [Units]**  $\Rightarrow$  ENTER

5. בחר את עוצמת האפנון (זהו ה-frequency deviation באיור הבא)

Choose: CW Frequency  $\Rightarrow$  **Frequency deviation [Units]**  $\Rightarrow$  ENTER

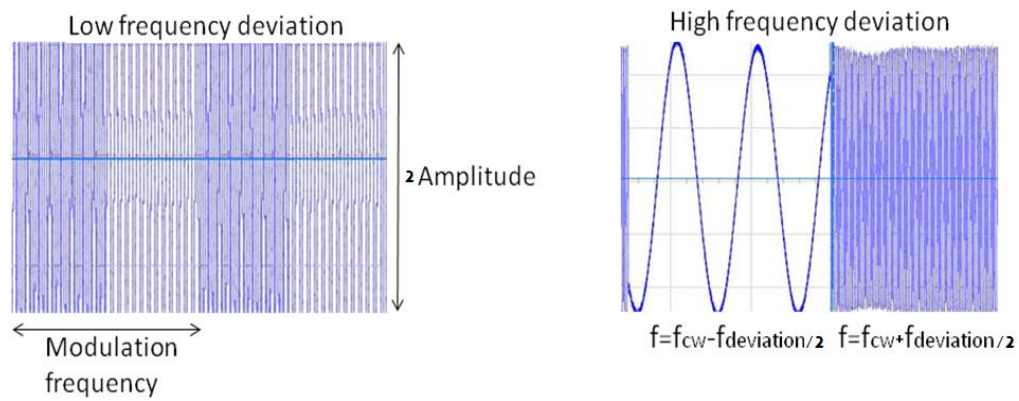
6. בחר תדר גל מאפנן (זהו ה-modulation frequency באיור הבא)

Choose: CW Frequency  $\Rightarrow$  **Modulation frequency [Units]**  $\Rightarrow$  ENTER

7. בחר אמפליטודה לסיגנל, (יש לרפרף למתה עם החצים כדי להגיע לאופציה הזאת)

Choose Amplitude  $\Rightarrow$  **Signal amplitude [Units]**  $\Rightarrow$  ENTER

להלן דוגמא של אפנון FM ע"י גל מאפנן ריבועי באפנון חזק וחלש ע"י שינוי ה-frequency deviation



**נספח 2 – אוסילוסקופ*****Keysight MSOS804A Oscilloscope short overview***

\*This appendix will cover the main features that will be used throughout the experiment.

**IMPORTANT NOTE-** Since we are dealing with statistical analysis it is very important to include as much information as possible in the measurements. Therefore for all the statistic measurements, try to include many cycles on the screen and make sure that the voltage level of the wave is in the borders of the screen. Of course there is tradeoff between the number of cycles on the screen (=memory of the scope) and the time it takes to process this information. If the density of cycles is too high it will take some time to see the full statistic result which means the scope will work slower.

**Key Specifications**

- 4 analogs plus 16 digital channels
- 8 GHz bandwidth and 20 GS/s max sample rate
- 100 Mpts/channel of standard memory
- 16 bits of vertical resolution
- Typical ENOB is 6.4 bits

**Features**

- 8 GHz bandwidth real-time oscilloscope with up to 40 GSa/s sample rate
- Noise floor: 131 uV @ 5 mV/div
- Trigger jitter less than 500 fs rms
- 15 inches XGA touch screen display with 256 level intensity grading

## Appliance Instructions

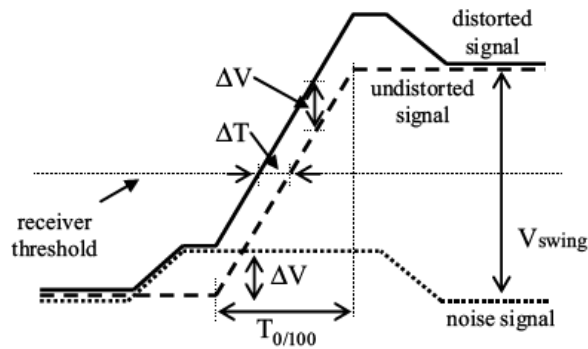
- Control Panel

1. Display options
  - Run/Stop
  - Single
2. Time Scale control(1-4)
  - Clear Display
  - Default Setup
  - Auto Scale
3. Trigger options
  - Source (1-4)
  - Slope (up-down)
  - Sweep(auto, Trig'd, Single)
  - Menu
  - Trigger Level
4. Voltage Scale control (1-4)



### נספח 3 – הסבר לשימוש באמפליטודה נמוכה בניסוי

גורמי Jitter כגון רעש רמת המתח, בנקודת זמן מסוימת ניתנים לתיאור כהליך אקראי בעל פונקציית התפלגות מסוימת. לדוגמא, באיור הנתון,  $\Delta T = a\Delta V$  כאשר  $a$  הוא  $1/\text{slope}$ . לשם קירוב, התפלגות  $\Delta V$  נלקחת כגאוסיאן, ולכן  $\Delta T$  מתפלגת גאוסית עם סטיית תקן  $\sigma_{\Delta T} = a\sigma_{\Delta V}$ .



ה Random Jitter נוצר כתוצאה מרעש מתח אינטרינסי שקיים ב function generator והוא בעל ערך נמוך, לכן על מנת להגביר את השפעת אמפליטודת המתח על Jitter, נפחית את האמפליטודה הכוללת ע"י השיפוע יקטן ולכן  $\sigma_{\Delta T}$  יעלה. תוצאות השפעה זו יגרמו לפילוג דמוי-גאוס של  $\Delta T$ .

## נספח 4 – פרמטרים של עקומת אמבטיה ברעש גאוס

### *Standard parameters for bathtub curve of white Gaussian noise*

BER levels for different  $\sigma$ 's from the center

Limit	BER level
$2\sigma (\pm 1\sigma)$	0.16
$4\sigma (\pm 2\sigma)$	$2.28 \times 10^{-2}$
$6\sigma (\pm 3\sigma)$	$1.35 \times 10^{-3}$
$8\sigma (\pm 4\sigma)$	$0.32 \times 10^{-4}$
$10\sigma (\pm 5\sigma)$	$2.87 \times 10^{-7}$
$12\sigma (\pm 6\sigma)$	$0.98 \times 10^{-9}$
$14\sigma (\pm 7\sigma)$	$1.28 \times 10^{-12}$
$16\sigma (\pm 8\sigma)$	$0.62 \times 10^{-15}$
$18\sigma (\pm 9\sigma)$	$1.13 \times 10^{-19}$
$20\sigma (\pm 10\sigma)$	$0.77 \times 10^{-23}$

Scaling factor for different BER levels

BER Level	2Q
$1 \times 10^{-7}$	10.399
$1 \times 10^{-8}$	11.224
$1 \times 10^{-9}$	11.996
$1 \times 10^{-10}$	12.723
$1 \times 10^{-11}$	13.412
$1 \times 10^{-12}$	14.069
$1 \times 10^{-13}$	14.698
$1 \times 10^{-14}$	15.301
$1 \times 10^{-15}$	15.883
$1 \times 10^{-16}$	16.444