

התפשטות גלי קול

מילות מפתח:

גל, פאזה (מופע), מהירות פאזה, גל עומד, נקודות צומת, נקודות טבור, גל רוחבי, גל אורכי.

הציוד הדרוש: מחולל אותות, אוסצילוסקופ, שפופרת, רמקול, מיתר, משקולות, גלגלת, שנאי וכבלים חשמליים, סרגל.

מטרות הניסוי:

- להכיר מושגים בנושא גלים.
- למדוד את מהירות הקול בשפופרת אויר.
- למדוד מהירות גל רוחבי במיתר מתוח.

1. תיאוריה

1.1 גלים

גל הינו תנודה המתפשטת בתווך. ניתן להתייחס לתווך חומרי כאל אוסף של פרודות, כך שכל תנודה של פרודות תשפיע על פרודות אחרות בתווך סמוך ובצורה זו התנודה מתפשטת בתווך. לדוגמא הטלת אבן למים תגרום לגל על פני המים, גל זה יתפשט לכל הכיוונים גם לאזורים המרוחקים ממקום הטלת האבן. כדוגמא נוספת, נדנד קצה של מיתר מתוח יעורר תנודות במיתר כולו.

הפונקציה המתארת את הגל היא פונקציה של המקום x והזמן t , ומתארת אותו בכל נקודה במרחב בכל רגע. נתמקד עתה בתנודה הרמונית בתווך חד ממדי (לדוגמא תנודות במיתר מתוח), הפונקציה המתארת את הגל תהיה

$$(1) \quad F(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

כאשר: A - אמפליטודת התנודה או המשרעת.

T - זמן המחזור (אם נתבונן בנקודה קבועה x אז $F(x, t+T) = F(x, t)$)

λ - אורך הגל (אם נתבונן בזמן מסוים t אז $F(x+\lambda, t) = F(x, t)$).

תדירות הגל: $f = \frac{1}{T}$, היא מספר המחזורים בשניה, התדירות נמדדת ביחידות הרץ

(Hertz) כאשר: $1/\text{sec} = \text{Hz}$.

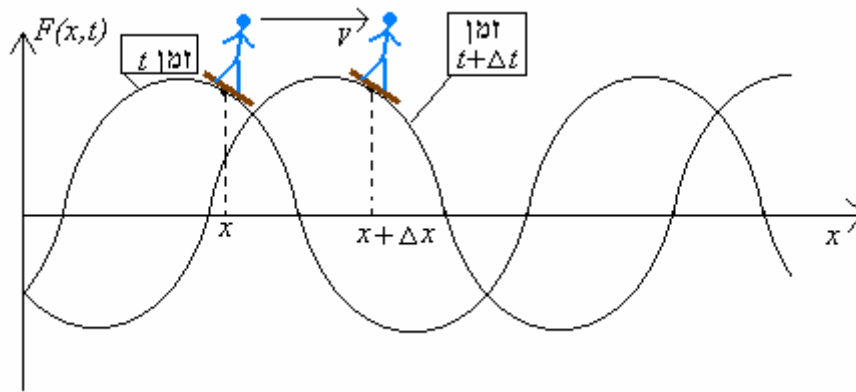
-התפשטות גלי קול-

הארגומנט של פונקציית הקוסינוס במשוואה (1) ידוע כמופע (פאזה) של הגל, להלן: פאזה, קביעת ערך המופע יקבע באיזו נקודה בתוך מחזור קוסינוס אנו נמצאים. הגל המתואר במשוואה (1) הוא גל המתקדם בכיוון החיובי של ציר x , זאת מפני שאם

נרכב על הגל ונשמור על מופע קבוע $\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda} = \text{const.}$, נקבל תנועה בכוון

ציר x במהירות קבועה $V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$, מהירות זו נקראת מהירות הפאזה. ראה

איור 1.



איור 1: הגולש התקדם מרחק Δx בזמן Δt

ניתן לייצר בתווך נתון גלים בעלי אמפליטודות שונות, תדרים שונים ותנועה בכוונים שונים. הגל הכולל הינו סכום כל הגלים בתווך - עקרון זה של חיבור הגלים נקרא עקרון הסופרפוזיציה. מהירות הפאזה היא מאפיין של התווך. בחומרים לא איזוטרופיים מהירות הפאזה תלויה בכיוון.

כאשר גל מתקדם בתווך מסוים ופוגע במכשול (כמו קצה התווך, מעבר מתווך אחד לשני או כל עיוות אחר) חלקו עובר את המכשול וממשיך הלאה, וחלקו האחר מוחזר. לגלים העוברים והמוחזרים, יש תדר זהה אך תיתכנה אמפליטודות שונות ואורכי גל שונים. גל עומד מורכב מגל מתקדם וגל מוחזר והוא מאופיין בכך שישנן נקודות קבועות שבהן אמפליטודת התנודות היא אפס-צמתות (nodes), ונקודות בהן האמפליטודה מכסימלית, הנקראות נקודות טבור (antinodes).

גלים בהם כיוון התנודה הוא בניצב לכיוון התקדמות הגל, כגון תנודות במיתר מתוח או גלים אלקטרומגנטיים הם גלים רוחביים (Transverse waves). גלים בהם כיוון התנודות הוא בכיוון התקדמות הגל הם גלים אורכיים

(Longitudinal-waves), לדוגמה גל קול באוויר הוא גל אורכי, כאשר התנודה היא בשינוי בצפיפות התווך.

1.2 גלי קול

כשהדיאפראגמה-סרעפֶּת של תוף, גרון, רמקול וכדומה רוטטת, נוצר גל קול המתקדם באוויר. גל הקול מורכב מתנועות קטנות של מולקולות האוויר בכיוון ניצב לדיאפראגמת הרמקול. אם היית יכול להסתכל על נפח קטן של אוויר בקרבת הרמקול, היית מבחין שהנפח הזה מתקדם ומתנדנד בתדירות שבה הרמקול רוטט. תנועה זאת דומה להתקדמות של גלים במיתר. אפשר לתאר גלי קול כשרשרת של דחיסה ודילול. כשהדיאפראגמה של רמקול נעה החוצה, האוויר שלידה נדחס ויוצר נפח קטן של אוויר בלחץ גבוה. הנפח הקטן הזה של האוויר בלחץ הגבוה יחסית דוחס את האוויר שעל ידו, שבתורו דוחס את האוויר שעל ידו, וכך הפרעה זו בלחץ מתקדמת מפני הרמקול. כשהדיאפראגמה של הרמקול נעה פנימה, נפח קטן של אוויר בלחץ נמוך יחסית, נוצר ליד הדיאפראגמה. גם הדילול הזה מתקדם מפני הרמקול החוצה.

באופן כללי, גל קול ממקור נקודתי מתקדם בכל הכיוונים. בניסיונות שלנו נבחן בעיה פשוטה יחסית של התקדמות גלים בממד אחד.

1.3 גלים עומדים בשופרת

המחשה פשוטה ביותר לגל עומד מתקבלת במיתר ששני קצותיו מעוגנים בנקודות קבועות. כל גל שנוצר במיתר מוחזר משני הקצוות וכתוצאה מהתאבכות בונה של הגלים, נוצר גל עומד. יש לזכור שגל במיתר הוא גל רוחבי, כלומר כיוון התנודה ניצב לכיוון התקדמות הגל. גלים עומדים נוצרים גם בשופרת אוויר קול אורכיים מוחזרים מקצות שופרת אוויר.

כפי שציינו קודם, לגל קול עומד יש נקודות צומת (nodes) העתקיות-נקודות שבהם האוויר לא מתנדנד- ונקודות טבור (antinodes) העתקיות- נקודות שבהם האמפליטודה של ויברציות האוויר מכסימליות. נקודות צומת ונקודות טבור של לחץ נוצרות בד בד עם תנודות האוויר. למעשה נקודת צומת של לחץ מתרחשת בנקודת טבור העתקית, ונקודת טבור של לחץ מתרחשת בנקודת צומת העתקית. אפשר להבין את הדבר הזה אם נבחן נקודת טבור של לחץ כנקודה שממוקמת בין שתי נקודות טבור העתקיות שמתנדדות בהפרש פאזה של 180° אחת יחסית לשנייה. כשהאוויר משתי נקודות טבור העתקית סמוכות נע בכיוון נקודת הטבור

השניה, הלחץ בנקודת הטבור של לחץ (צומת העתקית) יהיה מכסימלי. החזרה של גלי הקול מתרחשת בשתי הקצוות של השפופרת: הפתוח והסגור. אם הקצה של השפופרת פתוח, הלחץ שם קרוב ללחץ האוויר של החדר, לכן נקודות הקצוות של שפופרת פתוחה הן נקודות צומת של לחץ (נקודת טבור העתקית). יש לציין כי הלחץ בשפופרת גבוה מהלחץ בחדר.

1.4 תהודה (רזוננס)

כפי שתואר לעיל, גל עומד מתרחש כאשר הגל המוחזר מקצה השפופרת מתאבד עם הגל המקורי. למעשה גל הקול מוחזר פעמים רבות אחורה וקדימה מהקצוות של השפופרת וההחזרות הללו מתאבכות האחת עם השנייה.

בתדירויות תנודה ספציפיות, כל הגלים המוחזרים יהיו באותה פאזה, והגל העומד הנוצר יהיה בעל אמפליטודה מכסימלית. תדירויות אלו נקראות תדירויות תהודה (רזוננס).

בניסוי הזה נחקר הקשר בין אורך השפופרת ובין התדירויות שבהן מתרחשת התהודה. מצב התהודה יהיה תלוי במצב הקצה של השפופרת פתוח או סגור. עבור קצה פתוח, (שפופרת פתוחה בשתי הקצוות), תהודה מתרחשת כאשר אורך הגל מקיים את משוואה 1.

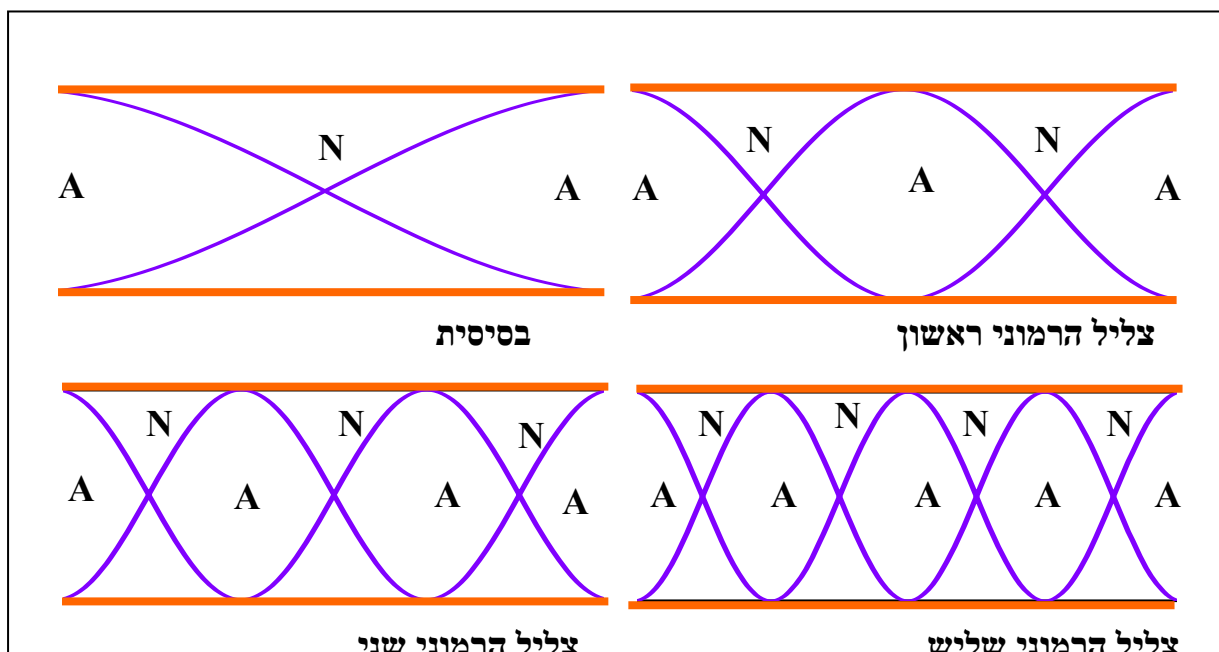
$$(2) \quad L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

כאשר: L אורך השפופרת ו- λ אורך הגל.

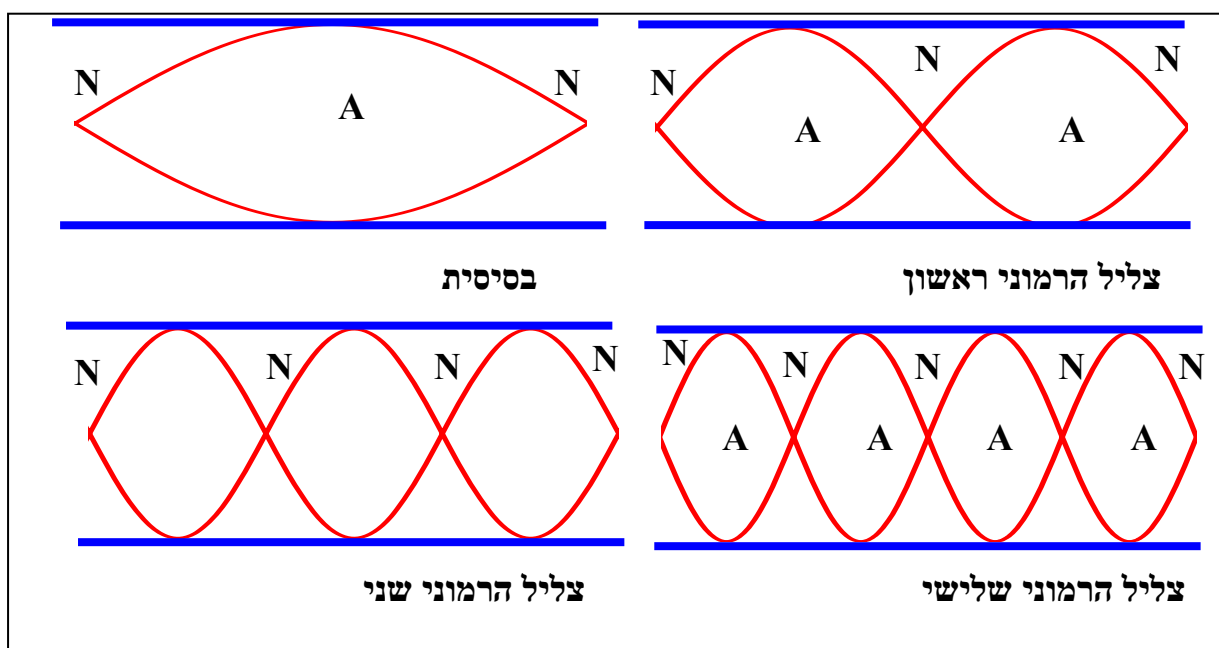
באורכי גל אלה מתאפשרת תבנית גלים עומדים שבהם נקודת הצומת של לחץ (טבור העתקית) של תבנית הגל תתקיים בצורה טבעית בכל קצה של השפופרת. דרך אחרת לאפיון מצב תהודה הוא קיום מספר שלם של חצאי אורכי גל בין הקצוות של השפופרת.

הערה: באיור 2 מוצגות ארבעה מצבים ראשוניים אפשריים של תהודה בשפופרת פתוחה. המצב הראשון של תהודה ($n=1$) נקרא בסיסי. מצבים גבוהים יותר ($n>1$) של תהודה נקראים צלילים הרמוניים (overtones).

(a)



(b)



איור 2: ארבעת המצבים הרזוננטים הראשונים בשפופרת פתוחה. (a) מתאר את נקודות טבור (A) וצומת (N) של לחץ. (b) מתאר את נקודות טבור (A) וצומת (N) של לחץ.

הנוסחאות והדיאגרמות לעיל מהוות קירוב בלבד למצב האמיתי בעיקר בגלל שהתנהגות הגלים בקצוות השפופרת (במיוחד בקצה הפתוח) תלויה בגורמים כמו קוטר השפופרת ותדירות הגלים.

התיאור האמיתי עבור שפופרת פתוחה ניתן ע"י המשוואה הבאה:

-התפשטות גלי קול-

$$(3) \quad L + 0.8d = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

כאשר: d הוא קוטר השפופרת.

1.5 תרגיל הכנה

1. הראה שמשוואת הגל הגל בנוסחה (1) יכולה להיות מבוטאת גם בצורה

$$\text{הבאה: } F(x, t) = A \cos\left[2\pi \cdot f\left(t - \frac{x}{V}\right)\right]$$

2. ידוע שבאוויר בטמפרטורה של 0 מעלות גלי הקול ינועו במהירות של 331

מטרים לשנייה מה יקרה אם המדידה הייתה מתבצעת בטמפרטורה גבוהה יותר?

3. באלומיניום בטמפרטורה של 20 מעלות - גלי הקול ינועו במהירות של 5090 מטרים לשנייה במים בטמפרטורה של 0 מעלות - גלי הקול ינועו במהירות של 1410 מטרים לשנייה מה ניתן להסיק מהנתונים הללו:

2. מהלך הניסוי

2.1 תיאור המכשור בניסוי

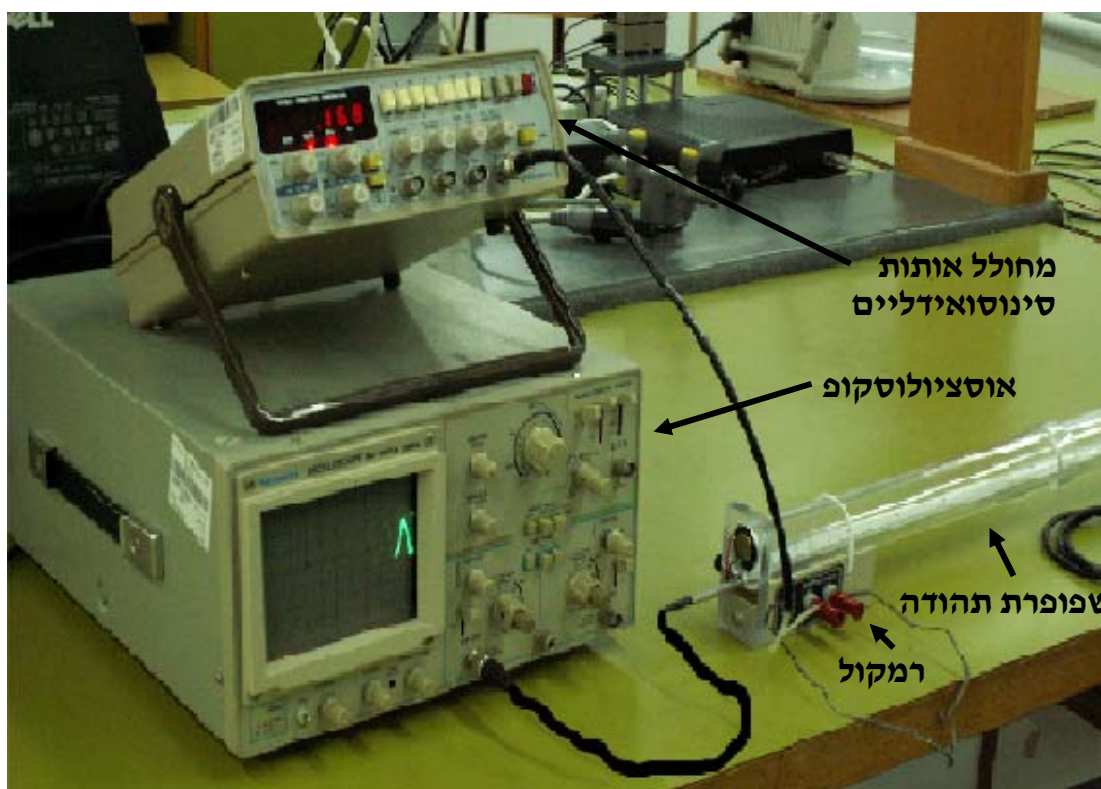
- שפופרת באורך 90 ס"מ עם סקלה מטריית. שפופרת האוויר מאפשרת חקירה של התקדמות גלי קול באוויר במימד אחד וכן חקירת תבניות של גלים עומדים בשפופרת פתוחה או סגורה.
 - שתי עמדות לקיבוע השפופרת, אחת מהן כוללת רמקול.
 - מיקרופון זעיר עם מגבר (שמופעל ע"י בטרייה), וחיבור קואקסיאלי לאוסצילוסקופ.
 - מחולל אותות מלבניים בתדר 10 Hz. המרחק בין האותות הוא 0.1 sec.
 - מחולל אותות סינוסואידלי.
 - אוסצילוסקופ.
- הניסוי שלנו כולל שלושה שלבים:

2.2 מדידת תדירויות רזוננס בשפופרת פתוחה

1. בנה את המערכת המתוארת באיור 3. מקם את המיקרופון בחריץ המתאים מתחת לרמקול. ניתן להסיט את המיקרופון לאורך השפופרת.

-התפשטות גלי קול-

2. הפעל את האוסצילוסקופ, קבע את מהירות הסריקה ל- 5 ms/div וקבע את ההגברה (gain) של ערוץ 1 ל 5 mV/div . הפעל את המגבר של המיקרופון ואת מחולל האותות הסינוסואידלי. הצב את תדירות המחולל ב- 100 Hz . העלה את העוצמה באיטיות עד שתשמע קול מהרמקול (אסור שהעוצמה תעבור את מחסום ה-5 וולט אחרת תקלקל את הרמקול). העלה את התדירות של גלי הקול והקשב בזהירות. באופן כללי עוצמת הקול תהיה גבוהה יותר עם העלאת התדירות מאחר והרמקול יעיל יותר בתדירויות גבוהות. עם זאת הקשב למכסימום יחסי ברמת הקול- כאשר תעלה את התדירות. בתדירות מסוימת תגיע למכסימום המצביע על מוד תהודה בשופרת.



איור 3 : המערכת הניסיונית

הערה חשובה: אם המתח לרמקול יהיה גבוה מדי אתה תקלקל את הרמקול. לכן העלה את המתח בזהירות. הרמקול צריך להשמיע קול שניתן לשמוע אותו בברור, אבל לא בעוצמה רבה. שים לב לעובדה שמחולל האותות יעיל יותר בתדירות גבוהות, לכן ייתכן שאתה תצטרך להוריד את המתח בתדירויות גבוהות.

3. מצא תדירות התהודה הנמוכה ביותר, (אתה יכול לעקוב אחרי המכסימום היחסי באוסצילוסקופ ולראות מתי הסיגנל באוסצילוסקופ יהיה מכסימלי) ורשום את הערך שלה.
4. התקדם עם המיקרופון לאורך השפופרת עד שתגיע לקצה השני, ובדוק את מספר "נקודות הטבור" המתקבלות.
5. מדוד חמש תדירויות תהודה, ובכל תדירות מצא את מספר נקודות הטבור ע"י התקדמות עם המיקרופון לאורך השפופרת.
6. בדוק אם התדירויות שקיבלת תואמות את הנוסחה 2 עבור שפופרת פתוחה. התנאי לתדירות תהודה בשפופרת פתוחה הנתון במשוואה 2 ניתן גם לניסוח בצורה הבאה:

$$\begin{aligned}v &= f \lambda \\L &= n \frac{v}{2f} \\n &= \frac{2L}{v} f\end{aligned}$$

(4)

- כאשר: L - אורך השפופרת, λ - אורך הגל ו- f - התדירות.
7. צייר גרף המתאר את מספר נקודות הטבור כפונקציה של תדירות הרזוננס וחשב בעזרתו את מהירות הקול בשפופרת. בדוק אם התוצאה שקיבלת קרובה למהירות המקובלת של הקול $v = 331.5 \frac{m}{sec} + 0.607 T$ כאשר T היא הטמפרטורה במעלות צלזיוס.

2.3 מדידת מהירות הקול באמצעות הדים

1. עבור מדידה זו החלף את מחולל הפונקציות במחולל של אותות מלבניים. מקם את המיקרופון בנקב אשר מתחת לרמקול.
2. הפעל את האוסצילוסקופ, קבע את מהירות הסריקה ל- 5 ms/div ואת ההגברה (gain) של ערוץ 1 ל- 5 mV/div . הפעל את המגבר ואת מחולל האותות המלבניים (אותות צרים בתדירות קבועה של 10 Hz במדויק). על המסך תתקבל תמונה הדומה לאיור 4.

-התפשטות גלי קול-

3. הגדל את מהירות הסריקה של האוסצילוסקופ עד שאתה רואה את ההדים בצורה ברורה על המסך. אתה תראה סדרה של הדים המוחזרים מספר פעמים מהקצה של שפופרת התהודה, בדומה לנראה באיור 4.

4. מדוד את הזמן בין ההד הראשון לשני ולשלישי.

5. המרחק שעבר הקול מההד הראשון ועד להד השני הוא פעמיים אורך השפופרת. ולכן מהירות הקול היא:

$$v = \frac{2l}{t}$$

כאשר t הוא הזמן בין הדים עוקבים.

6. חשב את מהירות הקול לפי הנתונים שקיבלת בניסוי זה.

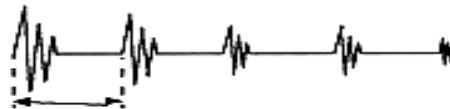
7. הגדלת דיוק המדידה של מהירות הקול יכולה להתקבל כאשר אתה מודד את הזמן שבין הפולס הראשון לשלישי (4L).

הערה: בתום הניסוי העבר את המתג של מגבר המיקרופון למצב off.

אות התחלתי



ההדים



Time from initial pulse until echo

איור 4: עקבה של האוסצילוסקופ המתארת את האות התחלתי (למעלה) ואת ההדים של הקול שהוחזרו מהקצה השני של השפופרת. המיקרופון מודד את השינוי בלחץ ולא את ההעתקה.

2.4 מדידת מהירות גל רוחבי במיתר מתוח

במיתר מתוח ניתן לעורר גל רוחבי המתאר את תזוזת המיתר ממצב שיווי

משקל. מהירות הפאזה במיתר נתונה ע"י

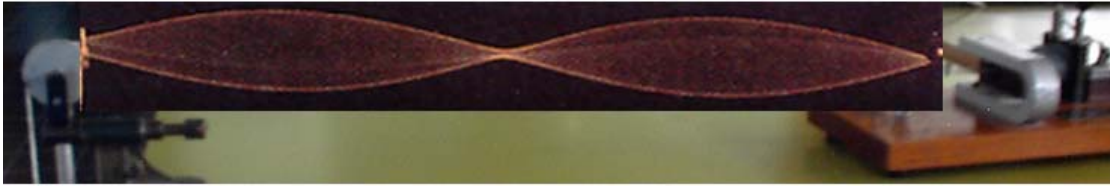
$$(5) \quad V = \lambda f = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

כאשר F המתוחות במיתר, אילו μ צפיפות המסה ליחידת אורך, f תדירות

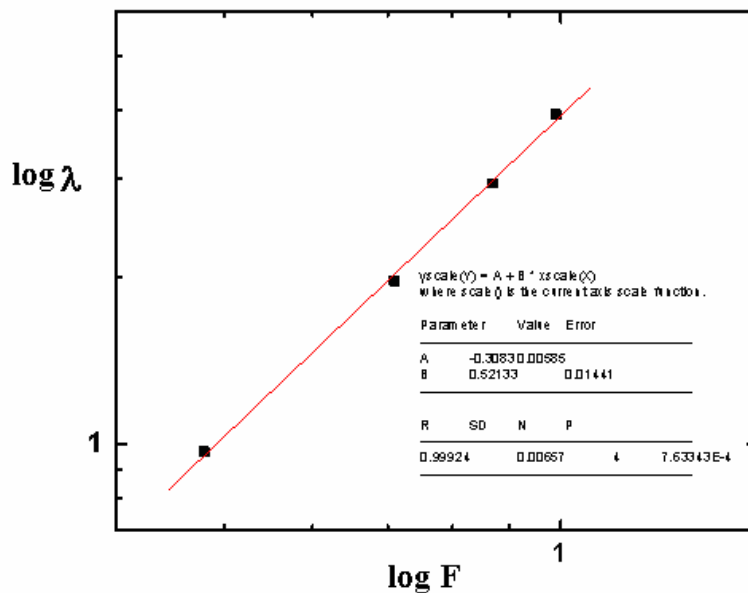
הקולן. במיתר מתוח המוחזק בשני קצותיו ניתן לעורר גלים עומדים, כאשר

-התפשטות גלי קול-

1. בנה את המערכת המתוארת באיור 5.



- איור 5: מיתר מתוח ע"י משקולת. המיתר מתנודד בתנועה רוחבית, במיתר נוצר גל עומד.
2. תלה מחזיק משקולות בקצה של החוט.
 3. הפעל את הקולן (תדירותו 50 Hz), והזז אותו קדימה או אחורה עד שתתקבל תבנית טובה של גלים עומדים.
 4. מדוד את המרחק בין שתי נקודות צומת סמוכות.
 5. חזור על סעיפים 3 ו-4 שלוש פעמים נוספות תוך הוספת משקולת של 50 gr כל פעם.
 6. שקול את החוט ומדוד את אורכו וחשב את צפיפות המסה ליחידת אורך של החוט μ .
 7. צייר גרף של אורך הגל $\log \lambda$ כפונקציה של $\log F$ והראה שהקשר הנתון במשוואה 4 מתקיים, מצא את משוואת הישר, (ראה דוגמה באיור 6).
 8. חשב מתוך הגרף את μ והשווה לערך שמדדת בסעיף 6.
 9. בצע סיכום ומסקנות לניסוי.



איור 6: גרף של $\log \lambda$ כפונקציה של $\log F$