

## אפקט דופלר

### **מילות מפתח :**

דופלר, משדר, מקלט, שינויי תדירות.

**הציוו הדיוש :** ממשק פסקו, מחשב, חיישן תנועה, משדר, מקלט, מחולל אותות (משמש כמונה תדר), מסילת הרצה, עגלות, ספק מתח להרצת העגלות.

### **מטרת הניסוי :**

- הכרת תופעת דופלר

### **1. תיאוריה**

במערכת המורכבת ממקור (Source) המשדר גלים אל המרחב ומקלט (Receiver) הקולט את הגלים, כל עוד אין תנועה יחסית בין המשדר למקלט, יקלוט המקלט את אותה התדירות של המשדר. אולם כאשר מקור הגלים (המשדר) והמקלט נעים אחד ביחס לשני במהירות מסוימת, התדירות הנקלטת תהיה שונה מהתדירות המשודרת.

כאשר המשדר והמקלט מתקרבים זה לזה התדירות הנקלטת תהיה גבוהה מזו שהמקור משדר; וכאשר הם מתרחקים אחד מהשני, התדירות הנקלטת קטנה מהתדירות המשודרת. תופעה זאת ידועה כ"אפקט דופלר" על שמו של המדען האוסטרי כריסטיאן דופלר (1803-1853).

ניתן בקלות להבחין בתופעה כאשר רכבת או מכונית צופרים חולפים לידך וממשיכים לצפור אנו קולטים שינוי בתדירות הצליל של הצופר. השינוי בתדירות גלי הקול תלוי אם המקור או המקלט נמצאים בתנועה יחסית לתווך שדרכו מתקדם הגל.

כיום, מכשור רב מבוסס על עיקרון תופעת דופלר, לדוגמא: מדי מהירות משטרתיים, מכשור אסטרונומי למדידת מהירותם של גלקסיות ומכשור רפואי לביצוע הדמיות של חלקי גוף נעים וכו'.

גלי קול הנעים בתווך יוצרים שינויים בלחץ האוויר עד הגיעם אל אוזננו. מהירות התקדמות הקול באוויר איננה משתנה כתלות בתדר, אחרת לא היינו

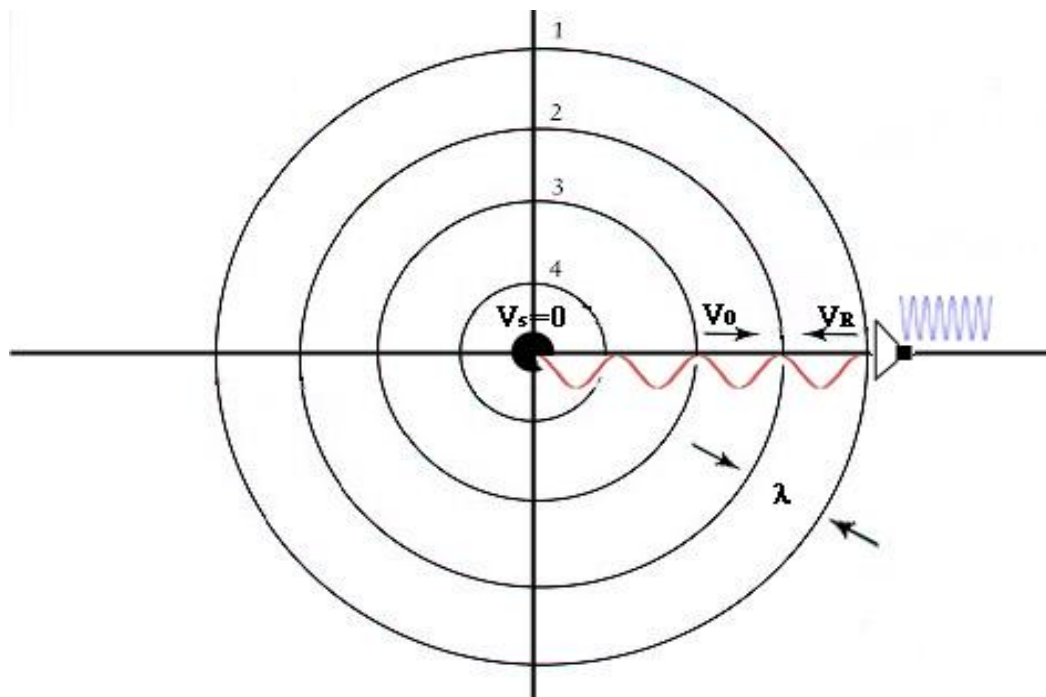
יכולים לשמוע לדוגמא, נגינה של תזמורת, אם כל צליל היה מגיע בזמן שונה אל אוזננו הייתה נוצרת דיס-הרמוניה וצרימות. כאשר המקור או המקלט נעים אורך הגל משתנה והתדירות החדשה  $f'$  מחושבת ע"י מדידת אורך הגל  $\lambda'$  והמהירות היחסית  $V$  לפי הקשר בנוסחה 1:

$$(1) \quad f' = \frac{V}{\lambda'}$$

נבחין בין שלש מצבים, מצב ראשון כאשר מקור הגלים (המשדר) נמצא במנוחה והגלאי בתנועה, מצב שני בו מקור הגלים במנוחה והגלאי בתנועה, ומצב כללי יותר בו הגלאי והמקור נעים יחד.

### 1.1 משדר במנוחה, גלאי בתנועה

נניח כי במרכז מערכת צירים ישנו משדר ניח המשדר גלים בתדירות קבועה אל המרחב, גלים אלו נעים ומתקדמים במהירות קבועה  $V_0$ . במרחק מסוים מהמשדר ישנו גלאי הקולט את הגלים המשודרים, נניח כי גלאי זה נע לכיוון המשדר במהירות קבועה  $V_R$ . תיאור סכימתי של המערכת ניתן לראות באיור 1.



איור 1: מקור (משדר) במרכז ניח, ומקלט נע לעברו במהירות קבועה

התדירות שיקלוט הגלאי תהיה גבוהה יותר מאחר שמהירות היחסית של הגלאי  $V_R$  ביחס למהירות התקדמות הגל  $V_0$  היא גדולה יותר כך שהזמן שלוקח לגלאי

לפגוש מקסימה הוא קצר יותר. כלומר הגלאי עובר את מרחק אורך הגל ( $\lambda$ ) במהירות יחסית שהיא  $V_0 + V_R$ . לכן ניתן לרשום את התדירות שימדוד הגלאי:

$$(2) \quad f' = \frac{V_0 + V_R}{\lambda}$$

במקום אורך הגל של המשדר ניתן לרשום את הגודל  $\left(\frac{V_0}{f_0}\right)$  כאשר  $V_0$  היא מהירות התקדמות הגלים ו- $f_0$  תדירותם, ולקבל את הביטוי הבא:

$$(3) \quad f' = \frac{V_0 + V_R}{\left(\frac{V_0}{f_0}\right)} = \frac{f_0}{V_0} (V_0 + V_R) = f_0 \left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)$$

קשר זה פותח בהנחה שהמקלט מתקדם לכיוון המשדר הנייח לו היינו מניחים כי המקלט מתרחק מהמשדר השינוי יהיה במהירות היחסית ביניהם והמונה בנוסחה (2) ישתנה ל- $V_0 - V_R$ . נוכל לסכם שבמקרה של מקור משדר נייח ומקלט נייח התדירות שתימדד על ידי המקלט ( $f'$ ) תהיה:

$$(4) \quad f' = f_0 \left(1 \pm \frac{V_R}{V_0}\right)$$

כאשר הסימן החיובי הוא עבור מקרה שבו המקלט מתקדם לכיוון המשדר והסימן והשלילי כאשר המקלט מתרחק מהמשדר.

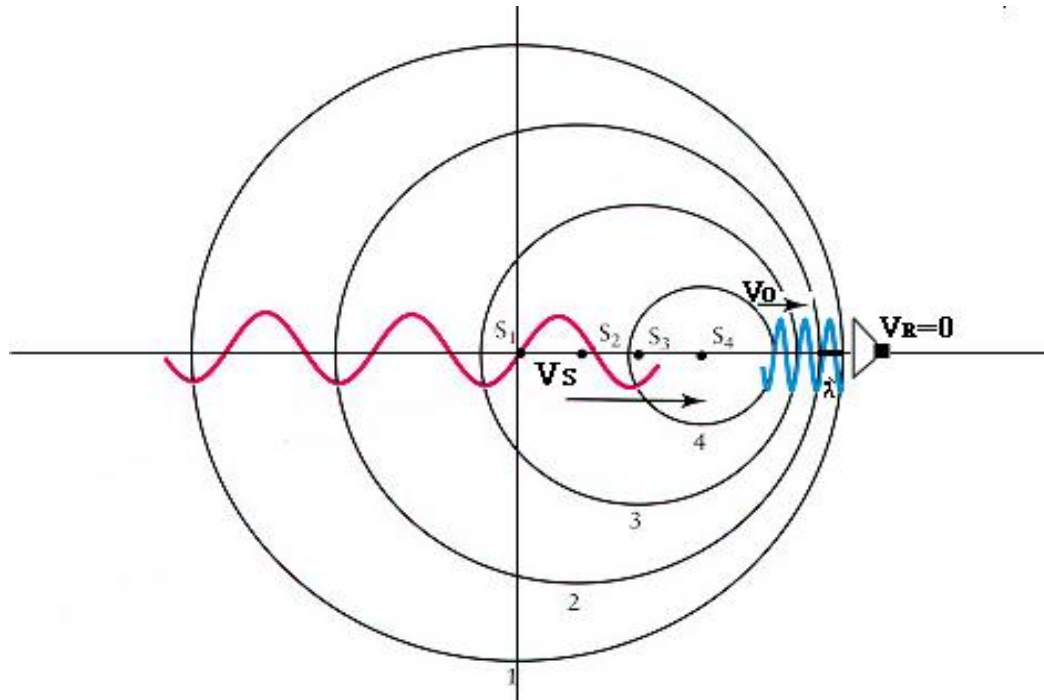
כאשר התווך בו נעים הגלים הוא אוויר (התווך בו יבוצע הניסוי) מהירות הקול

$$V_0 = 344 \frac{m}{sec} \quad \text{באוויר בטמפרטורת החדר היא:}$$

### 1.2 משדר בתנועה, גלאי במנוחה

נניח כי במרכז מערכת צירים ישנו משדר הנע במהירות קבועה  $V_s$  לאורך ציר ה-X. במרחק מסוים מהמשדר ישנו גלאי נייח הקולט את הגלים המשודרים. תיאור סיכמתי של המערכת ניתן לראות באיור 2. כפי שניתן לראות בתרשים הגלים בצד הקדמי של המקור "נדחסים", בעוד שהגלים בצד האחורי של המקור יהיו מרוחקים יותר אחד מהשני. כלומר התדירות שימדוד הגלאי בצד הימני תהיה גבוהה יותר מתדירותו הבסיסית של המשדר לו היה במנוחה ובצד השמאלי תימדד תדירות נמוכה יותר.

-אפקט דופלר-



איור 2 : מקלט במנוחה והמשדר נע לעברו במהירות קבועה

נתייחס לצדו הימני של התרשים, אורך הגל המסומן ב-  $\lambda'$  הוא קצר יותר ותלוי במהירות ההתקדמות של הגל-  $V_0$  ובמהירות ההתקדמות של המקור-  $V_s$ . ניתן לרשום את הקשר הבא :

$$(5) \quad \lambda' = \frac{V_0 - V_s}{f_0}$$

הגודל  $\frac{V_0}{f_0}$  הוא המרחק שמתקדם הגל המשודר בזמן מחזור אחד והגודל  $\frac{V_s}{f_0}$  הוא המרחק שמתקדם המקור באותו הזמן.

במקום  $\lambda'$  נוכל לרשום  $\frac{V_0}{f'}$  נחלץ את  $f'$  מהנוסחה ונקבל :

$$(6) \quad f' = \frac{V_0 f_0}{V_0 - V_s} = f_0 \left( \frac{1}{1 - \frac{V_s}{V_0}} \right)$$

קשר זה פותח בהנחה שהמשדר מתקדם לכיוון המקלט הנייח. אם נניח שמשדר מתרחק מהמקלט השינוי באורך הגל -  $\lambda'$  גדל. נוכל לסכם כי במקרה של מקור (משדר) נע ומקלט נח התדירות שתימדד על ידי המקלט ( $f'$ ) תהיה :

-אפקט דופלר-

$$(7) \quad f' = \frac{V_0 f_0}{V_0 \mp V_s} = f_0 \frac{1}{\left(1 \mp \frac{V_s}{V_0}\right)}$$

כאשר הסימן (-) מציין כי המשדר מתקדם לכיוון המקלט והסימן (+) כאשר המשדר מתרחק מהמקלט.

### 1.3 משדר וגלאי בתנועה

במקרה כללי יותר כאשר גם המקור המשדר וגם המקלט נעים יחד נוכל לאחד את שתי המשוואות 4 ו 7 ולקבל את הקשר הבא:

$$(8) \quad f' = \frac{V_0 \pm V_R}{\lambda'} = \frac{V_0 \pm V_R}{\left(\frac{V_0 \mp V_s}{f_0}\right)} = \frac{1 \pm \left(\frac{V_R}{V_0}\right)}{1 \mp \left(\frac{V_s}{V_0}\right)} f_0$$

נוסחה זו מכילה בתוכה את שני המקרים הקודמים.

### 1.4. עקרון פעולה של המשדר והמקלט

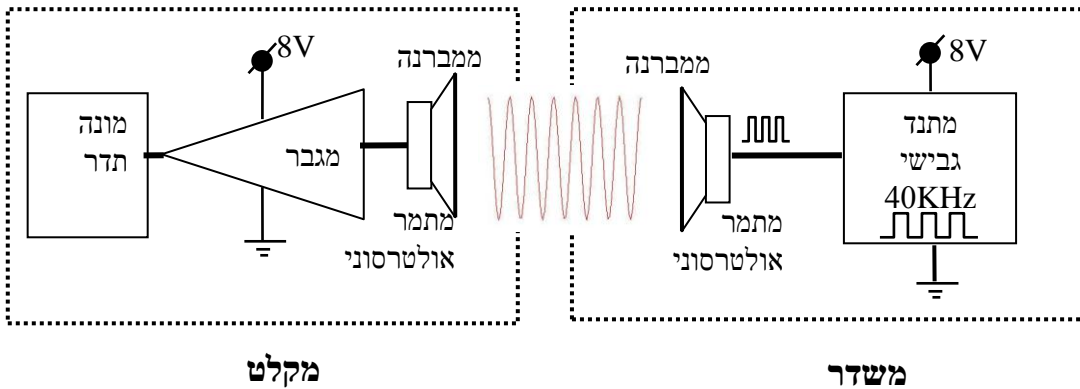
המשדר בו נשתמש בניסוי מבוסס על מתנד גבישי שתדירותו העצמית היא 40KHz. תפקידו של מתנד זה ליצור אות חשמלי ריבועי בתדירותו העצמית. הגל חשמלי שנוצר מחובר אל מתמר אולטרסוני עם תדירות תהודה המתאימה לתדירות המתנד. המתמר בנוי מגביש פיזיו-אלקטרי וממברנה. לגביש הפיזיו-אלקטרי ישנה יכולת להמיר שינויי מתח לתנודות מכניות בצורה פרופורציונלית וההיפך, תנודות מכניות לשינויי מתח.

הגל החשמלי גורם לגביש הפיזיו-אלקטרי להתנודד, תנודות אלו יוצרות שינוי בלחץ האוויר בסביבת הגביש וגורמים לממברנה להתנודד. תנודות הממברנה יוצרות גלים אקוסטיים בכיוון מוגדר שאליו פונה הגלאי. הגלים הנוצרים הינם אולטרסונים ואינם נשמעים באוזן האדם (אוזן אדם מסוגלת לשמוע עד כ- 20KHz). תיאור סכימתי של המערכת ניתן לראות באיור 3.

המקלט מורכב מיחידה דומה לזו של המשדר אולם, עיקרון הפעולה הפוך, המרת גל אקוסטי לאות חשמלי. תנודות הגל האקוסטי גורמים לשינויי לחץ האוויר

## -אפקט דופלר-

בסביבתו של המתמר. הגביש הפיזיו-אלקטרי במתמר ממיר את שינויי הלחץ לאותות חשמליים הפרופורציונליים לגל האקוסטי הפוגע. אותות אלו מוגברים ומועברים למונה תדירות. תיאור סכימתי של המקלט ניתן לראות באיור 3.



איור 3: מבנה סכימתי של מערכת משדר/ מקלט

### 1.5 שאלות הכנה

1. הסבר מה קורה לתדירות ולאורך הגל שמודד הגלאי (יחסית למדידה במצב מנוחה) בכל אחד מהמקרים הבאים:

- הגלאי נח והמקור נע לעברו במהירות קבועה.
- המקור נח והגלאי נע לעברו במהירות קבועה.
- הגלאי נח והמקור מתרחק ממנו במהירות קבועה.
- המקור נח והגלאי מתרחק ממנו במהירות קבועה.
- כאשר המקור וגלאי נעים במהירויות קבועות אחד אל עבר השני.
- כאשר המקור וגלאי מתרחקים במהירויות קבועות אחד מהשני.

2. א. מכונת צופרת בתדר של  $10,000\text{Hz}$  נוסעת במהירות של  $90\text{ km/h}$  לכיוון המאזין, באיזה תדר תישמע הצפירה למאזין לפני שהמכונת חולפת על פניו,

(מהירות הקול באוויר היא  $344\frac{m}{s}$ ) ?

ב. באיזה תדר תישמע הצפירה למאזין לאחר שהמכונת חלפה על פניו ?


3. בדיקת אולטרסאונד עוברית עושה שימוש באפקט דופלר על מנת לבדוק את תקינות פעילות הלב של עובר.

בהנחה שאות האולטרסאונד משודר בתדירות של  $3 \cdot 10^6 \text{ Hz}$  לכיוון הלב הפועם והתקבל בגל החוזר הסחה מקסימאלית של  $800 \text{ Hz}$  מהאות המקורי, מהי המהירות המקסימאלית של פעימת הלב בהנחה שמהירות הקול ברקמות היא  $1500 \frac{m}{s}$ ? (שים לב שישנם שתי הסחות דופלר בתהליך, ראה סעיף 3 בעיבוד תוצאות).

## 2. מהלך הניסוי

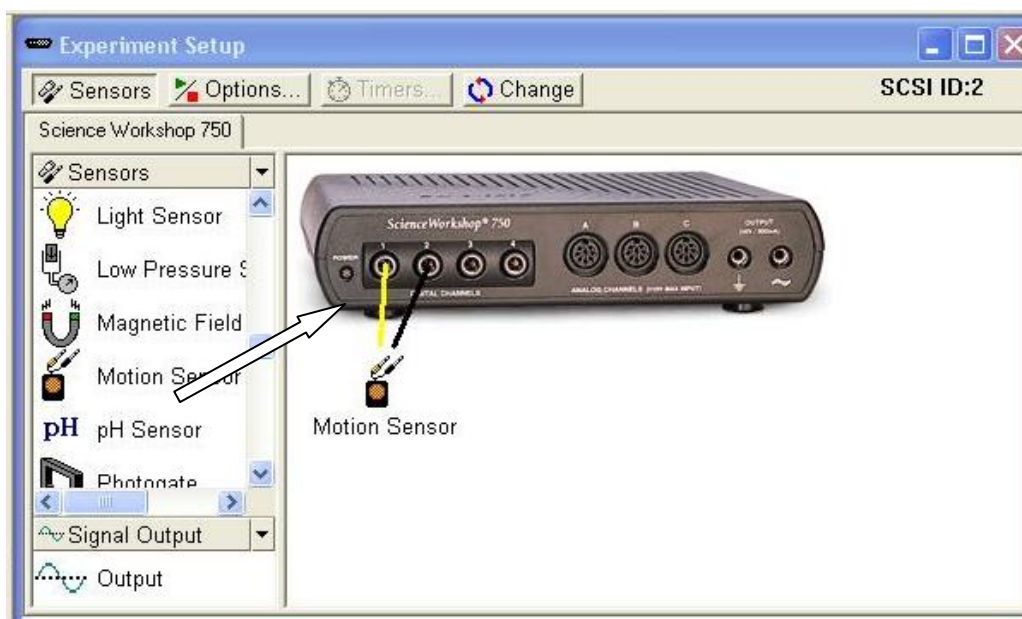
במהלך הניסוי תצטרך/י למדוד 2 גדלים פיסיקליים מהירות ותדירות. לשם מדידת המהירות נשתמש בחיישן התנועה של חברת פסקו למדידת התדירות נשתמש במונה תדר.

### 2.1 מדידת מהירויות של העגלה בעזרת חיישן תנועה של פסקו

1. הפעלת המערכת הניסיונית: אם המחשב אינו מופעל, הפעל תחילה את הממשק של פסקו ואח"כ הפעל את המחשב, פתח את תוכנת DataStudio ע"י לחיצה כפולה על  .

2. בחירת החיישנים: בחר את המצב "Create Experiment", ייפתח חלון Experiment Setup, עליך להגדיר את החיישנים בהם תשתמש. בצידו השמאלי של החלון ישנה רשימת חיישנים, מצא את "חיישן התנועה" Motion Sensor וגרור אותו לעבר שקעים 1,2. כמתואר באיור 4.

## -אפקט דופלר-

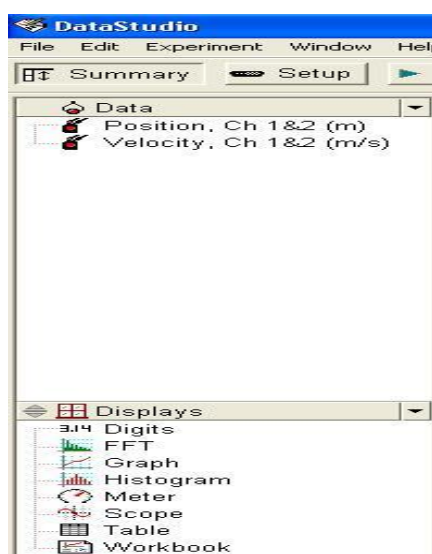


איור 4: גרירת "חישן התנועה אל הדקים 1 ו-2

3. הגדרת חיישן התנועה: לחץ לחיצה כפולה על חיישן התנועה, נפתח חלון ובו המאפיינים של החיישן. בחר את מדידת המקום והמהירות בלבד וקבע את קצב המדידה ל- 100 Hz.

4. תיאור חלון התצוגה של המחשב לאחר ההגדרות:

סגור את חלון Experiment Setup. בחלקו השמאלי של חלון העבודה ישנם שני חלוניות, העליון Data מכיל את הנתונים מהניסויים השונים (כרגע מופיעים בו מקום Position ומהירות Velocity). החלון התחתון מכיל את אפשרויות התצוגה איור 5.



איור 5: צורת החלון בחלקו השמאלי של תוכנת DataStudio

שים את חיישן התנועה בקצה של המסילה, הרכב את לוח המתכת על העגלה שנמצאת בקצה השני של המסילה ראה איור 6. העגלה מחוברת למכשיר שבעזרתו ניתן להניע את העגלה קדימה ואחורה בשלוש מהירויות שונות, וכן לעצור אותה.



איור 6: המערכת הניסיונית למדידת מהירויות העגלה בעזרת חיישן התנועה של פסקו.

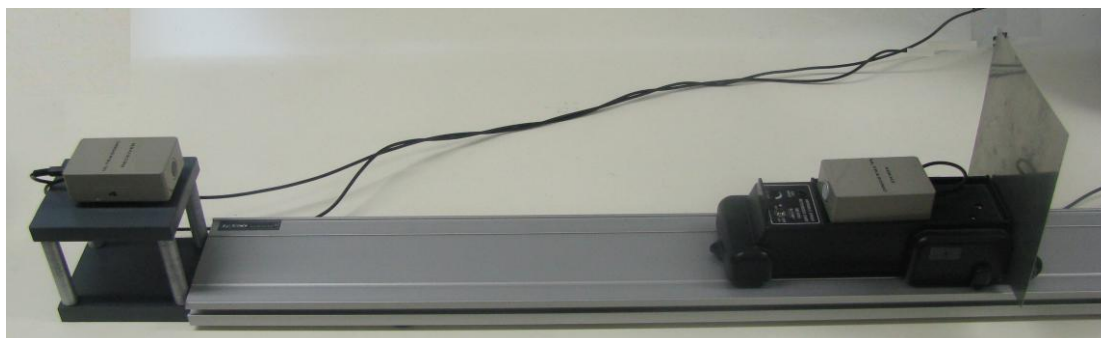
5. הפעל את העגלה במהירות הנמוכה ביותר, התחל את המדידה, לפני שהעגלה מגיעה אל קצה המסילה עצור את העגלה והחלף את כיוון תנועת העגלה בסיום הפסק את איסוף הנתונים. המחשב מתאר את גרף המקום כפונקציה של זמן, התאם קו ליניארי באמצעות התוכנה לשתי כיווני התנועה וקבל את השיפועים של הישרים, שהם למעשה מהירויות העגלה קדימה ואחורה, רשום גם את השגיאה בשיפועים. חזור על מדידה זו לכל שלושת המהירויות (סה"כ 6 מהירויות)

6. הוסף על גב העגלה מקלט וחזור על מדידות המהירויות כמתואר בסעיף הקודם (סה"כ 6 ערכי מהירות).

## 2.2. מדידת תדירות הסחת דופלר

1. בנה את המערכת המתוארת באיור 6. כאשר המקלט על העגלה והמשדר בקצה המסילה. כאמור, המקור משדר גלים בתדירות 40000Hz. הפעל את העגלה במהירות הנמוכה, ומדוד את התדירות הנקלטת בקולט. הקפד לבצע את המדידות אחרי התייצבות הקריאה ורצוי לקחת מדידה קצת לפני שהעגלה מגיעה לקצה המסילה. כדי לוודא שקראת את הערך המתאים בצע את המדידה לפחות פעמיים. בצע שוב את המדידה בכל המהירויות ובשני כיווני תנועת העגלה, קדימה ואחורה. מדוד את שינויי התדר עבור כל המהירויות בשני המצבים קדימה ואחורה.

2. בצע שוב את הניסוי (כמו סעיף 1) אך הפעם החלף בין המשדר והמקלט. כלומר המשדר על העגלה והמקלט בקצה המסילה (איור 7).



איור 7: תיאור המערכת שבעזרתה תמדוד הסחת דופלר, פעם המקלט על העגלה והמשדר במנוחה ופעם נוספת ההיפך.

3. שים את המקלט והמשדר בקצה של המסילה אחד על השני והדבק את הפלטה מתכתית לפני העגלה (איור 8). הפעל את העגלה ומדוד את הסחת התדירות עבור שלוש המהירויות ובכל מהירות קדימה ואחורה.



איור 8: מדידת הסחת דופלר כאשר המשדר והמקלט הם באותו צד במנוחה והעגלה בתנועה.

### 3. עיבוד תוצאות

1. ניתוח תוצאות משדר במנוחה ומקלט על העגלה בתנועה בהסתמך על משוואה 4, הצב את ערכי ההסחה של התדירות שמדדת בסעיף הקודם, כאשר מהירות התקדמות הגל באוויר  $V_0 = 344 \text{ m/sec}$ , וחשב את מהירות העגלה. השווה את מהירות העגלה שקיבלת עם המהירויות אותם מדדת

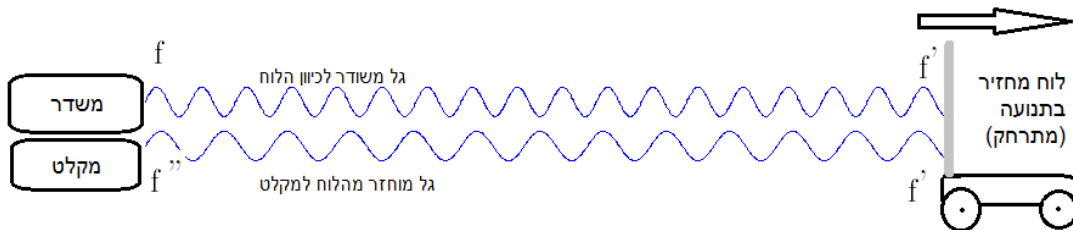
בחלק הראשון של הניסוי. חשב את השגיאות בערכי המהירות הנח שגיאה של הרץ אחד בכל תדירות שמדדת.

**2. ניתוח תוצאות משדר על העגלה בתנועה ומקלט במנוחה**

בהסתמך על משוואה 7, הצב את ערכי ההסחה של התדירות שמדדת כאשר מהירות התקדמות הגל באוויר היא:  $V_0 = 344 \frac{m}{s}$ , וחשב את המהירות העגלה. השווה את מהירות העגלה שקיבלת עם המהירויות אותם מדדת בחלק הראשון של הניסוי. חשב את השגיאות בערכי המהירות הנח שגיאה של הרץ אחד בכל תדירות שמדדת.

**3. ניתוח תוצאות עבור משדר ומקלט במנוחה ועגלה נעה**

במקרה זה ניתן לראות את התופעה כשתי הסחות, הסחה ראשונה היא כאשר המשדר הנייח לכיוון העגלה הנמצאת בתנועה (כלומר: משדר במנוחה ומקלט בתנועה) כך שהעגלה קולטת תדר מוסט. ההסחה השנייה מתרחשת כאשר העגלה משדרת את התדר המוסט לכיוון המקלט כאשר היא נמצאת בתנועה (משדר נע ומקלט במנוחה) (איור 9).



**איור 9:** משדר ומקלט במנוחה ועגלה נעה

השתמש בתוצאות המדידה ובנוסחה 8, וחשב את התדירות הצפויה לפי נתוני המהירות. השווה את התדירות המחושבת לתדירות שמדדת.

4. בהסתמך על התוצאות שקיבלת עבור סעיף 1 בעיבוד התוצאות (הצבות דרך נוסחה 4) ניתן לחשב את מהירות הקול כאשר מדדנו את ההסחות והמהירויות. אם נפתח סוגרים במשוואה 4 נקבל:

$$(9) \quad f' = f_0 \pm \frac{f_0}{V_0} V_R$$

אם נתאר גרף של  $f'$  כפונקציה של  $V_R$  נקבל גרף ליניארי ששיפועו  $\pm \frac{f_0}{V_0}$  (הסימן

תלוי בבחירת כיוון התנועה). בחר כיוון תנועה, סרטט את הגרף וחשב את מהירות הקול מתוך הגרף. חשב גם את השגיאה במהירות הקול.

#### **4. קישורים לאינטרנט**

השפעת אפקט דופלר על גוף הנמצא בתנועה ומשדר גלי קול.

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/light/dopplershift.html>

[http://www.weizmann.ac.il/zemed/net\\_activities.php?cat=1749&incat=1749&article\\_id=1647&act=forumPrint](http://www.weizmann.ac.il/zemed/net_activities.php?cat=1749&incat=1749&article_id=1647&act=forumPrint)