

# תקשורת מחשבים ואלגוריתמים מבוזרים



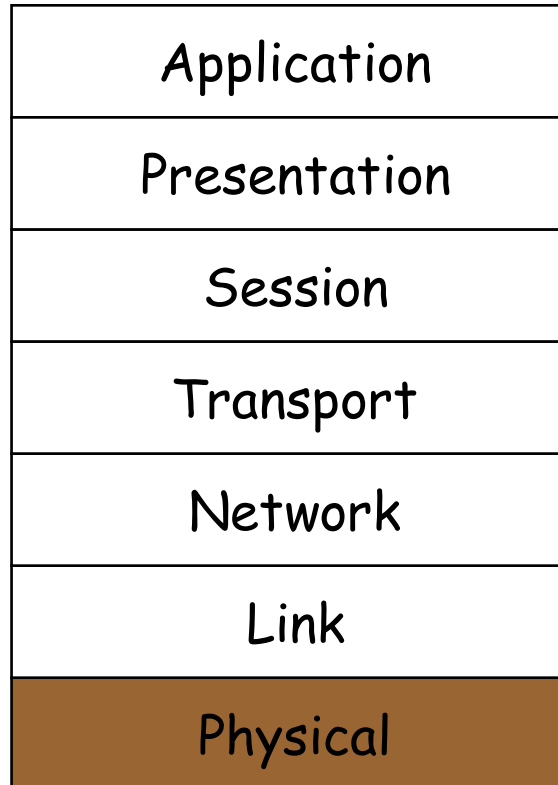
קורס מס' 202-2-1131

מתרגל: ד"ר גיא לשם [leshemg@cs.bgu.ac.il](mailto:leshemg@cs.bgu.ac.il)

הרצה שניה – השכבה הפיסית

# The OSI Model (7 layers)

---



The 7-layer OSI Model

# העברה של מידע או איק מציורים ביטים ממקום למקום?

---

□ נבין טוב את הבסיס:

■ מההבט הפיסי

□ אנרגיה.

□ התפשטות/העברה גל אלקטרומגנטי

■ מההבט המתמטי:

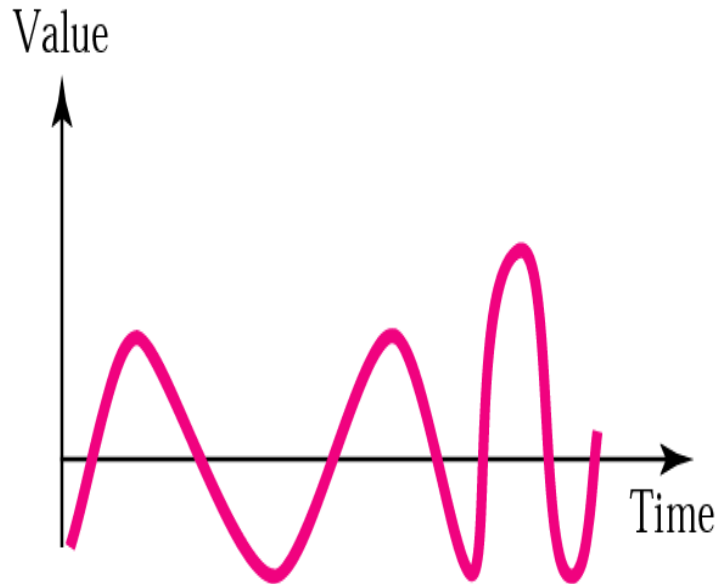
□ תיאורית הקידוד.

# אותות (Signals)

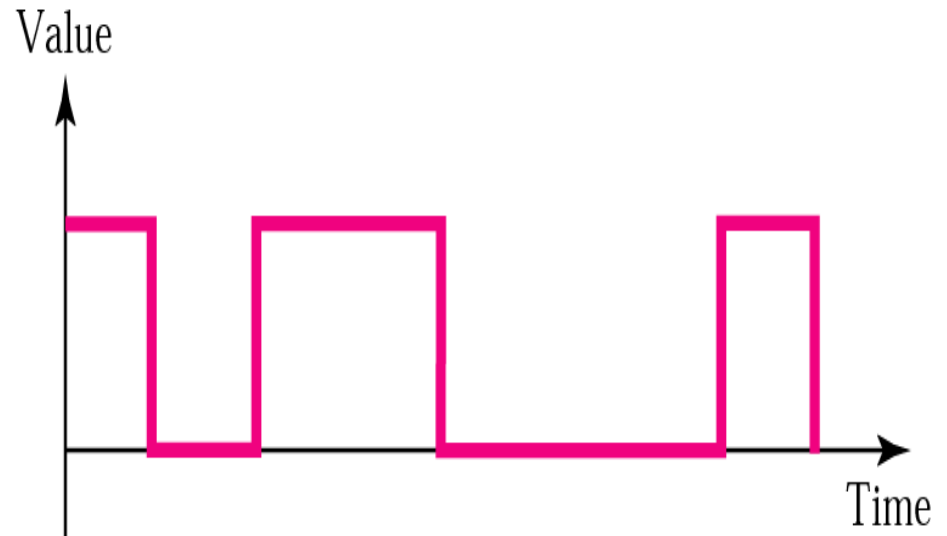
---

- כדי להישלח, נתונים חייבים להפוך לאותות אלקטרומגנטיים. כלומר ערוצי התקשורת מעבירים אנרגיה אלקטרו-מגנטית בין נקודת המקור לנקודת היעד.
- ערוץ התקשורת עשוי להמיר את האנרגיה האלקטרו-מגנטית מצורה אחת לאחרת ולכן אותות יכולים להיות אנלוגיים או דיגיטליים.
- אותות אנלוגיים יכולים להיות בעלי מספר אין סופי של ערכים בטווח.
- אותות דיגיטליים יכולים להכיל רק מיספר ערכים מוגבל.

# השוואה בין אותות אנלוגיים ודיגיטליים



a. Analog signal



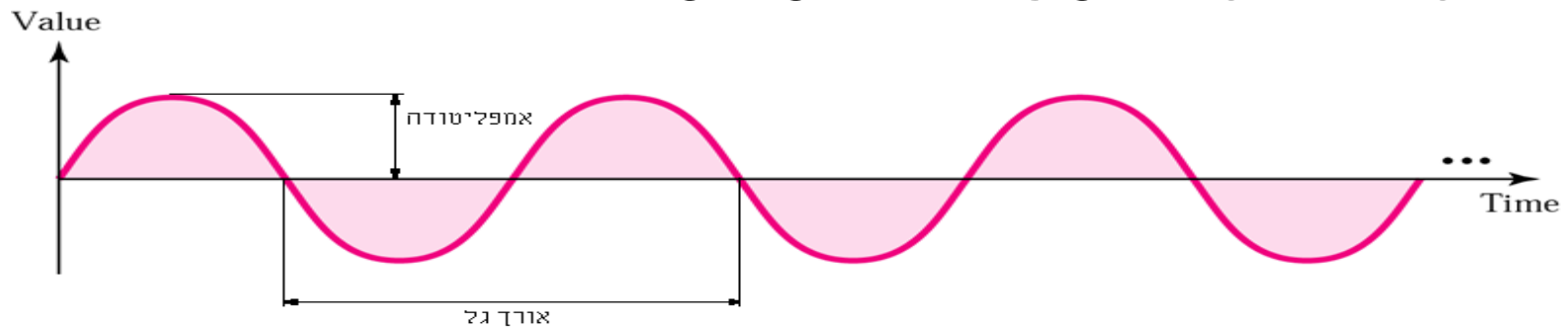
b. Digital signal

- ציר אנכי - הערך או החוזק (לדוגמא נמדד בוולטים)
- ציר אופקי - זמן

# אות אנלוגי (Analog Signals)

□ פשוט – לא יכול להתפרק לתוך אותות יותר פשוטים (גל סינוס).

□ מורכב – מכיל מספר גלים סינוס.



$$S(t) = A \sin (2\pi ft + \phi)$$

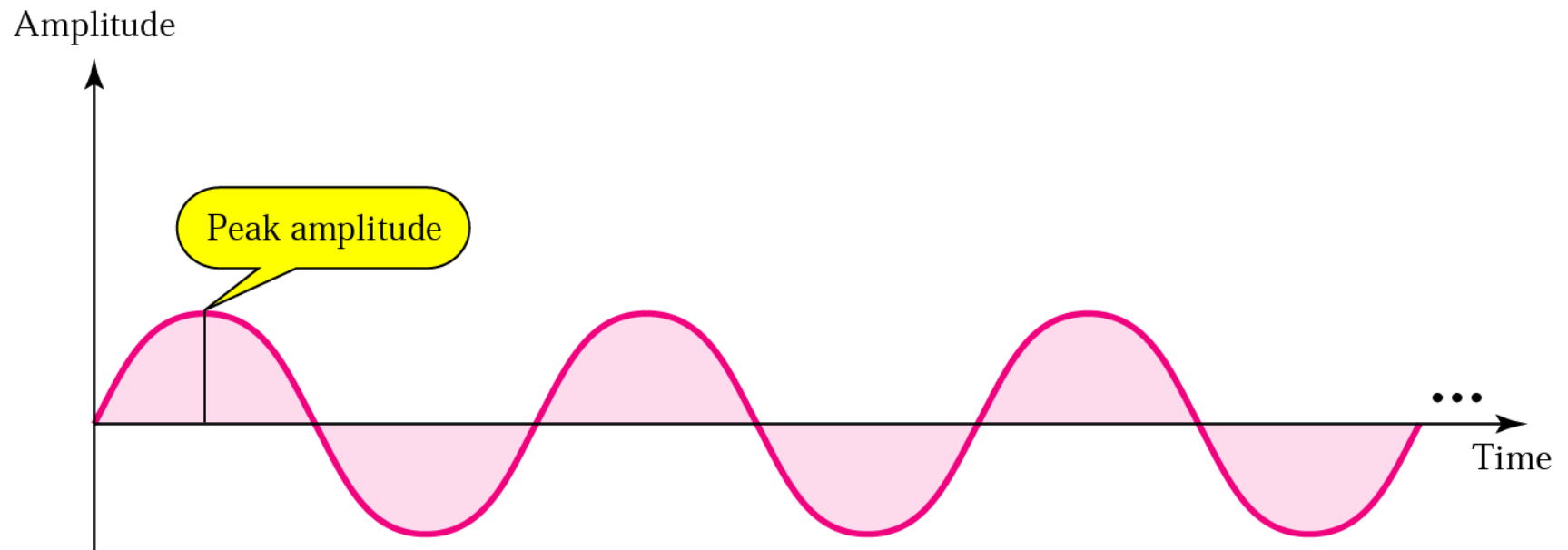
□ גל סינוס מיוצג ע"י:

A – peak amplitude (גודל ההפרעה המקסימלי)

f – frequency (מספר המחזורים ליחידת זמן)

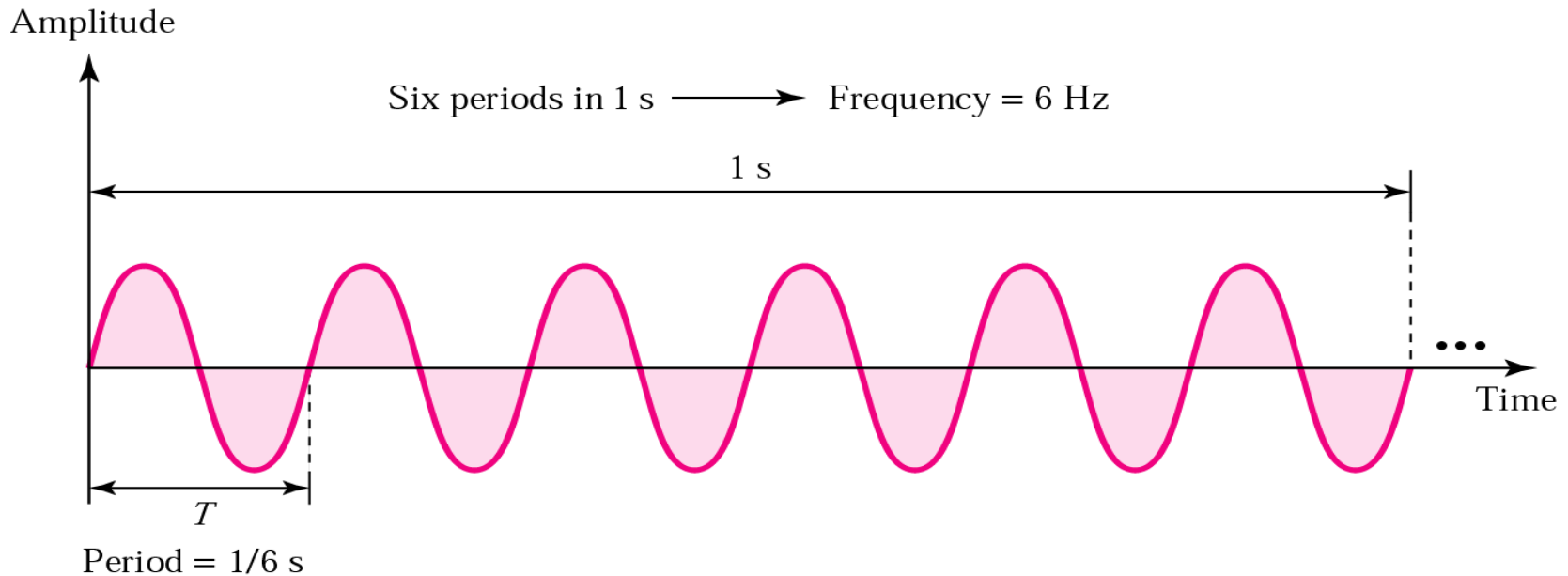
$\phi$  - phase (הפרש מופע הנמדד ברדיאנים)

## משקע (Amplitude)



□ עוצמה – אותות חשמליים, בדרך כלל נמדדים  
בוולטים.

## תדירות (Period) וזמן מחזור (frequency)



$$f = 1/T \quad T = 1/f \quad \square$$

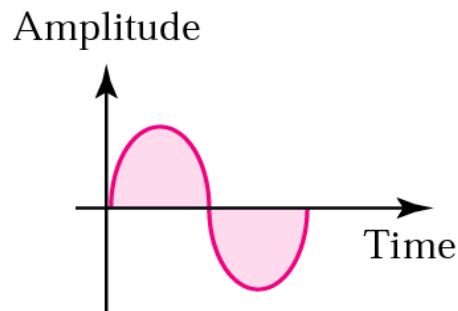
□ זמן מחזור (Period) - כמות הזמן שלוקח לגמור מחזור 1.

□ תדר הגל (Frequency) - הוא מספר המחזורים שהגל משלים בשניה אחת. תדירות הגל היא קצב השינוי עם התיחסות לזמן. שינוי במרווח קצר בזמן, אומר תדירות גבוהה. שינוי במרווח ארוך בזמן, אומר תדירות נמוכה.

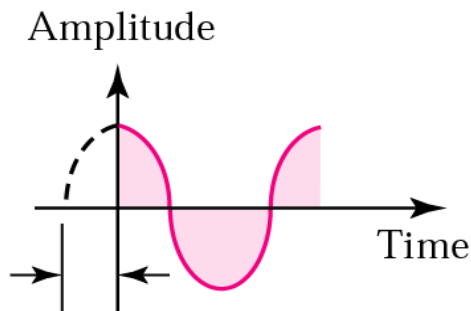


## מופע (Phase)

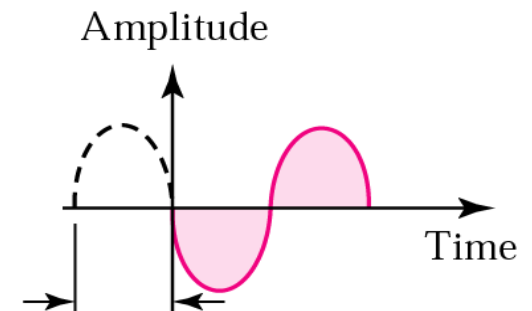
□ המופע מתאר את מצב צורת הגל יחסית לזמן של אפס  
■ נמדד במעלות ולא בדיאנים.



a.  $0^\circ$

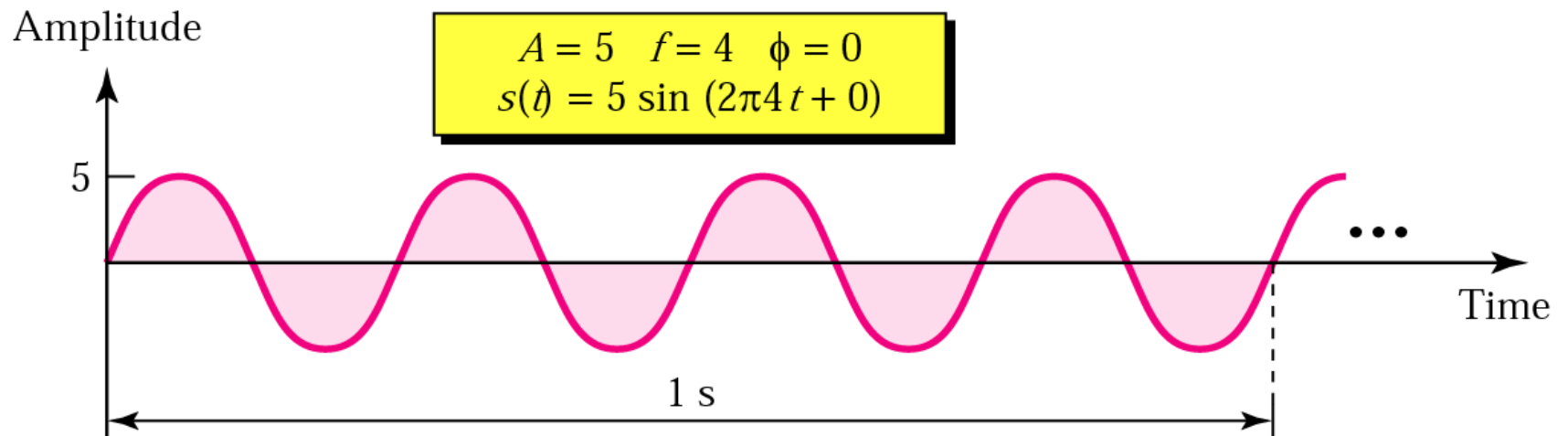


b.  $90^\circ$

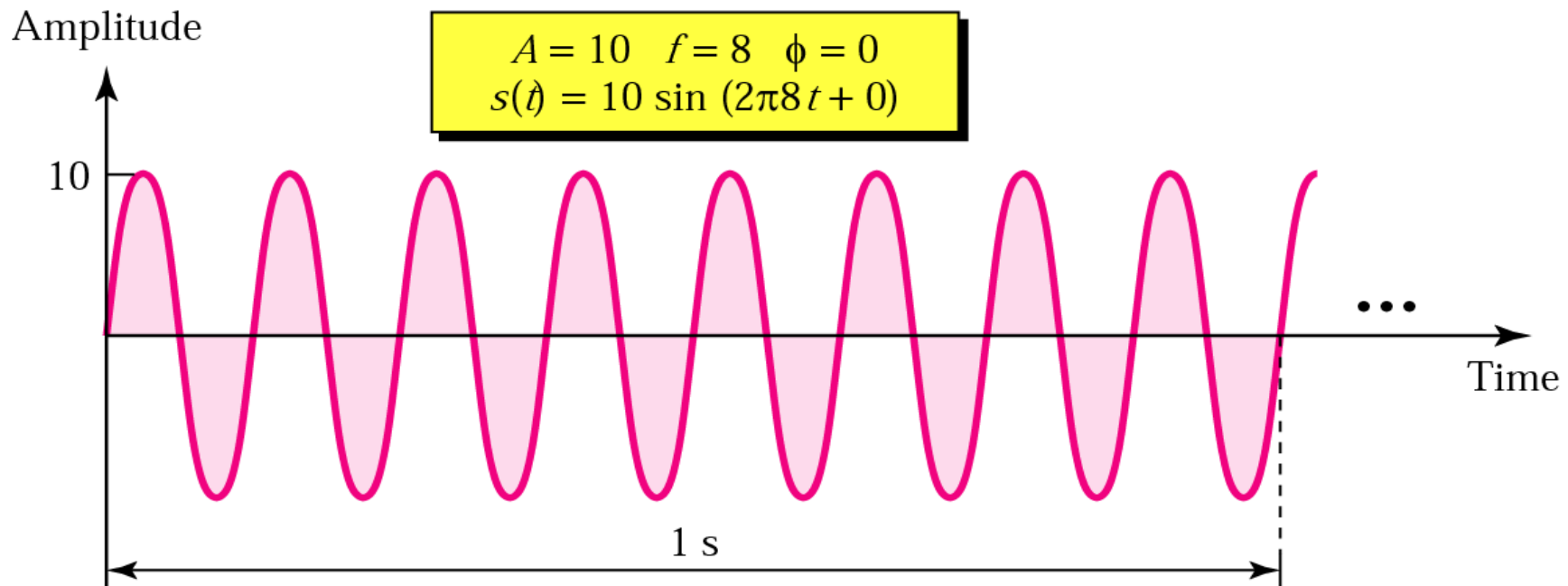


c.  $180^\circ$

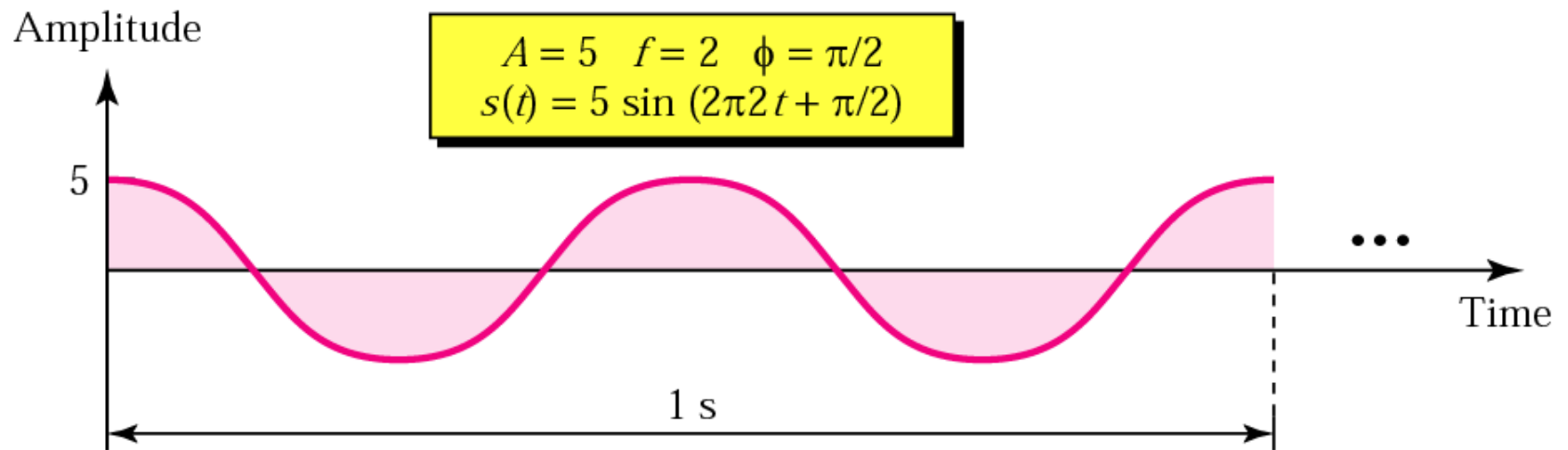
# קול 1 כדף סיום



# תדירות 2 קנצ'ס



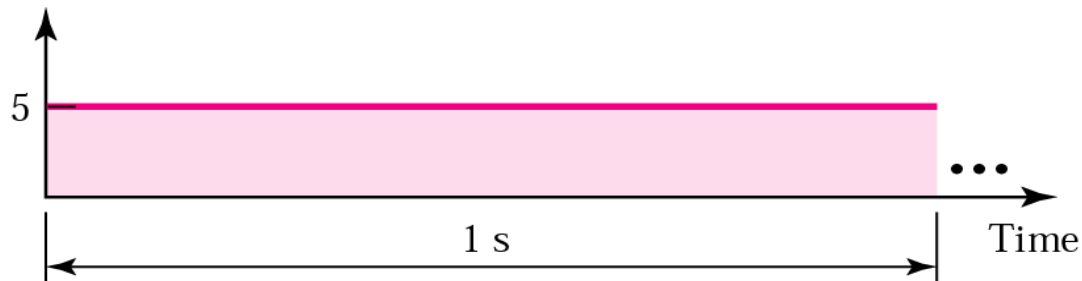
# תדירות 3 ס"פ



# אות אנלוגי (המשק)

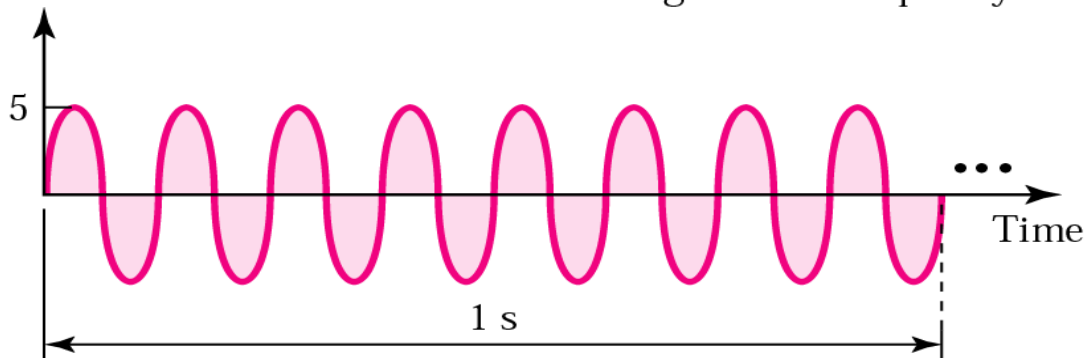
אות אנלוגי מיוצג הכי טוב בתחום התדירות. □

Time  
domain

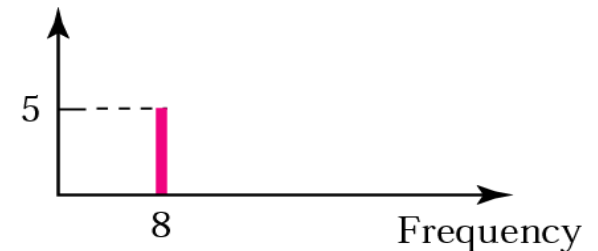


a. A signal with frequency 0

Frequency  
domain



b. A signal with frequency 8



## אותות (המשק)

---

□ תדירות האות של גל סינוס אינה שימושית בתקשורת נתונים ;

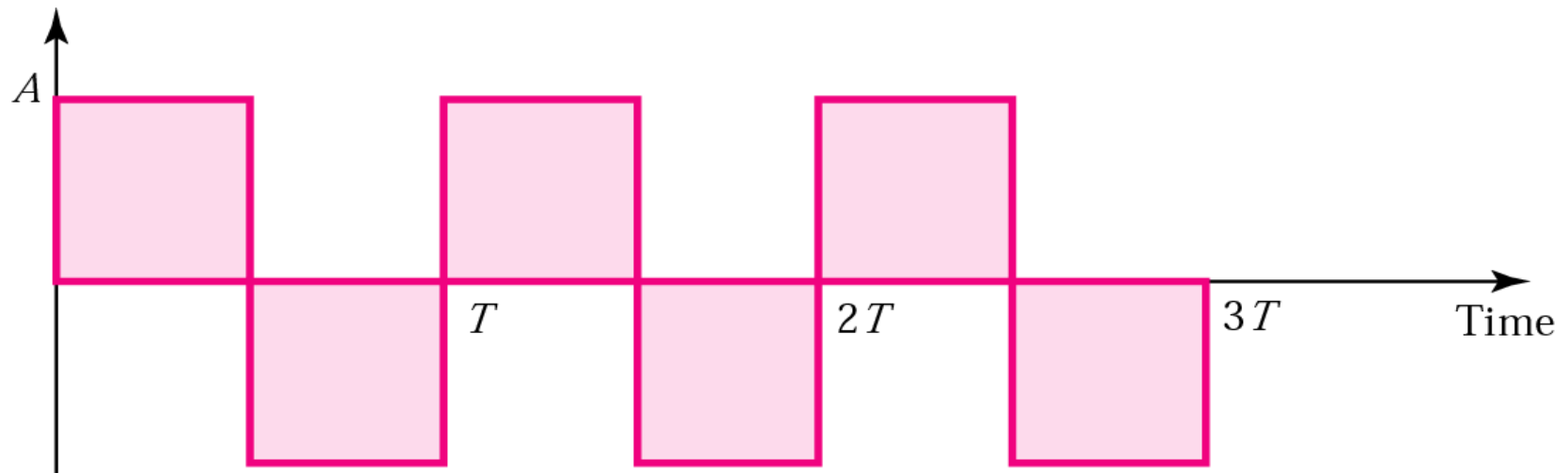
■ אנחנו צריכים להפוך אחד או יותר מהמאפיינים שלו על מנת לעשות אותו שימושי.

□ כאשר אנחנו הופכים אחד או יותר המאפיינים של אות התדירות, הוא הופך לאות המורכב מהרבה תדירויות.

□ על פי ניתוח פורייה, כל אות מורכב יכול להיות מיוצג על ידי שילוב של גלים סינוס פשוטים עם תדירות שונות, מופע ומשרעת.

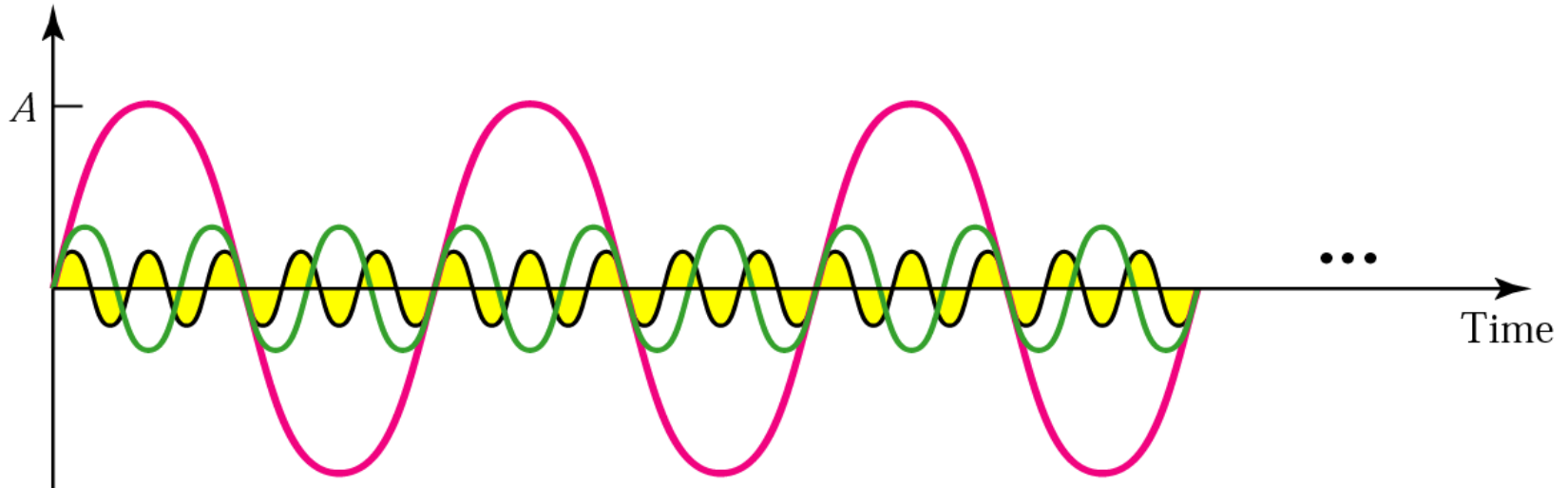
## פונקציית גל מרובעת (Square wave)

על מנת לעשות את הגל האלקטרומגנטי לשימושיי עבור תקשורת דיגיטלית צריך להפוך אותו לגל מרובע:



## פלושה הרמוניות (Three harmonics)

Amplitude



תאור של אות הרמוני:

$$v_h(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) = A \cos[\omega_0(t + \tau_d)] = \operatorname{Re}\{A e^{j\varphi} e^{j\omega_0 t}\} = \frac{A}{2} e^{j\varphi} e^{j\omega_0 t} + \frac{A}{2} e^{-j\varphi} e^{-j\omega_0 t}$$

$v_h(t)$  - גל הרמוני למשל מתח או זרם  
 $A$  - אמפליטודה.

$\omega$  - תדירות זוויתית

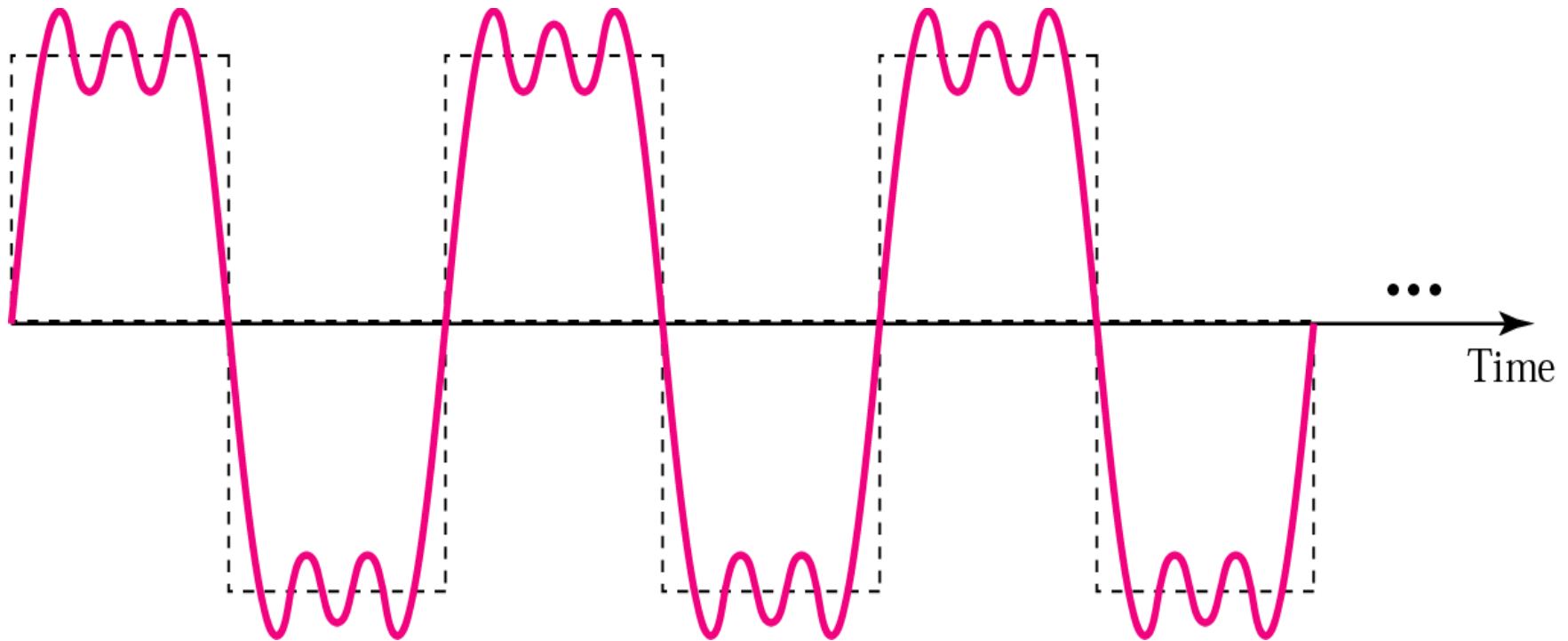
$\varphi$  - פאזה התחלתית



# תוספת של שלושה הרמוניות

(Adding first three harmonics)

□ ע"י חיבור בין שלושת ההרמוניות ניתן ליצור את האות המרובע.



# אפנון אות אנלוגי

□ כדי להוליך מידע או נתונים על קו תקשורת פותחו במהלך השנים טכניקות אפנון בהם נעשה שימוש בתקשורת. שלוש השיטות האנלוגיות הן:

■ אפנון משרעת (amplitude modulation).

■ אפנון תדירות (frequency modulation).

■ אפנון מופע (phase modulation).

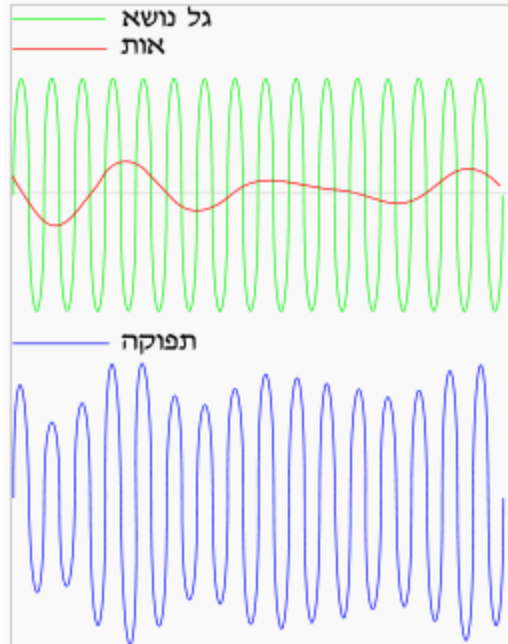
□ בנוסף פותחה עבור ערוצי תקשורת דיגיטליים טכניקה הנקראת אפנון דיגיטלי (digital modulation).

□ כל אחת מהטכניקות האנלוגיות מחיבות גל נושא (carrier signal) ויוצרות גל המורכב מהגל הנושא פלוס גל מידע עם מאפיינים ייחודיים.

□ כל טכניקת אפנון (מודולציה) מחייבת גם טכניקת גילוי (דה-מודולציה) תואמת בקצה הקולט.

# אפנון משרעת AM

□ **אפנון משרעת** (אמפליטודה) הוא שיטת שידור לשם העברת מידע המורכב על גבי גלים אלקטרומגנטיים בתדר רדיו כך **שמשרעת (עוצמת) הגל המשודר משתנה בתלות במידע**, בעוד תדר הגל נשאר ללא שינוי. בדרך כלל תדירות הגל הנושא גבוהה יותר מהתדירות של המידע המורכב עליו. שיטה זו נועדה בעיקר להפצת אותות שמע אלחוטיים, אך ניתן להעביר בה גם צפנים ונתונים. שיטה זו נפוצה בשידורי הרדיו בתחום הגלים הארוכים, הבינוניים והקצרים.



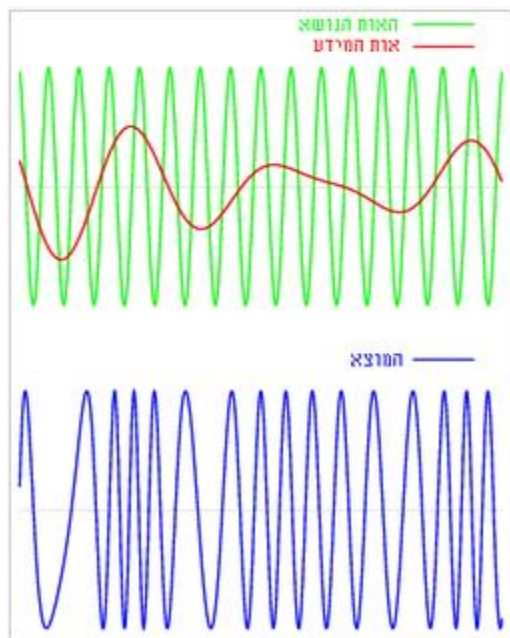
□ דוגמה של אפנון משרעת: התרשים העליון מראה את הגל (באדום) שאותו מעוניינים לאפן, ואת הגל הנושא (ירוק). התמונה התחתונה מראה את תוצאת אפנון המשרעת בין שני הגלים.

# אפנון תדר FM

■ **אפנון תדר** הוא שיטת אפנון שבה מידע מיוצג בעזרת שינויים בתדר של הגל הנושא (בניגוד לאפנון משרעת שבו משרעת האות הנושא משתנה והתדר נשאר קבוע). ביישומים אנלוגיים, תדר האות הנושא משתנה בתלות בשינויים בעוצמת אות המידע. לאפנון תדר שני יתרונות עקריים על פני אפנון משרעת:

■ רוחב פס גבוה יותר משל אפנון משרעת (דבר המאפשר למשל שידור בסטריאו).

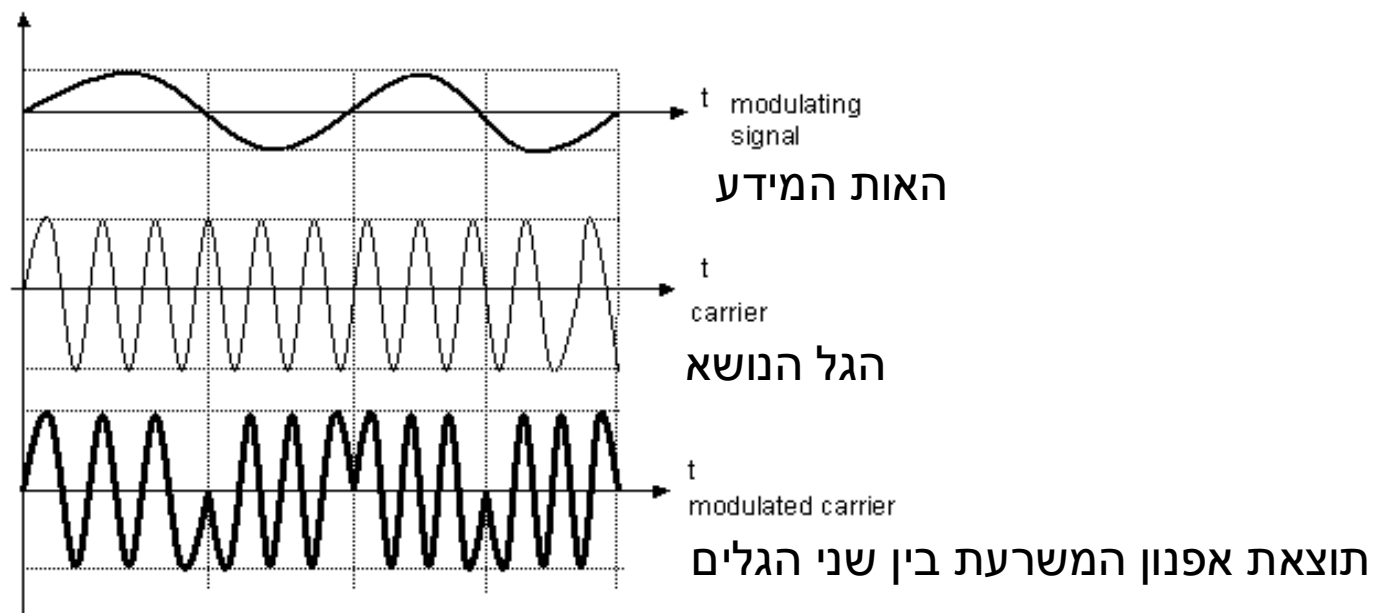
■ עמידות טובה יותר מפני רעשים, שכן הם בדרך-כלל פוגעים במשרעת של הגל ולא בתדר שלו.



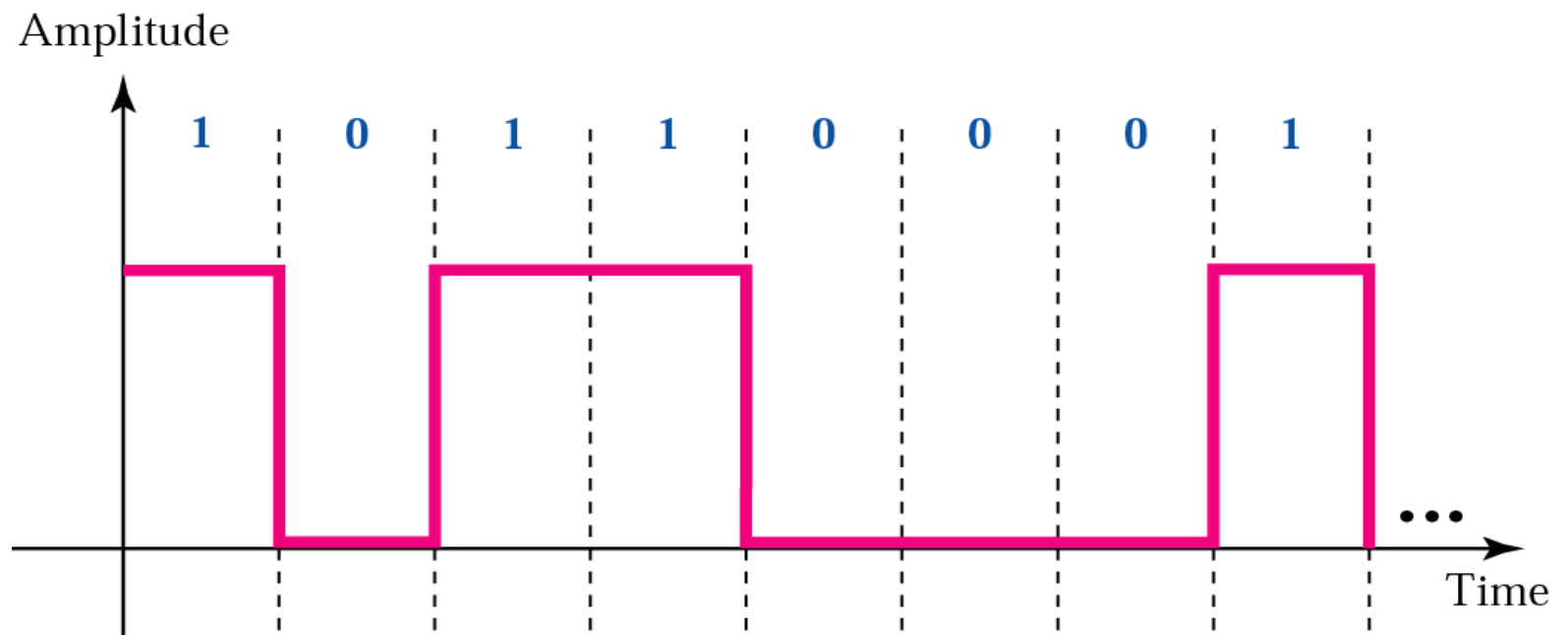
■ **אות המידע** הוא האות האדום, גודלו בכל נקודה הוא המידע אותו נרצה לשמור. האות הנושא (הירוק) הוא אות מחזורי בעל תדר גבוה. אפנון תדר הוא הוספת גודל אות המידע (מוכפל בקבוע ידוע) לתדר האות הנושא. כפי שניתן לראות בשרטוט, האות המאופן (הכחול) אינו מחזורי ומהירות השינוי שלו (קרי התדר הרגעי) משתנה – לפעמים השינויים מהירים ולעיתים איטיים. ניתן לראות כי האזורים שבהם האות המאופן משתנה במהירות, הם האזורים שבהם אות המידע הוא בעל ערכים גבוהים - ולהיפך.

# אפנון מופע PM

□ **אפנון המופע** דורש שני גלים, גל נושא הנתונים וגל נושא מידע. גלים אלה בעלי משרעת ומתח קבועים. הגלים נמצאים בהיסט זמנים (חוצים את ציר הזמן בנקודות שונות), כאשר ההפרש בין הגלים הוא זווית המופע (הפאזה), משרעת הגל עוקבת אחרי העקומה עד להיתקלות בשינוי מופע, בנקודת שינוי המופע נשברת תבנית העקומה והיא מתחדשת שוב בנקודה שונה.



# אות דיגיטלי (Digital Signals)



# אפנון אות דיגיטלי

- טכניקות אפנון שראינו אינן מתייחסות לתקשורת דיגיטלית.
- גל דיגיטלי מבצע שינויים חדים (מרמת מתח גבוהה לנמוכה), כאשר לגל דיגיטלי אין צורך בגל נושא והוא שומר על רמת מתח יציבה לאורך זמן עד לקביעת ערך הסיבית (0 או 1) האות משתנה מערך אחד למשנהו, רק כאשר המידע עצמו גורם לשינוי הערך.
- נדרוש כי אפנון גל דיגיטלי יהיה חזק עם משרעת גבוהה כך שיתאים לגל מידע דיגיטלי חלש. אפנון הגל הדיגיטלי לא מגביר את הרעשים ולכן יעיל להגדלת מרחק השידור.
- משתמשים באפנוני הגל הדיגיטלי הבאים:
  - *Amplitude shift key modulation (ASK)*
  - *Frequency shift key modulation (FSK)*
  - *Binary-phase shift key modulation (BPSK)*
  - *Quadrature-phase shift key modulation (QPSK)*
  - *Quadrature amplitude modulation (QAM)*

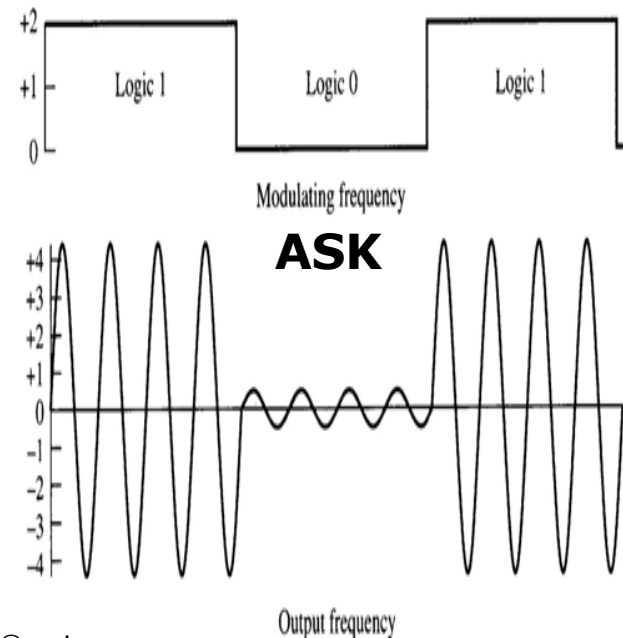
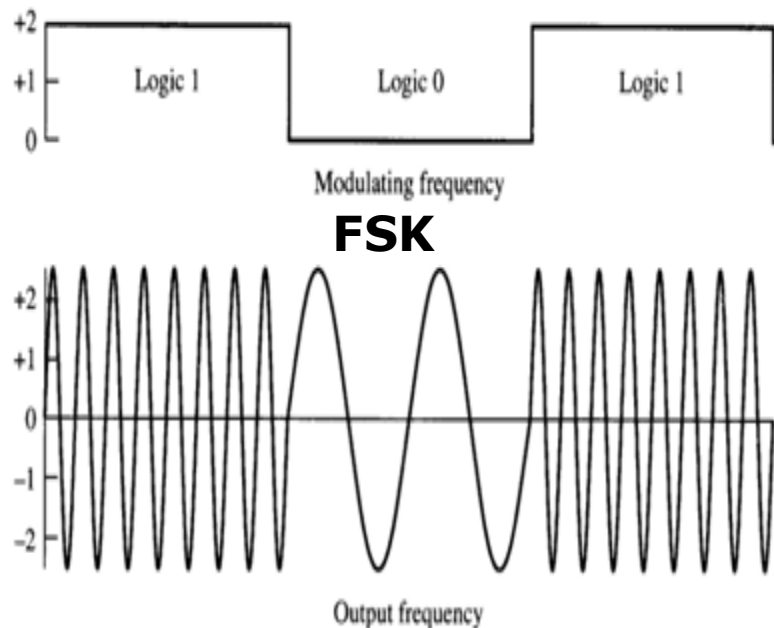
# שיטות אפנון דיגיטליות

## ASK

Amplitude-shift keying היא שיטה המשנה את עוצמת הגל-הנושא ע"מ לייצג נתונים דיגיטליים (בדומה ל-AM). המימוש הפשוט ביותר מעביר את הביט "1" כגל הנושא עצמו, ואת הביט "0" כהפסקה בגל הנושא. מימושים מורכבים יותר מייצגים צירופים שונים של ביטים על ידי עוצמות שונות של הגל הנושא. (ככל שיש שימוש ביותר רמות-עוצמה של הגל הנושא - עולה הסיכוי לשגיאה בתקשורת).

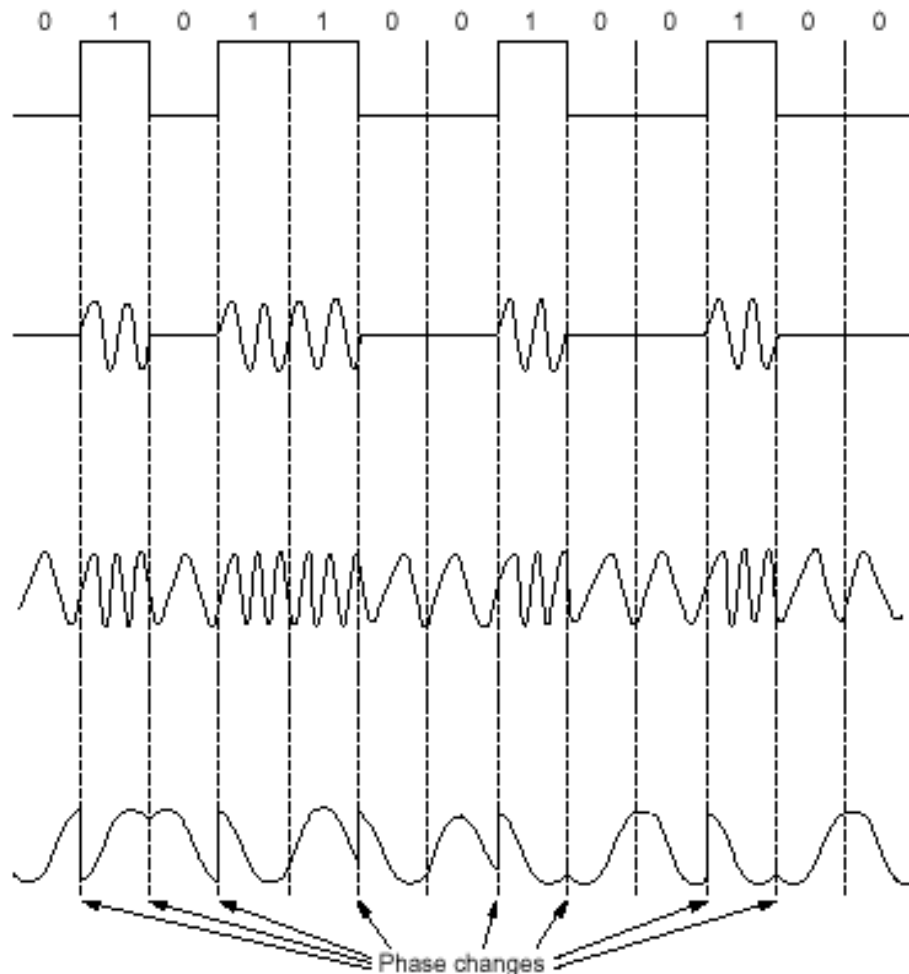
## FSK

Frequency-shift keying היא שיטה המייצגת ביטים באמצעות שינויים בדידים בתדר של הגל הנושא, כאשר כל שינוי בתדר מייצג ביט או צירוף מסוים של ביטים.





# איפנונים



A binary signal □

Amplitude □  
Modulation

Frequency □  
Modulation

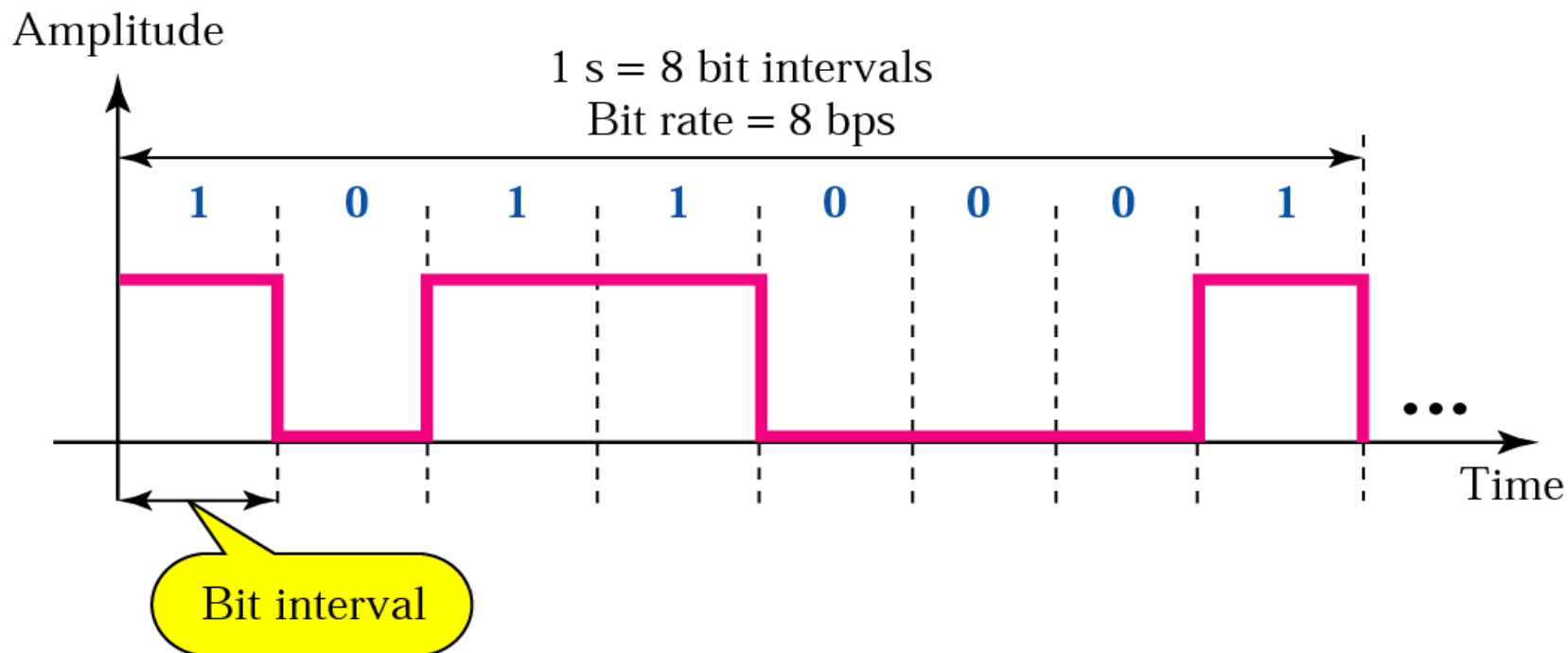
Phase □  
Modulation

# הקיבולת $fe$ ערוץ דיגיטלי

- לערוץ התקשורת המעביר אותות דיגיטליים, יש מגבלות הקובעות באיזו דחיפות יכול האות לשנות את מצבו בפרק זמן נתון, ומגבלות אילו קובעות את הקצב המקסימאלי.
- בכל נקודת זמן נתונה יש לערוץ התקשורת קיבולת מוגדרת המאפשרת לו לשדר מידע באמצעות מספר קבוע של סיביות (bits) ליחידת זמן.
- מערכת דיגיטלית ממתגת את האות בין שני מצבי אנרגיה או יותר, ומצבי האנרגיה הינם רמות מתח שונות (הנמדדות בוולטים) הנבדלות זו מזו.
- המערכת מבצעת שינויי מתח חדים ופתאומיים (שינויי מדרגה) ובכך היא שונה ממערכת אנלוגית (בה רמות המתח של הגל האנלוגי משתנה באופן הדרגתי, רציף ומתמשך).

# קצב סיביות וארווח בין סיביות

(Bit rate and bit interval)

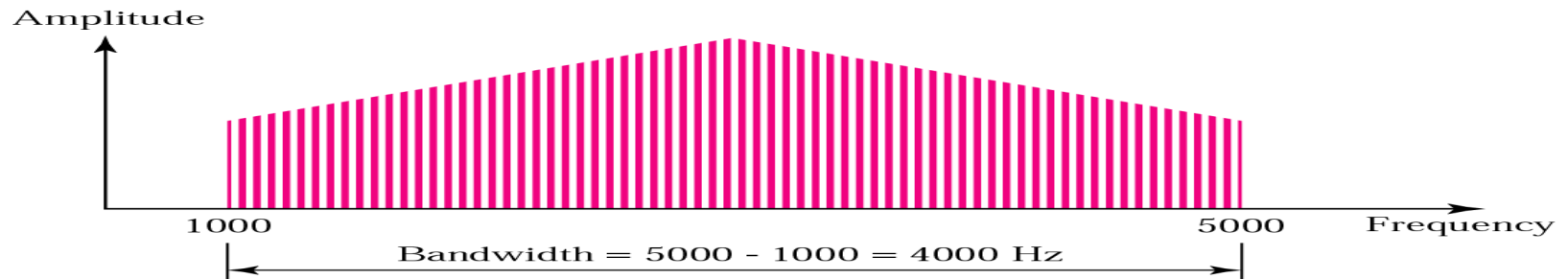


ארווח בין סיביות (Bit interval) - הזמן הדרוש כדי לשלוח Bit אחד.

קצב סיביות (Bit rate) - מספר סיביות שנשלחו בשניה אחת - מבטא את הביט לשניה (bps).

## רוחב הפס (Bandwidth)

- רוחב הפס הוא תכונה של התווך (האמצעי): הוא ההבדל בין התדירות הגבוהה לנמוכה שהתווך יכול להעביר בצורה מספקת.
- אנו משתמשים במונח רוחב פס (bandwidth) בהתייחסות לתכונה של התווך (האמצעי).



### רוחב פס:

- הקצב המקסימאלי שהחומרה יכולה לשנות את האות.
- נמדד במחזורים לשניה או בהרץ (Hz).
- קצב סיביות ורוחב הפס הם פרופורציונלי אחד לשני.

# קצב העברת מידע סטנדרטי

(Standard Transmission Rates)

---

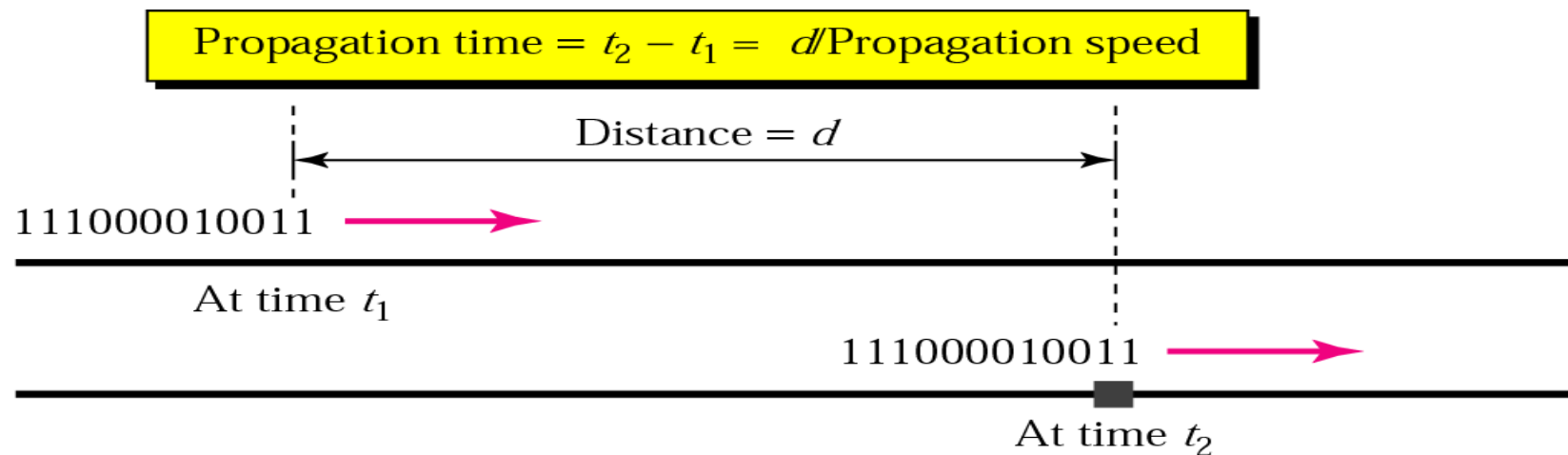
- ❑ Low Rates – 300 bps and multiplies – 1200, 2400, 9600, 19200
- ❑ LANs – 2, 4, 10, 16, 100, 1000 Mbps
- ❑ Wireless LANS – 11 Mbps, 54 Mbps
- ❑ Wireless MAN – 32 Mbps

# זמן ההתפשטות (השהייה) ולכן שידור

■ זמן ההתפשטות (Propagation delay):

■ הזמן הדרוש לאות לנוע דרך התווך (אמצעי).

■ לדוגמא: מהירות התקדמות אות חשמלי בריק:  $C=3 \times 10^8$  meters/sec  
בחוטי נחושת מהירות התקדמות האות היא  $C=2 \times 10^8$  meters/sec



■ הזמן הנדרש לשלוח  $N$  ביטים (bits) בקצב שליחה נתון.

קצב שידור / אורך ההודעה = Transmission time

## דוגמה לחישוב זמן עיכור ולכן התפשטות (השהייה)

---

### □ Example

- Message length: 500 Bytes
- Bit transmission Rate: 4 Mb/s
- Optical fiber length: 2 Km
- Speed of information in the fiber: 66%  $C \sim 2 \cdot 10^8$  m/s

□ Transmission time = (Message length) / (Bit transmission Rate) =  $(500 \cdot 8 \text{ bits}) / (4 \cdot 10^6 \text{ b/s}) = 10^{-3} \text{ s} = 1 \text{ ms}$

□ Propagation delay =  $d / (\text{propagation speed}) = (2000 \text{ m}) / (2 \cdot 10^8 \text{ m/s}) = 0.01 \text{ ms}$

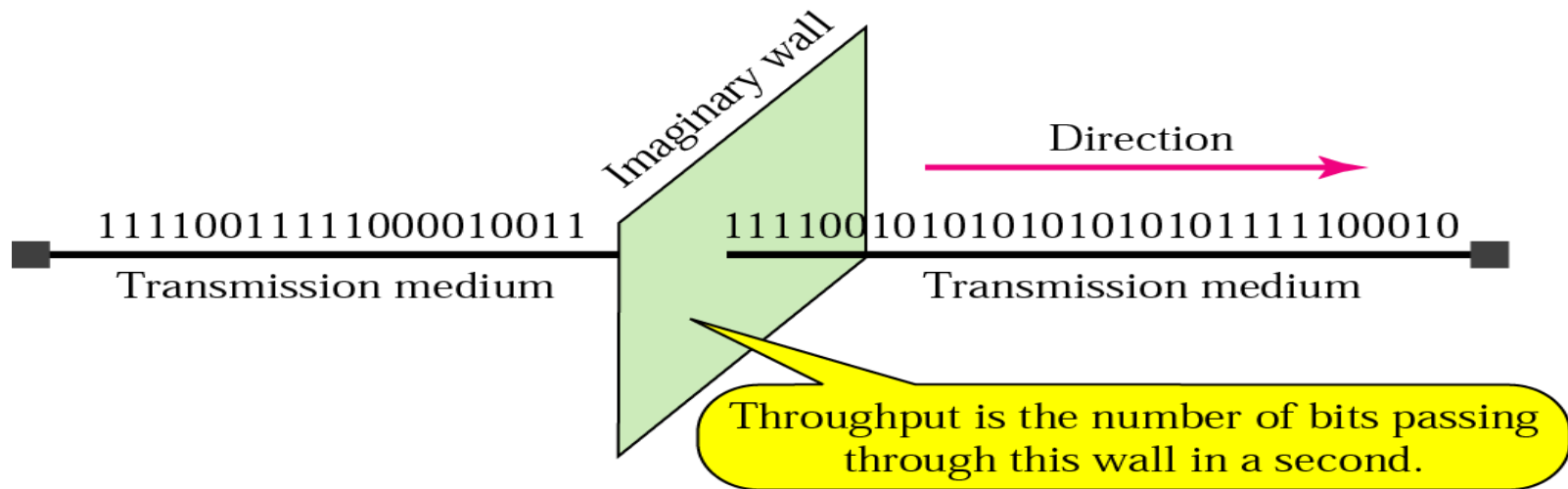
## קצב העברת המידע

□ קצב העברת המידע עבור ערוץ נתונים מוגדר כמהירות שבה יכול המידע הבינארי לעבור מהמקור ליעד.

■ היחידה של קצב העברת המידע  $\leftarrow$  bits/second.

■ בהתייחסות לרוחב הפס (מספר הפעמים לשניה שבו האות יכול להשתנות).

■ קצב העברת המידע  $1000 \text{ bits/second} = 6 \text{ bits/6ms}$





# שיטות תקשורת

## □ אות רב שכבתי המשתמש בערוץ תקשורת יחיד

□ שידור מידע בערוץ חייב בהכרח לא להיות מוגבל לפורמט בינארי – כל מספר של רמות מתח יכול להיות בשימוש. לדוגמא, שימוש ב- 4 רמות מתח. אנו יכולים באופן ייחודי להצפין 2 ביטים לתוך הרמות הבאות (00=level A, 01=level B, 10=level C, 11=level D). בכל פעם אנו נשנה את המצב היצוג (symbol), שני ביטים של מידע נמסרים לעומת רק אחד למערכת בינארית. אנחנו לכן שולחים מידע במהירות כפולה עבור רוחב פס נתון.

## □ אות רב שכבתי המשתמש בערוצי תקשורת מרובים מקביליים

□ ניתן להשתמש באותות רב שכבתיים עם הרבה ערוצי תקשורת, ועל ידי כך כמות המידע המשודרת גדלה.

## פאנל יצוא רב שכמות

---

■ בעקרון אנו יכולים להשתמש בכל מספר של מצבים ייצוגיים (symbols) למסירת מידע דיגיטלי, לדוגמא 1024 של רמות מתח שונות מוסרות:

$$\log_2 1024 = 10 \text{ bits}$$

■ הגבול מעשי תלוי ביכולת שלנו לפתור את המצב האינדיבידואלי (מתחים חשמליים, תדירויות, עוצמת אור וכו') באופן מדויק במקלט; זה יהיה תלוי ברמת הרעש והעיוות של הערוץ.

# פצולת יצוא רב שכבתית (המשק)

□ היחס בין ביטים (bits) לייצוג (symbols):

■ מספר מצבי הייצוג (symbols) צריכים באופן יחודי ליצג כל תבנית של  $n$  ביטים ניתנים על ידי הביטוי הפשוט הבא:

$$M = 2^n \text{ symbol states} \quad \square$$

■ לכן קבוצה של 3 ביטים יכולה להיות מיוצגת באופן הבא:

$$M = 2^3 = 8 \text{ symbol states} \quad \square$$

$$4 \text{ bits by } M = 2^4 = 16 \text{ symbol states} \quad \blacksquare$$

$$5 \text{ bits by } M = 2^5 = 32 \text{ symbol states} \quad \blacksquare$$

# קצב העברת המידע המקסימלי של הערוץ

(Maximum Data Rate of a Channel)

---

כלל נייקוויסט (Nyquist) הפשוט:

היחס בין כמות הנתונים שניתן להעביר בערוץ תקשורת לרוחב הפס, נתון ע"י

$$D = 2 * B * \log_2 K$$

כאשר:

D: קצב העברת המידע המקסימלי של הערוץ ב-b/s.

B: רוחב פס של המערכת.

K: ערך אפשרי של המתח (בינארי  $K = 2$ ).

## כחל נייקוויסט (Nyquist): מקרים פרטיים

□ עבור RS-232:

■ K הוא 2 משום ש- RS-232 משתמש רק בשני ערכים, +15 או -15 וולט, לקודד ביטים של מידע -  $\log_2 2 = 1$ .

$$D = 2 B \quad \blacksquare$$

□ עבור קידוד הזזת פאזה (phase-shift encoding):

■ נניח K הוא 8 (הזזה אפשרית) -  $\log_2 8 = \log_2 2^3 = 3$ .

$$D = 6 B \quad \blacksquare$$

## רעש (Noise)

---

□ שיתוף לא רצוי של האות עם הרעש בשידור המידע  
עלול לגרום למידע שגוי.

□ רמות רעש: יחס אות לרעש  $S/N$  (SNR).

■  $S$ : עוצמת אות ממוצעת.

■  $N$ : עוצמת רעש באות.

■ מדידה בדציבלים (decibels):  $10\log_{10} S/N$ .

# השפעה של הרעש

---

כלל שאנון (Shannon):

נוסחת קיבולת הערוץ בנוכחות רעש

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

כאשר:

C: גבול יעיל לקיבולת הערוץ (b/s).

B: רוחב פס של החומרה (ערוץ).

S/N: יחס אות לרעש.

# שורה תחתונה

## □ כללי שנון (Shannon) ונייקוויסט (Nyquist):

- כל כמות של הנדסה פיקחת אינה יכולה להתגבר על הגבולות היסודיים והפיסיים היסודיים של מערכת שידור אמיתית.
- נשייך את כמות הנתונים שניתן להעביר באפיק נתונים לרוחב הפס (bandwidth).
- נעודד מהנדסים להשתמש בקידוד מסובך.
  - נגדיל את הערך של  $K$ .
- נחפש דרך לקודד עוד ביטים פר מחזור לשיפור קצב העברת המידע.
  - נכוון את הרעש.
  - נפרט גבולות על מערכות שידור מידע אמיתיות.



## 1 kNcl?

□ שאלה: אנו יכולים לחשב את קצב העברת הביטים התיאורטי הגבוה ביותר לקו טלפוניה סטנדרטי. לקו טלפון נורמלי יש רוחב פס של (300 Hz to 3300 Hz) 3000 Hz. ויחס אות לרעש בוא בד"כ 1000.

□ פתרון: עבור ערוץ זה הקיבולת על פי נוסחת שאנון תחושב כך:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 3000 \log_2 (1 + 10^3)$$
$$C = 29.901 \text{ kbps}$$

## 2 כדף

□ שאלה: יש לנו ערוץ תקשורת עם רוחב פס של 1 MHz, יחס אות לרעש בערוץ זה הוא 63. מהו קצב העברת הביטים המתאים לערוץ זה? ומהי רמת האות?

□ פתרון: תחילה נשתמש בנוסחת שאנון למציאת הגבול העליון של קצב השידור:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 10^6 \log_2 (1 + 63) = 10^6 \log_2 (64) = 6 \text{ Mbps}$$

□ נשתמש בנוסחת נייקוויסט למצוא את מספר רמות

$$D = 2 * B * \log_2 K$$

האות המתאימות

$$6 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L \rightarrow L = 8$$

# סיכמת קידוד RZ & NRZ

## □ RZ(Return to Zero)

- אות חוזר לאפס אחרי כל קידוד ביט.
- 0 / 1: positive / negative pulse

## □ NRZ(Non-return to Zero)

- רמת המתח קבוע במשך ביט אינטרוול (אין חזרה ל-0 ברמות המתח).

## □ NRZ-L(NRZ Level)

- positive voltage :0
- negative voltage :1

## □ NRZ-I(NRZ Inverted)

- תוכנית קידוד דיפרנציאלית
- 0: אין שינוי (transition).
- 1: שינוי (transition).

## □ NRZ - פשוט, ויעיל -

