

פרק 2 – סול'י תקשורת וע'א'ות

- סוגי שידור – סינכרוני ואסינכרוני
- קצב שידור ברשתות
- רוחב פס ורעשים
- שגיאות ותיקון שגיאות
- נצילות קודים

סוגי שידור

- בהעברת נתונים בין מחשבים נדרש תאום
 - המקבל נדרש לדגום את הסיביות באופן נכון
 - המקבל צריך לדעת: תחילת שידור, כמה זמן נמשך, אורך קטע הזמן של סיבית אחת (זמן מחזור)
 - שעון של המשדר והמקבל – קצב זהה
- שלשה סוגי שידור עיקריים
 - **Simplex** (חד מגמי) – אין למקבל הנתונים אמצעי שידור
 - **Half Duplex** (דו-מגמי למחצה) – שידור אפשרי בשני הכוונים אך בכל רגע נתון רק צד אחד משדר
 - **Full Duplex** (דו מגמי) – שידור דו כיווני בו-זמנית

סול'י תמסורת

- **תמסורת אסינכרונית** – זמני תחילת שידור של סיביות המרכיבות כל תו (character) אינם קבועים מראש
- **תמסורת סינכרונית** – זמני שידור הסיביות ידועים מראש במשדר ובמקלט. קיים סינכרון עבור סיבית יחידה באמצעות אות הזמן ועבור רצף תווים באמצעות תווי סינכרון

תאסורת אסינכרונית ("התחלה-הפסק")

Start bit – סימון תחילת שידור סיביות המידע

Parity bit – לבקרת שגיאות

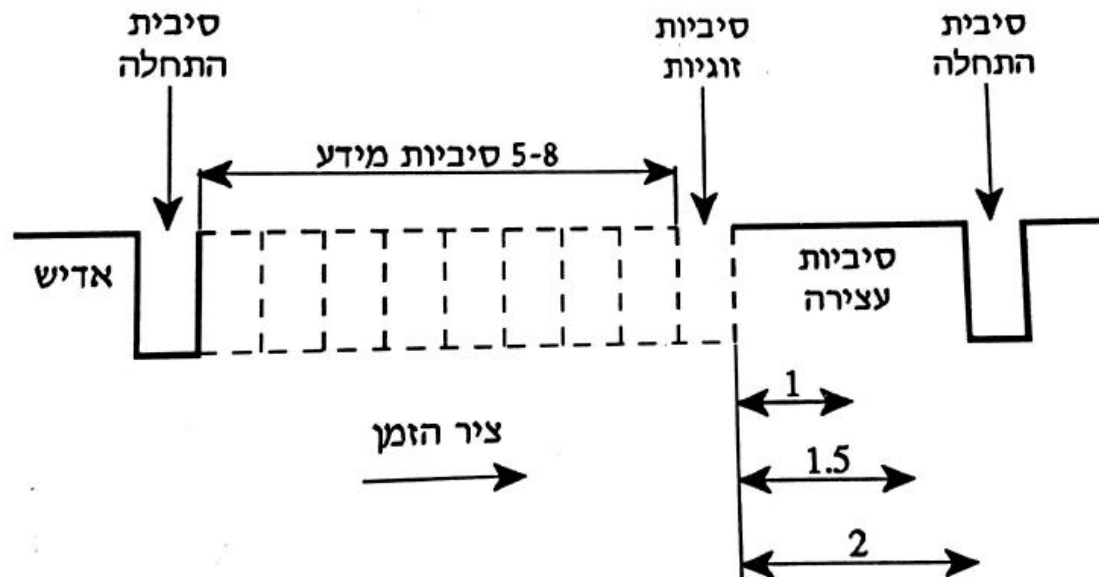
Stop bit – סימון סוף התו. משכו שווה לזמן שידור סיבית אחת עד שתי

סיביות (תלוי בקצב השידור ושיטת הקידוד)

שידור התו הבא יכול להתחיל מיד עם תום שידור סיבית העצירה

Idle state – אם אין תו נוסף עובר הקו למצב אדיש. מוגדר לרוב כרמה לוגית "1"

Synchronization bits – סיביות ההתחלה והעצירה המאפשרות תאום בין המשדר למקלט

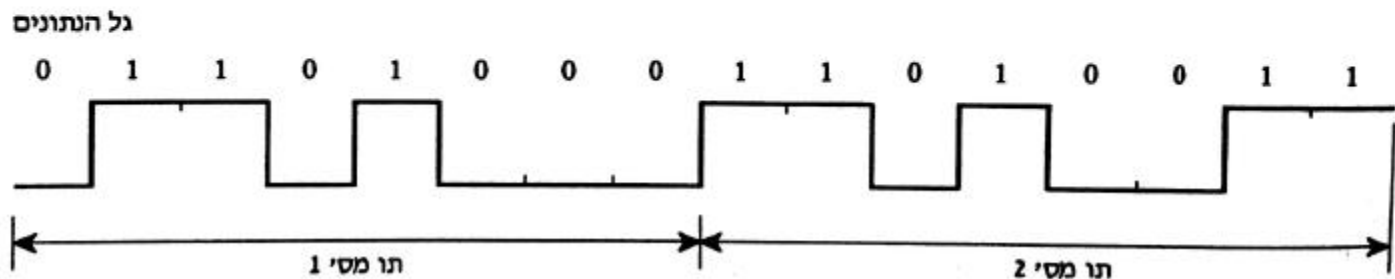
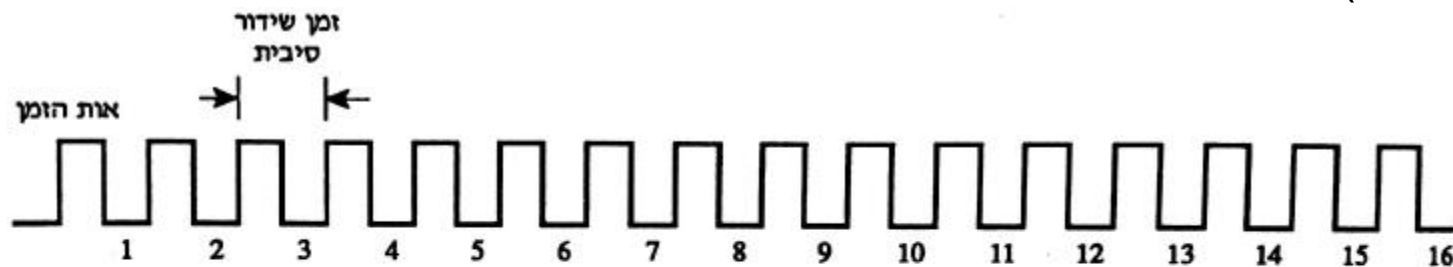


יתרונות וחסרונות ℓ_1 שידור אסינכרוני

- שיטה פשוטה וזולה למימוש
- תאום הזמנים בין השולח למקבל צרכים להישמר רק במשך קטעי זמן קצרים – לכן נדרש פחות דיוק
- תקורה (overhead) גבוהה – תוספת סיביות התחלה, עצירה וסיביות זוגיות
- נצילות הקוד (Code rate) – היחס בין מספר סיביות המידע לבין מספר הסיביות המשודר במסגרת הקוד: **שידור אסינכרוני פחות יעיל משידור סינכרוני**
- הימנעות משידור רצפים גדולים

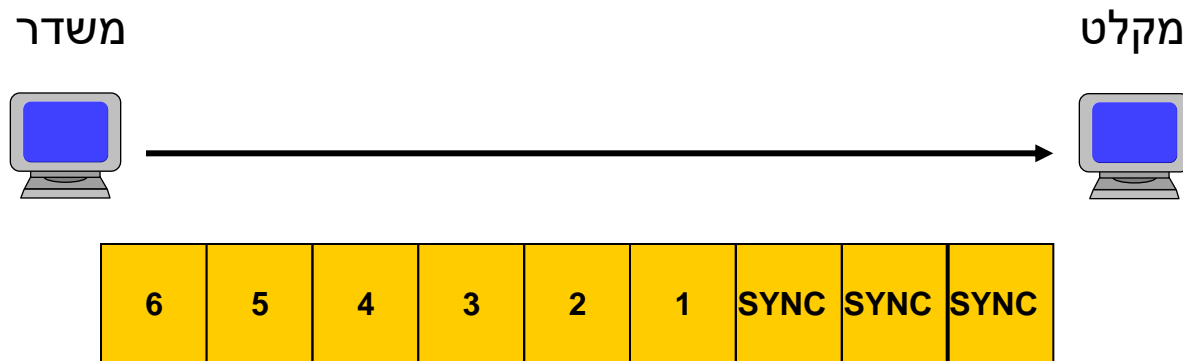
תאסורת סינכרוניות

- מחייב סינכרון בין שעון השולח והמקבל – מניעת גלישה בזמני הדגימה של המקבל
- סיביות הנתונים משודרות בקצב קבוע
- שעון המשדר קובע את קצב שידור הנתונים – שידור אות זמן (תמיד משודר בנוסף לאות הנתונים)
- מקלט דוגם את הקו באותו קצב
- הסיביות משודרות ללא הפסקה בין תו לתו
- Overhead קטן יחסית- אלפי סיביות מידע משודרות לעומת Preamble (משמש לסינכרון שעוני מקלט- משדר) הכולל כמות סיביות זניחה



תאסורת ס'נכרונ'ית

- שני תהליכי משנה
 - סינכרון סיביות (bit sync) – זיהוי נכון של סיביות ששודרו
 - סינכרון התווים (characters sync) - בנייה נכונה של התווים מתוך רצף הסיביות
- יישום הסנכרון
 - שידור תו סינכרון המשודר מספר פעמים (0010110 מוגדר כ-SYNC בקוד ASCII)



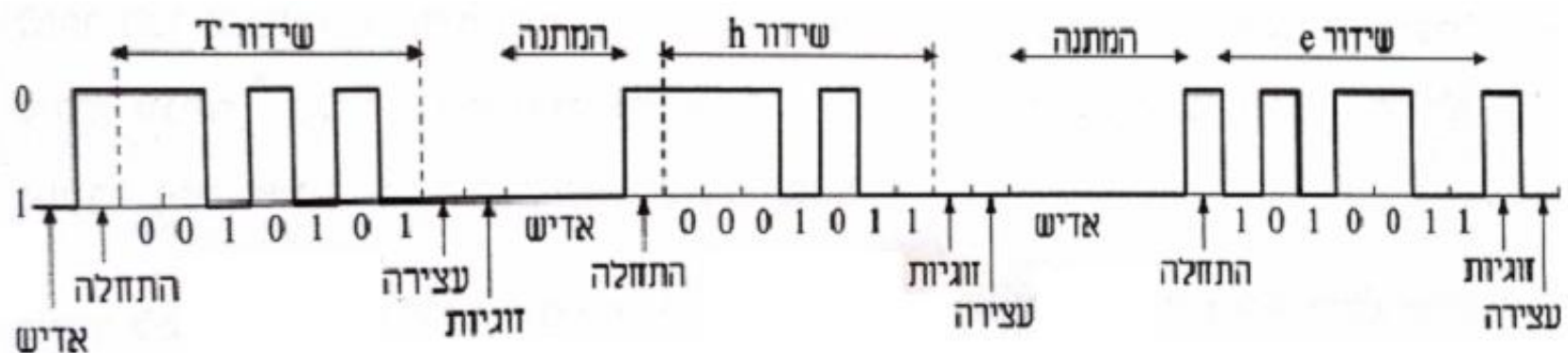
ASCII Table

Dec	Hex	Char	Dec	Hex	Char	Dec	Hex	Char	Dec	Hex	Char
0	00										
1	01										
2	02										
3	03										
4	04										
5	05										
6	06										
7	07										
8	08										
9	09										
10	0A										
11	0B										
12	0C										
13	0D										
14	0E										
15	0F										
16	10										
17	11										
18	12										
19	13										
20	14										
21	15										
22	16										
23	17										
24	18										
25	19										
26	1A										
27	1B										
28	1C										
29	1D	Group separator	61	3D	=	93	5D]	125	7D	}
30	1E	Record separator	62	3E	>	94	5E	^	126	7E	~
31	1F	Unit separator	63	3F	?	95	5F	_	127	7F	□

EOT - End Of Transmission

דואל אפידור אסין כרונ'י

אות	ASCII משמאל לימין	Parity check זוגיות זוגית
T	0010101	1
h	0001011	1
e	1010011	0



קצב שידור ברשתות

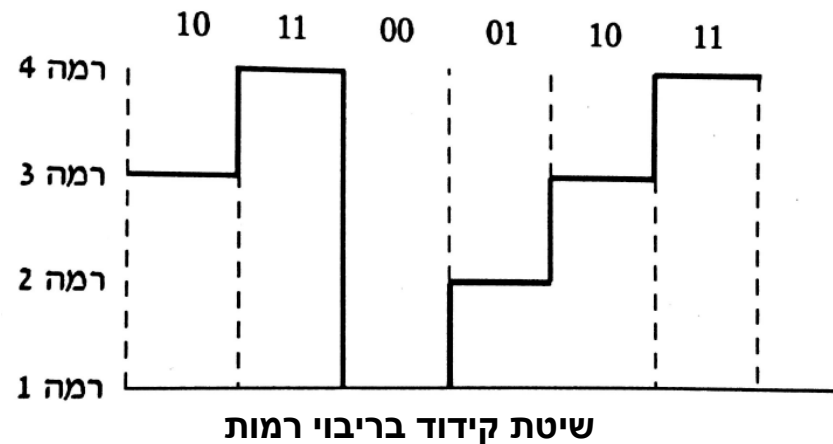
קצב השידור (Transmission Rate) – bps, Kbps, Mbps, Gbps ✓

Data Rate or bit rate – R ✓

Baud rate – קצב העברת הדפקים
T – זמן שידור דופק יחיד



$$D = 1/T$$



$$R = \left\{ \begin{array}{l} \text{מספר הסיביות המיוצגות} \\ \text{ע"י דופק אחד} \end{array} \right\} \cdot D$$

רוחב פס ורעשים

מהירות העברת נתונים תלויה ברוחב הפס של הערוץ

רוחב הפס- מגביל את קצב השינוי המרבי של אותות

כלל נייקוויסט (Nyquist): $D \leq 2W$ [Baud]

כאשר נתון: W - רוחב הפס של הערוץ ביחידות הרץ

רעשים גורמים לשיבוש המידע- סיביות הנשלחות בערוץ כ-"0" נקלטות כ-"1" ולהיפך

0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0

א האות המשודר ע"י המקלט

ב הרעש

ג האות המגיע למקלט

0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0

ד האות המפוענח מהשידור

0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0

ה הנתונים הבינאריים המיוצגים ע"י האות א

שגיאות

רוחב פס ורעשים (המשק)

- הגורמים העיקריים להיווצרות רעש
 - רעש תרמי – התנגשויות בין אלקטרונים כתוצאה מתנועתם במוליך
 - ערב דיבור – קרינה אלקטרומגנטית מקווים סמוכים (Crosstalk)
 - EMI – קרינה אלקטרומגנטית ממקורות חיצוניים
- כלל שנון (Shannon) מגדיר תאורטית את קצב העברת הנתונים המרבי האפשרי בקו רועש (באמצעות קידוד עם ריבוי רמות)

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

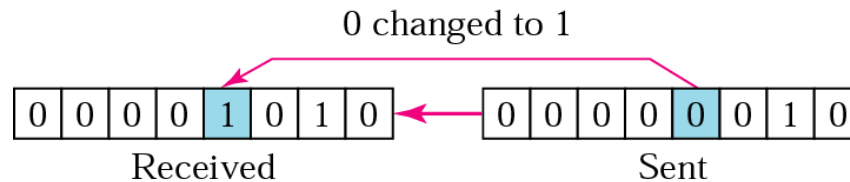
W – רוחב הפס של הערוץ ביחידות הרץ

C – קצב העברת הנתונים בקו

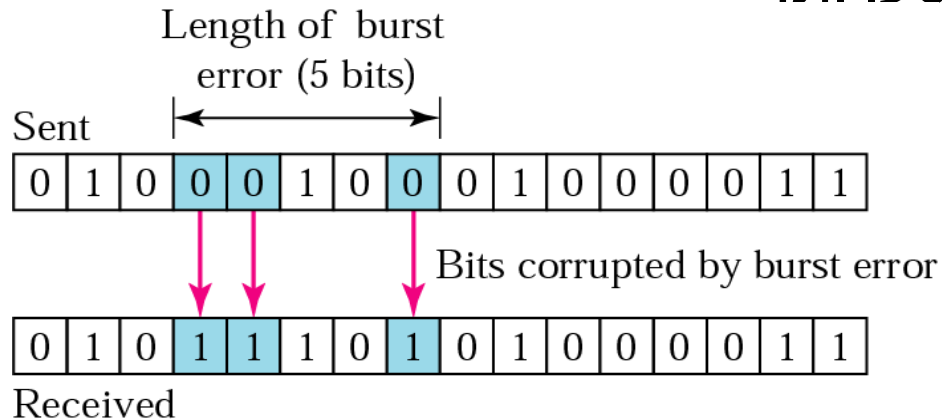
S/N – היחס בין עוצמת האות נושא המידע לעוצמת הרעש

שגיאות

- מידע יכול להפך לפגום במהלך השידור
- לדוגמא טעות של סיבית (bit) אחת:



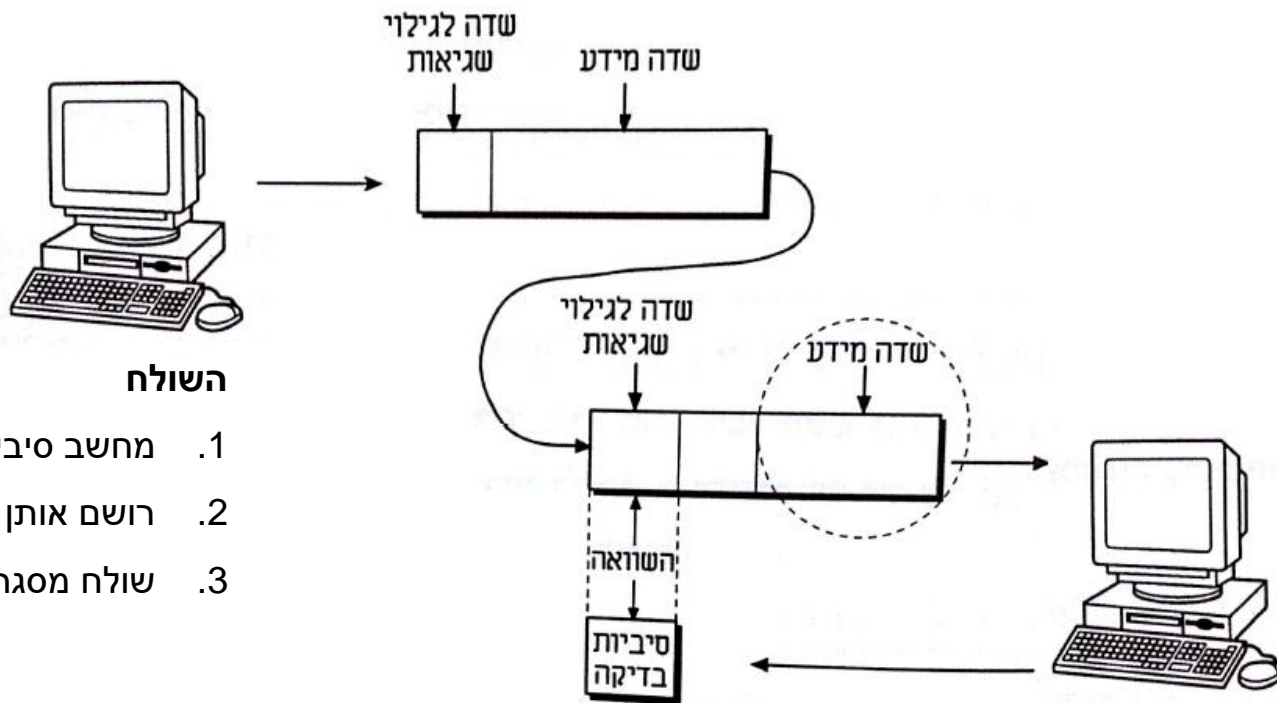
- לדוגמא פרץ של טעויות:



טיפוס שגיאות

- חבילות הנתונים כוללת מידע נוסף
 - לגלות שגיאות או נכונות
 - ביצוע בדיקה ע"י המקבל
 - EDC (Error Detection and Correction bits) – גילוי שגיאות וסיביות התיקון
 - D נתונים המוגנים ע"י בדיקת שגיאות ויכולות לקלוט בנוסף שדה של ראש (header)

אלו שיאות



השולח

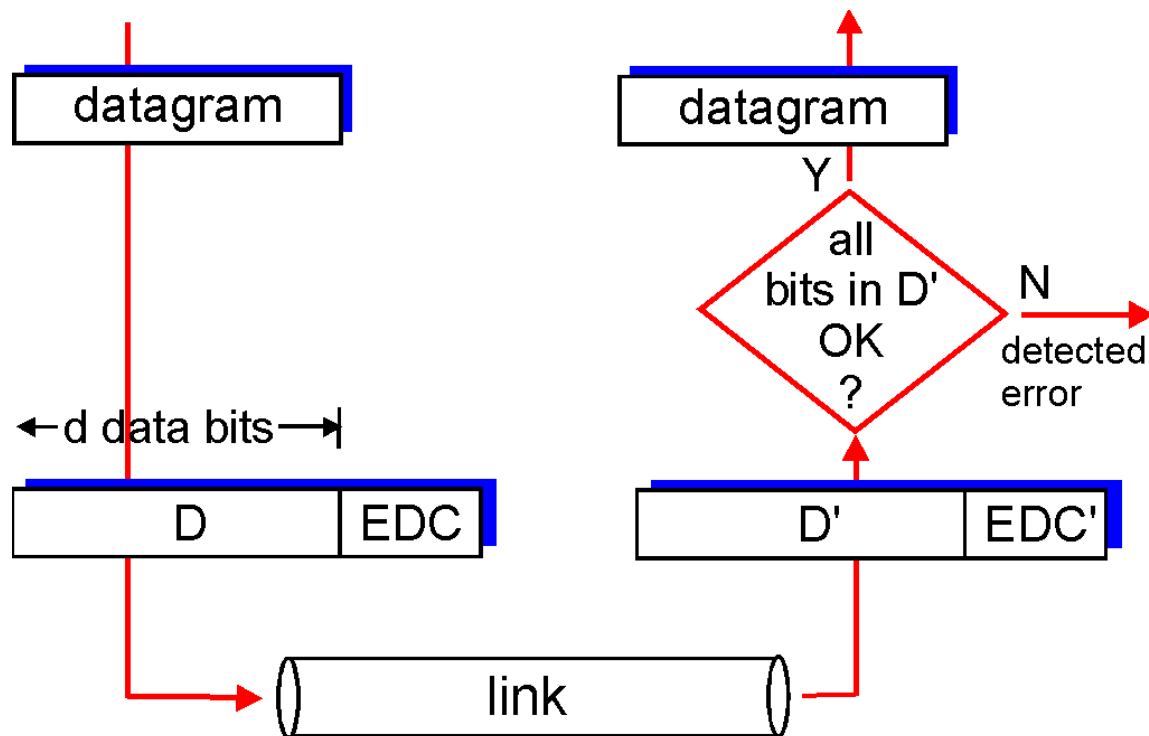
1. מחשב סיביות בדיקה
2. רושם אותן בשדה לגילוי שגיאות
3. שולח מסגרת

המקבל

1. קולט הודעה
2. מחשב את סיביות הבדיקה מתוך שדה המידע
3. משווה תוצאה עם תוכן השדה לגילוי שגיאות (כפי שנקלט)
4. מודיע על שגיאה אם מוצא הבדל

גילוי שגיאות

- שיטת גילוי שגיאות אינה אמינה ב-100%!
- הפרוטוקול יכול להחמיץ מספר שגיאות, אבל זה קורה לעיתים רחוקות.
- שדה EDC ארוך יותר יניב גילוי שגיאות ותיקון טובים יותר



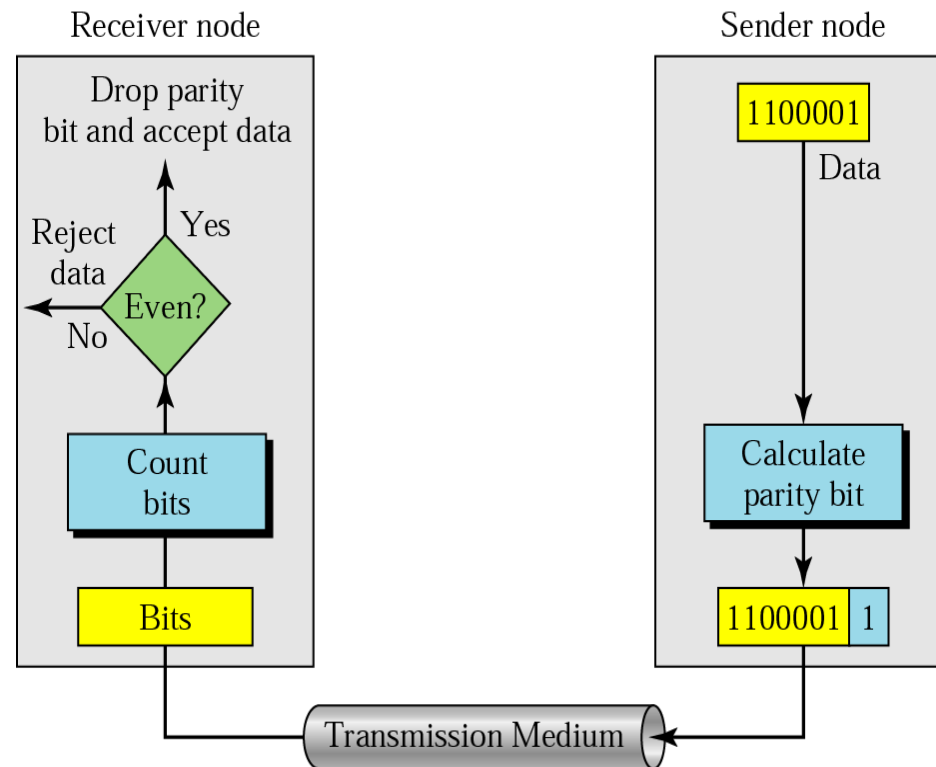
שיטה 1 לאיפוי שגיאות: בקורת זוגיות (Parity Checking)

דוגמאות להוספת סיבית זוגיות		
7 סיביות נתונים		בית עם סיבית זוגיות
		זוגית אי-זוגית
00000000	0	000000001
10100001	1	101000010
11010001	0	110100011
11111111	1	111111110

- **סיבית זוגיות או סיבית ביקורת זוגיות** - משמשת כספרת ביקורת, שערכה מסמן האם מספר הסיביות באוסף נתון שערך 1 הוא זוגי או אי-זוגי
- **מוסיפים לכל מילת קוד סיבית בכדי ליצור מספר זוגי של '1'ים**
- **קיימים שני סוגים של סיביות זוגיות**
 - **סיבית זוגיות זוגית**, ששווה ל-0 אם ורק אם מספר האחדות בסיביות הנבדקות הוא זוגי, ושווה ל-1 עבור אי זוגי
 - **סיבית זוגיות אי-זוגית** ששווה ל-0 כאשר מספר האחדות בסיביות הנבדקות הוא אי-זוגי, ושווה ל-1 עבור זוגי

בדיקת זוגיות - Parity Checking

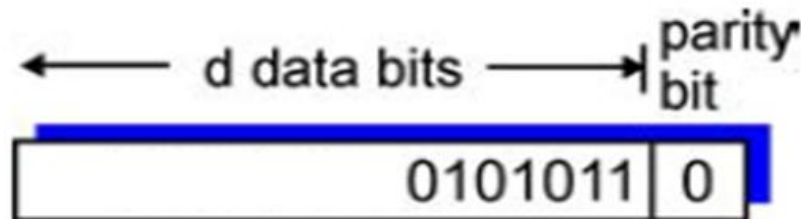
- הוספת סיבית ביקורת לרצף של סיביות מאפשר לגלות שגיאה אחת בהעברת המידע, אך לא מאפשר לתקן אותה
- סיבית בדיקת הזוגיות נוספת לכל יחידת מידע, כך שהמספר מוחלט של האחדים הוא זוגי (או אי זוגי עבור סיבית בדיקת זוגיות אי זוגית) .



בדיקת זוגיות - Parity Checking

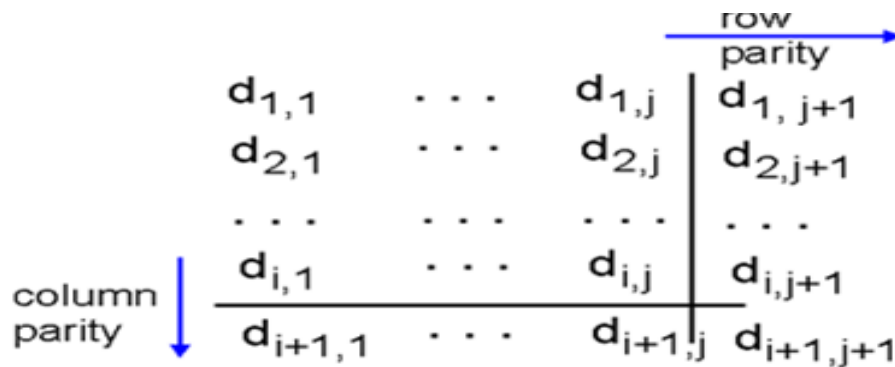
- בדיקת זוגיות חד-מימדית: הרעיון הוא להוסיף ביט אחד לכל 7 ביטים באופן שישלים למספר זוגי של אחדות.

Single Bit Parity:
Detect single bit errors



בדיקת זוגיות דו-מימדית

בדיקת זוגיות דו-מימדית: נבצע בדיקת זוגיות לפי קו-אורך (LRC) ולפי קו אנכי ונבדוק:



VRC

1	0	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	0	1	1	1
0	0	1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1

1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

no errors

1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

parity error

parity error

correctable single bit error

0 1 1 1 1 1 1 0 ← LRC

שיטה 2 לאיפוי שגיאות: סיכום ביקורת (Checksum)

- **סיכום ביקורת (Checksum)** הוא קוד לזיהוי שגיאות, המאפשר זיהוי של שגיאות ותיקון במקרים מסוימים, והוא סוג של "פונקצית יתירות" (redundancy check)
- אופן הפעולה מתבצע על ידי הוספת חלק נוסף להודעה שהוא תוצאה של פונקציה ידועה מראש המופעלת על ההודעה
- לאחר מכן, ניתן להפעיל את הפונקציה שוב על ההודעה ולוודא שהתוצאה שהתקבלה זהה לתוצאה שצורפה להודעה, אחרת, יש להסיק שנפלה שגיאה במידע
- יעילות המנגנון של פונקצית יתירות תלויה בבחירת הפונקציה לחישוב היתירות

חישוב המעלה $f - 1$

המטרה: לייצג מספרים שליליים באופן פשוט שיאפשר חיסור ע"י חיבור השלילי של מספר.

חישוב המשלים ל-1:

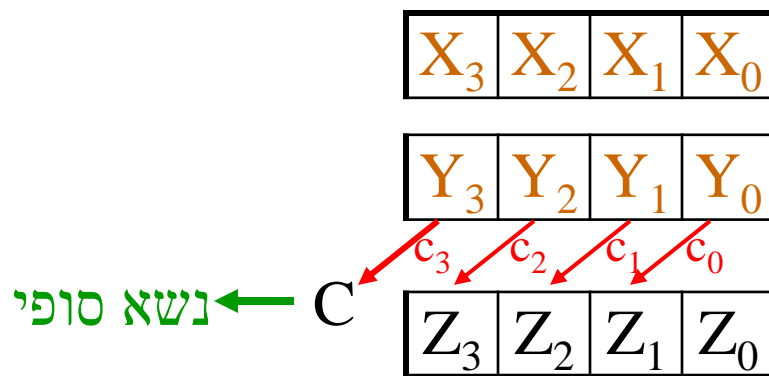
הפוך "1" ל- "0" ו- "0" ל- "1".

0	1	1	0	1	1	0	0
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	0	0	1	0	0	1	1

חיסוק בעזרת $1 - f$

קלט: X, Y מספרים בעלי "גודל" של n סיביות, מיוצגים ע"י משלים ל-1 בעזרת $n+1$ סיביות
חשב: $X + Y$ והשאר התוצאה ב-1's comp.
ביצוע: א. חבר $X + Y$.
ב. אם יש נשא סופי חבר אותו אל התוצאה (נשא מעגלי)

דוגמא ע"י $n=3$:



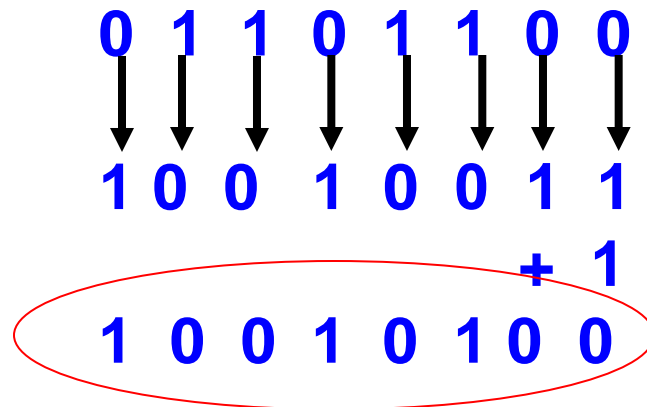
חישוב המעלה $f - 2$

הפתרון: נחשב את המשלים ל-1 נוסף 1 לתוצאה.

חישוב המשלים ל-2:

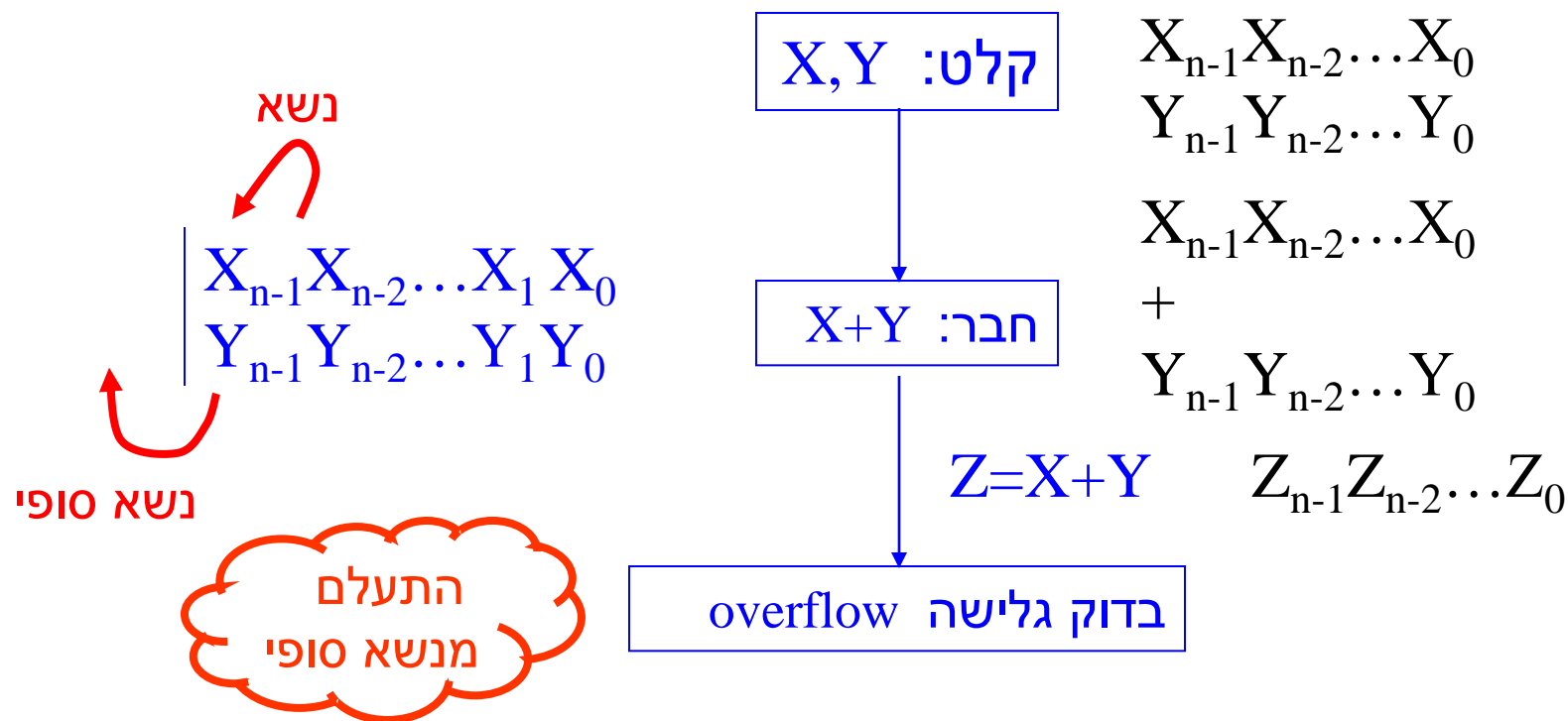
1. הפוך "1" ל- "0" ו- "0" ל- "1".

2. נוסף לתוצאה 1



חיסור בעזרת 2 's Complement

קלט: X, Y מספרים בינאריים בעלי n ספרות וספרת סימן $(n+1)$ מיוצגים ע"י 2 's Complement



דוגמא: $n=3$, חשב $3-5 \Leftarrow -5 + (3) \equiv 3-5$ נזדקק ל-4 סיביות (+1) ביט סימן.

:3-5

$$\begin{array}{r}
 3 = 0011_2 \\
 + 0011 \\
 \hline
 1011 \\
 \hline
 \end{array}$$

$-5 = 0101_2$
 $\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$
 1010_2
 $+ \quad 1$
 \hline
 1011_2

2 's Comp. \rightarrow 1110 (דוגמא) \leftarrow שלילי
 $-2 \equiv -0010_2$

:5-3

$$\begin{array}{r}
 5 = 0101_2 \\
 + 1101 \\
 \hline
 0010
 \end{array}$$

$-3 = 0011_2$
 $\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$
 1100_2
 $+ \quad 1$
 \hline
 1101_2

נשא סופי
 "התעלים". \rightarrow "1"

פצולות סיכום ביקורת

- השולח מבצע את הפעולות הבאות
 - יחידת המידע מחולקת ל- k חלקים, כל אחד עם n סיביות.
 - מחברים את כל החלקים ומשתמשים במשלים ל-1 לקבלת הסכום
 - הסכום הוא המשלים והוא הופך לסיכום הביקורת (checksum)
 - סיכום הביקורת (checksum) נשלח עם הנתונים.

פעולות סיכום ביקורת (checksum)

- **הקולט מבצע את הפעולות הבאות**
 - יחידת המידע המתקבלת מחולקת ל- k חלקים, כל אחד עם n סיביות.
 - מחברים את כל החלקים ומשתמשים במשלים ל-1 לקבלת הסכום
 - הסכום הוא המשלים והוא הופך לסיכום הביקורת (checksum)
 - נפחית את ה-checksum של השולח מה-checksum של המקבל, אם התוצאה אפס, הנתונים שנשלחו התקבלו, אחרת ידחו

דואא פסיכאס ביקורת

נניח שהבלוק הבא מכיל 16 סיביות (ביטים) הנשלחים ומשתמשים בסיכום ביקורת (checksum) של 8 סיביות.

10101001 00111001

נחבר את המספרים תוך שימוש בשיטת המשלים ל-1 (one's complement).

10101001

00111001

11100010 Sum

סיכום

סיכום ביקורת

00011101

התבנית אשר תשלח: 00011101 00111001 10101001

דואנא פסיכוס פיקורט (המשק)

עתה שהקולט מקבל את התבנית שנשלחה ואין שגיאות שנוצרו בשידור נניח

10101001 00111001 00011101

כאשר הקולט מבצע סיכום של שלושת הקטעים שנשלחו, הוא אמור לקבל רצף של 1-ים, ואחרי חישוב המשלים ל-1 נקבל רצף של 0-ים אשר יראה כי לא נוצרו שגיאות בשידור.

10101001

00111001

00011101

Sum

11111111

Complement

00000000 means that the pattern is OK.

דואא אסיכוס פיקורט (המשק)

נניח עתה כי יש פרץ של שגיאות באורך 5 אשר משפיעות על 4 סיביות.

10101111 11111001 00011101

כאשר הקולט מסכם את שלושת הקטעים שנשלחו, הוא מקבל

10101111

11111001

00011101

Partial Sum 1 11000101

Carry 1

Sum 11000110

Complement 00111001 the pattern is corrupted.

סיכום ביקורת (המשק)

■ יתרונות:

■ קל לחישוב

■ גודל

■ חסרונות:

■ לא מגלה את כל הטעויות הנפוצות

■ לדוגמא: הסיבית MSB נהפכת בקבוצת הנתונים

בדיקת יתירות מחזורית

- **בדיקת יתירות מחזורית (Cyclic redundancy check או בקיצור CRC)**
 - סוג של קוד לאיתור שגיאות או פונקצית גיבוב (hash function) המשמשת לאיתור שגיאות בהעברת נתונים
 - לפני העברת המידע מחושב ה-CRC ומתווסף למידע המועבר
 - לאחר העברת המידע, הצד המקבל מאשר באמצעות ה-CRC שהמידע הועבר ללא שינויים
 - שיטה זו מבטיחה גילוי כל שגיאה, שתי שגיאות, כל מספר אי זוגי של שגיאות, כל השגיאות באורך עד 16, 99.997% שגיאות באורך 17, 99.998% שגיאות באורך 18 ומעלה
- יתרונות השימוש ב-CRC
 - קלות המימוש שלו בחומרה בינארית
 - קלות החישוב המתמטית שלו
 - היעילות שלו בגילוי שגיאות נפוצות הנובעות כתוצאה מערוצי תקשורת רועשים

בדיקת יתירות מחזורית

- כל וקטור באורך n ניתן לייצג כפולינום שמקדמיו הם קואורדינטות הווקטור
- CRC משתמש בפולינום המוגדר בפולינום יוצר מדרגה r
- סוגים שונים של קוד CRC משתמשים בפולינומים יוצרים שונים
- לדוגמא **110001** יכול לייצג את הפולינום $G(x) = x^5 + x^4 + x^0$

פולינומים מחוללים אחרים:

- $G(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ CRC-16 (16 סיביות בדיקה)
- $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ CRC-16 ITU (16 סיביות בדיקה)
- $G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$ CRC-32 (32 סיביות בדיקה)

← d bits → ← r bits →

D : data bits to be sent	R : CRC bits
----------------------------	----------------

בדיקת יתירות מחזורית

■ אופן הפעולה

- בהינתן פולינום יוצר מדרגה r ובהינתן הודעה M שברצוננו לקדד, עלינו לבצע את הפעולות הבאות:
 1. נוסיף r אפסים מימין להודעה
 2. נחלק בפולינום (תוך שימוש בחילוק של השדה מודולו 2)
 3. נחסר את השארית תוך שימוש ב- XOR במקום בחיסור רגיל
- נצרף את התוצאה שקיבלנו מימין להודעה המקורית ונשלח.
- כמו בכל קידוד Checksum, הצד המקבל יבצע את שלבים 1 ו-2 ויוודא ש- r הביטים האחרונים שנשלחו זהים לתוצאה שהתקבלה

CRC - פונקציה

M=101110, d=6, G=1001, r=3

=> <D,R> = 101110000

לפני השידור מחשבים את שארית R ואותה
נוסיף למסגרת המידע M מימין:

101110011

מסגרת המידע המשודרת

מחשב היעד (המקבל)

101110011 | 1001

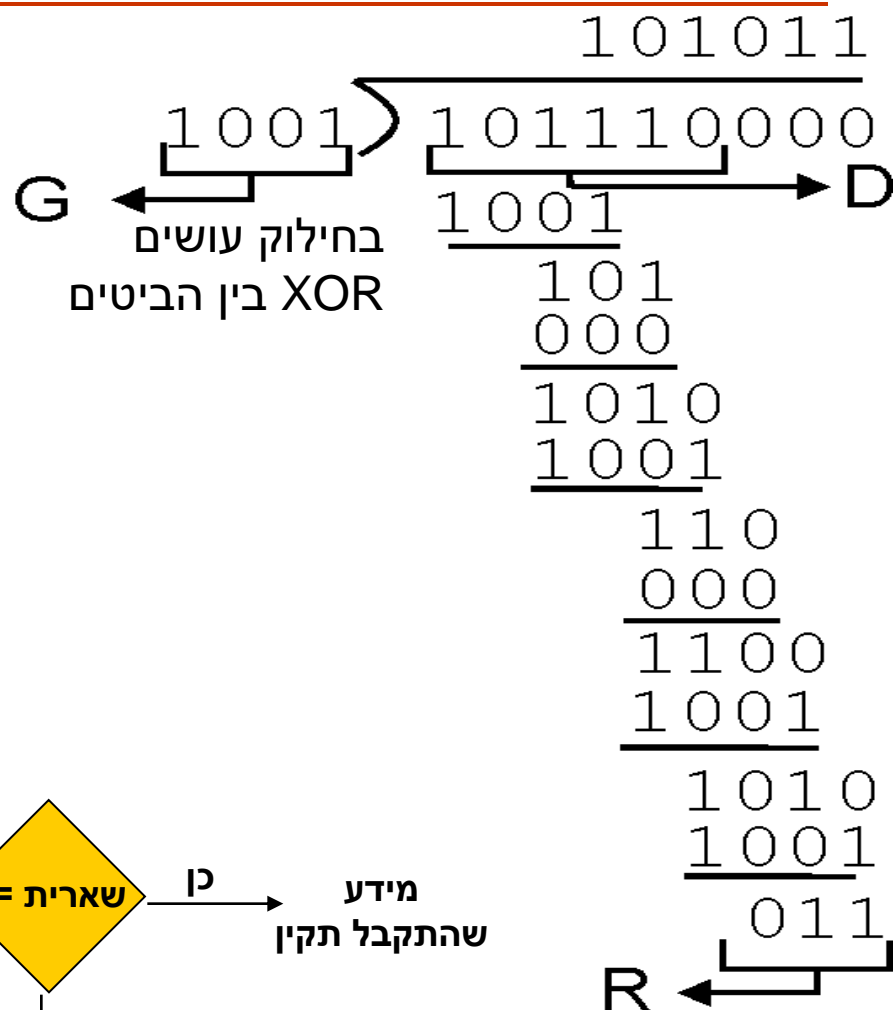
שארית = 0

כן

מידע
שהתקבל תקין

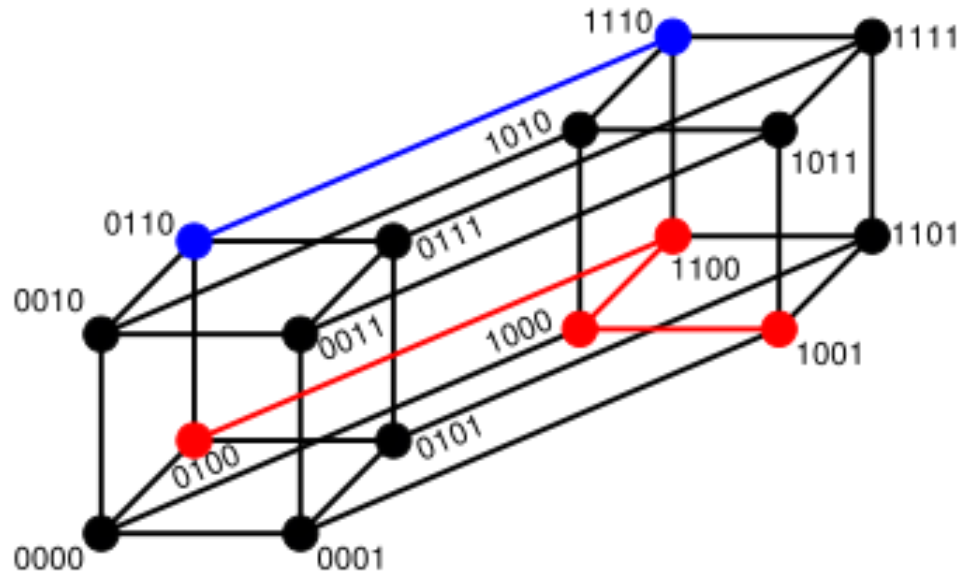
לא

Retransmission



תיקון שגיאות

- שתי שיטות לתיקון שגיאות
 - בעזרת קודים – שיטות עם בקרת שגיאות קדומנית (FEC)
 - שידור חוזר (Retransmission)
- קוד המינג (1950) מאפשר לתקן שגיאה אחת תוך שימוש מזערי של סיביות ביקורת
- Hamming distance - מספר הסיביות השונות בין שתי מילות קוד (המרחק בין שני תווים)



קוד המינג

H - מספר סיביות הקוד שנרצה להוסיף לסיביות הנתונים

L - אורך הבלוק המרבי המשודר כולל הסיביות הנוספות

m - מספר המרבי של סיביות הנתונים שניתן לקודד

$$L = 2^H - 1$$

$$m = 2^H - 1 - H$$

- לפי מספר סיביות הנתונים m שרוצים לשדר ניבחר את מספר סיביות H
- סיביות המינג ממוקמות בבלוק במקומות שמספרם הסידורי נתון ע"י 2^i (1, 2, 4, 8, וכו')

קוצא

- נקודד בלוק נתונים בן 8 סיביות: 01010010
- מספר סיביות המינג שנשתמש יהיה $H=4$ שהרי מתקיים $m = 2^4 - 1 - 4 = 11$ כלומר מספר סיביות הנתונים המרבי שניתן לקודד הינו 11 (ובדוגמא מספר הסיביות קטן מ-11 ושווה לשמונה סיביות).
- ** אם ננסה להשתמש ב- $H=3$ יתקיים $m = 2^3 - 1 - 3 = 4$ נראה שבלוק הנתונים המרבי שניתן לקודד באמצעות 3 סיביות יהיה רק 4 שבמקרה זה קטן מבלוק הנתונים שגודלו 8 סיביות.

- בלוק הנתונים כולל סיביות הקוד של המינג יהיה בן 12 סיביות ($m + H = 8 + 4 = 12$)
- נסמן את סידור 12 הסיביות כולל קוד המינג שמיקום הסיביות יהיה לפי 2^i (8, 4, 2, 1)

12	11	10	9	<u>8</u>	7	6	5	<u>4</u>	3	<u>2</u>	<u>1</u>
0	1	0	1	H	0	0	1	H	0	H	H

קואטא - האשק

- נרשום את כל המיקומים בבלוק המורחב ששם יש את הערך "1" ונרשום בפורמט בינארי:

12	11	10	9	<u>8</u>	7	6	5	<u>4</u>	3	<u>2</u>	<u>1</u>
0	1	0	1	H	0	0	1	H	0	H	H

	↑		↑				↑				
$11_{10} = 1011$			$9_{10} = 1001$				$5_{10} = 0101$				

- כעת נחשב את מרחק המינג בין המיקומים השונים ע"י פעולת XOR:
- $$0101 \oplus 1001 \oplus 1011 = 0111$$

הבלוק המורחב כולל הנתונים וסיביות קוד המינג:

12	11	10	9	<u>8</u>	7	6	5	<u>4</u>	3	<u>2</u>	<u>1</u>
0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1

קוד א-מסק

הבלוק המורחב כולל הנתונים וסיביות קוד המינג שהתקבל ביעד:

12	11	10	9	<u>8</u>	7	6	5	<u>4</u>	3	<u>2</u>	<u>1</u>
0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1

- לבדיקת נכונות הנתונים שהתקבלו (validation) יבצע המקבל חישוב כדלקמן:

$$\underbrace{0111}_{\text{קוד המינג שחושב}} \oplus \underbrace{0101}_{\text{מיקום 5}} \oplus \underbrace{1001}_{\text{מיקום 9}} \oplus \underbrace{1011}_{\text{מיקום 11}} = 0000$$

במידה והתוצאה שונה מאפס- משמע קיימת שגיאה בנתונים. התוצאה תסמן את מיקום הסיבית השגויה.

נצילות קודים

■ נצילות מערכת תקשורת- מידת ניצולו של קו התקשורת

$$E_c = \frac{\text{מספר סיביות הנתונים}}{\text{סה"כ הסיביות}}$$

■ גילוי שגיאות ותיקון - הוספת סיביות יתירות הגורמות להקטנת נצילות הקוד

■ **דוגמאות** לחישוב נצילות הקידוד עבור שיטות שונות לתיקון שגיאות:

■ זוגיות אנכית (VRC)- הוספת סיבית זוגיות לתו ASCII בן 7 סיביות נתונים

$$E_c = \frac{7}{8} = 87.5\%$$

■ בדיקת CRC - הוספת 16 סיביות לבלוק הכולל 80 תווים בני 8 סיביות כל אחד

$$E_c = \frac{80 \times 8}{80 \times 8 + 16} = 97.5\%$$

סיכום

- תמסורת סינכרונית ואסינכרונית
- הגורמים לרעש בערוצי תקשורת והשפעתם על קצב העברת הנתונים
(כלל נייקוויסט ונוסחת שנון)
- שיטות לגילוי שגיאות כולל בדיקת יתירות מחזורת (CRC)
- תיקון שגיאות באמצעות קוד המינג
- נצילות קודים נגזרת מהיחס בין מספר סיביות היתירות לבין מספר סיביות המידע