תקני Token Ring ו-FDDI, ולמה כבר לא משתמשים בהם

מאת אירי מור ועידו פרידמן

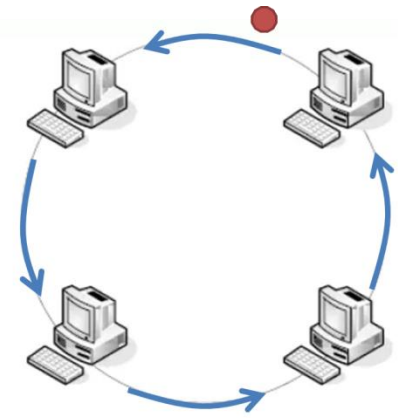
הקדמה

מאמר זה מתמקד בשני התקנים לתקשורת ברשת מקומית Fiber Distributed Data Interface (מבוסס על תקן token bus, IEEE 802.4) שפועל על רשת טבעת כפולה, וב-Token Ring (תקן IEEE 802.5) שפועל עם טבעת לוגית על רשת בטופולוגיית כוכב פיזית. נבצע סקירה של שני התקנים האלו, ושל הסיבות בגללן השימוש בהם כיום הוא מועט עד אפסי.

שכבת הקו (Data Link Layer) היא השכבה השנייה במודל שבע השכבות OSI. שכבת הקו מתחלקת לשתי תת-שכבות: Logical Link Control (LLC) ו-Media Access Control (MAC):

- LLC מספקת את הכתובות ויכולות השליטה בשכבת הקו, נמצאות בה השיטות לשליחת מידע מעל תווך, ולשליטה בו.
- MAC היא השכבה התחתונה יותר בשכבת הקו, ומפרטת את הדרכים לקבוע למי מותר לגשת לתווך ומתי.

Token Ring



Token Ring הוא פרוטוקול ברשתות מקומיות (LANs) אשר עובדות בטופולוגית כוכב (בדרך כלל. ישנם תקנים של Token Ring התומכים ברשת בטופולוגיית טבעת פיזית, בה כל רכיב מחובר לזה שלפניו ולזה שאחריו בלבד) ומשתמשת בהעברת Token לוגי בין הרכיבים ברשת - רק רכיב אשר מחזיק ב-Token יכול לשדר מידע. הפרוטוקולים הנפוצים ביותר של Token Ring הם של IBM, שפורסמו באמצע שנות ה-80. גרסאות של Token Ring יכלו להעביר מידע במהירות של 4Mbps ושל 16Mbps. בכך שרק צומת אשר מחזיק ב-Token יכול להעביר מידע בכל רגע נתון, ומספר ה-Tokens ברשת קבוע ונשלט, Token Ring מונע לגמרי התנגשויות בין סגמנטים של מידע.

טופולוגיות רשת Token Ring

רשת Token Ring היא בדרך כלל רשת בטופולוגית כוכב פיזית (כל הצמתים מחוברים לרכיב אחד המעביר את ה-frames ביניהם), ו-Token Ring יוצר טבעת לוגית מהרשת. טופולוגיית Token Ring משתמשת ב-Multistation Access Units (או Media Access Units, בקיצור MAUs), שמאפשרות חיבור כוכב של הרשת. ה-MAU מחוברת לשאר הצמתים ברשת, כך שאין ביניהם חיבור פיזי. לכן, חיבור הטבעת מתממש רק ברמה הלוגית - כשמידע מועבר ל-MAU, הוא לא נשלח ליעד מסוים, אלא לצומת הבא ברצף הקבוע של הטבעת.

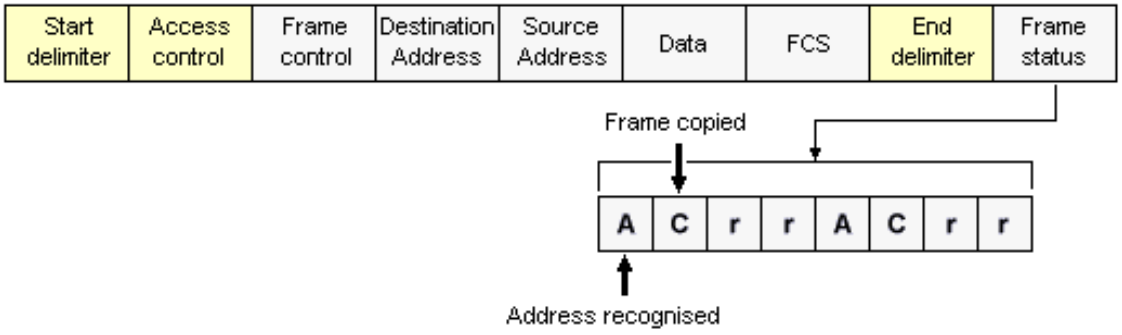
רוב ה-MAUs שייצרה IBM פעלו ללא חיבור לחשמל - היו בהם סדרת ממסרים שהעבירו את המידע לצומת הבא ברשת.

עמידות בפני תקלות

המאפיין המרכזי של Token Ring שמאפשר עמידות בפני תקלות נמצא ב-MAUs. כשיש כשל בצומת כלשהו ברשת (כבל תקשורת פגום, הפסקת פעולת הצומת וכו'), ממסרי המעקף (bypass relays) ב-MAUs מתוכננים להוציא את הצומת שכשל מהטבעת, ולהמשיך את התקשורת בטבעת ישירות בין הצמתים שנמצאו לפני ואחרי הצומת שכשל, והרשת עדיין מחוברת ופעילה.

מבנה ה-Token ודרך העברתו

שיטת העברת Token מבטיחה שלא כל הצמתים ישלחו מידע לרשת באותו זמן - רק מחשבים שמחזיקים ברגע נתון ב-Token יכולים לשלוח חבילות מידע לרשת, וגם אם אין מידע שצריך להעביר ברשת, ה-Token ימשיך "להסתובב" בין הצמתים. Token הוא חבילת מידע של שלושה בתים, ומורכב מהשדות SD, Access Control, ED (בצהוב בתמונה).



- **Start Delimiter** - או SD, מתריע על ההגעה של ה-Token או ה-frame.
- **Access Control** - מכיל את שדה העדיפות (שלושה ביטים שמבטאים את רמת העדיפות של ה-frame), את שדה ה-Token (ביט יחיד, מודיע אם הועבר frame או Token), שדה monitor (ביט יחיד, מונע סיבובים אינסופיים של frames שלא הגיעו ליעדם) ושדה reservation (שלושה ביטים).
- **Frame Control** - שדה של byte יחיד, מודיע אם ה-frame מכיל מידע לצומת אחר או נתוני בקרה (control information). ב-frame שליטה (command frame), שדה זה מפרט את סוג מידע הבקרה שמועבר.
- **Dest. Address, Source Address** - שני שדות של שישה בתים כל אחד, מזהים את כתובות ה-MAC של של צומת המקור וצומת היעד.
- **Data** - המידע המועבר ב-frame. האורך המקסימלי מוגבל על ידי זמן החזקת ה-Token של הטבעת (מאפיין של הרשת שקובע את הזמן המקסימלי שתחנה יכולה להחזיק בו את ה-Token מבלי להעבירו הלאה).
- **End Delimiter** - מתריע על סוף ה-Token או ה-frame, מכיל ביטים שיכולים לשמש לבדיקה האם ה-frame נפגע, ולזיהוי ה-frame האחרון מתוך רצף.
- **Frame Status** - שדה של בית אחד שמסיים את ה-frame, כולל את השדות Frame-copied ו-Address-recognized, שמעידים האם המידע הגיע לתחנת היעד ונקרא. מכיוון ושדה Frame Status לא נכלל בחישוב הערך לבדיקת יתירות מחזורית (CRC), כדי לוודא שהמידע בשדה זה לא נפגע, השדות Frame-copied ו-Address-recognized מופיעים פעמיים ב-Frame Status.

כשלאף תחנה אין מידע להעביר, ה-Token מועבר בין התחנות השונות בטבעת. כאשר לתחנה יש מידע להעביר, היא תסמן את שדה ה-Token ב-Access Control, תוסיף את המידע או את נתוני הבקרה, מה שייצור frame מידע או שליטה, ותשלח את ה-frame לתחנה הבאה. אם התחנה הזו אינה תחנת היעד, היא תעתיק את ה-frame ותשלח אותו מחדש (כך נשמרת עוצמת האות, ומידע לא נאבד) לתחנה שאחריה עד שיגיע לתחנת היעד.

כשיגיע ה-frame לתחנת היעד, היא תקרא את המידע, תסמן את הביטים address-recognized ו- frame copied בשדה Frame Status, ותשדר את ה-frame לתחנה הבאה. כשיגיע בחזרה לתחנת המקור שלו, היא תיצור Token חדש ותעבירו לתחנה הבאה בטבעת (גם אם יש לה מידע נוסף לשלוח). כך, לכל תחנה ברשת יש מספר הזדמנויות שווה לשליחת מידע, ואין התנגשויות.

FDDI - Fiber Distributed Data Interface

FDDI הוא תקן להגדרת תקשורת בשכבה הפיזית, שפותח ע"י מכון התקנים האמריקאי ANSI בועדת התקנים X3T9.5 שהתקיימה באמצע שנות ה-80 של המאה הקודמת. באותה תקופה, מהירויות גבוהות של מחשבים התחילו להופיע ברשתות מקומיות שונות שהיו מבוססות על Ethernet ו-Token Ring, מה שהוביל לצורך בתקן חדש לרשת מקומית שהיה מסוגל לתמוך בקלות במחשבים אלה.

בנוסף, הצורך ברשת אמינה הלך וגבר כשמנהלי מערכות החלו להעביר תוכנות חיוניות ממחשבים חזקים אל הרשת המקומית. FDDI פותח כדי למלא את הצרכים האלו.

התקשורת בין הרכיבים מתבצעת באמצעות סיבים אופטיים, ומהירות ההעברה יכולה להגיע לעד 100Mbps (לשם השוואה, ה-Ethernet בצורתו המקורית תמך במהירות של עד 2.94Mbps, והשתמש בכבל קואקסיאלי לתקשורת).

אבטחת הרשת, אמינותה וביצועיה, כולם משתפרים בעזרת השימוש בסיבים אופטים, מכיוון שסיב אופטי אינו פולט אותות חשמליים - לתווך פיזי שכן פולט אותות חשמליים ניתן לצוטט, מה שמאפשר גישה לא מאושרת למידע שעובר בתווך.

בנוסף, סיבים אופטים חסינים להפרעה של אותות רדיו ואותות אלקטרומגנטים שפוגעים באמינות הרשת. באופן "היסטורי", סיבים אופטים יכולים לתמוך ברוחב פס גדול בהרבה מאשר חוטי נחושת (למעט התקדמויות טכנולוגיות שקרו לאחרונה והצליחו להגדיל את רוחב הפס המקסימלי של חוטי נחושת).

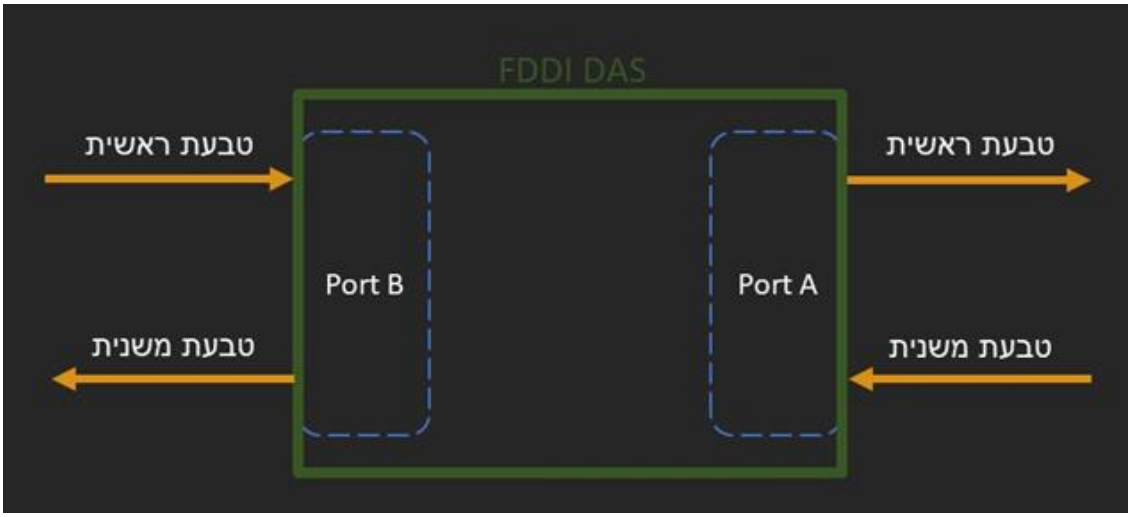
FDDI מבוסס על טופולוגית טבעת, ומשתמש בטבעת כפולה - הטבעת הראשית משמשת להעברת ה-frames, בעוד הטבעת המשנית משמשת כגיבוי, redundancy, במקרה של כשל בטבעת הראשית (למעט בשימוש ב-FDDI Full Duplex Technology או FFDT, בה הטבעת המשנית מעבירה את חבילות המידע במקביל לטבעת הראשית, מה שמגדיל את ביצועי הרשת).

חיבורים פיזיים

כאמור, FDDI משתמש בטבעת כפולה. התעבורה בטבעות מתבצעת בכיוונים נגדיים (הסבר איך זה תורם לאמינות הרשת בהמשך). תחנת FDDI היא צומת ברשת שניתן לפנות אליה (addressable node), המסוגלת לשלוח, להעביר ולקבל מידע. FDDI מגדיר ארבעה סוגים של תחנות:

- **Single-Attachment Station** (SAS)
- **Dual-Attachment Station** (DAS)
- **Single-Attachment Concentrator** (SAC)
- **Dual-Attachment Concentrator** (DAC)

DAS היא תחנה ברשת המחוברת ישירות לשתי הטבעות - הראשית והמשנית - דרך שני חיבורים (port A and port B) שכל אחד מהם מחובר לשתי הטבעות. לכן, כשל (למשל התנתקות או כיבוי) בתחנה המשתמשת בחיבור DAS ישפיע על שתי הטבעות.



[חיבורים חיצוניים של Dual-Attachment Station ב-FDDI]

SAS היא תחנה שמחוברת לרשת רק דרך Concentrator, שיכול לספק חיבורים למספר SASs.

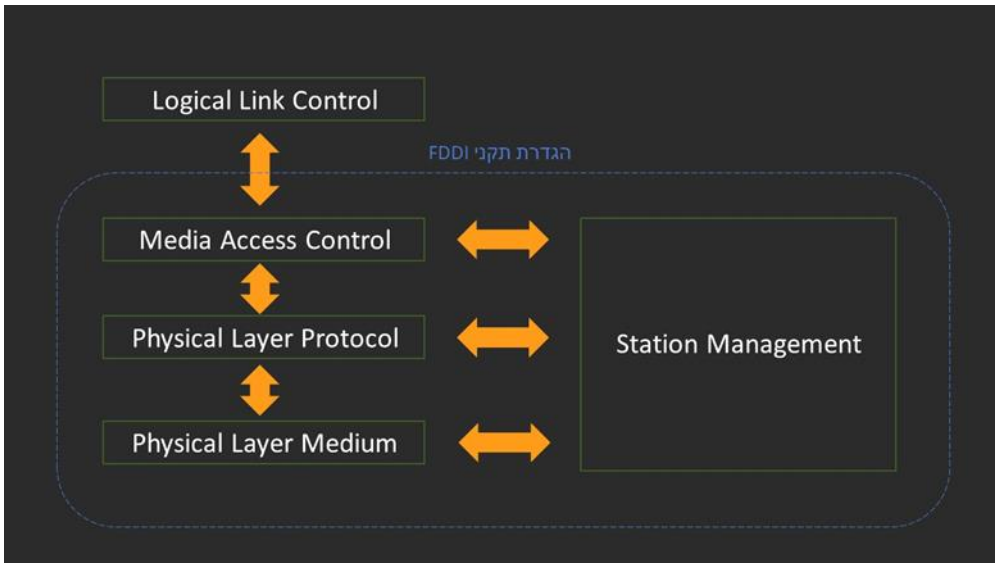
Concentrator יכול להיות Dual-Attachment לשתי הטבעות, או Single-Attachment ל-Concentrator אחר. חיבור SAS ל-concentrator מבטיח שכאשר יש כשל כלשהו ב-SAS (למשל כיבוי של מחשב אישי), או שמכניסים SAS חדש לרשת, לא תהיה השפעה על אף אחת מהטבעות, מכיוון שה-concentrator נשאר מחובר לרשת ומעביר את כל המידע בין הטבעות ל-SASs.

רמות הגדרת תקן FDDI

FDDI מגדיר תקנים בארבע רמות הקשורות זו לזו:

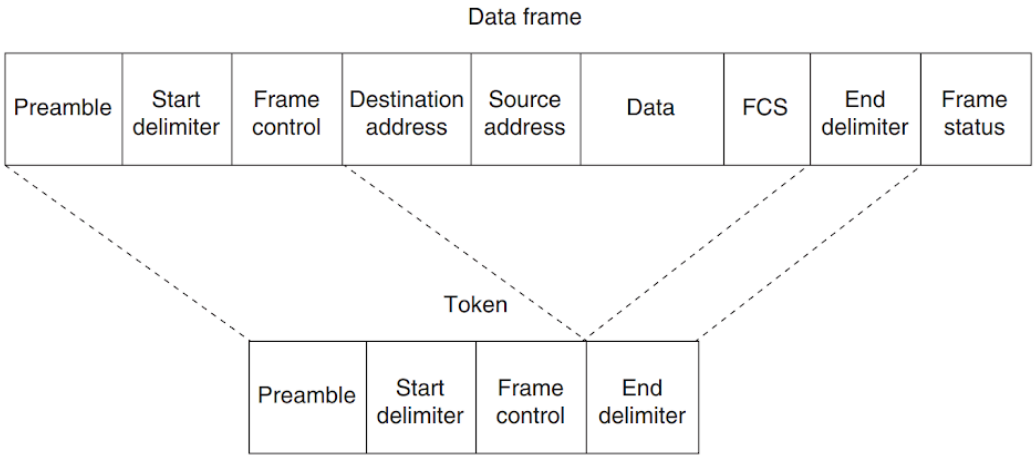
- **Media Access Control** מגדיר את דרך הגישה לתווך הפיזי של העברת המידע (Medium) - כולל פורמט ה-frame, דרך הטיפול ב-Token, האלגוריתם לחישוב ערך לבדיקת יתירות מחזורית (CRC), ודרכי טיפול בשגיאות.
- **Physical Layer Protocol** מגדיר את הליכי ההצפנה והפענוח, דרישות שעון, וכו'.
- **Physical Layer Medium** (נקרא גם **Physical-Medium Dependent**) מגדיר מאפייני תווך השידור - כולל את תכונות הכבל האופטי, כוח השידור, הרכיבים האופטים והמחברים.
- **Station Management** מגדיר את אופן העברת המידע, הטופולוגיה (תפקיד הטבעת הראשית והמשנית) ומאפייני שליטה בטבעות - כולל הכנסת תחנה לרשת, הוצאת תחנה, אתחול הרשת, בידוד וטיפול בתקלות, ואיסוף סטטיסטיקות.

התרשים הבא ממחיש את הקשרים בין ארבע רמות הגדרת התקנים של FDDI ביניהן, ובין ה-LLC בשכבת הקו:



[הקשרים בין רמות הגדרת תקן FDDI]

מבנה frame של FDDI

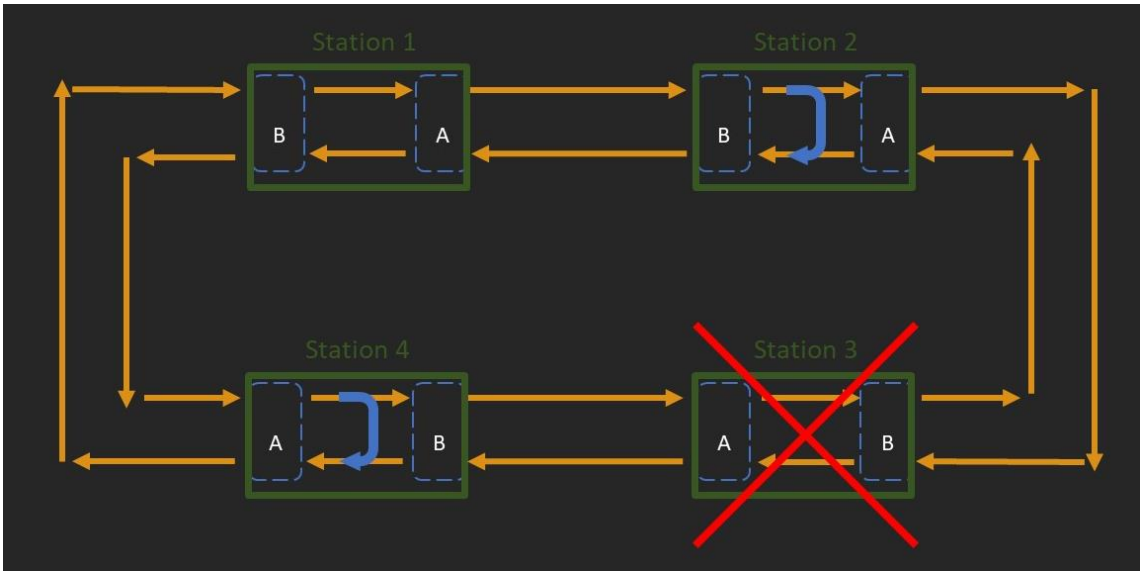


[מקור: https://www.cisco.com/en/US/docs/internetworking/troubleshooting/guide/tr1905.pdf]

- **Preamble** - רצף ייחודי שנועד להכין תחנה לקבלת frame.
- **Start Delimiter** - מתריע על תחילת ה-frame.
- **Frame Control** - גודל השדות בהן מופיעות הכתובות, ועוד מידע בקרה (למשל האם המידע ב-frame הוא סינכרוני או א-סינכרוני).
- **Destination Address** - כתובת היעד של הפריים, יכול להכיל כתובת אחת (Unicast), כמה כתובות ספציפיות (Multicast), או כתובת Broadcast. גודל כל כתובת 6 בתים.
- **Source Address** - כתובת רכיב המקור של הפריים, גודל השדה 6 בתים.
- **Data** - יכול להכיל מידע המיועד לשכבה גבוהה יותר, או מידע בקרה של הרשת המקומית.
- **Frame Check Sequence** - תחנת המקור ממלאת בערך לבדיקת יתירות מחזורית (CRC) שתלוי בתוכן ה-frame (כמו ב-Ethernet), אותו תחנת היעד מחשבת מחדש כדי לבדוק האם המידע ב-frame נפגם בדרך. אם המידע פגום, ה-frame יזרק.
- **End Delimiter** - ערכים המציינים את סיום ה-frame.
- **Frame Status** - מאפשר לתחנת היעד לקבוע אם הייתה בעיה בשליחת ה-frame או אם תחנה בדרך קיבלה ועיבדה את המידע.

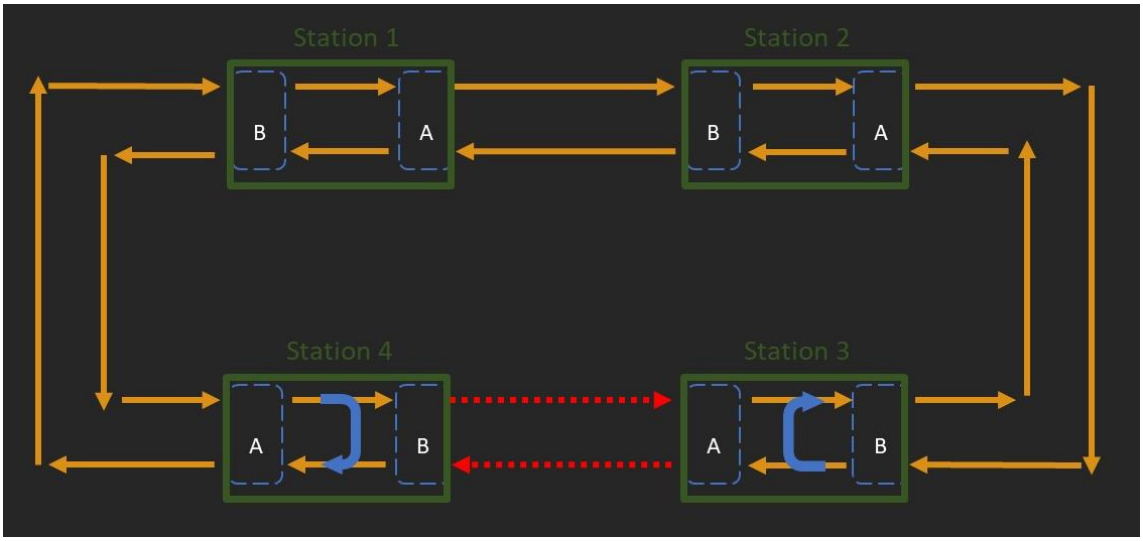
עמידות בפני תקלות

ל-FDDI יש כמה תכונות ההופכות את התקן לעמיד בפני תקלות מגוונות. התכונה החשובה ביותר היא השימוש בטבעת כפולה וב-Ring Wrap. אם יש כשל בתחנה מסוימת על הטבעת הכפולה (למשל נכבית, החיבור הפיזי אליה פגום), הטבעת הכפולה תהפוך באופן אוטומטי לטבעת יחידה (Ring Wrapping), שמנותקת מהתחנה שנכשלה. בתרשים, כשתחנה מספר 3 נכשלת, מתבצע Ring Wrapping בתחנות 2 ו-4 (חץ כחול), מה שיוצר טבעת יחידה, ולמרות שתחנה 3 כבר לא על הטבעת, התקשורת ממשיכה בין שאר התחנות:



[Ring Wrapping כאשר יש כשל בתחנה 3]

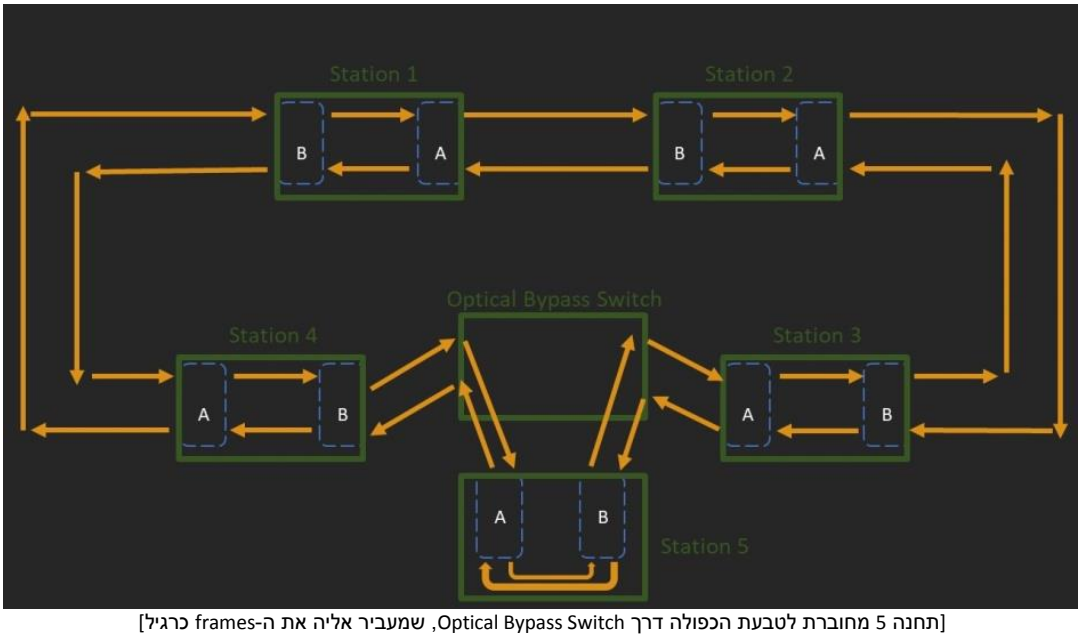
FDDI יכול לפצות גם על כשלים בחיבורים בין התחנות (למשל התנתקות כבל). בתרשים הבא, החיבור בין תחנות 3 ו-4 נכשל, ומתבצע ring wrapping בתחנות אלו על מנת לפצות על הכשל (שוב, נוצרת טבעת יחידה במקום טבעת כפולה):



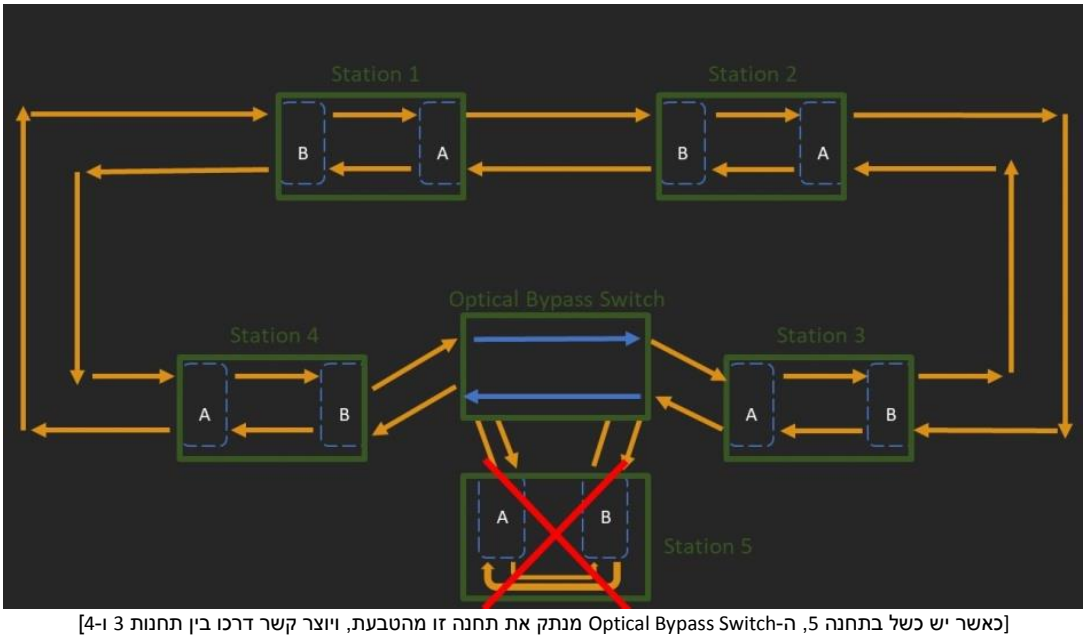
[Ring Wrapping כאשר יש כשל בחיבור בין תחנה 3 ותחנה 4]

נשים לב כי Ring Wrapping יעזור רק כאשר יש כשל יחיד ברשת (בחיבור או בתחנה), וככל שרשת FDDI גדלה, הסיכוי לכשלים מרובים גדל. לכן כשיש שני כשלים או יותר, FDDI יבצע "פיצול" של הטבעת (segmentation) לשתי טבעות או יותר, שיהיו עצמאיות וללא תקשורת ביניהן. כשלים נוספים יגרמו לפיצולים נוספים של הטבעות.

Optical Bypass Switches משמשים למניעה של פיצולים כאלו, ע"י הוצאת תחנות שנכשלו מהטבעת. כל המידע שנשלח לתחנה שמחוברת ל-optical bypass switch מהטבעות עובר דרכו - אם התחנה עובדת באופן תקין, המידע ימשיך מה-switch לתחנה, שתוכל לשלוח תגובה והודעות נוספות. אם יש כשל כלשהו בתחנה, ה-switch יעביר את האותות בסיב האופטי דרך סדרת מראות, כך שימשיכו אל התחנה הבאה "וידלגו" על התחנה שכשלה.



[תחנה 5 מחוברת לטבעת הכפולה דרך Optical Bypass Switch, שמעביר אליה את ה-frames כרגיל]



[כאשר יש כשל בתחנה 5, ה-Optical Bypass Switch מנתק את תחנה זו מהטבעת, ויוצר קשר דרכו בין תחנות 3 ו-4]

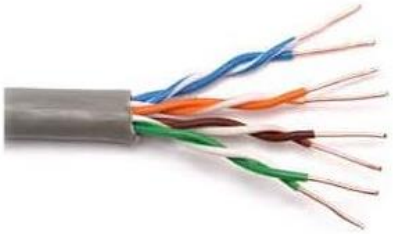
CDDI - Copper Distributed Data Interface

העלות הגבוהה של כבלים אופטים היוותה המכשול העיקרי של תקן FDDI, שמבוסס על העברת המידע דרך כבלים אופטים. לעומת זאת, העלות של כבלי נחושת מסוג Unshielded Twisted Pair (בקיצור UTP) ו-shielded twisted pair (או STP) נמוכה בהרבה ביחס לזו של כבלים אופטים, והם כבר נמצאו בשימוש נרחב. לכן ניתן היה ליישם את FDDI באופן מסוים על גבי כבלי נחושת, ויישום זה נקרא Copper Distributed Data Interface.

התקן הרשמי של ANSI מכיר בדיוק שני סוגים של תווכים עבור CDDI: כבלי UTP ו-STP. הסבר מפורט ניתן למצוא כאן.

הגדרות: זוג שזור הוא כבל חשמלי המורכב מזוג גידים מוליכים (במקרה של CDDI, נחושת), כל אחד מהם מורכב ממוליך פנימי ושכבת בידוד, והם שזורים זה על זה.

- Unshielded twisted pair הוא כבל של ארבעה זוגות שזורים, והוא הסוג הפשוט והנפוץ ביותר; נותן הגנה לקויה מפני הפרעות.



- Shielded twisted pair הוא כבל של ארבעה זוגות שזורים, בו לכל זוג יש סיכוך - שכבת בידוד מתכתית שנועדה להקטין את הרגישות להפרעות.

[כבל UTP ו-STP, מתוך http://www.fiber-optic-components.com/shielded-vs-unshielded-ethernet-cable-use.html]

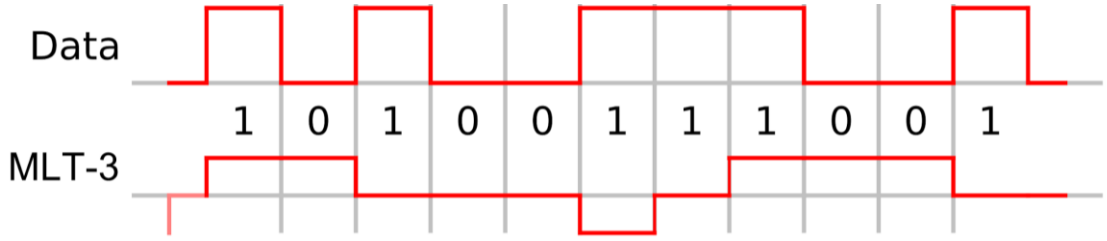
הבעיה העיקרית ביישום של FDDI על גבי כבלי נחושת מסוג UTP או STP היא הקרינה הנפלטת מכבלים אלה בהעברת המידע. נסביר בקצרה על הטכניקות השונות להנמכת הקרינה האלקטרומגנטית הנפלטת מחוטי הנחושת:

- **Scrambling** - כשלא מועבר מידע בתווך, FDDI ישדר דפוס סרק המורכב מתווים בינארים של "1". כשהדפוס הזה נשלח ב twisted-pair wires, ההפרעה האלקטרומגנטית מתרכזת בתדר שבו נשלח דפוס הסרק, מה שגורם לעלייה ברמת המתח בתדר של ההפרעה. כאשר FDDI מערבל את המידע בעזרת רצף פסאודו-רנדומלי לפני השידור, מבוטלים דפוסים חוזרים, וכתוצאה מכך יש עליה במתח המחולקת באופן יותר מאוזן על פני הספקטרום של האות שמשודר.

- **Encoding** - עוצמת האות חזקה יותר וההפרעה האלקטרומגנטית נמוכה יותר כשהשידור מתבצע על גבי twisted-pair wires בתדרים נמוכים. השימוש בסכמת MLT-3 מנמיך את התדר של האות המשודר, כך שהגבוה ביותר מועבר לפחות מ-20Mhz.

  MLT-3 מעביר בין שלוש רמות מתח בסדר הבא: -1, 0, +1, 0. בשביל להעביר "1" בינארי, MLT-3 יעבור לרמת המתח הבאה, ועבור "0" ישאר באותה רמת מתח.

- **Equalization** - הגברת האותות בתדרים הגבוהים בשידור על גבי UTP.



[מקור: https://en.wikipedia.org/wiki/MLT-3_encoding]

בדומה ל-FDDI, תקן CDDI מספק מהירות העברת מידע של 100Mbps ומשתמש בטופולוגית טבעת כפולה. CDDI תומך במרחקים של עד 100 מטרים בין תחנות. שם התקן הרשמי הוא Twisted-Pair Physical Medium-Dependent או TP-PMD, ונקרא גם Twisted-Pair Distributed Data Interface או TP-DDI (עקבי עם השם Fiber Distributed Data Interface).

מסקנות - השוואה עם Ethernet, למה השיטות הוחלפו

היתרון העיקרי של Token Ring היה QoS (או Quality of Service) - רשת Token Ring תישאר יציבה ותפעל תחת כל עומס, בניגוד לרשת Ethernet המשתמשת ב-hubs, שבד"כ יגרמו לתקלות (התנגשויות של מידע) ב-60% עומס, ויקרסו ב-90% עומס. לעומת זאת, כאשר תחנה מחוברת ל-Ethernet Switch, יש רק שני רכיבים שיכולים לגרום להתנגשות - התחנה וה-Switch, וקורות הרבה פחות התנגשויות. בנוסף, ברשתות מקומיות קריטיות (בהן נדרשת אמינות ומהירות גבוהה של הרשת) מתבצע שימוש בטופולוגיית Full Duplex על Ethernet (כל רכיב מחובר לכל הרכיבים האחרים באופן ישיר), ולא קורות התנגשויות של מידע, מכיוון ושני הצדדים יכולים לשדר זה לזה בו-זמנית.

בנוסף, החומרה הנדרשת ברשת Ethernet זולה מאוד, ביחס לסיבים האופטים הנדרשים ברשת FDDI. עבור רשת CDDI המשתמשת בכבלי נחושת הדומים לכבלי Ethernet, מהירות הרשת נמוכה מאוד (עד 100Mbps) ביחס לזו של גרסת ה-Ethernet המהירה ביותר כיום (יותר מ-1Gbps). בתחילת דרכן, Token Ring ו-Ethernet שתיהן השתמשו בכבלים יקרים, אבל כאשר Ethernet תוקננה עבור כבלי Unshielded

Twisted Pair, והומצאו Ethernet Switches, עלות ההקמה של רשת Ethernet ירדה בהרבה. גם העלות של כרטיסי רשת ושאר הרכיבים לרשת Token Ring היו יקרים.

באמצע שנות ה-90, המהירות המקסימלית של Ethernet הייתה 10Mbps ו-Token RIng הציעה 4 או 16Mbps. לכן באותה תקופה, FDDI נחשבה לפתרון טוב עבור רשתות Backbone (רשת מחשבים המחברת בין מספר LANs או Subnets, מהווה נתיב להעברת מידע ביניהן), מכיוון שהציעה מהירות גבוהה - עבור אותה תקופה - של 100Mbps, והעלויות של רשת FDDI היו דומות לאלו של Ethernet. בהמשך נוצרו אלטרנטיבות טובות יותר - Fast Ethernet שהציע 100Mbps ותמך בכבלי נחושת ובסיבים אופטים, ואחריו Gigabit Ethernet עם מהירות של 1Gbps ועלות יותר נמוכה מזו של Token Ring ושל FDDI. שיקולים כספיים אלו נתנו ל-Ethernet יתרון מוחלט על פני Token Ring, והמכירות של רכיבי Ethernet עלו, בעוד השימוש ב-Token Ring וב-FDDI הפך לאפסי.

קצת על עצמנו

- **אירי מור** - בן 14, גר בגבעתיים, לומד בתיכון אהל שם ברמת גן ובתכנית אודיסיאה, מרכז מדעני העתיד, באוניברסיטת תל אביב לנוער במסלול סייבר שנה א'.
- **עידו פרידמן** - גר ולומד ברחובות, בשנה א' בתכנית אודיסיאה באוניברסיטת תל אביב, מסלול סייבר.

המאמר נכתב כחלק מהלימודים בקורס רשתות בתכנית אודיסיאה, מרכז מדעני העתיד, באוניברסיטת תל אביב לנוער במסלול סייבר שנה א', בהנחיית שלומי בוטנרו. בחרנו בנושא זה מכיוון שעניין אותנו מדוע Ethernet הוא כמעט הפרוטוקול היחיד בשימוש ברשתות מקומיות כיום ומה הן האלטרנטיבות הקיימות כיום ובעבר.

ביבליוגרפיה

- Fiber Distributed Data Interface (FDDI) Volume 34 of Fiber Optics Reprint Series, ISBN 1568510837, 9781568510835
- https://www.cisco.com/en/US/docs/internetworking/troubleshooting/guide/tr1905.pdf
- https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/fiber-distributed-data-interface
- https://phdessay.com/fddi-and-cddi/
- https://www.ionos.com/digitalguide/server/know-how/token-ring
- http://www.technologyuk.net/telecommunications/networks/fibre-distributed-data-interface.shtml