



תורת התקשורת והמידע: המעבר מאיך לעשות למה לעשות

ראיון מיוחד למגזין טכנולוגיות עם פרופ' שלמה שמאי מהפקולטה להנדסת חשמל בטכניון לרגל זכייתו בפרס שנון לשנת 2011

< עליזה ברקן

ושירת בצבא ביחידת מו"פ, שם התמקד בתחומי העיסוק הנוכחיים שלו – נושאים שונים בתורת המידע, ביניהם



פרופ' שלמה שמאי

קידוד ערוצים, מגבלות תיאורטיות בתקשורת תחת אילוצים פרקטיים, מערכות תקשורת רבות משתמשים <

תאריו בפקולטה להנדסת חשמל בטכניון ובשנת 1986 הצטרף לפקולטה כאיש סגל, הצטרף ל"משפחה" ותיקה ומכובדת של חברי סגל העוסקים בתורת המידע. בעבר זכו בפרס המכובד גם הפרופ' מחקר אמריטוס יעקב זיו, חתן פרס שנון לשנת 1997 ופרופ' מחקר אורח אנדרו ויטרבי שזכה בפרס בשנת 1991.

לדברי פרופ' שמאי, אלה אנשים משכמם ומעלה שסללו את הדרך למחקר המתקדם. גם כיום מתקיימת בפקולטה פעילות רחבה ומעמיקה בתחום הזה. גם בדור הצעיר יותר, בנוסף לפרופ' שמאי, יש חוקרים הנמנים עם השורה הראשונה של החוקרים בעולם. שמאי למד לתואר הראשון במסגרת העתודה האקדמית,

ישראל זוכה לתהילה בעולם המדע הודות ליצירתיות והחדשנות של חוקריה באקדמיה.

פרסי נובל ופרסים יוקרתיים אחרים מיקדו את התעניינות במחקר האקדמי בישראל בכלל ובטכניון בפרט. והפעם פרופ' שלמה שמאי זוכה בפרס שנון לשנת 2011.

את פרס שנון מעניק ארגון IEEE Information Theory Society והוא הפרס החשוב ביותר בתחום העוסק באינפורמציה במובנה הרחב. הפרס מוענק על "תרומה עקבית ומשמעותית לתחום של תורת המידע" כאשר הזוכה הראשון בפרס היה קלוד שנון, אבי תורת המידע, עצמו, בשנת 1973.

פרופ' שמאי, שעשה את שלושת

◀ ומודלים תיאורטיים של מערכות סלולאריות אלחוטיות ונושאים נוספים.

טכנולוגיות שימושיות שהתחילו בתיאוריות מתמטיות

מסקרן לדעת מה קדם למה, התיאוריה או היישום. לדברי פרופ' שמאי, קיימות דוגמאות קונקרטיות רבות של טכנולוגיות תקשורת שקיימות היום או שיישמו בקרוב, המבוססות על תיאוריות מתמטיות.

חלק מהדוגמאות הקלאסיות מתייחסות ל-CDMA (Code-Division

המודלים המתמטיים חייבים להיות פשוטים ומוגדרים באופן מושכל, כדי לאפשר ניתוח תיאורטי שלהם ועדיין ללכוד את התכונות של מערכות בעולם האמיתי



(Multiple-Access), טכנולוגיה שהיא הבסיס למערכות הסלולאריות מהדור השני של Qualcomm. ואכן, פרופ' ויטרבי ופרופ' ג'יקובס, מובילים בתחום התקשורת ותורת המידע, היו המייסדים המשותפים של Qualcomm.

דוגמאות מהעת האחרונה לטכנולוגיות שפותחו על בסיס תוצאות תיאורטיות ונושאים שפרופ' שמאי ועמיתיו עבדו עליהם:

טכנולוגיית OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) אשר פותחה על בסיס עקרונות בתורת המידע, משמשת כיום בצורה נרחבת בתקשורת סלולארית (LTE ו-WiMAX) וב-WiFi. תקשורת ופרוטוקולי אינטרנט- אלה מושפעים מרעיונות תיאורטיים עדכניים שלהם רלבנטיות ישירה כמו קידוד רשת (Networking Coding) כחלופה לניתוב (Routing). קודים מסוג Fountain וכן קודים מסוג Raptor המתקדם יותר, המשמשים על-גבי האינטרנט, הם פרדיגמות תיאורטיות חדשות אשר אומצו בפרקטיקה כמעט מיד עם הופעתן.

התפיסה התיאורטית הבסיסית בתורת המידע, של "Broadcast Approach", שמאוחר יותר אופיינה כ- variable to fixed channel coding, היא מרכזית בטכנולוגיות חדשות שפותחו לצורך הפצה אלחוטית של וידאו ליישומי בידור ביתי. המערכות היעילות בתחום

זה מיישמות רעיונות של successive multi layer refinement – 1. טכנולוגיה זו נקראת: Wireless HDMI.

גישת השידור משמשת גם בשידור רדיו דיגיטלי (DRB). התקן מציע כיסוי באיכות משתנה – ככל שמתקרבים יותר לבסיס, כך האיכות גבוהה יותר.

תקן מתפתח בתחום של נהיגה בטוחה ברכב, באמצעות תקשורת אלחוטית מרכב לרכב (V2V). התקן מבוסס על Wi-Fi במצב ad-hoc, שזוהה תיאורטית כגישה יעילה.

היבטים של רדיו קווגיטיבי מודרני (שמטופלים לדוגמה במסגרת CORNET, קונסורציום מטעם משרד המסחר והתעשייה אשר משלב גופים אקדמיים ותעשייתיים), מקורם בהתפתחותן של תפיסות של תורת המידע בתחום זה.

תקשורת קווית מודרנית, כמו שיטות ADSL/VDSL אשר מתקרבות לגבולות התיאורטיים המוחלטים של תקשורת בתוך כבל מסוג twisted-pair.

דחיסת נתונים, שהיא מרכיב מרכזי בתקשורת יעילה. האלגוריתמים הפרקטיים שניתן למצוא בכל מחשב מבוססים על התפתחויות תיאורטיות קלאסיות, כמו אלגוריתם למפל-זיו (פרופ' למפל מהפקולטה למחשבים ופרופ' זיו מהפקולטה להנדסת חשמל בטכניון), קידוד אריתמטי ועוד.

טכנולוגיות חדשניות של אחסון וזיכרון, בין אם מבוזרות ובין אם לא, מבוססות על

המדהימה מאפשרת לממש כמעט כל אלגוריתם, כך שהמלאכה עברה מ- "כיצד לממש" ל- "מהי השיטה והאלגוריתמים הטובים ביותר לממש".

לא פחות חשובה היא היכולת של תורת המידע לספק גבולות מוחלטים לביצועים הטובים ביותר האפשריים. אפילו אם השיטה האופטימאלית אינה ניתנת למימוש או אינה ידועה, הגבולות והחסמים התיאורטיים מגדירים מדד השוואתי שבעזרתו ניתן להשוות בין טכנולוגיות מתקדמות. קוד Turbo LDPC וקוד LDPC, אשר מתקרבים מאוד לגבולות הסופיים של תקשורת מנקודה- לנקודה על ערוץ גאוסיאני (ואחרים), הם הדוגמאות הטובות ביותר לכך.

לשאלתי בדבר טכנולוגיות תקשורת שנוצרו בשטח ושלא "נולדו" מתיאוריות מתמטיות של תקשורת, השיב פרופ' שמאי שאכן בעבר הרחוק יותר מרבית הטכנולוגיות היו שייכות לקטגוריה זו. לדוגמה רדיו AM ו-FM אשר קודם הומצא ורק אחרי כן נחקר בצורה מתמטית. המערכת הסלולארית האנלוגית הראשונה יכולה גם היא לשמש דוגמה לטכנולוגיה שקודם הומצאה ורק אח"כ נחקרה.

מערכות תקשורת בטבע

ניסיתי להקשות ולאתגר את החשיבה המחקרית בשאלה גבולית למדע הטהור. הרי בטבע קיימים סוגי תקשורת שונים בטווחים שונים, שיטות שונות שמקיימות

על הפרס

להגדרת היכולות והמגבלות בהעברה (שידור וקליטה) של מידע באופן אמין. מדובר במאמר גאוני, שיצר את תורת המידע. אומר פרופ' שמאי: "שנון הכניס מחשבה חדשה לתחום הזה ובכך ייסד אותו כתחום תיאורטי בוגר, שהתפתח מאז למגוון רחב של נושאים רלוונטיים לטכנולוגיות התקשורת כמו למשל, תקשורת טלפון ואלחוט, תקשורת אופטית ולוויינית וכמובן תקשורת סלולארית ואינטרנט."

תקשורת בטבע כמו בעולם הצומח ובחי. האם תיאוריות מתמטיות של תקשורת, אומתו מול אותן תופעות תקשורת שקיימת בטבע?

לדברי פרופ' שמאי חשוב להדגיש שתפיסות בתורת המידע קיימות לגבי כל מודל תקשורת המוגדר באופן

תפיסות תיאורטיות מתקדמות. זה כולל שבבי זיכרון מודרניים, כמו זיכרון פלאש. הסיבה שהתיאוריה, ובמיוחד תורת התקשורת והמידע, הופכת כיום לכל-כך מרכזית במערכות מעשיות, היא המעבר מהפרדיגמה הבסיסית, מ-"איך לעשות" ל-"מה לעשות". ההתקדמות הטכנולוגית

מתמטי על בסיס הסתברות (ומובן שהמסקנות תלויות במודל הזה). הדוגמה הקלאסית היא תקשורת אופטית פוטונית, המבוססת על חוק פואסון, ולא על ערוצים גאוסיאנים הקלאסיים יותר. תורת המידע, כפי שנוסחה על-ידי שנון לפני יותר מ-60 שנה (ב-1948), משתמשת במודלים סטטיסטיים כדי לאפיין (בין היתר) ערוץ תקשורת, ולשם כך התיאוריה מגדירה ביצועים אופטימאליים במונחים של קצב נתונים מקסימאלי אשר ניתן לספק באמינות גבוהה דרך ערוץ זה. לדברי פרופ' שמאי, יש להיזהר משימוש לא מתאים בעקרונות המתמטיים של תורת המידע ושנון עצמו ציין זאת במפורש בשנות החמישים של המאה הקודמת.

מן הסתם, המודלים המתמטיים חייבים להיות פשוטים ומוגדרים באופן מושכל, כדי לאפשר ניתוח תיאורטי שלהם, ועדיין ללכוד את התכונות של מערכות בעולם האמיתי.

מיחשוב ענן ותיאוריות תקשורת

שאלה מעניינת סובבת סביב ההשלכות של מיחשוב הענן (Cloud Computing) על מידע ותקשורת והאפשרות לנהלן באופן דיסקרטי (מוצפן). פרופ' שמאי אומר, שההתפתחות של יכולות המיחשוב בכל היבט שהוא, בין אם זה בתוך שבבים ובין אם ברשתות מבוזרות,

אולטימטיביים. לדוגמה, מיחשוב ענן הופך לרלבנטית את כל התיאוריה הבסיסית והמתקדמת לגבי מערכות תקשורת/עיבוד מבוזרות, וכן היבטים מודרניים של קידוד רשת.

אילוצי תקשורת

כמו בכל תחום גם לתקשורת יש מגבלות ואילוצים שאלתי את פרופ' שמאי האם האילוצים הפרקטיים של מגבלות התקשורת התיאורטית נובעים מהחומר, ממשאבים פיננסיים, מאנרגיה



הסיבה שהתיאוריה, ובמיוחד תורת התקשורת והמידע, הופכת לכל-כך מרכזית במערכות מעשיות, היא המעבר מהפרדיגמה הבסיסית, מ-"אין לעשות" ל-"מה לעשות"

או מגורמים אחרים?

תשובתו בהקשר זה הייתה שכל מערכת מאופיינת על-פי האילוצים שלה, כמו הספק (שיא וממוצע), עוצמת קרינה, תכונות ספקטראליות ותפוסה ספקטראלית, צריכת אנרגיה, וכד'. ההיבט החשוב הוא שאילוצים אשר מאפיינים מערכות, בין אם אילוצים טבעיים (כמו ניחות ופיזור בהתפשטות

מרכזי בפיתוח מערכות תקשורת מתקדמות, אבל גם שיקולים כלכליים ושיקולי תקינה משחקים תפקיד חשוב במשחק וזה מודגם בהתפתחות הדורות השונים של הרשתות הסלולאריות.

הישגים והתקדמות ברשתות סלולאריות

היבטים מסחריים הם בהחלט מרכזיים לכל מערכת המשמשת בתפוצה רחבה. הרעיון הוא שתיאוריה מתקדמת יכולה לעזור אפילו בתחום זה, אומר פרופ' שמאי. לדוגמה, מערכות יעילות יותר עשויות לחייב שימוש בפחות אנרגיה, או פריסה פחות יקרה. יתרה מזאת, כפי שכבר נאמר, אילוצים שנובעים ממגוון שיקולים (לרבות כלכליים) יכולים וצריכים להיות מומרים לחפיסות מתמטיות. זה עשוי להוביל להתפתחותן של המערכות הטובות ביותר האפשריות בכפוף לרשימת האילוצים המוכתבת מראש.

דוגמה טובה רלבנטית במיוחד הינה מערכות MIMO (Multi-Input-Multi-Output), אשר התפתחו הודות לתורת המידע. רעיונות אלה, כאשר הם ממומשים כ-Massive MIMO, עשויים לשנות את הטכנולוגיה הסלולארית במונחים של איכות שירות (בכל ההיבטים, גם זמינות וגם קצבי תקשורת), וכן מבחינת מזעור עוצמת הקרינה מהתקנים ניידים/נישאים ביד (תקשורת "ירוקה"). הפרדיגמה המעשית מתייחסת לבעיות תיאורטיות חדשות בתורת המידע הרלוונטית לדוגמה, מערכות MIMO, תקשורת שיתופית ועיבוד מבוזר.

"כדי להדגיש את התפקיד של המחקר התיאורטי המתקדם ביותר בתחום זה, נזכיר שתפיסות מתקדמות של "interference alignment" אשר רק בשנים האחרונות נכנסו למחקר התיאורטי, כבר נבדקות לטובת תקנים עתידיים של תקשורת סלולארית ורשתות תקשורת אלחוטית אחרות, אומר פרופ' שמאי. דוגמה נוספת היא היישומים של התוצאות המתמטיות המתקדמות ביותר בתורת המטריצות האקראיות (נושא מתמטי טהור) כדי להעריך ביצועים במערכות אלחוטיות המאופיינות ע"י מודלי זמן/תדר משתנים.

סיכום

תורת המידע, שיסודותיה נעוצים בעבודתו המונומנטאלית של שנון, היא כיום כלי בסיסי תיאורטי ומעשי



אות), ובין אם בכפוף לצרכים מעשיים (כמו אנרגיה, אשר מכתיבה את חיי הסוללה), יכולים בעקרון להיות משוקללים בתוך מודלים של תקשורת המטופלים בעזרת כלים של תורת המידע. כמוכן, למחקר ולפיתוח יש תפקיד

הופכת את הגישה התיאורטית ליותר רלבנטית למערכות פרקטיות. כפי שנאמר לעיל, מיחשוב מתקדם מספק את הפלטפורמה המעשית למימוש אלגוריתמים, אשר הוכחו תיאורטית כמינימים ביצועים אופטימאליים כמעט

כאמור, תיאוריה מתקדמת תשפיע על עצם המושג של תקשורת מודרנית, בדגש על תקשורת אלחוטית, ועל הדרך שבה היא נתפסת.

להלן ההשפעות הבסיסיות:

- שילוב של רשתות ומערכות תקשורת (cross layer design).
- גישות לרשת (קוגניציה, שיתוף פעולה) וקידוד רשת.
- MIMO (Massive MIMO).
- קידוד (LDPC) במובן הרחב.
- עיבוד איטרטיבי משולב, עקרון טורבו: דטקציה מרובת משתמשים, אומדן, דה-מודולציה, פענוח, סנכרון.
- אלגוריתמים אוניברסאליים.
- לכאורה, אלה תחומים בשלים, אבל ההבנה התיאורטית והתוצאות המתאימות שיובילו לקונספטים מהפכניים נמצאים עדיין בחיתוליהם ודרושה עבודת מחקר רבה לשנים הבאות.
- לפרופ' שמאי ולחבריו החוקרים בטכניון ובשאר מוסדות המחקר בישראל אנו מאחלים הצלחה והכרה בינלאומית. ולממשלת ישראל - תזכורת להשקיע בחינוך כי זה מקור עוצמתה של ישראל.

לגבולות התיאורטיים האולטימטיביים של הביצועים המתאימים, של מודלים כלליים של תקשורת, שכן הרעיונות התיאורטיים והתוצאות האנליטיות משפיעים, ואף מחוללים מהפכה, גם בעצם הדרך שבה תקשורת (עם דגש על תקשורת אלחוטית) נתפסת. זאת ועוד, התיאוריה הבסיסית משפיעה לא רק על פיתוחם והבשלתם של גישות ואלגוריתמים שונים, אלא גם על המימוש שלהם, כפי שראינו לאחרונה באמצעות היבטים ויישומים שונים של דגימה/חישה דחוסה (sampling / compressed sensing).

היבטים מודרניים נוספים בתורת המידע אשר הינם רלבנטיים לטכנולוגיות תקשורת מעשיות נוגעים לנושאים מתמטיים נרחבים, וכן לפיזיקה. לדוגמה, כלים סטטיסטיים בפיזיקה הינם שימושיים בניתוח של מערכות קידוד מתקדמות, אלגוריתמי במערכות מרובות משתמשים וכן במסגרות תיאורטיות של MIMO. כולם מהווים מרכיב מרכזי ברשתות התקשורת החדשניות ביותר ובאלה העתידיות.

כאחד! בעבר הלא כל-כך רחוק, הבעיה המרכזית הייתה "כיצד לעשות" (לממש), בעוד השאלה "מה לעשות" הייתה די ברורה. כיום, אומר פרופ' שמאי ההיפך הוא הנכון.

תורת האינפורמציה היא כלי בסיסי בעל היבטים פרקטיים רלוונטיים ומעודכנים. היא נותנת מענה ישיר לבעיה של "מה לעשות", ויותר מזה, "מהו הדבר הנכון ביותר לעשות".

פרופ' שמאי מדגיש שכדי לפתח ולהשיק טכנולוגיות חדשות כיום נדרשות המיומנויות התיאורטיות הגבוהות ביותר, הן במחקר והן בתעשייה. אותם מגזרים בתעשייה אשר ממלאים תפקידים בתחום זה דורשים השכלה ברמת PhD/DSc במדעי תורת המידע כתנאי מינימום וזו דרישה מקבילה למה שהיה BSc בהנדסה ובמדעים נלווים בעבר הלא רחוק.

לדבריו, למסגרות תיאורטיות טהורות יש חשיבות פרקטית ישירה. בעיות פרקטיות בשטח משוועות לתוצאות בתורת המידע הבסיסית (אשר לעתים עדיין אינן ידועות ודורשות מחקר נוסף). יש לכך השפעה מעבר

אנרטק מערכות בע"מ

פיתוח ספקי כוח ומערכות הספק מבצעיות

לאנרטק יש ניסיון רב בפיתוח מערכות אלקטרוניות ייחודיות עבור השוק הצבאי.

אנרטק מתמחה בפיתוח מערכות הספק ובנוסף פיתוח וייצור ספקי כוח מכל הסוגים, המותקנים בכל סוגי מערכות הנשק.

לאנרטק יש ניסיון של כ-25 שנים בתחום פיתוח מערכות הספק.

אנרטק מפתחת ומייצרת:

- ספקי כוח AC/DC
- ספקי כוח DC/DC
- ספקי כוח להספקים גבוהים עד 10KW
- ספקים לעבודה בתנאי סביבה קשים במיוחד
- מערכות הזנה, מיתוג ובקרה מבצעיות
- דוחפים למערכות לייזר ומנועים שונים
- הספקים עומדים ב- MIL STD 704, MIL STD 810, MIL STD 461
- הספקים שאנרטק מפתחת מורכבים על: מטוסי קרב, טילים, פודים, ספינות קרב, טנקים וקרונוט ניידים (באוויר בים וביבשה)

לפרטים נוספים: אנרטק מערכות בע"מ

צביקה אבני - מנכ"ל | טל: 04-9585680 | שלוחה 103
נייד: 052-2663155 | E-mail: zvi@enertec.co.il | www.enertec.co.il

