

שחזור מידע אבוד בעולם דיגיטלי

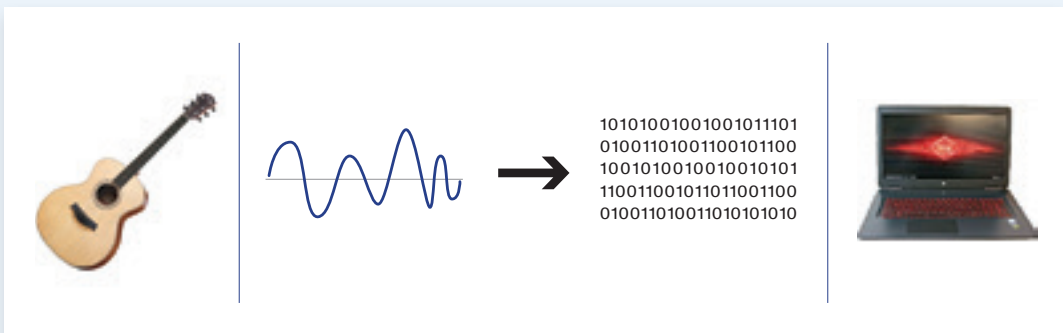


מאת פרופ' יונינה אלדר

ביטים. בצורה זו עיבוד האות מתורגם לאלגוריתמים מתמטיים המופעלים על הביטים. לדוגמה, אם נרצה להגביר את האות או לנקות ממנו רעשים מסוימים, אפשר לעשות זאת בקלות יחסית, באמצעות עיבוד מתאים של הביטים. אחד מיתרונות העיבוד הדיגיטלי הוא היכולת לבצע פעולות מתקדמות על האות באמצעות תכנון אלגוריתמים מתמטיים מתאימים. יישום השיטות השונות מצריך רק מחשב ותוכנה, בלא בניית מעגלים חשמליים מורכבים וייעודיים לכל עיבוד. נוסף על זה, קל מאוד לאחסן מידע ספרתי לעומת אחסון מידע אנלוגי למשל באמצעות קלטות מגנטיות כפי שהיה נהוג בעבר.

אנו חיים היום בעולם דיגיטלי (ספרתי), כלומר עולם שבו עיבוד מידע ואחסונו נעשים באמצעות מחשבים ומיקרו־מעבדים. המהפכה הדיגיטלית משפיעה על כל תחומי החיים, כגון תקשורת, בידור, עסקים, יישומים ביטחוניים ומכשור רפואי. מכשירים דיגיטליים מתוכנתים לעבד במהירות וביעילות רצפים של ביטים, כלומר סדרות של אפסים ואחדים.

בעיבוד דיגיטלי לוקחים אות פיזיקלי אמיתי שאותו רוצים לעבד, למשל צליל שיוצא מגיטרה או אות דיבור, כמתואר באיור 1, ומייצגים אותו באמצעות רצף של



איור 1. עיבוד דיגיטלי מצריך מעבר מהעולם הפיזיקלי לרצף של אפסים ואחדים המעובדים במחשב.

המעבר מאות אנלוגי לדיגיטלי מתואר סכמטית באיור 2. מעבר זה נעשה בפועל בשני שלבים ונקבע לפי שני פרמטרים: קצב הדגימה וקצב הביטים. בשלב הראשון האות הרציף נדגם בזמנים מסוימים, וערך האות בזמנים אלה נשמר; ערכים אלה נקראים "דגימות" של האות. המרווחים בין זמני הדגימה קובעים את קצב הדגימה – ככל שהקצב מהיר יותר, המרווחים קטנים יותר. קיימות תאוריות מתמטיות שונות הנקראות משפטי דגימה, אשר מגדירות תנאים על האות המקורי באופן שניתן לשחזר את האות במדויק מתוך הדגימות שלו. השחזור מתאפשר בגלל הנחות מסוימות על האות, למשל שהוא חסום-סרט או משתנה לאט מספיק בין הדגימות. משפטים אלה פותחו לראשונה בידי המתמטיקאים ויטאקר (1915) וקוטלניקוב (1933). יישומים הנדסיים של ייצוג דיגיטלי למערכות תקשורת נחקרו בידי נייקוויסט (1928) ושנון (1948).

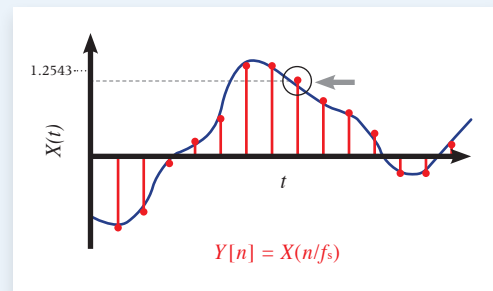
לאחר שלב הדגימה האות הספרתי או הדגימות מיוצגים על ידי מספר סופי של ביטים או רמות בדידות, פעולה שנקראת "קוונטיזציה". ככל שקצב הביטים מהיר יותר, הייצוג יהיה מדויק יותר. מספר הרמות נקבע לפי מספר הביטים העומדים לרשותנו. פיזור אופטימלי של הביטים ובחירה אופטימלית של הרמות נחקרו בתאוריה של source coding שפיתח שנון ב־1948.

קצב נייקוויסט

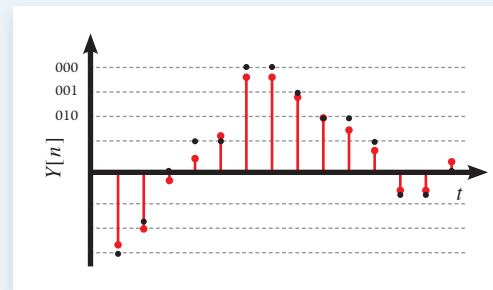
המעבר מאות פיזיקלי לרצף של ביטים גורם לאיבוד מידע בזמן (שלב הדגימה) ובאמפליטודה (שלב הקוונטיזציה). אכן, בין שתי נקודות בזמן האות יכול לקבל כל ערך, וכל הדגימות שערך נמצא בין שתי רמות ייצוג מופות לאותם ביטים. שאלה חשובה היא אפוא זו: האם ניתן לשחזר את המידע הזה שלכאורה הלך לאיבוד? התשובה תלויה בידע המוקדם הקיים לנו על האות.

"Analog Girl in a Digital World" – Judy Gorman '99

השיר של הזמרת גורמן מבטא היטב את תהליך הדגימה – בסופו של דבר אף שהעיבוד נעשה יותר ויותר באמצעים דיגיטליים, העולם הוא אנלוגי, כלומר אותות פיזיקליים כמו אותות דיבור הם רציפים בזמן. כיצד מיוצגים קולות בשיחת טלפון, או אותות אולטראסאונד, שהם אותות פיזיקליים, באמצעות סדרות של מספרים? על מנת לאפשר עיבוד מידע כמו דיבור, מוזיקה או אותות רפואיים באמצעים דיגיטליים, אנו נעזרים ברכיב שנקרא דוגם. הדוגם ממיר אות פיזיקלי לייצוג במחשב. הוא דוגם את האות בנקודות זמן מסוימות ולאחר מכן מציג את ערך האות ברגע מסוים באמצעות רצף של ביטים. הדוגם משמש ממשק בין העולם הדיגיטלי לעולם הפיזיקלי, והוא נמצא בכל מכשיר דיגיטלי. תחום עיבוד האותות הספרתי עוסק בתהליך המרה זה ובשיטות לעיבוד, לניתוח ולהצגה של המידע.



איור 2. דגימה של אות פיזיקלי בזמן



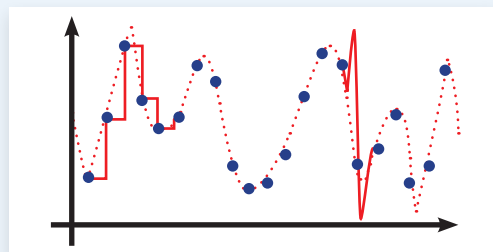
איור 3. ייצוג הדגימות באמצעות מספר סופי של רציפים (ביטים)

(צריכת סוללה גדולה), זמן רב לביצוע הדגימה, עלות גבוהה ונפח אחסון גדול כדי להכיל את כל הדגימות שנאספות. בפרט, יישומים רבים משתמשים היום באותות בעלי רוחב סרט גדול מאוד על מנת להעביר קצב מהיר של מידע ועל מנת לקבל רזולוציה טובה יותר באפליקציות שונות כגון רדאר ומערכות דימות רפואי. ממשפט נייקוויסט רוחב סרט גדול גורר קצבי דגימה מהירים, שקשה לממשם בפועל מבחינת חומרה. נוסף על זה, קצב דגימה מהיר מוביל לכמות גדולה של מידע דיגיטלי – מה שמכונה נתוני עתק (big data) – שגם אותו קשה לעבד, לאחסן ולשדר. בהקשר של דימות רפואי, קצב דגימה מהיר מתורגם לזמן סריקה ארוך, למשל בסריקת MRI, ולמינון קרינה גדול, לדוגמה בדימות CT. לכן שאלה חשובה היא אם באמת צריך לדגום בקצב נייקוויסט או שניתן לשחזר מידע גם בדגימה בקצב איטי יותר. במילים אחרות, האם ניתן "לשבור" את קצב נייקוויסט?

בעיה אחרת, בסיסית מאוד במדע, שדומה מאוד מתמטית לבעיית הדגימה, היא הבעיה של סופר-רזולוציה או כושר הפרדה. כל מכשיר מדידה פיזיקלי הוא מוגבל-רוחב-סרט או רזולוציה, כלומר אי אפשר לראות בדיוק זמני, מרחבי או תדרי טוב כרצוננו. לדוגמה, משפט אבה מ-1873 אומר שהרזולוציה הטובה ביותר שניתן לקבל במיקרוסקופ אופטי יחסית לחצי אורך הגל המשמש להארה. לכן, כפי שמתואר באיור 4, בתחום האופטי אי אפשר לראות במיקרוסקופ רגיל חלבונים ומולקולות קטנות ברזולוציה טובה.

דוגמה נוספת היא רזולוציה מרחבית בשימוש במערך אנטנות – למשל במערכות רדאר, תקשורת ואולטרסאונד. הרזולוציה שניתן לקבל יחסית לחצי רוחב המפתח. לכן מידע על פרטים קטנים מגודל זה הולך לאיבוד בגלל עקרונות פיזיקליים. השאלה שעולה היא זו: האם ניתן להשתמש ברעיונות דומים לשחזר מידע מדגימות על מנת לשחזר מידע אבוד בגלל עקרונות פיזיקליים?

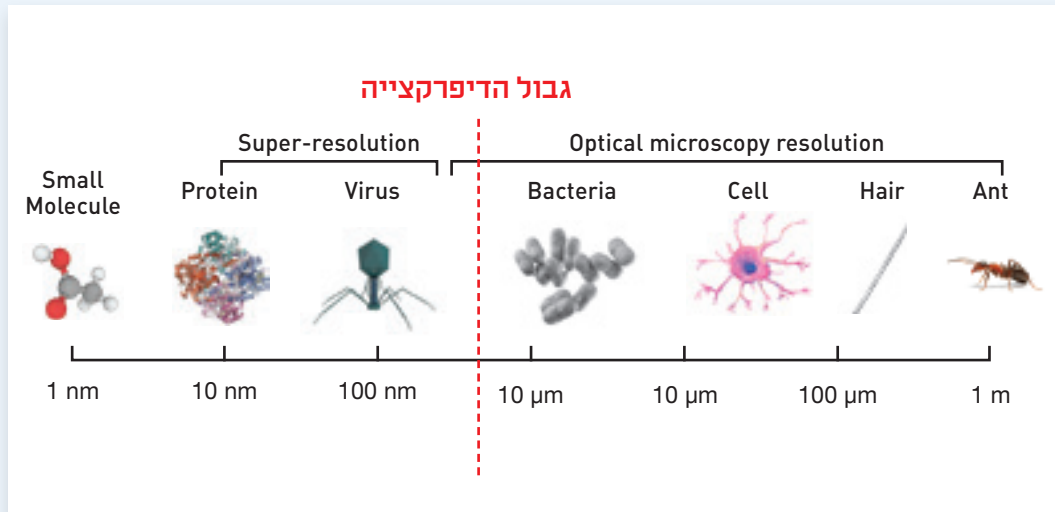
ברור שאם כל מה שיש בידינו אלה הדגימות של האות, אזי יש הרבה אותות שיכולים להתאים לדגימות. למשל, כפי שמצויר באיור 3, האות המקורי מתאים לדגימות, אך כך גם אותות שמשתנים מהר מהאות המקורי. לכן דרך אחת לאפשר שחזור מושלם היא להגביל את מהירות השינוי של האות. רעיון זה דומה למשחק הילדים המוכר שבו משלימים ציור באמצעות חיבור בין נקודות. מובן שככל שהאות משתנה מהר יותר, נצטרך לדגום בקצב מהיר יותר על מנת לתעד כל שינוי שהתרחש.



איור 3. האות המקווקו הוא האות המקורי שעובר דרך הדגימות (הנקודות הכחולות). גם שני האותות האדומים, שמשתנים מהר מהאות המקורי, מתאימים לדגימות.

רעיון זה הוא הבסיס למשפט הדגימה המפורסם ביותר הנקרא משפט נייקוויסט. משפט זה אומר שניתן לשחזר אות מהדגימות שלו אם קצב הדגימה, כלומר מספר הדגימות ליחידת זמן, הוא לפחות פעמיים התדר הגבוה ביותר באות. קצב זה נקרא קצב נייקוויסט, והוא נקבע לפי רוחב הסרט של האות, כלומר גודל תכולת התדר שלו. קיימת גם נוסחת שחזור ספציפית הניתנת למימוש בחומרה באמצעות רכיבים פשוטים. משפט זה הוא עמוד התווך של התקשורת הדיגיטלית, והוא קיים בבסיסם של כל המכשירים הדיגיטליים בשוק: הם כולם דוגמים בקצב נייקוויסט או בקצב מהיר יותר.

אף שמשפט נייקוויסט השפיע רבות על המהפכה הדיגיטלית ועל התפתחות אפליקציות מודרניות, יש לו כמה מגבלות. ביישומים רבים עמידה בקצב נייקוויסט דורשת חומרה מסובכת שתופסת נפח רב, הספק גדול



איור 4. גבול הדיפרקצייה. ניתן לראות במיקרוסקופ אופטי תאים, אך לא ניתן לראות חלבונים ומולקולות קטנות.

3. בניית מערכות המבוססות על טכנולוגיות הדגימה החדשות שמראות את היתרונות היישומיים של הורדת קצב הדגימה בתחומים שונים כגון דימות רפואי, תקשורת, יישומים ביטחוניים, אופטיקה ובטיחות רכב.

הקטנת תדר הדגימה מאפשרת עיבוד של אותות רחבים מאלו האפשריים כיום, עיבוד אותות שונים בעת ובעונה אחת, גילוי מהיר של תדרים ומטרות, מזעור מכשירים, הפחתת ההספק שהמכשיר דורש (מה שיכול להיות מתורגם למשל לזמן סוללה ארוך יותר), הגדלת רזולוציה לדוגמה בדימות רפואי, סריקות מהירות יותר, סריקה רבת ממדים והורדת מינון הקרינה.

כדוגמה למבניות טבעיות באותות פיזיקליים נסתכל על אות רדאר. במערכת רדאר אנחנו שולחים פולס לעבר מטרות שאותן ברצוננו לגלות. כאשר הפולס פוגע במטרה, הוא מוחזר לכיוון המקלט, וכך מתקבלת במקלט שרשרת פולסים המורכבת מהחזרים. כל החזר מגיע בזמן שתלוי במרחק למטרה ובגובה שתלוי במהירות המטרה.

שחזור מידע אבוד

על מנת לשחזר מידע אבוד, בין שזה נובע מכושר הפרדה מוגבל ובין מדגימה בקצב איטי מנייקוויסט, אנחנו מציעים שתי שיטות:

1. לנצל מבניות שקיימת לעיתים תכופות באותות מדרך הטבע.
2. להביא בחשבון את המטרה הסופית של עיבוד המידע. כדוגמה נניח שאנחנו עוקבים אחרי מסלול טיסה של מטוס. אם המטרה הסופית היא מציאת כיוון ההגעה של המטוס, הגיוני שהמידע שנזדקק לו יהיה מועט מבמצב שבו אנחנו רוצים לדעת בדיוק את מסלול הטיסה.

כיום גם מבניות וגם מטרת העיבוד אינן מובאות בחשבון בשלב הדגימה.

במעבדה אנחנו מתמקדים בשלושה מישורים:

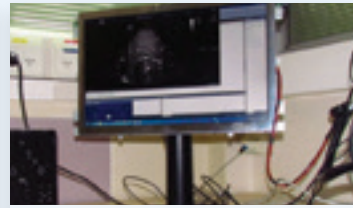
1. הבנה מתמטית של גבולות הדגימה והשחזור האפשריים בהתחשב במבניות ובמטרה.
2. פיתוח אלגוריתמים וחומרה לסופר-רזולוציה ושחזור מידע.



שיערוך DOA



פולסים



אולטרסאונד



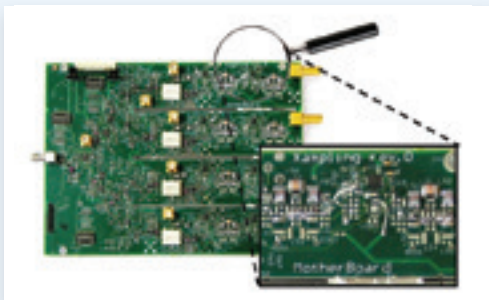
רדאר



רדיו קוגנטיבי

איור 5. מערכות אב"טיפוס בדגימת תדנייקוויסט ליישומים שונים

דוגמים מידע בקצב הרבה יותר איטי מנייקוויסט. באיור 5 רואים כמה דוגמאות של דוגמים ומערכות שפיתחנו במעבדה לשימושים שונים. האב"טיפוס הראשון שפיתחנו מופיע באיור 6; הוא נועד למערכות תקשורת רבות־משתמשים ודוגם בקצב של 6% מקצב נייקוויסט.



איור 6. כרטיס הדגימה הראשון שפותח, הדוגם בקצב איטי מנייקוויסט. מתאים למערכת תקשורת רבת־ערוצים ודוגם ב־6% מקצב נייקוויסט.

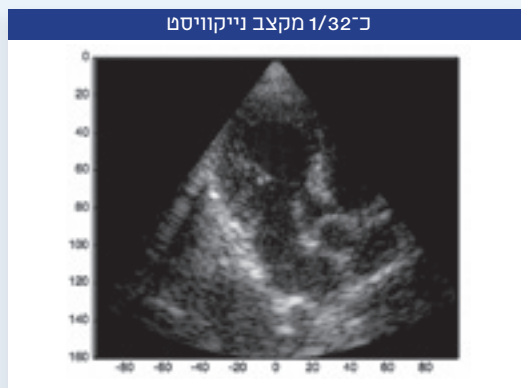
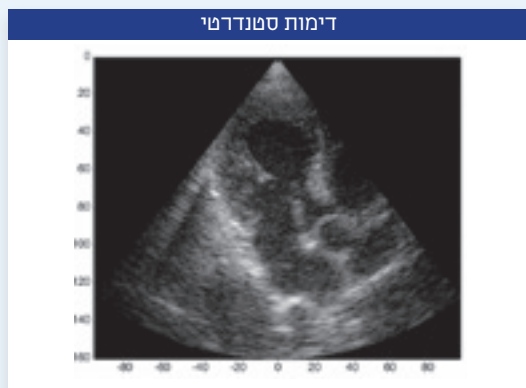
יישומים

לסיום נראה כמה יישומים של דגימה בקצב איטי. הדוגמה הראשונה היא לדמות אולטרסאונד, שיטת דימות פשוטה ונפוצה. בשימוש ברעיונות דלעיל

אותו מבנה מתקבל במערכות דימות רפואי כדוגמת אולטרסאונד. גם כאן נשלח פולס מהמתמר לתוך הרקמה, ובקליטה מתקבלים החזרים של הפולס מתוך הרקמה שבעזרתם מציירים קו בתמונה. דוגם שידע להביא בחשבון את המבנה הזה של שרשרת הפולסים יוכל להסתפק בפחות דגימות וליצור כושר הפרדה בין האותות שיהיה גבוה מזה שייצור דוגם נייקוויסט רגיל.

דוגמה זו היא מקרה פרטי של משפחה מתמטית רחבה של אותות הניתנת למידול באמצעות איחוד תת־מרחבים. מבנה זה רחב דיו לכלול דוגמאות רבות של אותות בתחומים מגוונים מצד אחד, ועשיר מספיק על מנת להוכיח שניתן לדגום אות באיחוד כזה בקצב איטי בהרבה מקצב נייקוויסט מצד אחר. ניתן גם להכליל את משפטי הקידוד של שנון לבעיות אנלוגיות. הכללה זו מאפשרת לפתח את קצב הדגימה המינימלי ואת השיגאה הקטנה ביותר האפשרית בהינתן מספר סופי של ביטים במעבר מאנלוגי לדיגיטלי.

בהשתמשנו בתוצאות התאורטיות בנינו במעבדה משפחה רחבה של דוגמים פשוטים למימוש אשר



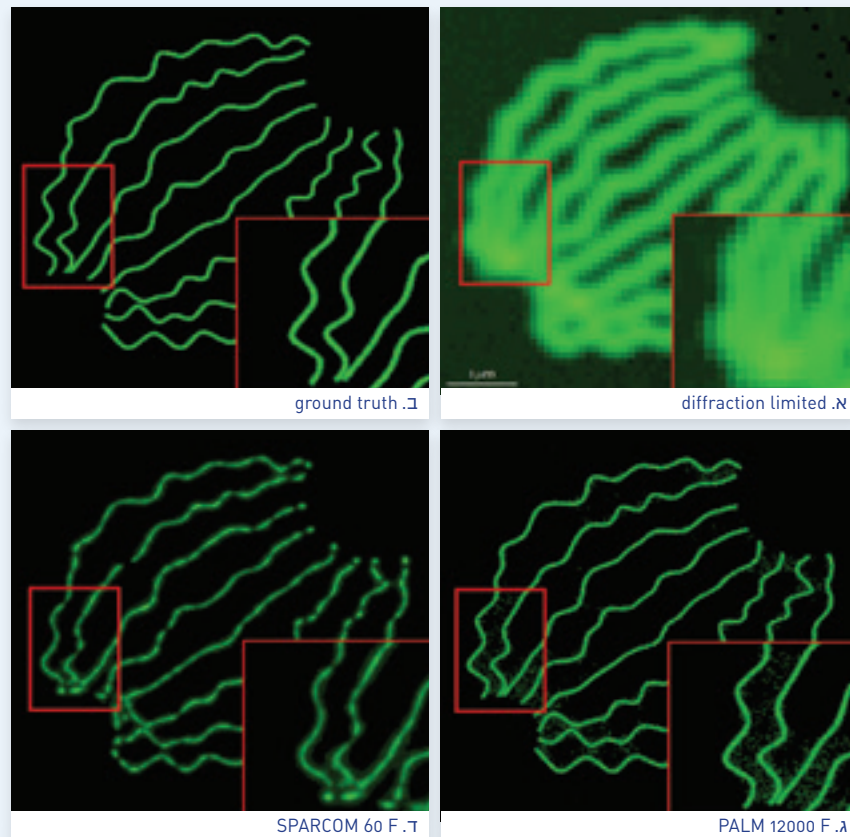
איור 7. הדמיית אולטראסונד ב־3% מקצב נייקוויסט

דימות המתאימה לכל כיס הן מבחינת הגודל והן מבחינת המחיר. מערכת כזאת מאפשרת גם רפואה מרחוק שיכולה להיות חשובה מאוד במדינות מתפתחות ובתנאי שטח.

ניתן לקבל יתרונות דומים ביישומים ביטחוניים שונים. לדוגמה, ניתן לפתח רדארים קטנים וזולים הפועלים על סוללה זמן ארוך יותר ויכולים לספק רזולוציה זמנית ומרחבית טובה בשימוש במספר קטן של אלמנטים. מערכות שמבוססות על הרעיונות שפירטנו יכולות גם לזהות מטרות בזמן קצר מהגבולות הידועים כיום. נוסף על זה, מערכות אלה יכולות להצר את רוחב הסרט של האות המשודר במידה ניכרת מבלי לפגוע ברזולוציה המתקבלת. פיתחנו בפרט מערכת אשר משתמשת במספר קטן של אותות צרי סרט הפרוסים לאורך רוחב סרט גדול, עם מיקומים בתדר שיכולים להיקבע בצורה דינמית. מערכת זו יכולה לשדר עם מערכת תקשורת קיימת יחד: היא אינה מצריכה תחום תדרים ייעודי, ולכן היא מאפשרת שיתוף ספקטרום בין הרדאר לתקשורת באותו רוחב סרט, ובכך מובילה לניצול יעיל יותר של הספקטרום. נוסף על זה, פיענוח המטרות יכול להתבצע בקצב איטי הודות לרוחב הסרט הקטן שמאפיין מערכות אלה.

הצלחנו להאט את קצב הדגימה במידה ניכרת מבלי לפגוע באיכות התמונה, כפי שרואים באיור 7. יכולת זו מאפשרת כמה פיתוחים טכנולוגיים בעלי משמעויות קליניות רחבות כגון דימות תלת־ממדי והעלאת הקצב של רכישת התמונות המאפשר דימות לבבי בקצב מהיר. לבסוף, בזכות ההאטה בקצב פיתחנו מתמר אלחוטי שיכול להחליף את המכונה הגדולה הקיימת כיום ואת הכבל המחבר בין המתמר למכונה. היום המתמר מתפקד כיחידה אנלוגית בלבד, ואילו הדגימה נעשית בתוך מכשיר האולטרסאונד הגדול. בזכות הדגימה בקצב איטי ניתן כעת לדגום ישירות בתוך המתמר ובכך להיפטר מהכבל. המידע הדגום הוא בקצב איטי מספיק כדי להיות משודר מעל נתב אלחוטי רגיל, וכך הרופא יכול לשחזר את התמונה במכשיר נישא אשר מקבל את המידע בנתב האלחוטי. בד בבד ניתן להעביר את המידע גם לענן ולנצל את הכוח החישובי הרב בענן על מנת לבצע עיבודים מתקדמים על האות ולשפר במידה רבה את איכות התמונה.

שיטה זו מאפשרת גישה פתוחה למידע האולטרסאונד ועיבוד אותות מתקדם שיכול לרוץ על כל פלטפורמה, בניגוד למציאות של היום שבה המידע מעובד פנימית בתוך המכונה, ואין אפשרות להפעיל עליו אלגוריתמים מתקדמים. בכך ניתן ליצור מערכת



איור 8. סופר־רזולוציה במיקרוסקופיה אופטית. (א) התמונה המתקבלת במיקרוסקופ אופטי רגיל; (ב) התמונה המקורית ברזולוציה גבוהה; (ג) התמונה המתקבלת מ־12,000 חשיפות בשיטת ה־PALM; (ד) התמונה המתקבלת בשיטת ה־SPARCOM בשימוש ב־60 חשיפות בלבד

בשימוש ברעיונות של מבניות וחוסר קורלציה בין הבהובי המולקולות ניתן להקטין במידה ניכרת את מספר החשיפות הדרוש ליצירת תמונה ברזולוציה מרחבית גבוהה ובכך להגדיל את הרזולוציה הזמנית במידה ניכרת (פי פקטור 100!) ולאפשר דימות בתאים חיים. הבנה מעמיקה של תהליכים ביולוגיים דורשת תצפית ישירה עליהם בזמן התרחשותם ובגודלם הננומטרי. מכיוון שתהליכים ביולוגיים הם דינמיים, דימות בתאים חיים חיונית להבנתם. לשיטה זו קראנו SPARCOM (SuPer Resolution COrrelation Microscopy).

נחזור כעת לבעיית כושר ההפרדה או סופר־רזולוציה. ב־2014 ניתן פרס נובל בכימיה לחוקרים הל, בטסיג ומורנר, שהצליחו לשבור את גבול הדיפרקציה במיקרוסקופ אופטי באמצעות שימוש בהבהוב מולקולות פלורסנטיות. שיטה זו הגדילה את הרזולוציה המרחבית בערך פי פקטור 10 על חשבון הרזולוציה הזמנית – כלומר באמצעות לוקליזציה של מולקולות מבודדות ומיצוע של הרבה מאוד חשיפות בזמן כאשר בכל חשיפה יש רק מספר קטן של חלקיקים פלורסנטיים מאירים. לשיטה זו קוראים PALM (PhotoActivated Localization Microscopy).

לתרופות שונות וכן דימות פונקציונלי, לדוגמה של המוח. נוסף על זה, שיטה זו מתאימה לשימוש קליני ללא עצירת נשימה ומאפשרת למשל בהקשר של מחלת הקרון לעקוב אחר כלי הדם ללא צורך בבדיקות פולשניות.

סיכום

לסיכום, כדי לראות טוב יותר, בדיוק רב יותר ובשימוש במידע מועט ככל האפשר יש לנצל את כל המידע שברשותנו כפי שהראינו כאן, באמצעות ניצול מבניות וניצול המטרה. ראינו שרעיון זה מוביל לתאוריות מתמטיות חדשות שעוסקות במשפטי דגימה ובגבולות כושר הפרדה. הזכרנו פיתוחים הנדסיים חדשים שהובילו לטכנולוגיות חדשות הפורצות מגבלות קיימות. אנחנו מקווים שבעתיד יוביל השילוב של המתמטיקה וההנדסה לפריצות מדעיות חדשות בבילוגיה, בפיזיקה ובכימיה בכך שנוכל לראות פרטים בדיוק שלא ראינו קודם לכן ונוכל לעקוב אחר תופעות המתרחשות מהר ממה שאפשר היום. ■

באיר 8 אנחנו משווים בין SPARCOM, המבוססת על מבניות ומשתמשת ב־60 חשיפות, לשיטה הסטנדרטית, PALM, המצריכה 12,000 חשיפות. ניתן לראות ששתי השיטות מובילות לרזולוציה דומה (באזורים מסוימים לשיטת ה־SPARCOM אף רזולוציה גבוהה יותר), אך SPARCOM מצריכה מספר מדידות הקטן בשני סדרי גודל.

את אותם הרעיונות ניתן להפעיל לדימות אולטרסאונד עם חומרי ניגוד. שיטה זו משפרת את איכות התמונה אך גוררת זמני סריקה ארוכים המצריכים עצירת נשימה של החולה. כמו כן אין מידע על שינויי זרימת הדם במשך הדימות. על מנת להתגבר על מגבלות אלה ניתן לראות בזרימת חומרי הניגוד פעולה דומה לזו של הנצנוצים של המולקולות הפלורוסנטיות. בניצול חוסר קורלציה בין חומרי ניגוד בכלי דם שונים ניתן לבצע דימות ברזולוציה מרחבית וזמנית גבוהה. שיטה זו נותנת כושר הפרדה גבוה בין כלי דם ומאפשרת דימות של זרימת דם קפילארי. דימות בזמן אמת מאפשר מעקב מדויק אחר התגובה של גידולים סרטניים

תודות: אני רוצה להודות לחברי האקדמיה על האמון שנתתם בי – אני מקווה שאוכיח את עצמי כראוי לכבוד הזה ואדע למלא את המינוי בתוכן ובעשייה. אני רוצה להודות גם להורי, לחמי ולחמותי, למשפחתי המורחבת, ובייחוד לבעלי שלומי ולחמשת ילדינו שממלאים את חיי בהרבה שמחה וגאווה.

העבודות והרעיונות שהוצגו כאן נעשו בשיתוף פעולה עם קבוצת המחקר שלי ועם עמיתים רבים אשר אני חבה להם הרבה תודה.