



הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
Technion – Israel Institute of Technology

ספריות הטכניון
The Technion Libraries

בית הספר ללימודי מוסמכים ע"ש ארווין וג'ואן ג'ייקובס
Irwin and Joan Jacobs Graduate School

©

All rights reserved

*This work, in whole or in part, may not be copied (in any media), printed, translated, stored in a retrieval system, transmitted via the internet or other electronic means, except for "fair use" of brief quotations for academic instruction, criticism, or research purposes only.
Commercial use of this material is completely prohibited.*

©

כל הזכויות שמורות

אין להעתיק (במדיה כלשהי), להדפיס, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, להפיץ באינטרנט, חיבור זה או כל חלק ממנו, למעט "שימוש הוגן" בקטעים קצרים מן החיבור למטרות לימוד, הוראה, ביקורת או מחקר. שימוש מסחרי בחומר הכלול בחיבור זה אסור בהחלט.

זיהוי פונקציות הלם מרחביות מתוך תמונות מטושטשות

חבור על עבודת גמר
לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת התואר
מגיסטר למדעים
בהנדסת חשמל

מאת
רם פביאן

טכניון
פקולטה להנדסת חשמל
פקולטה לנדעי מחשב
840
ספרייה מס'

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
תשרי תשמ"ו ח'פה אוקטובר 1985

2025566



000001010329

25.12.88

לאמי,
ולאשתי שרה.

העבודה נעשתה בהנחית פרופ' דוד מלאך
במעבדה לעיבוד אותות ותמונות בפקולטה להנדסת חשמל.

תודתי מקרב לב לפרופ' דוד מלאך על הנחיתו המועילה והמסורה.

תודה לצוות המסור של המעבדה לעיבוד אותות, גב' ציפי פורטנוי,
גב' זיוה אבני ומר יורם אור-חן על סיועם בכל הקשור לתפקוד
השוטף והתקיין של המעבדה.

תודה למשרד הבטחון על מענק הלימוד ועל האפשרות לקדם את הנושא
במקביל לעבודתי השוטפת.

תוכן הענינים

<u>עמוד</u>	
1	תקציר
3	רשימת סימונים וקיצורים
6	1. מבוא
7	1.1 הגדרת בעית השחזור
8	1.2 מכנה החיבור
10	2. מודל הטשטוש
10	2.1 רכישת תמונה
13	2.2 מקורות טשטוש
14	2.2.1 טשטוש עקב יציאה ממוקוד
16	2.2.2 טשטוש עקב תנועה ליניארית אחידה
19	3. סקר שיטות שיחזור
19	3.1 שיטות קלאסיות לשיחזור
19	3.1.1 מסנן הופכי
20	3.1.2 מסנן Wiener (MMSE)
22	3.1.3 מסנן הומומורפי
23	3.2 שיטות אינטראקטיביות
24	3.3 שיטות חדשניות לשיחזור
24	3.3.1 שימוש בטכניקות של בקרה אופטימליות לשיחזור
25	3.3.2 שימוש במודל לתמונה וביצוע שיחזור איטרטיבי
28	3.3.3 שיטה רקורסיבית לשערוך פרמטרים ושיחזור
29	3.4 סיכום ומסקנות.

תוכן הענינים (המשך)עמוד

30	4	שיטות לזיהוי פרמטרים של ה-PSF או OTF
30	4.1	שיטות לזיהוי במרחב התמונה
30	4.1.1	זיהוי מתוך פרטים בתמונה
31	4.1.2	התאמת פונקציית האוטוקורלציה למודל
	4.1.3	התאמת התמונה ופונקציית הטשטוש למודל
31		מסוג ARMA
33	4.2	שיטות לזיהוי במרחב התדר
35	4.3	שיטות לזיהוי כ-PSF במרחב הקפסטרום
35	4.3.1	זיהוי במישור ה-log-spectrum
37	4.3.2	זיהוי במישור ה-cepstrum
41	4.4	סיכום - השיטה הנבחרת
42	5	תאור שיטת הניסוי
42	5.1	צילוד ואמצעים
43	5.2	תהליך הסימולציה
44	5.3	הגדרות
44	5.3.1	הגדרת יחס אות לרעש
45	5.3.2	סוגי טשטוש במישורים שונים
48	6	שיטת Cannon לזיהוי בקפסטרום - בחינה ושיפורים
48	6.1	תאור השיטה
51	6.2	בדיקת ביצועים
	6.3	בדיקת אפשרות שיפור ע"י מיצוע בלוג-ספקטרום ולא בספקטרום
53	6.4	שיפור בעזרת הפעלת סריקה של חלון 'מסרק'
57		במישור הקפסטרום
	6.5	בדיקת השימוש ב-Slice Projection Theorem
60		לחסכון בחישובים
64	6.6	סיכום
64	6.6.1	שילוב אלגוריתם המסרק בשיטת Cannon
66	6.6.2	מסקנות

תוכן הענינים (המשך)

<u>עמוד</u>	
67	7. שיטה יעילה לדיכוי הרעש
67	7.1 שיטות לניקוי הרעש
67	7.1.1 מסנן מעביר נמוכים על לוג ממוצע הספקטרום
68	7.1.2 מסנן מדיאנלי במישור התמונה
69	7.1.3 מיצוע במישור התמונה
69	7.1.4 תוצאות ומסקנות
70	7.2 דיכוי רעש ע"י החסרה ספקטרלית (Spectral Subtraction)
70	7.2.1 הגדרת החסרה ספקטרלית
72	7.2.2 שיערוך הרעש
73	7.2.3 גישות שונות בהחסרה ספקטרלית
74	7.2.3.1 גישה מס' 1
75	7.2.3.2 גישה מס' 2
76	7.2.3.3 גישה מס' 3
77	7.2.3.4 גישה מס' 4
78	7.2.4 תוצאות ומסקנות
79	7.3 הדגמת ביצועי השיטה הנבחרת
86	8. תאור האלגוריתם המוצע
87	8.1 תאור האלגוריתם
88	8.2 בדיקת ביצועי האלגוריתם המוצע
89	8.3 זיהוי ושיחזור
96	9. סיכום ומסקנות
100	מקורות

תקציר

בעבודה זו אנו בוחנים שיטה משופרת לזיהוי פונקציות טשטוש (Point Spread - PSF Function) חד-מימדיות ודו-מימדיות מתוך תמונות מטושטשות ורועשות.

אנו מניחים שהמערכת המעוותת כוללת טשטוש ליניארי ע"י פונקציה לא ידועה ותוספת רעש, כאשר האינפורמציה היחידה הנתונה לנו היא תוצר מערכת זו (תמונה מטושטשת ורועשת).

מתוך סקר ספרות של שיטות קלאסיות לשיחזור ושיטות שפותחו בשנים האחרונות ומדווחות בעבודה אנו מגיעים למסקנה שהמפתח לשיחזור טוב של תמונה שעברה את המערכת המעוותת שהנחנו היא ידיעה מדויקת של פונקציה הטשטוש. לאחר בחינה מדוקדקת של האלגוריתמים הקיימים לזיהוי ה-PSF אנו בוחרים בשיטת הזיהוי במישור הקפסטרום.

שיטה זו מתבססת על העובדה שספקטרום ההספק של פונקציות הטשטוש שבהן אנו מטפלים, טשטוש עקב תנועה ליניארית אחידה (motion blur) וטשטוש עקב יציאה ממיקוד (out-of-focus blur), כוללים אפסים מחזוריים או כמעט מחזוריים. מחזוריות זו באה לידי ביטוי במישור הקפסטרום בצורת שיא שלילי בודד או מכלול של מספר שיאים שליליים כאשר המיקום שלהם במישור זה מאפשר את זיהוי מאפייני הפונקציה.

הבעיה העיקרית בשיטה זו היא רגישותה הרבה לתוספת רעש. בעבודה זו אנו מציעים שני חידושים עיקריים:

א. הפעלה של חלון בצורת מסרק במישור הקפסטרום שתפקידו העיקרי לבטל את ההשפעה השלילית של הכפולות השלמות של השיא הרצוי. חלון זה מביא לשיפור הביצועים במידה רבה.

ב. הפעלה עיבוד נוסף לשם ניקוי הרעש מהתמונה הנתונה. עיבוד זה מתבסס על החסרה ספקטרלית (Spectral Subtraction) של הרעש. עיקר החידוש הוא בשילוב יעיל של החסרה הספקטרלית בתוך אלגוריתם הזיהוי ובשיערוך יעיל של ספקטרום הרעש. לאחר השילוב אנו מקבלים שיפור נוסף בביצועים.

בעזרת האלגוריתם המוצע ניתן לזהות פונקציות טשטוש מתוך תמונות רועשות כאשר יחס האות לרעש שלהן הוא בסביבות 0db. בעבודות קודמות הדבר ניתן היה לביצוע רק עבור יחסי אות לרעש שמעל 20db.

תכונה נוספת של האלגוריתם המוצע כאן הוא בכך שאין הגבלה מעשית על מימדי ה-PSF במישור התמונה. באופן תיאורטי האלגוריתם מסוגל לטפל בפונקציות טשטוש שמימדיהן עד מחצית ממימדי התמונה.

העבודה כוללת הדגמות של יצוג תמונות שונות במישור המרחב, במישור הספקטרום ובמישור הקפסטרום באמצעות תצלומים של מישורים אלו.

רשימת סימונים

- A - וקטור שורת הקפסטרום לאחר הפעלת סריקה של מסנן סורק.
- CR - קריטריון בחינה
- $C_b(p, q)$ - קפסטרום של האות $b(x, y)$
- $C_{k1}(\cdot)$ - סדרת מקדמים כמודל התמונה
- $C(z_1, z_2)$ - התמרת Z-דו-מימדית של מקדמי מודל התמונה
- E - סימן התחלת
- $e(t)$ - שגיאת השיחזור עבור אות חד-מימדי
- F - סימן החמרת פורייה
- $f(x, y)$ או
- $f(m, n)$ - התמונה המקורית לפני הטשטוש ולפני הרעש
- $f_k^y(x, y)$ - שיערוך התמונה המקורית
- $f_k^y(\cdot)$ - שיערוך התמונה המקורית לאחר איטרציה K# בתהליך שיחזור איטרטיבי
- $F(u, v)$ או
- $F(w_1, w_2)$ - התמרת פוריה של $f(x, y)$
- $F(u, v)$ - שיערוך החמרת פוריה של $F(u, v)$
- $g(x, y)$ או
- $g(m, n)$ - התמונה המעוותת הנתונה
- $G(u, v)$ או
- $G(w_1, w_2)$ - התמרת פוריה של $g(x, y)$
- $h(x, y)$ - פונקציית טשטוש
- $H(u, v)$ - התמרת פוריה של $h(x, y)$
- $H(z_1, z_2)$ - התמרת Z של $h(x, y)$
- $H_R(u, v)$ - התמרת פורייה של מסנן שחזור

רשימת סימונים (המשך)

- $n(x,y)$ - רעש אדיטיבי לכן
- או $N(u,v)$
- $N(w_1, w_2)$ - התמרת פוריה של $n(x,y)$
- או $P_N(u,v)$
- $P_n(w_1, w_2)$ - שיערוך ספקטרום ההספק של הרעש
- $P_g(u,v)$ - שיערוך ספקטרום ההספק של התמונה הנתונה
- $P_f(u,v)$ - שיערוך ספקטרום ההספק של התמונה המקורית
- M - נקודת הבדיקה בקפסטרום
- Q - מספר קטעי התמונה
- R_f - פונקצית אוטוקורלציה של האות $f(\cdot)$
- S - עוצמת הפולס הרצוי בתוך A
- $U(t)$ - אות כניסה למערכת
- $V(m,n)$ - רעש אדיטיבי לתמונה
- $W(\cdot)$ - חלון
- $W(m,n)$ - רעש המשמש לבניית התמונה (באמצעות מודל)
- x_n - סדרת כניסה למסנן
- $y(t)$ - אות יציאה ממערכת
- y_n - סדרת יציאה ממסנן
- $\hat{Y}(w_1, w_2)$ - שיערוך התמרת פוריה של תמונה מטושטשת ללא תוספת רעש
- α - מקדם
- β - פרמטר
- γ - קבוע אווילר
- δ - הפרש בין האפסים בספקטרום של מעגל
- ϵ - סף נתון
- σ - סטית תקן
- λ_k - מקדם השליחזור בתהליך איטרטיבי
- $\theta(m,n)$ - משתנים אקראיים המייצגים את מודל התמונה

רשימת סימונים (המשך)

- $g(x,y)$ - ספקטרום ההספק של האות $\Phi_g(u,v)$
 $\overline{\Phi_n(u,v)}$ - ממוצע ספקטרום ההספק של הרעש
* - סימן הקונבולוציה
(.) - סימון תזזת של המשחנה בסוגריים
 ∇ - אופרטור הגרדיאנט

רשימת קיצורים

Auto Regressive Moving Average	-	ARMA
Discrete Fourier Transform	-	DFT
Fast Fourier Transform	-	FFT
Inverse Discrete Fourier Transform	-	IDFT
Inverse Fast Fourier Transform	-	IFFT
Inverse Two Dimensional Fast Fourier Transform	-	ITDFFT
Low Pass	-	LP
Modulation Trasfer Function	-	MTF
Optical Transfer Function	-	OTF
Point Spread Function	-	PSF
Root Means Square	-	RMS
Space Invariant Point Spread Function	-	SIPSF
Signal to Noise Ratio	-	SNR
Squire Root	-	SQRT
Two Dimensional Fast Fourier Transform	-	TDFFT

1. מבוא

אחד הנושאים המרכזיים בתוך הנושא הכללי של עיבוד תמונות (Image Processing) הוא הנושא של שחזור (Restoration).

כאשר מדברים על שחזור תמונה מתיחסים בדרך כלל למקרה שבו נתונה תמונה בודדת שעברה תהליך של טשטוש ולא ניתן לשוב ולקבל תמונה דומה אחרת אלא בדרך של תיקון העיוות בתמונה הנתונה. הדוגמאות לתמונות הדורשות שחזור הן רבות וכוללות לאו דוקא תמונות שהושגו באמצעות מצלמה רגילה. ניתן למנות סוגים רבים של תמונות: צילומי נוף, תצלומי אוויר, צילומים מדעיים של חלקיקים תוך כדי תנועתם, תמונות אינפרא-אדום, תמונות אקוסטיות, תמונות אולטרא-סאונד, תמונות מכ"ם ועוד.

סוגי העיוות בתמונות נובעים מעצם תהליך רכישת התמונה והם יכולים להיות תוצאה של אובך, טורבולנציה אטמוספירית, חוסר מיקוד, תנועה יחסית של העצם והמצלמה, רעש במערכת הסנסור, רעש פוטונים (אטמוספירי) ועוד.

לצורך שחזור התמונה נדרש בדרך כלל מידע מסוים לגבי סוג העיוות ופרמטרים הקשורים אליו, בתלות באלגוריתם השחזור. אלגוריתמים שונים דורשים סוגי מידע שונים לדוגמה פרמטרים המאפיינים את מערכת העיוות, גדלים סטטיסטיים, הכרה של המערכת הפיזיקלית המטשטשת וכדומה. תוצאות השחזור תלויות ביכולת לתאר בצורה מדויקת את המערכת המטשטשת או ביכולתנו למצוא את נתוני העיוות מתוך התמונה הנתונה.

העבודה המובאת להלן עוסקת בבעיית מיצוי פרמטרים של פונקציה הטשטוש מתוך התמונה המטושטשת. הדגש העיקרי ניתן לטיפול במיצוי הפרמטרים מתוך תמונות מטושטשות הטבולות ברעש גבוה (יחס אות לרעש נמוך במיוחד). ההצלחה בזיהוי פרמטרי הטשטוש מתוך תמונה רועשת מהווה את החידוש העיקרי שבעבודה בעיקר לנוכח העובדה שזהו המקום שבו נכשלות כל השיטות המוכרות לנו שפותחו עד היום.

1.1 הגדרת בעיית השיחזור

את בעיית השיחזור ניתן להגדיר בצורה הבאה: נתונה תמונה מטושטשת (ורועשת). נדרש לתכנן מסבן (חד-מימדי או דו-מימדי) כך שאם נפעיל אותו על האינפורמציה הנתונה נקבל ביציאה תמונה שהיא השיערוך הטוב ביותר של התמונה המקורית (לפני הטשטוש) על פי קריטריון מסויים.

שיטות השיחזור המוכרות לנו ניתנות לחלוקה לשני סוגים:

א. שיטות הדורשות ידע מוקדם מפורט לגבי המערכת שגרמה לטשטוש התמונה. בתוך קבוצה זו ניתן למנות את כל השיטות הלא-איטרטיביות ורוב השיטות האיטרטיביות.

ב. שיטות שאינן דורשות ידע מוקדם לגבי המערכת המעוותת. אלו הן בדרך כלל שיטות איטרטיביות המבצעות שיערוך פרמטרים בין איטרציה אחת לשניה.

המגבלה העיקרית של השיטות המופיעות בקטגוריה הראשונה היא כאמור הצורך להכיר את המערכת שגרמה לטשטוש התמונה על כל פרמטריה בצורה מדויקת. אי ידיעה מדויקת של הפרמטרים גורמת בדרך כלל לשיחזור גרוע או דורשת הרבה נסיונות שיחזור עם ערכים שונים של הפרמטר הלא ידוע כאשר האדם הצופה בתוצאה הוא אשר סוגר את החוג בנסיון להתכנס לערך המדויק של הפרמטר.

יתרון של השיטות בקטגוריה זו הוא בכך שחלקן בעלות פוטנציאל טוב לטיפול במקרים שבהם התמונה המטושטשת נתונה כשהיא טכולה ברעש.

השיטות המופיעות בקטגוריה השניה הן מודרניות הרבה יותר ורובן מהוות תוצרי מחקר של השנים האחרונות. יתרון הגדול הוא בכך שלא נדרש שום ידע מוקדם לגבי התמונה המקורית ו/או המערכת שטשטשה אותה. השיחזור מתבצע באופן אוטומטי תוך בדיקת תוצאת קריטריון נתון ונעצר כאשר אין יותר התקדמות בתהליך.

יחד עם זאת, לוקים תהליכים מסוג זה בחסר משום שטרם הוכח שהם מסוגלים לטפל ברעש בצורה יעילה. נוכחות של רעש בתהליך השיחזור האיטרטיבי מן הקטגוריה השניה גורם לקשים רבים: החל ממקרים שבהם תמונת התוצאה לא "השתחזרה" כנדרש (וזאת בגלל שהקריטריון בו משתמשים שוב אינו יעיל) וכלה במקרים שבהם התהליך לא מצליח להתכנס (או אפילו מתבדר). הפתרון הטריביאלי כביכול לבצע קדם עיבוד (Pre-Processing) לשם סילוק הרעש לפני תהליך השיחזור

אינו תמיד מתאים. קדם עיבוד מסוג זה צריך להיות מתוחכם מאד. עליו לסלק את הרעש מצד אחד ומצד שני לשמר פרטים בתמונה וזאת על מנת שהתמונה המשוחררת תתקבל עם חדות מספקת.

שתי דרישות אלו הן כמובן דרישות סותרות ואין אנו מכירים דיווח על הצלחה בכיוון זה.

בביצוע עבודה זו בחרנו להתרכז בסיוע לשיטות מן הקטגוריה הראשונה וזאת מהסיבות הבאות:

- (א) אנו שואפים לעסוג בתמונות הנתונות בתנאי רעש קשים.
- (ב) חלק מהשיטות בקטגוריה זו הן בעלות פוטנציאל לשיחזור יעיל בתנאי רעש, בתנאי שנתונה להן פונקצית המערכת המטשטשת.
- (ג) האלגוריתמים בקטגוריה זו אינם שלמים ללא החוספת של זיהוי פונקצית הטשטוש מתוך התמונה הנתונה.

מטרת העבודה היא לפיכך: למצוא אלגוריתם יעיל לזיהוי פרמטרי הפונקציה המטשטשת וזאת מתוך תמונה הנתונה בתנאי רעש קשים. לאחר זיהוי הפרמטרים נפעיל על חלק מהתמונות אלגוריתם שיחזור לשם הדגמה.

אנו נטפל בתמונות שעברו טשטוש עקב תנועה יחסית של עצם-מצלמה (Motion Blur) ובתמונות שעברו טשטוש עקב חוסר מיקוד (Out-of-Focus Blur). התמונות יהיו כאלו שעברו Blur סינטי ע"י המחשב + תוספת של רעש לבן או כאלו שנדגמו מאות מצלמת וידיאו ומדגימות את סוגי הטשטוש הנ"ל.

1.2 מבנה החיבור

בפרק 2 נתאר מודל לרכישת תמונה ובתוכו נכלול את הגורמים העלולים לעוות תמונה בתהליך הרכישה. נתייחס לעיוות עקב טשטוש ועיוות עקב תוספת רעש ונסקור את המקורות האפשריים לעיוותים אלה. בפרק 3 נביא סקירה ממצה על שיטות שיחזור מתוך הספרות השוטפת. נסקור מספר שיטות קלאסיות לדוגמה ואת רוב השיטות המודרניות שהתפרסמו בשנתיים האחרונות. המסקנה מפרק זה היא שרובן המוחלט של השיטות דורש ידע מוקדם לגבי המערכת שגרמה לטשטוש התמונה או כושר

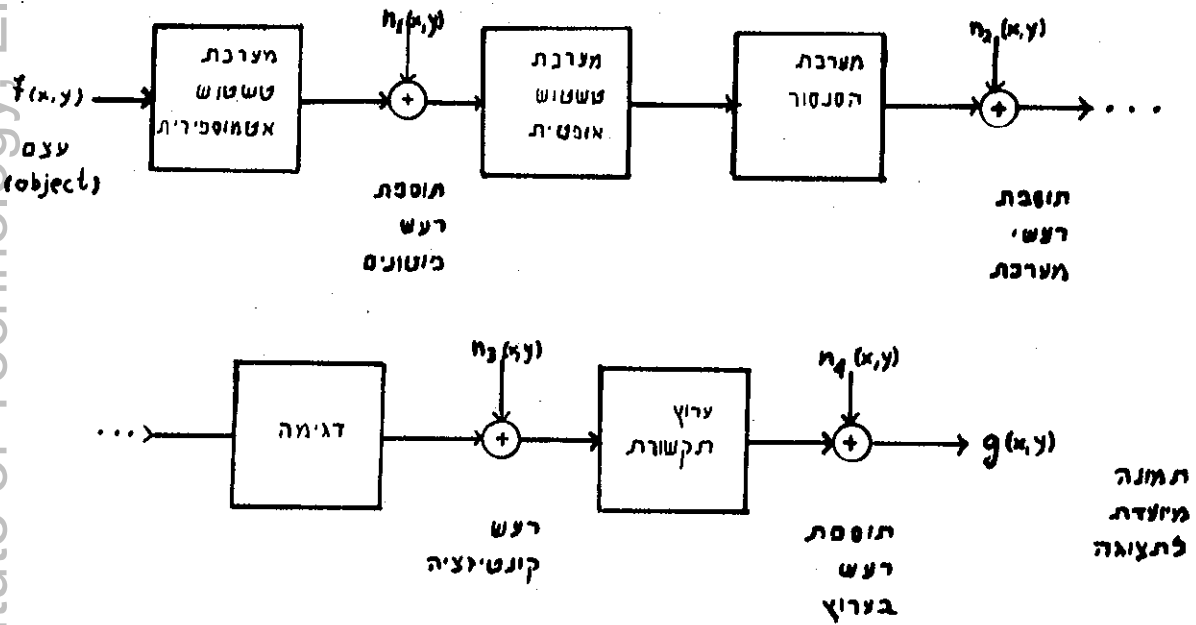
זיהוי פונקציה הטשטוש מתוך התמונה הנתונה. ננסה לתרום לתהליך השיחזור ע"י אלגוריתם יעיל לזיהוי הפונקציה. לצורך זה אנו סוקרים תחילה את השיטות הקיימות לזיהוי פרמטרים של פונקציה הטשטוש. סקירה זו מבוצעת בפרק 4 ובסיכומו אנו ממליצים על השיטה בעלת הפוטנציאל הטוב ביותר. שיטה זו תועמד לבחינה מדוקדקת בפרק 6. לפני כן, בפרק 5, מתוארות שיטות הניסוי והסימולציה שבהן נקטנו ובכלל זה הגדרות למושגים שונים וצורות חישוב. נקודות התורפה של האלגוריתם שבבדק בפרק 6 נבחנות מהיבטים שונים. נבדקות שיטות לשיפור ולבסוף ממליצים על אלגוריתם משופר מבחינות רבות לאלגוריתם שבבדק. עיקר השיפורים: שימוש ב-Slice projection theorem לשם הקטנת מספר החישובים ושימוש בקריטריון חדש לזיהוי במישור הקפסטרום. השימוש בקריטריון מתאפשר ע"י הפעלת חלון "מסרק" הסורק את סדרת הקפסטרום והוא מהווה את אחד החידושים בעבודה זו. האלגוריתם המוכלל המומלץ בפרק זה עדיין אינו מספק משום רגישותו לרעש (אע"פ שהוא טוב בהרבה מהאלגוריתם הקודם). לשם כך אנו בודקים בפרק 7 שיטות שונות לדיכוי השפעת הרעש. השיטה היעילה ביותר שמצאנו לדיכוי הרעש ומומלצת בפרק מבוססת על החסרה ספקטרלית (Spectral Subtraction). שילוב שיטה זו באלגוריתם הזיהוי מהווה חידוש נוסף בעבודתנו זו.

תאור האלגוריתם הסופי המוצע על ידנו מופיע בפרק 8. שם גם נבחנים ביצועיו ומובאות דוגמאות שונות לזיהוי ושיחזור. פרק 9 הוא סיכום כללי של העבודה.

2. מודל הטשטוש

2.1 רכישת תמונה

תהליך אפשרי רכישת תמונה ניתן לתיאור בהתאם לדיאגרמת הבלוקים שבציור 2.1.



ציור 2.1: תהליך אפשרי של רכישת תמונה

Fig. 2.1: A possible process of image acquisition

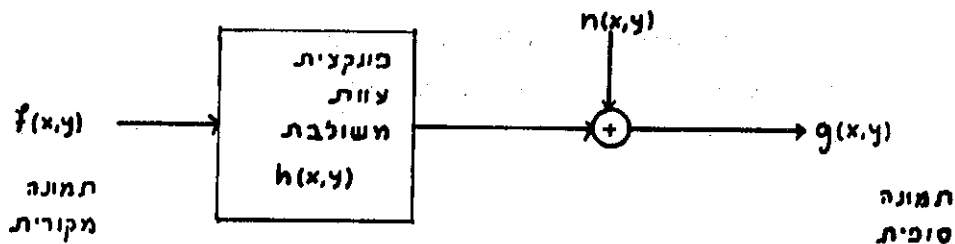
כפי שניתן ללמוד מן הציור, קיימים גורמים רבים ומגוונים שעלולים לחרום לעיוות התמונה הסופית.

"מערכת הטשטוש האטמוספירית" ו"רעש הפוטונים" קיימים רק במקרים שבהם מדובר בצילומי חוץ. קרני האור (בתחום הנראה או הבלתי נראה - IR למשל) מתעוותות כאשר הן עושות דרכן מן העצם אל המצלמה/סנסור ואינן נעות עוד על פני קו ישר ולכן עלולה להתקבל תמונה מעוותת. בנוסף לכך מתווסף רעש הפוטונים שמקורו בקרינה קוסמית.

"המערכת האופטית" ו"מערכת הסנסור" כוללות בדרך כלל את העדשה ומערכת הגלאים. (הגלאי יכול להיות פילם במצלמה רגילה או מערכת גלאים רגישה מסוג כלשהו אחר). יציאת העדשה ממוקד היא מקרה אופייני של עוות המתקבל מהמערכת האופטית. רעשי המערכת $n_2(x,y)$ כוללים בתוכם רעידות של כל מערכת התצפית, וחוסר אחידות במהלך ה"תרגוט" של האינפורמציה הנקלטת על פני הגלאים. אם קיימת תנועה יחסית בין המצלמה לבין העצם היא בדרך כלל מסווגת כתרומה של המערכת האופטית לעיוות הכולל ולא כתרומת רעש.

לאחר קליטת התמונה בעזרת הסנסור ניתן לדגום אותה ואז נוצרים גם רעשי קוונטיזציה $n_3(x,y)$ או להעבירה בערוץ תקשורת כלשהו ואח"כ לדגום. כמובן שגם בערוץ התקשורת עלול להתווסף רעש והוא מסומן ע"י $n_4(x,y)$. "ערוץ התקשורת" משמש כאן כשם כללי למערכת האלקטרונית שבה משתמשים ולפיכך הרעש $n_4(x,y)$ יכול בתוכו גם את תוספת הרעש המתקבלת מהמעבר דרך מערכת זו.

בעבודה זו נזניח את רעש הפוטונים ורעשי המערכת ולפיכך ניתן יהיה להסתפק במודל המפושט המופיע בצירור 2.2.



צירור 2.2: מודל מפושט להחליך רכישת תמונה

Fig. 2.2: A simplified model for image acquisition

הקשר המתמטי בין התמונה המקורית לתמונה הסופית ניתן לתיאור ע"י (2.1):

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \quad (2.1)$$

כאשר: $f(x,y)$ - התמונה המקורית
 $g(x,y)$ - התמונה הסופית
 $h(x,y)$ - פ' התמסורת של מערכת ההדמיה
 $n(x,y)$ - רעש אדיטיבי
* - אופרטור הקונבולוציה.

הפונקציה $h(x,y)$ נקראת בדרך כלל פונקציה הרחבת הנקודה - Point Spread Function או בקיצור PSF.

בעבודה זו נעסוק בסוגי PSF אשר אינן משתנות במרחב התמונה ולפיכך נקראות Space Invariant או SIPSF.

הנחה בסיסית נוספת בעבודה (ומקובלת בספרות העוסקת בנושא זה) היא שהמערכת $h(x,y)$ היא מערכת ליניארית המקיימת את חוקי הסופר-פוזיציה (ולכן השתמשנו באופרטור הקונבולוציה).

הביטוי המלא של (2.1) יהיה לכן:

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta) h(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta + n(x,y) \quad (2.2)$$

במישור פורייה ניתן לרשום:

$$G(u,v) = F(u,v) \cdot H(u,v) + N(u,v) \quad (2.3)$$

כאשר לדוגמה:

$$h(x,y) \xrightarrow{F} H(u,v) \tag{2.4}$$

מהווים צמד פורייה.

הגודל:

$$\frac{H(u,v)}{\iint_{-\infty}^{\infty} h(x,y) dx dy} \tag{2.5}$$

נקרא פונקצית התמסורת האופטית Optical Transfer Function או בקיצור OTF (נשים לב שבגלל הנירמול עבור $u=0, v=0$ הגודל מקבל את הערך 1).

מקובל לדבר לעתים גם על ה-MTF (Modulation Transfer Function) שהיא למעשה הערך המוחלט של ה-OTF.

2.2 מקורות טשטוש

בספרות מקובל לטפל בארבעה מקרים עיקריים של טשטוש:

- א. טשטוש עקב יציאה ממוקוד (Out-of-Focus Blur)
- ב. טשטוש עקב תנועה יחסית של עצם ומצלמה (Motion Blur)
- ג. טשטוש עקב מעבר דרך האטמוספירה (Turbulence Blur)
- ד. טשטוש עקב רעידות של מערכת התצפית (Vibrations).

בעבודה זו נתרכז בטיפול בשני המקרים הראשונים בלבד.

2.2.1 טשטוש עקב יציאה ממיקוד

כאשר המצלמה איננה ממוקדת היטב, נוצר טשטוש בעל אופי מעגלי (הדבר נכון רק לגבי מערכות עם עדשות עגולות אך רוב המערכות הן אכן כאלה).

מקובל לקרב את $h(x,y)$, במקרה זה ע"י צילינדר בהתאם ל-(2.6)

$$h(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2} & \sqrt{x^2+y^2} \leq R \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases} \quad (2.6)$$

כאשר R הוא "רדיוס הטשטוש" והוא גדל ככל שהמצלמה רחוקה יותר ממיקוד.

מאחר של- $h(x,y)$ יש סימטריה מעגלית גם להתמרת פורייה שלה יש סימטריה כזאת

$$H(u,v) = \frac{J_1(\pi Rr)}{\pi r R} \quad (2.7)$$

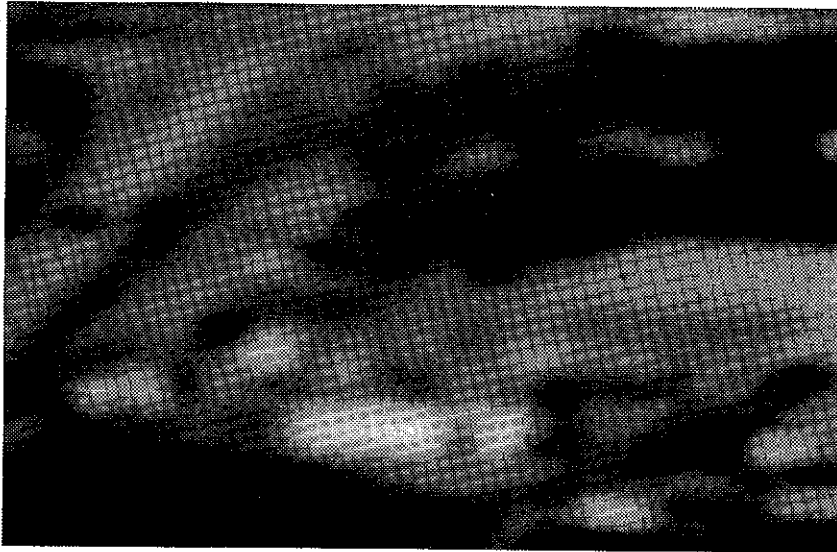
$$r = \sqrt{u^2+v^2} \quad \text{כאשר:}$$

$J_1(\cdot)$ פונקציה בסל מהסדר הראשון.

ל- $H(u,v)$ יש התנהגות המאופינת ע"י $J_1(2\pi Rr)$. כל אונה שניה של $J_1(\cdot)$ היא שלילית ולכן טשטוש מסוג זה גורם להזזת פאזה של π רדיאנים בחלק מהתדרים המרחביים. האמפליטודה של $J_1(\cdot)$ מאופינת ע"י האפסים שלה שהם "כמעט" מחזוריים. האפסים יופיעו עבור הערכים שבהם מתקלים

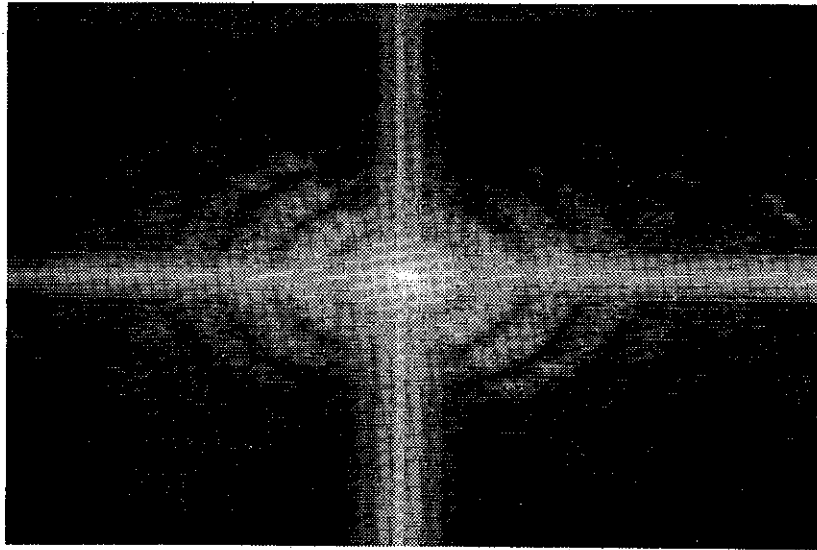
$$2\pi Rr = 3.83, 7.02, 10.2, 13.3, 16.5, \dots (2.8)$$

צילור 2.3 מראה תמונה ('AVIR2!') שעברה טשטוש מסוג 'DEFOCUS'.
תמונת הספקטרום שלה מופיעה בצילור 2.4.



צילור 2.3 - התמונה 'AVIR2' לאחר טשטוש מסוג 'DEFOCUS' עם $R=8$

Fig. 2.3 - The image 'AVIR2' after synthetic defocus blur with $R=8$



2.3 ציור 2.4 - תמונת log-spectrum של התמונה בציור 2.3
Fig. 2.4 - Image of log-spectrum of image in fig. 2.3

2.2.2 טשטוש עקב תנועה ליניארית אחידה

במקרה של תנועה ליניארית אחידה (מניחים תנועה יחסית בין עצם למצלמה בציר X בלבד), ניתן לקרב את $h(x,y)$ ע"י מלבן חד מימדי בהתאם ל-(2.9)

$$h(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{d} & -\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}; y = 0 \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases} \quad (2.9)$$

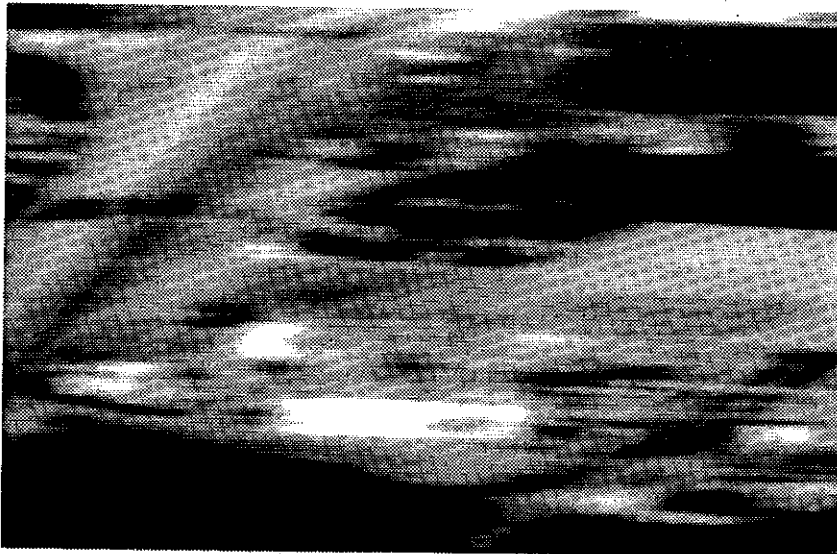
d הוא "אורך הטשטוש" והוא יחסי לזמן החשיפה של סרט הצילום ולמהירות היחסית שבין המצלמה והעצם. התמרת פוריה במקרה זה תהיה כהתאם ל-(2.10).

$$H(u,v) = \frac{\text{Sin}(\pi du)}{\pi du} \quad (2.10)$$

גם כאן חלק מהאונות של $H(u,v)$ הן שליליות ולכן גם עבור טשטוש מהסוג הזה ישנו היפוך מופע עבור חלק מהתדרים. האמפליטודה מאופיינת ע"י אפסים מחזוריים כציר u . האפסים יופיעו עבור הערכים שבהם מתקיים:

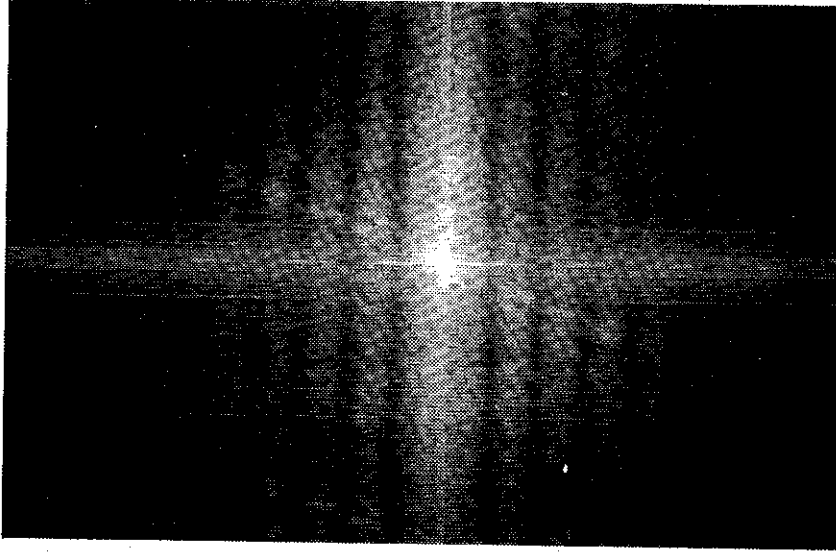
$$u = \pm \frac{1}{d}, \pm \frac{2}{d}, \pm \frac{3}{d}, \dots \quad (2.11)$$

ציור 2.5 מראה תמונה ('AVIR2') שעבר טשטוש מסוג 'motion'. תמונת הספקטרום שלה מופיעה בציור 2.6.



ציור 2.5 - התמונה 'AVIR2' לאחר טשטוש מסוג motion עם $d=19$

Fig. 2.5 - The image 'AVIR2' after synthetic motion blur with $d=19$



ציור 2.6 - תמונת log-spectrum של התמונה בציור 2.5

Fig. 2.6 - Image of log-spectrum of image in fig. 2.5

3. סקר שיטות שיחזור

בפרק זה נסקור את השיטות ה"קלאסיות" העיקריות לשיחזור וחלק מהשיטות המודרניות יותר (שהופיעו בשנים האחרונות). עבור כל שיטה יוצג הרעיון שבבסיסה, תבדק יכולתה לטפל במקרים שבהם הרעש הוא גבוה ויבחן הצורך או אי הצורך של כל שיטה בקבלת בתונים מדויקים לגבי פרמטרים של ה-PSF או כל מידע מוקדם אחר. מטרת הפרק היא להמחיש את הצורך בידיעת פרמטרי ה-PSF עבור תהליך השחזור.

3.1 שיטות קלאסיות לשיחזור

3.1.1 מסנן הופכל

בהתאם לפרק 2, ניתן לרשום את תיאור המערכת כדלקמן:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \quad (3.1)$$

או במישור פורלייה:

$$G(u,v) = F(u,v) \cdot H(u,v) + N(u,v) \quad (3.2)$$

המסנן ההופכל מוגדר ע"י:

$$H_R(u,v) = H_{IF}(u,v) = \frac{1}{H(u,v)} \quad (3.3)$$

ומכאן שהתמונה המשוחזרת מתקבלת מתוך הנוסחה הבאה:

$$\hat{F}(u,v) = F(u,v) + \frac{N(u,v)}{H(u,v)} \quad (3.4)$$

מגבלות השיטה:

1. יש להכיר את $H(u,v)$ במדויק על מנת לשחזר.
2. מאחר של- $H(u,v)$ יש נקודות שבהן היא מתאפסת עבור סוגי העיוות שבהם מדובר, נוצר מצב שבו $H_R(u,v)$ מכיל נקודות שבהן מתקבלים ערכים אינסופיים ולכן לא ניתן למימוש פיזיקלי.
3. השיטה רגישה לרעש. מנוסחת השיחזור ניתן לראות שתוספת רעש גוררת עיוות של $\hat{F}(u,v)$ לעומת $F(u,v)$. במקומות שבהם $H(u,v)$ שואף ל-0 התמונה בשלטת ע"י הרעש. הדבר קורה בעיקר בתדרים הגבוהים בהם הספק הרעש אינו אפס אך ההספקים של $F(u,v)$ ו- $H(u,v)$ נמוכים מאד.

פירוט בוסף ניתן למצוא בספרות ה"קלאסית" בנושא למשל [1], [2], [3], [4].

3.1.2 מסנן Wiener (MMSE)

מסנן וינר מנסה להביא למינימום את השגיאה הריבועית הממוצעת שבין התמונה המשוחזרת והתמונה המקורית.

- א. התמונה נבנתה ע"י תהליך אקראי סטנציונרי.
- ב. ממוצע התמונה הוא אפס (המגבלה אינה קשה משום שביתן בקלות להחסיר הממוצע).

הביטוי המתקבל (ראה למשל [2] פרק 5) נתון במונחים של $H(x,y)$ היא פ' הטשטוש ופונקציות האוטוקורלציה של התמונה ושל הרעש. מאחר והתמרת פורייה של פ' האוטוקורלציה היא הצפיפות הספקטרלית, מתקבל הביטוי הבא עבור מסנן השיחזור:

$$H_R(u, v) = H_W(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \left(\frac{P_N(u, v)}{P_F(u, v)}\right)} \quad (3.5)$$

כאשר:

- $H^*(u, v), H(u, v)$ - פונקציות הטשטוש הדו-מימדית והצמוד שלה.
- $P_N(u, v)$ - פונקציות הצפיפות הספקטרלית של הרעש.
- $P_F(u, v)$ - פונקציות הצפיפות הספקטרלית של התמונה.

נוסחת השיחזור תהיה:

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) \cdot H_R(u, v) \quad (3.6)$$

ניתן מיד לראות שכאשר הרעש שואף לאפס המסנן הופך למסנן ההופכי שתואר ב-3.1.1.

יתרונות השיטה:

1. אין חשש מערכים במוכים של $H(u, v)$ משום שהגורם $\frac{P_N(u, v)}{P_F(u, v)}$ מונע את איפוס המכנה.
2. המסנן מביא בחשבון הן את סטטיסטיקת הרעש והן את סטטיסטיקת התמונה ובכך מתאים את עצמו לטיפול ברעש בכל תמונה ותמונה.

מגבלותיה:

1. יש צורך להכיר במדויק את $H(u, v), P_N(u, v), P_F(u, v)$.
2. התמונה איננה ת"א סטציונרית בהתאם להנחה ולכן השיחזור לא תמיד נעים לעין.

בגלל המגבלה הראשונה, ומאחר ש-

$$\frac{P_N(u, v)}{P_F(u, v)} = (SNR)^{-1} \quad (3.7)$$

פוחח קירוב למסנן וינר המניח יחס אות לרעש קבוע - K בכל תחום התדרים ומקל במעט את הדרישות לגבי ידע מוקדם לצורך תהליך השיחזור, נוסחת השיחזור נראית כך:

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) \cdot \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K} \quad (3.8)$$

ישנן הרחכות ונגזרות רכות מאד למסנן וינר ואת רובן ניתן למצוא בספרות הקלאסית העוסקת בנושא. נזכיר כאן את הדיווח של Berriel et al [2 C] שבו השתמשו ב-(3.8) ומוכאות בו מספר רב של דוגמאות עבור ערכים שונים של K.

3.1.3 מסנן הומומורפי

הסינון ההומומורפי או Power Spectrum Equalization הוצע לראשונה ע"י Cole [7] ושוכלל ע"י Cannon [8]. המסנן ההומומורפי מנסה להשוות את ספקטרום ההספק של התמונה הנתונה P_g לספקטרום ההספק של התמונה המקורית P_f (פיתוח מלא ניתן למצוא ב-[8] או [3]).

כהתאם לדרישה זו מתקבל מסנן השיחזור:

$$H_R(u, v) = \left| \frac{P_f(u, v)}{P_g(u, v)} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

נציב עבור P_g :

$$P_g(u, v) = |H(u, v)|^2 P_f(u, v) + P_n(u, v) \quad (3.10)$$

ומכאן:

$$H_R(u,v) = H_H(u,v) = \left| \frac{P_f(u,v)}{|H(u,v)|^2 P_f(u,v) + P_n(u,v)} \right|^{1/2} \quad (3.11)$$

מאחר ש- P_f לא נתון, לוקחים את P_p שהוא דגם אב טיפוס עבור ספקטרום לתמונות מהסוג שיש לשחזר.

יתרונות השיטה:

1. כאשר הרעש שואף לאפס המסנן הופך להיות מסנן הופכי (ללא אינפורמציה הפאזה).
2. כאשר $|H(u,v)|$ שואף לאפס המסנן שואף לערך קבוע שהוא $\frac{P_f(u,v)}{P_n(u,v)}$ ולא לערכים אינסופיים או לאפס.

חסרונות השיטה:

1. במידה ומעונינים בשחזור מדויק הכולל אינפורמציה של הפאזה של $H(u,v)$ (כפי שמוצע ב-[8]) יש להכיר את $H(u,v)$ במדויק ולא את P_f בלבד.
2. דגם אב הטיפוס אינו יכול להיות מדויק לעולם ולכן תוצאת השחזור אינה מדויקת לפרטים.

פירוט נוסף ותוצאות ניתן למצוא בנוסף למקורות שהוזכרו עד עכשיו גם ב-[10] ו-[11].

3.2 שיטות אינטראקטיביות

שיטות אינטראקטיביות הן שיטות שבהן מבצעים מספר רב של שחזורים בשיטה מסוימת וקבועה אך בשינוי פרמטרים כאשר האדם הצופה בתוצאות השחזור הוא אשר סוגר את החוג ומשנה את הפרמטרים.

Boulter (1979) מתאר ב-[19] מערכת לשחזור תמונות לפי מסנן ויבר עבור 16 מקרים בסביבות הערך המשוערך של הפרמטר הקובע עבור ה-PSE

כאשר לאחר מכן בוחנים איזו תוצאה מבין ה-16 נאה יותר לעין וממשיכים הלאה. Berriél et al (1983) מחאר ב-[21] מערכת דומה מאד כאשר נוסחה השיחזור היא (3.9) ומשנים גם את K בתור פרמטר.

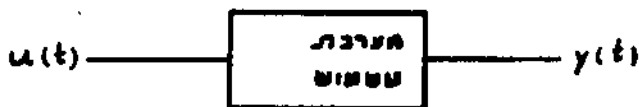
ככלל ניתן לאמר שהשיטות האינטראקטיביות באות למלא את החסר במקום שבו לא ניתן לזהות את ה-PSF ואין דרך אחרת אלא לבצע מספר ניסויים. מובן שלא ניתן למנות שיטה זו בין השיטות החסכוניות בזמן חישוב.

3.3 שיטות חדשניות לשיחזור

בסעיף זה נביא מספר דוגמאות נבחרות לשיטות שיחזור שהן פרי מחקר של השנים האחרונות. עבור כל אחת מהשיטות יוסבר הרעיון העומד בבסיס השיטה.

3.3.1 שימוש בטכניקות של בקרה אופטימליות לשיחזור

כשני מאמרים [24] (1980) ו-[25] (1983) מדווח Thomas על שיטת השיחזור שפיתח. ההנחה היא שהמערכת שגרמה לטשטוש ידועה וניתנת לתיאור ע"י מודל, אולם הסיגנל המקורי אינו ידוע.

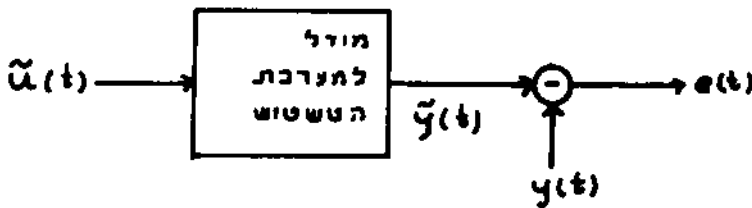


ציור 3.1 - מודל למערכת הטשטוש

Fig. 3.1 - A model of the blurring system

$y(t)$ - אות מוצא (תמונה מטושטשת).
 $u(t)$ - אות מקור (תמונה מקורית) - בלתי ידוע.

המערכת המוצעת לשיחזור היא בהתאם לציור 3.2.



ציור 3.2 - מערכת השיחזור המוצעת

Fig. 3.2 - Proposed restoration system

כאשר:

$e(t)$ - שגיאת השיחזור

$\tilde{u}(t)$ - אות כניסה משוערך.

במערכת זו מתארים מודל ("ע"י משוואות מצב) למערכת הטשטוש ומנסים לגלות מהו האות המדובר $\tilde{u}(t)$ שיביא למינימום את השגיאה $e(t)$ ביציאה. הבעיה כאן הופכת לבעיית עקיבה המוכרת מתורת הבקרה האוטומטית.

ב-[24] או [25] אין התייחסות לנושא הרעש (והרעש גם לא מופיע במודל). נציין שיש צורך להכיר את $h(x,y)$ בצורה מדויקת.

3.3.2 שימוש במודל לתמונה ובכיוע שיחזור איטרטיבי

השיטות האיטרטיביות לשיחזור הן אמנם בזכזניות מבחינת זמני חישוב אך בעלות עצמה רבה. עדיפותן הרבה היא בכך שניתן להציג אילוצים שונים לגבי התוצאות תוך כדי התהליך וכן ניתן לטפל בתמונה בעלת מודל לא קבוע במרחב או בטשטוש המשתנה במרחב.

משפחת שיטות השיחזור שנחאר בתת-סעיף זה כוללת הנחת מודל מסוים לתמונה וידע כלשהו לגבי פונקציית הטשטוש.

מודל התמונה:

$$f(m,n) = \sum_{k,\ell} C_{k\ell}(\theta(m,n)) f(m-k,n-\ell) + w(m,n) \quad (3.12)$$

כאשר:

- $f(m,n)$ - התמונה המקורית.
- $\theta(m,n)$ - מ"א המייצגים את מודל התמונה.
- $C_{k\ell}(\theta(m,n))$ - המקדמים המתאימים לכל נקודה בתמונה.
- $w(m,n)$ - רעש לבן עם פילוג $N(0, \sigma_w^2)$.

מודל הטטטוש:

$$g(m,n) = \sum_{i,j} h(i,j) f(m-i, n-j) + v(m,n) \quad (3.13)$$

כאשר:

- $h(i,j)$ - פונקציית הטטטוש.
- $v(m,n)$ - רעש לבן עם פילוג $N(0, \sigma_r^2)$ ב"ח ב- $w(m,n)$.

ב-[26] ו-[28] מוצעים מודלים קצת יותר פשוטים ודטרמיניסטיים הבעיה היא שנוכחות רעש בתהליך השיחזור שלהם גורמות לתוצאה גרועה. ב-[27] היה נסיון להוריד את השפעת הרעש ע"י מסנן מעביר נמוכים אך הוא לא עלה יפה (משום שנעשה טטטוש נוסף ע"י כך).

שתי גישות דומות מבטיחות תוצאות טובות יותר. שתי הגישות מניחות שמודל התמונה הוא סטוכסטי ומשתנה במרחב. בשתי הגישות יש תחילה לשערך את המקדמים $C_{k\ell}(\theta)$ עבור כל נקודה בתמונה ואחרי כן להפעיל תהליך שיחזור. תהליך השיחזור בגישה הראשונה [51] הוא על בסיס מסנן קלמן והמחברים פותרים את הבעיה ע"י שימוש ב-Reduced Update Kalman Filter (על מימוש נוסף בעזרת מסנן קלמן ניתן לקרוא ב-[30]).

בהתאם לדיווח ב-[31] מתקבלות תוצאות טובות גם עבור רמות SNR נמוכות יחסית.

תהליך השיחזור בגישה השניה [29] הוא פיתוח של [26], [27] ו-[28] ומתבסס על מערכת המשוואות (3.14). בכל צעד משערכים תחילה תמונת ביניים \tilde{f}_k בהתאם למודל (3.12) - ראה משוואה (3.14a) מתמונת ביניים זו מחסירים גודל המסומן $[g-h*\tilde{f}_k]$ והוא יחסי להפרש שבין התמונה המטושטשת לכין התוצאה המתקבלת ממודל הטשטוש (3.13) על סמך תמונת הכיבניים. השיערוך ב-(3.14a) הוא על סמך התוצאה מהצעד הקודם.

$$\tilde{f}_k(i, j) = C_{k\ell}(\theta(i, j)) * \tilde{f}_{k-1}(i, j) \quad (3.14a)$$

$$\tilde{f}_k(i, j) = \tilde{f}_k(i, j) - \lambda_k [g(i, j) - h(i, j) * \tilde{f}_k(i, j)] \quad (3.14b)$$

כאשר:

- λ_k - מקדם האיטרציות - מחושב בנפרד.
- \tilde{f}_k - התמונה המשוחזרת בצעד k.
- \tilde{f}_k - תמונת הביניים המשוערכת מצד k-1 לצעד k.

בהתאם לדיווח ב-[29] התוצאות עבור SNR נמוך טובות בהרבה מתוצאות קודמות, למשל [28]. בזכיר כאן שיטה איטרטיבית נוספת [23] שבה הצליחו לפי הדיווח להתגבר על הרעש במידה מסוימת ע"י העברת תמונות הביניים המתקבלות בכל צעד זרך מסנן מדיאני.

מגבלות השיטה:

1. יש צורך להכיר את ה-PSF כמדויק.
2. יש צורך לשערך מודל התמונה.
3. השיטה בזבזנית בדרישות החישוב שלה לעומת אלגוריתמים לא איטרטיביים.

יתרונות השיטה:

1. הודות לתהליך האיטרטיבי ניתן להתגבר במידה מסוימת על בעית הרעש.
2. מופעל מודל אדפטיבי לתמונה.
3. קיימת אפשרות לעבוד עם פונקצית טשטוש המשתנה כמרחב.

3.3.3 שיטה רקורסיבית לשיערוך פרמטרים ושיחזור [32]

המודל הרגיל לתאור הטשטוש מתאר בנאמנות את ה-PSF אך לא מאפשר זיהוי של מרכיביו בקלות. המחברים מציעים מודל חדש לתהליך הטשטוש המבוסס על מערכת המשוואות הבאה:

$$g(i,j) = \theta(i,j) + n(i,j) \quad (3.15a)$$

כאשר:

$$\theta(i,j) = \sum_k \sum_\ell h(k,\ell) \cdot \theta(i-k,j-\ell) + f(i,j) \quad (3.15b)$$

כאשר:

- $f(i,j)$ - תמונה מקורית
- $g(i,j)$ - תמונה מטושטשת ורועשת
- $n(i,j)$ - רעש אדיטיבי
- $h(i,j)$ - פונקצית הטשטוש

מודל זה נותן ביטוי לתהליך הטשטוש אך הוא סיבתי ולכן יש להבינו כאילו הופעל פעמיים (פעם k, ℓ עולים ופעם יורדים).

המחברים מציעים סט משוואות רקורסיביות לשיחזור התמונה בהתאם למודל שתואר. פירוט ניתן למצוא ב-[32].

לתרונות השיטה:

1. מכנה פשוט ולא יקר מבחינה חישובית.

2. אין צורך להכיר את $h(x,y)$ והוא משוערך תוך כדי תהליך השיחזור.

חסרונותיה:

אין השיטה בנויה לעבודה בתנאי רעש.

3.4 סיכום ומסקנות

מתוך הסקר שערכנו ניתן לסווג את השיטות השונות בהתאם לקריטריונים הבאים:

א. איטרטיביות או לא איטרטיביות - מרבית השיטות החדשניות הן איטרטיביות. היתרון הגדול של שיטות מסוג זה הוא שניתן להכניס אילוצים שונים בתהליך השיחזור בין איטרציה אחת לשניה וע"י כך לגרום לשיפור הביצועים.

ב. מחיר - השיטות האיטרטיביות הן הרבה יותר "יקרות" מהשיטות הלא-איטרטיביות.

ג. יכולת השיחזור וטיפול ברעש - בדרך כלל ניתן לאמר שיכולת השיחזור טובה יותר עבור השיטות האיטרטיביות החדשניות וזאת מהסיבה שהוזכרה ב-א. גם היכולת לטפל בתמונות רועשות טובה יותר עבור משפחה זו אך רק עבור אותן שיטות המבליאות בחשבון את הרעש במודל יצירת התמונה.

ד. הצורך בידע מוקדם לגבי ה-PSF - מסתבר שרוב השיטות המוכרות לנו דורשות ידע מוקדם מדויק למדי לגבי ה-PSF. השיטה היחידה שהובאה כאן (סעיף 3.3.3) ואינה דורשת ידע מוקדם כלשהו אינה טובה לשיחזור בתנאי רעש (המחבר אינו מכיר שיטה נוספת שאינה דורשת שום ידע מוקדם).

מסקנות:

המסקנה העולה מכך היא שאם ברצוננו לאפשר שיחזור נאות של תמונה ואיננו רוצים לשלם מחיר יקר מדי (כמו בשיטות האינטראקטיביות), עלינו לזהות את פרמטרי ה-PSF מתוך התמונה הנתונה. הדבר נכון ביחוד עבור תמונות רועשות.

4. שיטות לזיהוי פרמטרים של ה-PSF או OTF

כפי שראינו בפרק הקודם, זיהוי ה-PSF מתוך התמונה המטושטשת הוא במרבית המקרים הכרחי לטובת תהליך השיחזור. בפרק זה נסקור את מרבית שיטות הזיהוי הקיימות. הסקירה המקפת העיקרית בנושא נמצאת ב-[3], פרק 5.1.

4.1 שיטות לזיהוי במרחב התמונה

4.1.1 זיהוי מתוך פרטים בתמונה

אחת השיטות המוצעות ב-[3] היא לבדוק את השתנות רמות האפור בתמונה בנקודות שבהן ידוע שקלים מעבר חד או שקיימת נקודת אור בודדת. מתוך השרטוט של השתנות רמות האפור בתלות במרחק (לעומת המעבר החד שהיה צריך להיות) ניתן ללמוד על מידת הטשטוש שחלה ולמעשה למדוד את ה-PSF.

מובן שתהליך כזה הוא תהליך אינטראקטיבי וכן רגיש מאד לתנאי רעש. ב-[33] (1982) מציעים המחברים טכניקה חדשה הכוללת:

- א. החלקה ע"י מסנן מדיאנלי (תכונותיו העיקריות הן שימור קצוות והורדת רעש).
- ב. חיפוש קוים בולטים בתמונה.
- ג. סריקה בניצב לקוים הבולטים שבתמונה ונסיון לשחזר את ה-PSF מתוך רמות האפור המתקבלות בסריקה זו.

גם תהליך זה רגיש לרעש ותלוי במידה רבה ביכולתו ומיומנותו של המפעיל לבחור את הקוים הנכונים בתמונה.

4.1.2 התאמת פ' האוטוקורלציה למודל

ב-[15] מניחים המחברים שניתן לחאר את פ' האוטוקורלציה החד-מימדית של תמונה בהתאם למשוואה הבאה:

$$F_f(i) = E_o e^{-\alpha|i|} \quad (4.1)$$

כאשר α קבוע האופיני לתמונה המקורית f .

מאחר שניתן לחאר את הטשטוש ע"י:

$$g = f * h \quad (4.2)$$

אזי:

$$R_g(i) = R_f(i) * R_h(i) \quad (4.3)$$

אם ידוע לנו מהו α עבור התמונה המקורית f (וזאת למשל מתוך תמונת אב-טיפוס) אזי ניתן לבדוק במה השתנה R_g לעומת R_f ומכאן למצוא את הפרמטרים של h .

המגבלה העיקרית של שיטה זו היא המודל שאיננו תמיד מתאים לתמונה ולכן לא ניתן לקבל את h בצורה מדויקת. בנוסף לכך רגישה השיטה לרעש.

4.1.3 התאמת התמונה ופונקציית הטשטוש למודל מסוג ARMA

שיטה זו מוצעת ב-[34] (1984). לטענת המחברים תמונה שעברה טשטוש ניתנת לתיאור ע"י מודל ARMA (Auto Regressive Moving Average) כאשר התמונה לבדה ניתנת לתיאור ע"י תהליך מסוג AR (משוואה (4.4)).

ואילו הטשטוש ניתן לתיאור כמערכת מסוג MA (משוואה (4.5)). המחשה של המודל ניתן לראות בציור 4.1.

מודל התמונה:

$$f(m,n) = \sum_{k,\ell} C_{k\ell} f(m-k, n-\ell) + w(m,n) \quad (4.4)$$

מודל הטשטוש:

$$g(m,n) = \sum_{i,j} h(i,j) f(m-i, n-j) + v(m,n) \quad (4.5)$$

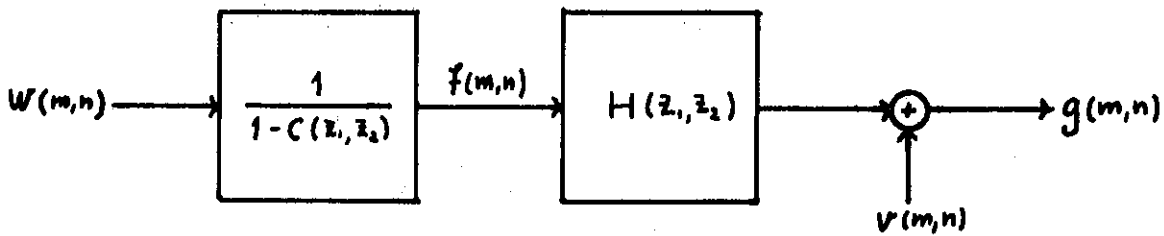
כאשר:

f - התמונה המקורית.

g - התמונה המטושטשת

h - התגובה להלם של ה-PSF

v, w - רעשים לבנים ב"ת בעלי ממוצע 0 ופיזורים σ_v^2 , σ_w^2 בהתאמה.



ציור 4.1 - מודל ARMA לתמונה מטושטשת

Fig. 4.1 - An ARMA model for the blurred image

כעת מציעים המחברים להשתמש בטכניקה של זיהוי מערכת כדי לקבל את הקטבים* והאפסים המתאימים. בשים לב שמן המודל עולה שהאפסים הם חרומת פונקצית הטשטוש מה שמתאים לתיאור בפרק 2. המחברים מציעים שיטה לשיערוך ML (Maximum Likelihood) של פרמטרי המודל בתחום המרחב עבור תמונות עם SNR גבוה. עבור תמונות עם SNR יותר נמוך השיטה המוצעת היא בתחום התדר.

השיטה היא חדשנית וטרם נבדקה על תמונות אמת אלא על תמונות שעברו טשטוש ע"י המחשב. במאמר [34] מדווח על נסיונות זיהוי בתמונות רועשות עם SNR של עד 10db (מינימום).

4.2 שיטות לזיהוי במרחב התדר

בהתאם לסעיפים 2.2.1 ו-2.2.2 ניתן לראות שעבור פונקציות טשטוש מסוג 'motion blur' או מסוג 'defocus blur' הספקטרום המתקבל מכיל אפסים מחזוריים או כמעט מחזוריים בהתאמה.

עבור טשטוש של תנועה ליניארית מתקבלים אפסים בהתאם ל:

$$H(f) = \text{Sinc} \left(\frac{\pi}{N} df \right) \tag{4.6}$$

דהיינו במרווחים של $\frac{N}{d}$ כאשר: d - המרחק שהתמונה "עברה" במשך זמן החשיפה בציר X.

N - אורך הווקטור לבצוע DFT. (במישור התדר הנקודה $\frac{N}{2}$ מתארת את מחצית תדר הדגימה).

עבור טשטוש מסוג יציאה ממוקוד מתקבלים אפסים בהתאם ל-

$$H(r) = \frac{J_1(2\pi Rr)}{\pi Rr} \tag{4.7}$$

* פאזיט מלא המקרה החד-צדדי לזיהוי סכאן מוגבר של סגוליות

להילינו במרווחים כמעט מחזוריים בהתאם לפ' בסל של בערך $3.2 \frac{N}{2\pi R}$

כאשר:

N - אורך וקטור ה-DFT

R - רדיוס הטשטוש

r - המרחק מהראשית בציר התדר.

במאמר הבסיסי מ-1973 מציע Gennery [5] לזהות את האפסים ישירות מתוך הספקטרום של התמונה. מאחר שהספקטרום המתקבל היה בעל תחום דינמי נרחב למדי (בגלל שרוב האנרגיה נמצאת באיזור ה-dc), הקשה הדבר על זיהוי האפסים. הפתרון המוצע ב-[5] הוא "הלבנת" הספקטרום ע"י גזירה במרחב התמונה. האופרטור המוצע הוא האקוילובנט של

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2}$$

דהילינו: $\begin{matrix} -1 & & -1 \\ -1 & 4 & -1 \\ -1 & & -1 \end{matrix}$ וזה מוריד את ה-dc.

בנוסף, מציע המחבר להכפיל בחלון לפני המעבר לספקטרום כדי למנוע את אפקט הקצוות.

הבעיה בשיטה זו היא כפולה:

- א. השיטה רגישה מאד לרעש שממסך את האפסים בתחום התדר.
- ב. ספקטרום התמונה אינו תמיד חלק ועלול לתרום אפסים משלו בנוסף לאפסים שהם תרומת ה-blur.

בנוסף לכך לא ניתן לזהות את האפסים בדיוק מספיק טוב.

במאמר מ-1977 [15] מציעים המחברים שלב נוסף לעיבוד האינפורמציה בתחום התדר. לאחר חישוב הספקטרום הם מציעים להשוותו לסף הנתון בנוסחה הבאה:

$$\epsilon(f) = \frac{\epsilon_0}{\sqrt{1 + \alpha f}} \tag{4.8}$$

כאשר α - פרמטר תלוי תמונה, ϵ_0 - מקדם.

הסך $\epsilon(f)$ מקבל ערך גבוה בתדרים שבהם עוצמת הספקטרום גבוהה וערך נמוך בתדרים שבהם עוצמת הספקטרום נמוכה. בצורה זו ההסתברות למעבר סף בתדרים שבהם הספקטרום צריך להתאפס (בגלל פונקציה הטשטוש) שווה בכל תחום התדרים.

המחברים מבצעים מספר ניסויים ולאחר מכן עושים מיצוע. עבור טשטוש עקב תנועה ליניארית נדרש למצע בערך 30 עד 50 שורות כדי לקבל זיהוי טוב.

גם שיטה זו רגישה לרעש וזוהי מגבלתה העיקרית.

4.3 שיטות לזיהוי ה-PSF במרחב הקפסטרום

בפרק זה נסקור שתי שיטות לזיהוי ה-PSF. שיטה ראשונה שהוצעה ע"י Cole [7] ב-1973 הכוללת למעשה עבודה במישור ה-log-spectrum ושיטה שניה שהוצעה ע"י Cannon [8], [10] ב-1974 וכוללת מיצוי פרמטרים במישור ה-Cepstrum. הסיבה ששתי השיטות נכללות בפרק זה היא הקשר התיאורטי שביניהן והזיקה ההדדית שבין העבודות [7] ו-[8].

ניתוח מפורט והגדרות של עבודה במישור הקפסטרום ניתן למצוא ב-[13] וכן ב-[12]. פירוט נוסף לגבי שתי השיטות ניתן למצוא ב-[11].

4.3.1 זיהוי במישור ה-log-spectrum

סעיף זה מכוסס על עבודתו של Cole [7] מ-1973. (ראה גם [11] 1975). הפיתוח הראשוני מתעלם מהרעש האדיטיבי שבמודל הטשטוש. מודל הטשטוש יהיה איפוא:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) \quad (4.9)$$

הדרישה היא שאורך ה-PSF יהיה קטן מאד לעומת אורך התמונה ולא ישתנה במרחב. מחלקים את התמונה ל-Q תת-תמונות (אפשר חופפות) ואז מאחר ש-h(*) בלתי משתנה במרחב מתקבל עבור כל תת תמונה

$$g_k \approx f_k * h \tag{4.10}$$

בתחום התדר ניתן לכתוב:

$$|G_k| e^{j\angle G_k} \approx |F_k| e^{j\angle F_k} \cdot |H| e^{j\angle H} \tag{4.11}$$

על מנת להפריד בין $f(\cdot)$ ל- $H(\cdot)$, ניקח את הלוג הקומפלכסי של (4.11) ונקבל:

$$\log |G_k| \approx \log |F_k| + \log |H| \tag{4.12}$$

$$\angle G_k \approx \angle F_k + \angle H$$

אם נמצע את (4.12) ע"פ כל תת-התמונות ונקבל מיצוע של F_k ו- G_k אך לא של H (בלתי משתנה במרחב):

$$\frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q \log |G_k| \approx \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q \log |F_k| + \log |H| \tag{4.13}$$

וההנחה היא שהזוית מתמצעת לאפס.

מחברים שונים וגם Cole מצאו שפונקציות האוטוקורלציה של תמונות שונות מתנהגות בצורה דומה מאד (גם אם התמונות שונות מאד במקורן). לכן המסקנה היא שכמעט תמיד כאשר מחלקים את התמונה לקטעים וממצעים כפי שעשינו מקבלים תוצאה דומה.

מסיבה זו נגדיר אב-טיפוס של ממוצע לוג הספקטרום ונסמנו ב- $\log |P|$

ומכאן:

$$\frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q \log |G_k| \approx \log |P| + \log |H| \quad (4.14)$$

או

$$|H| \approx \exp \left\{ \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q \log |G_k| - \log |P| \right\} \quad (4.15)$$

מובן מתוך התהליך שתוספת רעש אינה מאפשרת עוד הפרדה וחילוף של $|H|$ משום שבמקום (4.10) נקבל:

$$g_k = f_k * h + n_k \quad (4.16)$$

ובמקום (4.12) נקבל:

$$\log |G_k| = \log |F_k \cdot H + N_k| \quad (4.17)$$

ומאחר ופעולת ה-log איננה ליניארית, אין הרעש "מתמצע" ולהפך - עלול לגרום לתופעות לוואי בלתי צפויות.

בעבודתו קיבל Cole תוצאות טובות עבור תמונות עם SNR מעל 20db.

4.3.2 שיטת זיהוי במישור הקפסטרום

סעיף זה מבוסס על עבודותיו של Cannon [8] (1974), [10] (1976), [11] (1975). הגדרות מפורטות וניתוח התנהגות של אותות בתחום הקפסטרום ניתן למצוא ב-[12], [13] ו-[14].

הגדרת הקפסטרום הממשי:

$$C_b(p,q) = F^{-1} \{ \log |B(u,v)| \} \quad (4.18)$$

כאשר:

$$C_b(p,q) - \text{הקפסטרום הדו-מימדי של האות } b(x,y)$$

$$B(u,v) - \text{הספקטרום הדו-מימדי של האות } b(x,y)$$

$$F^{-1} - \text{התמרת פורייה הפוכה.}$$

לשם הפיתוח נזנחה תחילה את הרעש והמודל יהיה לכך בהתאם ל-(4.9).
כעת ניקח את הקפסטרום של שני צידי המשוואה:

$$C_g(p,q) = F^{-1} \{ \log |F \{ f(x,y) * h(x,y) \}| \} \quad (4.19)$$

$$= F^{-1} \{ \log |F(u,v) \cdot H(u,v)| \}$$

$$= F^{-1} \{ \log |F(u,v)| + \log |H(u,v)| \}$$

$$= F^{-1} \{ \log |F(u,v)| \} + F^{-1} \{ \log |H(u,v)| \}$$

$$= C_f(p,q) + C_h(p,q)$$

לפי Rom [9] האפסים המחזוריים (כמעט) של $H(u,v)$ מובילים לשיאים שליליים חזקים מאד ב- $C_h(p,q)$. במקרה של motion blur מופיעים האפסים של $H(u,v)$ במרווחים של $1/d$ (כאשר d אורך ה-blur). הדבר יגרום להופעת שיא שלילי חזק במרחק d מהראשית ב- $C_h(p,q)$. עבור out-of-focus blur מופיעים האפסים של $H(u,v)$ במעגלים קונצנטריים במרווחים בהתאם ל- $J_1(\cdot)$ (ראה סעיף 2.2.1) ודבר זה גורם להופעת טבעות קונצנטריות של שיאים שליליים ב- $C_h(p,q)$.

בהתאם לנסיובו של Cannon, קשה מאד לזהות את השיאים השליליים כאשר לתמונה מתוסף רעש. אם בוססף רעש למודל הטשטוש, נקבל ששוב לא ניתן להפריד את $h(x,y)$ מתוך התמונה. במקום (4.9) נקבל:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \quad (4.20)$$

ובמקום (4.19) נקבל:

$$\begin{aligned} C_g(p,q) &= F^{-1} \{ \log |F \{ f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \}| \} \quad (4.21) \\ &= F^{-1} \{ \log |F(u,v) \cdot H(u,v) + N(u,v)| \} \end{aligned}$$

וכעת פעולת ה-log (הלא ליניארית) עלולה לגרום לתופעות לוואי בלתי רצויות.

מסיבה זו ניסה Cannon לשפר את ה-SNR ע"י מיצוע. הוא הניח שאותות התמונה והרעש הם דגמים של ת"א סטציונרי ואז ניתן לבטא את (4.20) במובחי ספקטרום ההספק.

$$\Phi_g(u,v) = \Phi_f(u,v) \cdot |H(u,v)|^2 + \Phi_n(u,v) \quad (4.22)$$

הדרישה היא שאורך (קוטר) ה-PSF יהיה קטן מאד לעומת מימדי התמונה. כעת מנסים לשערך את $\Phi_g(u,v)$ בהתאם להצעתו של Welch [38]: מחלקים את התמונה להרבה תת-תמונות $g_i(x,y)$ שכל אחת מהן מספיק גדולה כדי להכיל בתוכה את $h(x,y)$, מעבירים כל תת-תמונה דרך חלון כדי למנוע את אפקט הקצוות, מחשבים את ספקטרום ההספק שלה וממצעים על פני כל התת-תמונות.

עבור כל קטע מחקבל:

$$g_i(x,y) = f_i(x,y) * h(x,y) + n_i(x,y) \quad (4.23)$$

ובסה"כ לאחר מיצוע ריבוע האמפליטודות השערורך הוא:

$$\Phi_g(u,v) = \overline{\Phi_f(u,v)} \cdot |H(u,v)|^2 + \overline{\Phi_n(u,v)} \quad (4.24)$$

ניתן להביח:

1. $\Phi_n(u,v)$ שהוא הספקטרום הממוצע של קטעי הרעש, שואף לערך קבוע על פני כל תחום התדרים (אם מניחים רעש לבן) כל שמספר התחנות גדל.

2. $\Phi_f(u,v)$ שואף לערך קבוע והספקטרום הממוצע אינו דומה כלל לספקטרום של התמונה המקורית בגלל השוני בין קטעי התמונה.

נגדיר כעת:

$$C'_g(p,q) = F^{-1} \{ \log \Phi_g(u,v) \} \quad (4.25)$$

מתוך (4.22) ובהזנחת הרעש:

$$C'_g(p,q) = C'_f(p,g) + 2C'_h(p,g) \quad (4.26)$$

מאחר שהאפסים של פונקציית הטשטוש מופיעים באמפליטודה של הספקטרום הרי שכל השיאים השליליים הנובעים מהם במישור הקפסטרום באים לידי ביטוי בצורה חזקה כ- C'_g ולכן רואים שאין צורך לחשב קפסטרום קומפלכסי ותהליך המתואר במשוואות (4.22) עד (4.26) מספק.

בהתאם לבסיונו של Cannon [8], יש לבצע את השיערוך של $\Phi_g(u,v)$ על פני 20 תת-תמונות לפחות ואז הדבר מאפשר זיהוי של ה-PSF. אם עושים מיצוע על פני 100 תת-תמונות לפחות [10], הדבר מאפשר זיהוי חד משמעי ואוטומטי.

אין התליחסות ב-[8] או ב-[10] לנושא הרעש בהקשר לתוצאות שהתקבלו מעבר למה שנאמר עד עכשיו.

מגבלות השיטה:

1. נדרש מספר מיצועים רב מאד כדי לקבל תוצאות בעלות ערך (מחיר חישובי גבוה).
2. השיטה אינה פועלת היטב בתנאי רעש.

יתרונות השיטה:

השיטה מאפשרת זיהוי פרמטרי ה-PSF עבור תמונות לא רועשות.

דיווח על מימוש השיטה ניתן למצוא ב-[22] (1984).

4.4 סיכום - השיטה הנבחרת

שיטות הזיהוי במישור התמונה וכן שיטות הזיהוי במרחב הספקטרום רגישות מאד לרעש. בנוסף קשה להפעיל עבורן מסנן קדם לסילוק הרעש משום שיש בכך סכנה של סילוק פרטים החיוניים לצורך המשך העיבוד. מעל רמה מסוימת של רעש (SNR די גבוה) לא ניתן להפעיל את השיטות הללו משום שהרעש הופך להיות הגורם הדומיננטי.

מסיבה זו נשארות לבחירתנו שתי השיטות המוצעות בסעיף 4.3. מתוכן שיטת הזיהוי במישור הקפסטרום נראית כשיטה המתאימה ביותר.

- השיטה מספקת אמצעי זיהוי טוב עבור סוגי הטשטוש שאנו נעסוק בהם.
- השיטה אינה דורשת דגם אב-טיפוס הגורר אי דיוקים משלו בהגדרת $H(u,v)$ (כשם שנדרש בשיטת הזיהוי ב-log-spectrum).
- השיטה היא ברורה ובקיה מבחינה מתימטית ולכן ניתן להבין את השפעת הרעש ומתוך כך גם להפחית את השפעתו.
- השיטה היא בעלת פוטנציאל לאפשר זיהוי של פונקציות טשטוש רחבות (וארוכות) המוגבלות באופן מעשי ע"י גודל קטעי התמונה.

להלן נבדוק את צורת ההפעלה של השיטה כפי שהוצעה ב-[8] וב-[10] ובציע דרכים לשיפור הביצועים.

5. תאור שיטת הניסוי

5.1 ציוד ואמצעים

הציוד והאמצעים ששימשו אותנו בעבודה מהווים חלק מתשתית המעבדה לעיבוד אותות בפקולטה להנדסת חשמל בטכניון. הם כללו:

- א. מחשב ECLIPS S/250 (16 סיביות) תוצרת Data General (גודל זכרון 512 KByte).
- ב. ציוד עזר למחשב: - Array Processor (מעבד מקבילי) מותאם למחשב (8 KByte) - דיסק בקיבולת של 192 MByte (קבוע). - דיסק בקיבולת של 5MByte (Removeable). - סרט מגנטי (MAGTAPE).
- ג. צג גרפי (בעל רזולוציה של 1000 X 1000 נקודות תוצרת Genisco) וציוד להעתקת הגרף (Hard-Copy) תוצרת Tektronix ארה"ב.
- ד. מערכת להצגת תמונה תוצרת Ramtek ארה"ב.
- ה. דוגם תמונה תוצרת CVI.

גודל הזכרון המוגבל של המחשב 64Byte למשתמש גרם לכך שכל תוכנית הכוללת עבודה על קובץ תמונה נזקקה קודם כל לקטעי ניהול קבצים על הדיסק וכתוצאה מכך דרשה זמן ביצוע ארוך. העבודה שניתן להשתמש ב-Array Processor סייעה במקצת לקיצור זמן הביצוע. לשם המחשת זמני הביצוע, נביא את הדוגמאות הבאות:

- קריאת וקטור מהדיסק באורך 256 נקודות (Fl. Pt), ביצוע FFT (באורך 256 נקודות) בעזרת ה-Array processor (Array processor) וכתיבת התוצאה לדיסק - 170mSec.
- ביצוע transpose לקובץ (Int.) בגודל 256 X 256 נקודות - 3 min.

התוכנה כולה נכתבה בשפה עילית FORTRAN V וכללה תוכניות שירות רבות לצורך הטיפול בתמונות (FFT דו-מימדי, קובבולוציה דו-מימדית, סינון דו-מימדי וכו').

האותות המתקבלים מתמונות שונות נושאים בדרך כלל אופי שונה. גם אותות המתקבלים מקטעים שונים בתוך אותה תמונה עלולים להיות שונים במאפיינים שלהם בצורה קיצונית. בגלל סיבה זו טרם הוגדרו מדדים אחידים לצורך בדיקה של אלגוריתמים או השוואה בין תמונות שונות. גורם נוסף המקשה מאד על הגדרת מדדים מסוג זה היא העובדה שמערכת הראיה האנושית מעדיפה, בחלק גדול מהמקרים, תמונות מעוותות במקצת או רועשות במקצת על פני תמונות שנבחרו כ"טובות יותר" לפי קריטריון מתימטי זה או אחר.

בהעדר מדד אובייקטיבי באמן, נבחן את האלגוריתמים השונים לפי שיטה השוואתית. נפעיל את האלגוריתמים על תמונה אחת שעברה טשטוש מסוג 'Motion' blur עם $\ell=8$. לאחר השוואת התוצאות נבחר את השיטה הטובה ביותר ונבחן אותה עבור אורכי 'blur' שונים וכן עבור סוג הטשטוש השני - 'out-of-focus'.

הסיבה שבגללה בחרנו $\ell=8$ היא שעבור אורך זה החלוקות $256/\ell$, $128/\ell$ וכו' הן שלמות ולכן מביאות למינימום את התופעות המלאכותיות שבמעבר לתחום התדר, הקפסטרום וכו'.

בסיס המידע שלנו יכלול מספר תמונות עיקריות לביצוע הניסויים ומספר תמונות נוספות להוכחת הביצועים. תמונות המקור הביסיסיות יהיו בדרך כלל תמונות מתוך בסיסי מידע בינלאומיים וזאת על מנת לאפשר חזרה על התוצאות ע"י אחרים. התמונה העיקרית תהיה 'AVIR2' המובאת בציור 5.1. התמונות להוכחת הביצועים יהיו תמונות שהטשטוש שלהן נגרם בצורה פיזיקלית אמיתית. תמונות אלו מובאות בפרק 8.

תוספת הרעש לתמונות מבוצעת לפי יחסי סטיות התקן של התמונה ושל "תמונת" הרעש. כדי לשמור על יחסיות התוצאות לא הצמדנו את התמונה הרועשת לגבולות התחום הדינמי הטבעי של התמונה $[0, 255]$ אלא אפשרנו גלישה מתחת לרמת השחור (ערכים שליליים) ומעל לרמת הלבן (255). בצורה זו ניתן למעשה להוסיף רעש כרצוננו ללא מגבלות של תחום דינמי (מובן שכדי להציג תמונה רועשת כן מגבילים אותה לתחום המדובר).



צילום 5.1 - תמונת המקור 'AVIR2'
Fig. 5.1 - Original image 'AVIR2'

הגדרות 5.3

הגדרת יחס אות לרעש 5.3.1

בספרות מצויות הגדרות שונות ליחס אות לרעש בתמונות. [7] Cole
ו-Cannon [8] מגדירים:

$$SNR_C = 20 \log \left\{ \frac{\text{Peak Signal}}{\text{Peak Noise}} \right\} \quad (5.1)$$

Lim [35], [36] מגדיר:

$$SNR_L = 10 \log \left\{ \frac{\text{Variance of Signal}}{\text{Variance of Noise}} \right\} \quad (5.2)$$

מגדיר: Ghiglia [20]

$$SNR_G = 20 \log \left\{ \frac{\text{Peak Signal}}{\text{RMS Noise}} \right\} \quad (5.3)$$

אנחנו בחרנו בהגדרה (5.2) מהסיבות הבאות:
 - ההגדרה היא סטטיסטית (על פני כל התמונה).
 - זו ההגדרה המחמירה ביותר ביחס להגדרות האחרות (על מנת לקבל SNR בתוך נדרש להוסיף את רמת הרעש הגבוהה ביותר).

5.3.2 סוגי טשטוש והתנהגותם במישורים שונים

Motion Blur .א

כפי שכבר תיארו בסעיף 2.2.2 מאופיין סוג טשטוש זה כקונבולוציה חד מימדית של מלבן עם התמונה.

נניח שאורך המלבן הוא L.

בתחום התדר נקבל שהאמפליטודה (או ספקטרום ההספק) מתאפסת בצורה מחזורית (בציר u בלבד) כאשר מקום האפס הראשון הוא ב-K=N/L והמרווחים בין האפסים הם N/L (N - אורך הווקטור לביצוע ה-FFT).

כאשר עוברים למישור הקפסטרום מתקבלים האפסים המחזוריים של האמפליטודה בספקטרום כפולס שלילי בודד (והמכפלות השלמות שלו) כאשר מרחקו של הפולס מהראשית הוא L=N/N. (כפי שנראה יותר מאוחר בנוסף לפולס הכודד מופיעות גם הכפולות השלמות שלו במרחקים nL מהראשית. n - מספר שלם).

Out-of-focus Blur .ב

כפי שכבר ראינו בסעיף 2.2.1 מאופיין סוג טשטוש זה כקונבולוציה דו מימדית בין מעגל ברדיוס R לבין התמונה.

בתחום התדר מתקבל שספקטרום ההספק מתאפס לאורך מעגלים קונצנטריים ובצורה מחזורית "כמעט" בהתאם לפונקציה:

$$\frac{J_1(xR)}{xR}$$

הרדיוסים שבהם מתקבלים האפסים מתקבלים מתוך האפסים של $J_1(\cdot)$:

$$2\pi fR = 3.83, 7.01, 10.2, 13.3, 16.5, 19.6, \dots \quad (5.4)$$

האפס הראשון מתקבל ב-

$$K = 3.83 \frac{N}{2\pi R} \quad (5.5)$$

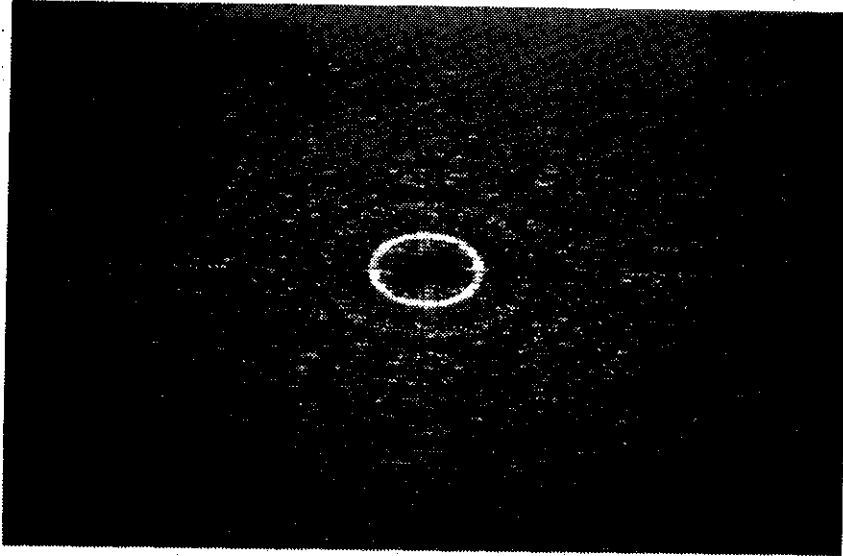
המרווחים בין האפסים יהיו בערך:

$$\frac{N}{2R}$$

כאשר: N - אורך הווקטור לביצוע FFT, R - רדיוס הטטווש.

כאשר עוברים למישור הקפסטרום בותנים המעגלים "הכמעט מחזוריים" של האפסים בספקטרום מעגל שערכו שלילי (ומכפלותיו השלמות) כאשר רדיוס המעגל מסביב לראשית הוא בערך: $N/(N/2R) = 2R$.

בציור 5.2 בתונה תמונת החלק השלילי של מישור הקפסטרום של תמונת המקור לאחר שעברה טטווש מעגלי עם רדיוס $R=8$. המעגלים נראים כבירור.



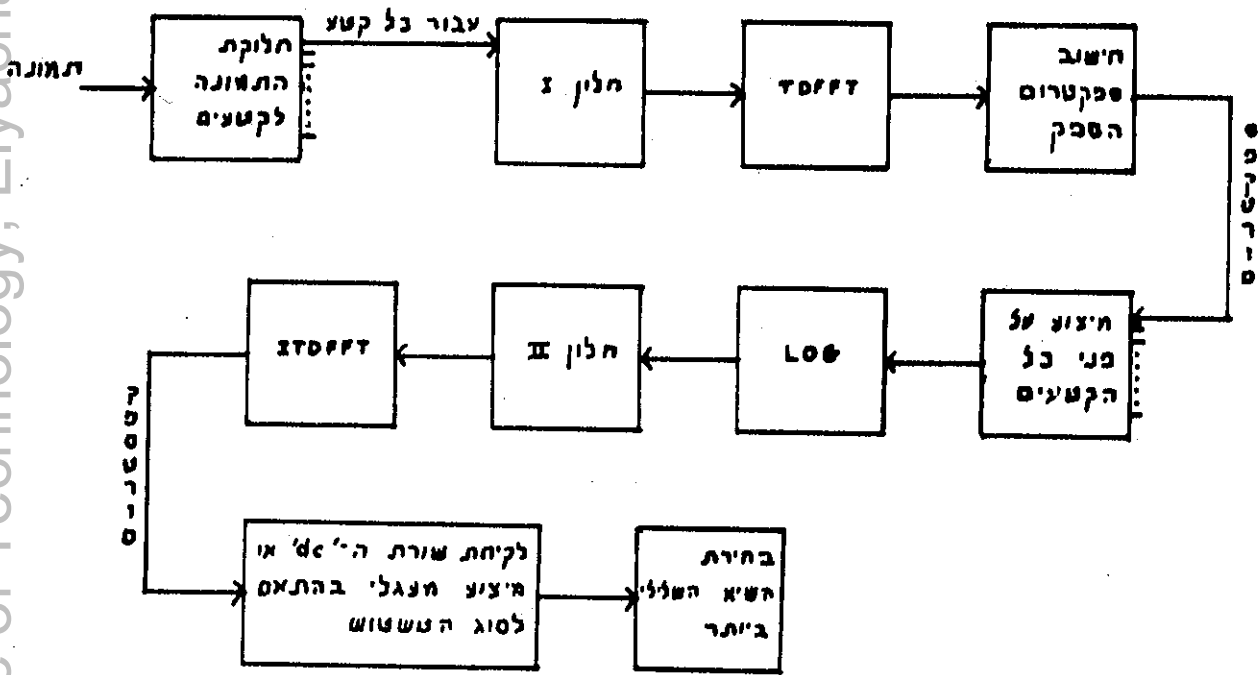
ציור 5.2 - תמונת החלק השלילי של מישור הקפסטרם של התמונה בציור 2.3.

Fig. 5.2 - Image of negative part of cepstrum domain of image in Fig. 2.3

6. שיטת Cannon לזיהוי בקפסטרום - בחינה ושיפורים

6.1 תאור השיטה

השיטה תוארה בפרוטרוט בסעיף 4.3.2. נוסף כאן את דיאגרמת הבלוקים שלה לצורך המימוש. ראה ציור 6.1.



ציור 6.1 - דיאגרמת בלוקים עבור שיטת Cannon לזיהוי במישור הקפסטרום
 Fig. 6.1 - Block diagram for Cannon algorithm for identification in the cepstrum domain

בהתאם ל-[8] מתבצע חיפוש במישור הקפסטרום אחר השיאים השליליים החזקים ביותר. בשלב זה בחרנו לבדוק את היחס שבין עוצמת הפולס השלילי הרצוי (המופיע במקום הנכון עבור blur ידוע) לבין עוצמת הפולס השלילי החזק ביותר שאיננו רצוי (תולדה של רעש, הרמוניות או התמונה עצמה).

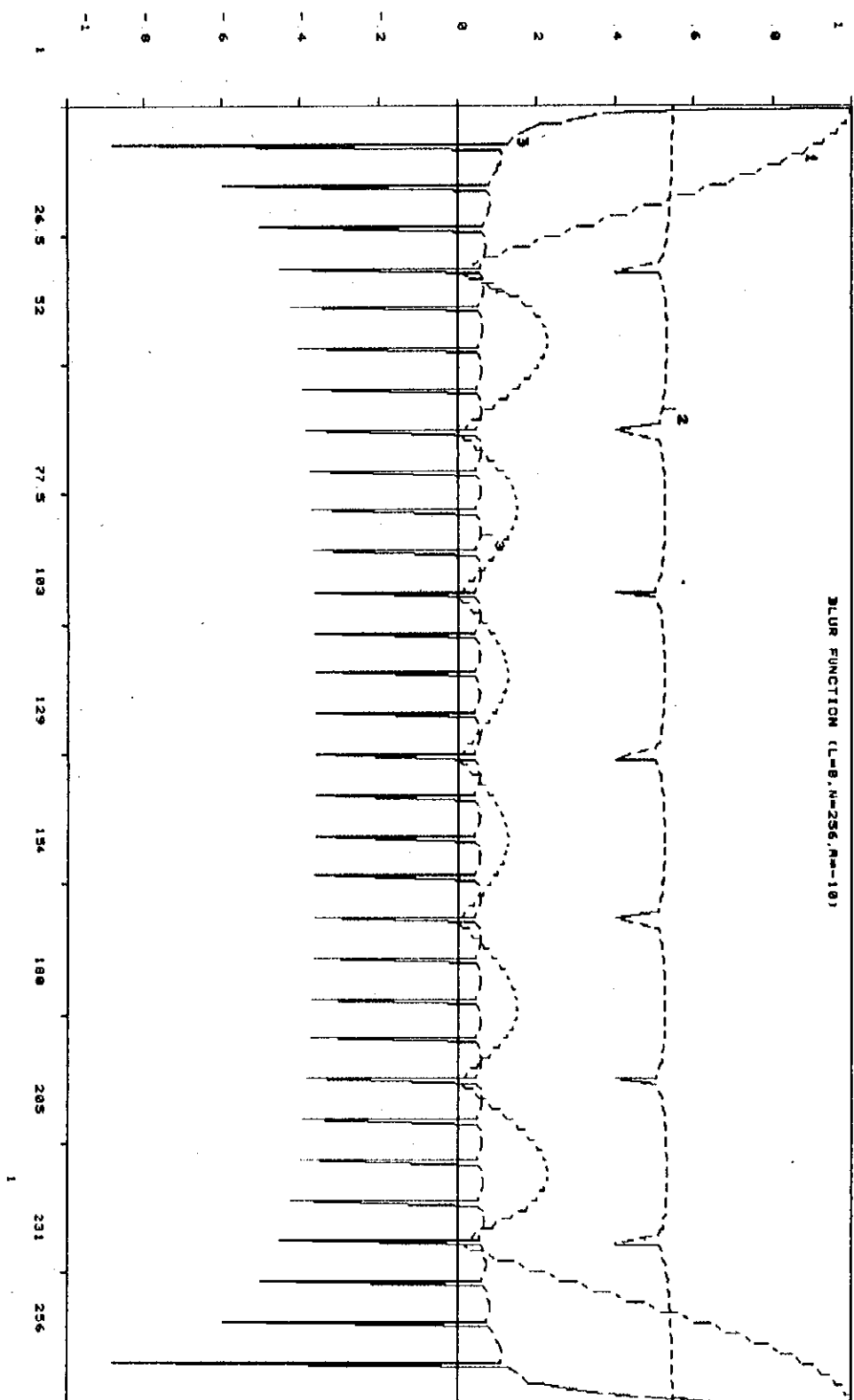
בצורה זו ברור שכאשר היחס הזה נמוך מ-1 חלה טעות בזיהוי פרמטרי הטשטוש.

יש להסביר בנקודה זו שכאשר מבצעים את פעולת ה- \log בחקלים בבעית מימוש והיא איזה ערך לתת לתוצר הפעולה כאשר האות בכביסה שואף ל-0.

במקרה זה בחרנו לתת לתוצר פעולת ה- \log ערך שלילי גבוה וזאת כדי להדגיש את האפסים שבמישור הספקטרום (תכונה המסיעת בידינו בשלב מאוחר יותר). כדי להמחיש לקורא את צורת האות המאפיינת פונקצית טשטוש במישורים שונים מובא ציור 6.2. בציור מובאים שרטוטי פונקציות טשטוש קוית חד-מימדית באורך 8 במישור הספקטרום, לוג-ספקטרום וקפסטרום. בדוגמה זו הערך שניתן לתוצר פעולת הלוג עבור אות כביסה השואף ל-0 הוא -10.

בציור 6.2 יכול הקורא להבחין באחת מנקודות התורפה של האלגוריתם - במישור הקפסטרום מופיעים בנוסף לפולס השלילי הרצוי גם פולסים שליליים נוספים במקומות שהם כפולות שלמות של מקום הופעת הפולס הרצוי. כתבאי רעש עלולים פולסים אלו לעלות בעצמתם על עצמת הפולס הרצוי ולגרום לטעות. בשלב מאוחר יותר בפרק זה נציע שיטה המסיעת להתגבר על הבעיה.

נקודה נוספת הראויה להסבר היא שבמישור הקפסטרום מצטמצמת הפעילות לסדרה בודדת חד-מימדית. עבור motion blur מרוכזת כל האינפורמציה בשורה הראשונה במישור זה ולכן זוהי הסדרה שיש לטפל בה. עבור out-of-focus blur יש למצע את האינפורמציה הדו-מימדית לאורך המעגלים מסביב לראשית. תוצאת המיצוע היא סדרה חד מימדית שבה מטפלים בהמשך.



ציור 6.2 - ספקטרום (גרף 1), לוג-ספקטרום (גרף 2 מוזז כלפי מעלה), וקפסטרום של פונקציית טשטוש קוית באורך 8.

Fig. 6.2 - Spectrum (plot #1), log-spectrum (plot #2 biased upwards) and cepstrum of motion blur function ($\ell=8$)

בחינת ביצועי האלגוריתם נעשתה במספר שלבים:

- א. בדיקת הצורך או אי הצורך בחלונות I ו-II (ראה ציור 6.1).
- ב. בדיקה מהו סף הגילוי בתנאי רעש.
- ג. בדיקת השפעת אורך ה-blur על הביצועים.

עבור הבדיקה הראשונה נבדקו הצירופים הבאים של חלונות:

- ללא חלונות כלל.
- חלון מסוג LP על לוג ממוצע הספקטרום.
- חלון על קטעי התמונה בלבד.
- חלונות על קטעי התמונה ועל לוג ממוצע הספקטרום.

כל החלונות שהופעלו היו חלונות Hamming ספרביליים דו מימדיים הניתנים לרישום בצורה הבאה:

$$W(I, J) = [0.54 - 0.46 \cos(2\pi \frac{I-1}{N-1})] \cdot [0.54 - 0.46 \cos(2\pi \frac{J-1}{N-1})] \quad (6.1)$$

כאשר:

- N - מימדי הקטע הריבועי,
- (I, J) - מיקום הנקודה בתוך הקטע.

הבדיקות בוצעו עבור מספר תמונות והתוצאות התבררו כדומות. בטבלה 6.1 מופיעות תוצאות לדוגמה עבור תמונה שעברה טשטוש קוי באורך 8.

מתוך הטבלה נראה שעבור תמונה עם SNR גבוה אין צורך בחלונות ומתקבל זיהוי מצוין (יותר מאוחר נראה שעבור תמונה רועשת אין הדבר כך). תוספת כל אחד מהחלונות גורעת מהביצועים.

טבלה 6.1 - היחס שבין הפולס הרצוי ללא רצוי בתלות בסוג החלוקה ובשיטת הזיהוי.

Table 6.1 - The ratio of the desired to undesired pulses as function of division type and method of identification

שיטת הזיהוי Identification Procedure	division type		
	1 x 256 x 256	4 x 128 x 128	סוג החלוקה 16 x 64 x 64
ללא חלונות	3.8	9.3	76
חלון על קטע התמונה	3.1	3.4	5.5
חלון על לוג ממוצע הספקטרום	2.1	2.5	3.8
חלון על קטע התמונה ועל לוג ממוצע הספקטרום	2.9	3.6	5.6

בתהליך בדיקת הביצועים בתנאי רעש הוספנו רעש לבן עם פילוג גאوسي בקירוב ופיזור ידוע לתמונה שעברה טשטוש ידוע. בטבלה 6.2 מסוכמות תוצאות של יחסי הפולסים הרצוי והלא רצוי בתלות ביחס האות לרעש ובסוג החלוקה. בכל מקרה מתאפשר זיהוי עבור יחסי ירעה הגדולים מ-20db בלבד.

טבלה 6.2 - היחס שבין הפולסים הרצוי והלא רצוי בתלות בסוג החלוקה וביחס אות לרעש.

Table 6.2 - The ratio of the desired to undesired pulses as function of SNR and division type

יחס אות לרעש SNR	division type		
	1 x 256 x 256	4 x 128 x 128	סוג החלוקה 16 x 64 x 64
ללא חוספת רעש	3.8	9.3	76
31db	12.3	2.8	16
25db	3.0	1.1	0.4 (<1)
22db	1.2	0.6 (<1)	0.2 (<1)

כאשר ניגשים לבדוק את רגישות הזיהוי עבור אורכי blur שונים יש לקחת בחשבון את אופי הרעש. מאחר שאנחנו מניחים רעש לבן בקירוב המופיע בעצמה כמעט זהה בכל התחום הספקטרלי הרי צפוי שבמישור הקפסטרום הרעש יתרכז קרוב לראשית ולכן צפוי שיפריע יותר לזיהוי אורכי blur קצרים מאשר אורכי blur ארוכים.

התוצאות שקבלנו מאמתות הנחה זו והן מרוכזות בטבלה 6.3 לפי הדוגמה בטבלה זו מתקבל שרגישות הזיהוי לרעש קטנה ככל שאורך ה-blur גדל.

טבלה 6.3 - היחס שבין הפולסים הרצוי והלא רצוי בתלות ב-SNR ובאורך הטשטוש (ℓ)

Table 6.3 - The ratio of the desired to undesired pulses as function of SNR and blur length (ℓ)

יחס אות לרעש SNR	אורך טשטוש - ℓ - blur length	
	9	21
ללא תוספת רעש	16	2.4
31db	4.2	2.2
25db	2.6	2.0
22db	1.1	1.8
19db	0.1	0.8

6.3 בדיקת אפשרות שיפור ע"י מיצוע בלוג-ספקטרום ולא בספקטרום

בשיטת Cannon ראינו שתהליך המיצוע במישור הספקטרום מביא לתמונה "ממוצעת" בעלת ספקטרום "חלק" וחסר אפסים - למעט האפסים שהם תרומת פונקצית הטשטוש המקבלים דגש נוסף.

בסעיף זה נבדוק האם ניתן לשפר את השיטה ע"י מיצוע במישור הלוג-ספקטרום. אפסים במישור הספקטרום יהפכו לשיאים שליליים במישור הלוג-ספקטרום ובמידה ואינם אפסים עקביים (של פונקצית הטשטוש) הם "יעלמו" בזמן המיצוע. בגישה זו נקטו Cole [7] ו-Stockham [11].

נראה שבתנאים מסויימים המיצוע במישור הלוג-ספקטרום גורם בסה"כ להטיה של התוצאות בשיעור קבוע לעומת המיצוע במישור הספקטרום. מאחר והטיה זו משפיעה רק על האבר הראשון במישור הקפסטרום (אבר ה-'dc'), אין הבדל משמעותי בתוצאות הסופיות של שתי הגישות.

הפיתוח שיובא להלן עוקב במידה מסויימת אחר [7].

נניח שהתמונה בוצרה ע"י רעש לבן גאוס. אם נעביר אותה למישור פורליה ניתן יהיה לתאר את האמפליטודה של כל נקודה במישור זה ע"י:

$$u = |u_1 + ju_2| \quad (6.2)$$

כאשר u_1, u_2 מ"א ב"ת עם ממוצע 0 וסטית תקן σ .

בתנאים אלו ניתן לרשום עבור האמפליטודה u את הפילוג הסגולי החד מימדי הבא:

$$P(u) = \begin{cases} \frac{u}{\sigma^2} \exp \{ -u^2/2\sigma^2 \} & u \geq 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

וזוהו פילוג ריילי (Rayleigh).

נמצא את פילוג ההסתברות הסגולי עבור ספקטרום ההספק של התמונה:

נרשום:

$$V = u^2 \quad (6.4)$$

ואז:

$$\begin{aligned}
P(V) &= P(f(u)) = P(u) \left| \frac{df^{-1}(V)}{dV} \right| & (6.5) \\
&= \left| \frac{u}{\sigma} \exp \left\{ -u^2/2\sigma^2 \right\} \right| \cdot \left| 1/2\sqrt{V} \right| \\
&= \left| \frac{\sqrt{V}}{\sigma} \exp \left\{ -V/2\sigma^2 \right\} \right| \cdot \left| \frac{1}{2\sqrt{V}} \right| \\
&= \frac{1}{2\sigma^2} \exp \left\{ -V/2\sigma^2 \right\}
\end{aligned}$$

וזוהו פילוג אקספוננציאלי רגיל.

כעת נמצא מהי פונקציית הפילוג הסגולי עבור לוג הספקטרום:

נרשום:

$$W = \log(V) \tag{6.6}$$

ואז:

$$P(W) = P(V) \cdot \left| \frac{df^{-1}(w)}{dw} \right| \tag{6.7}$$

$$= \frac{1}{2\sigma^2} \exp \left\{ -V/2\sigma^2 \right\} \cdot \exp \{w\}$$

$$= \frac{1}{2\sigma^2} \exp \left\{ -\exp\{W\}/2\sigma^2 \right\} \cdot \exp \{W\}$$

$$= \exp \{W - \log(2\sigma^2)\} \cdot \exp \{-\exp \{W - \log(2\sigma^2)\}\}$$

כעת נציב:

$$W - \log(2\sigma^2) = X \tag{6.8}$$

ונקבל:

$$P(\log V) = \exp \{X - \exp \{X\}\} \quad (6.9)$$

למשנתה X יש ממוצע השווה ל...

$$\bar{X} = \int_{-\infty}^{\infty} X \exp \{X - \exp \{X\}\} dx = \gamma = -0.577... \quad (6.10)$$

כאשר γ - קבוע אוילר.

נבדוק כעת מהו הממוצע של ספקטרום ההספק:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V \frac{1}{2\sigma^2} \exp \{-V/2\sigma^2\} dV = 2\sigma^2 \quad (6.11)$$

בהתאם לתוצאה זו נסב את הביטוי במשוואה (6.8) בצורה הבאה:

$$X = W - \log(\bar{V}) \quad (6.12)$$

מאחר שהתוצאות שקבלנו נכונות לכל W ולכל X אזי הן נכונות גם עבור \bar{W} ו- \bar{X} . לכן נמצעי את שני האגפים של (6.12):

מאחר ו...

$$\bar{W} = \overline{\log(\bar{V})} \quad (6.13)$$

$$\overline{\log(\bar{V})} = \log(\bar{V}) \quad \}$$

$$\bar{X} = \gamma$$

מתקבל:

$$\overline{\log(V)} = \log(\overline{V}) + 0.577 \quad (6.14)$$

מכאן רואים שמיצוע במישור הספקטרום שונה ממיצוע במישור הלוג-ספקטרום בקבוע אוילר בלבד. מאחר וכאשר עוכרים למישור הקפסטרום הפרש זה מתורגם להבדל כאיבר ה- 'dc' בלבד, הרי שמכינתנו אין שוני מהותי בתוצאות של שני המקרים.

למרות שידוע לנו שהמודל של רעש לבן אינו תמיד מתאים לתמונה, הרי שיש בחוצאות כדי קרוב טוב. בגלל סיבה זו וכך מהסיבה שאנו מעדיפים לטפל באלגוריתם ליניארי כמרבית השלבים ורק בסוף לבצע פעולות לא ליניאריות (log) ולא ההפך, ומאחר וממילא אין הבדל בתוצאות החלטנו שלא לסטות משיטת Cannon ולבצע את המיצוע במישור הספקטרום.

6.4 שיפור בעזרת הפעלת סריקה של חלון 'מסרק' במישור הקפסטרום

ראינו שהכפולות השלמות של הפולס הרצוי במישור הקפסטרום מהוות את אחד הגורמים העיקריים לאי יכולת הזיהוי שלו. לכן החלטנו לבנות מדר חדש, סטטיסטי, ובאמצעותו להפריד את הפולס הרצוי מהאחרים בצורה יעילה. המדר יהיה:

$$\left. \begin{aligned} CR &= 0 & X(M) &\geq 0 \\ CR &= \frac{|X(M)|}{\left(\frac{1}{n} \sum_{x \in A} x^2\right)^{\frac{1}{2}}} & X(M) &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

כאשר:

M - הנקודה הנבדקת

X(M) - הערך בנקודה הנבדקת

A - כל הנקודות השליליות בסדרת הקפסטרום הסופית העונות לתנאים הבאים:

- מספרן הסידורי גדול מ-3

- הן אינן מתלכדות עם הנקודה הנבדקת.

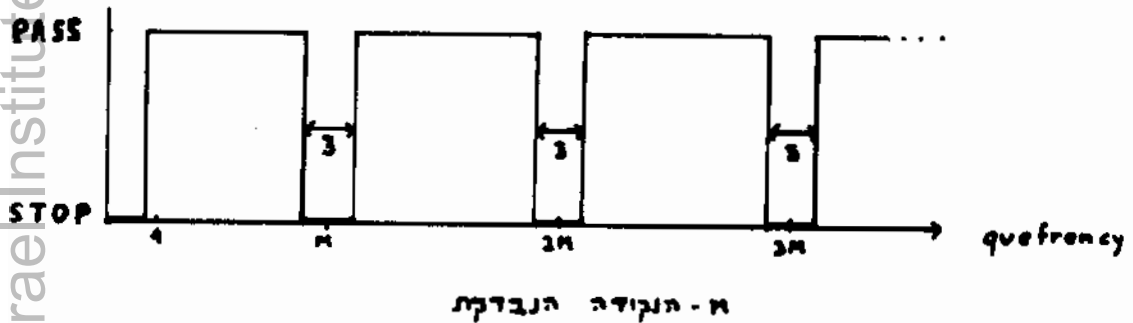
- אינן בתחום ± 1 של כפולה שלמה של המספר הסידורי של הנקודה הנבדקת.

ת - מספר הנקודות השייכות ל-A.

עבור כל נקודה M בסדרת הקפסטרום מחשבים את ערך המדד ולכן יוצא שלמעשה מפעילים כאן סריקה של חלון בצורת מסרק שתחומי ההעברה (PASS) והעצירה (STOP) שלו משתנים עבור כל נקודה בסדרה. הסריקה מתבצעת מנקודה מס' 4 עד $N/2$ כאשר N - אורך הווקטור לביצוע DFT.

בציור 6.3 מופיע חלון המסרק עבור נקודה מס' M כלשהי. בחישוב ההפרעה ישתתפו כל הנקודות שאינן נחסמות ע"י החלון. נבדוק מהי תוצאת המדד עבור מספר מקרים:

- א. M היא הנקודה המאפיינת את אורך הטטטוש האמיתי - במקרה זה הכפולות השלמות של M אינן משתלפות בחישוב ההפרעה. שאר הנקודות כוללות רעש "אקראי" בלבד שהוא נמוך באופן ממוצע ולכן CR יקבל ערך גבוה.
- ב. M היא נקודה שהיא כפולה שלמה של מקום הפולס המאפיין האמיתי - במקרה זה ישתתפו בחישוב ההפרעה רעשים "אקראיים", הפולס האמיתי וחלק מהכפולות השלמות שלו לכן CR יקבל ערך נמוך.
- ג. M היא נקודה כלשהי שאינה מתאימה לאחד מהמקרים א' או ב'. במקרה זה ישתתפו בחישוב ההפרעה הפולס הרצוי ורוב הכפולות השלמות שלו ולכן CR יקבל ערך נמוך עוד יותר מאשר במקרה ב'.



ציור 6.3 - חלון מסרק לזיהוי בקפסטרום

Fig. 6.3 - A 'Comb Window' for identification in cepstrum domain

חשומת לב הקורא מופנית לשני פרטים מימושיים:

- א. רוחב פס העצירה נבחר להיות 3 נקודות היות שאורך ה-blur המקורי אינו חייב להיות מספר שלם ולכן "כפולתו השלמה" עלולה להיות פחות או יותר מהמספר המחושב.

ב. ההפרעה המחושבת היא ממוצע של הנקודות שהשתתפו בחישובה בלבד. בצורה זו הקריטריון הוא שוויוני בלא תלות אם הנקודה הנבדקת קרובה לראשית (ולכן יהיו לחלון המסרק הרבה פסי עצירה ומעט נקודות בחישוב ההפרעה), או רחוקה מהראשית (ולכן יהיו לחלון המסרק מעט פסי עצירה והרבה נקודות בחישוב ההפרעה).

תוצאות ראשוניות

כזכור, לא ניתן היה לקבל זיהוי עבור תמונות עם SNR נמוך מ-20db. הפעלת הקריטריון החדש בתנאים זהים לתנאי הבדיקה בסעיף 6.2 גרמה לקבלת זיהוי טוב עד יחסי אות לרעש בתמונה, של 10db וזהו כשלעצמו שיפור ניכר לעומת שיטת Cannon המקורית.

בדיקת הצורך בחלונות

חזרנו על הבדיקה שבוצעה בסעיף 6.2. הפעם עם הקריטריון החדש. מתברר:

- א. עבור תמונה ללא תוספת רעש לא ברור הצורך בחלונות והתוצאות המתקבלות מזכירות במידה רבה את התוצאות הקודמות.
- ב. עבור תמונה בתוספת רעש, חלונות על קטעי התמונה (חלון I) תורמים באופן משמעותי לשיפור הזיהוי.
- ג. תוספת חלון מסוג LP על לוג ממוצע - הספקטרום (בנוסף לחלון הראשון) משפרת את הזיהוי במקרים מסוימים וגורעת באחרים. נתיחס לחלון זה כמסנן לסילוק רעש ונבחן אותו בהמשך.

בטבלה 6.4 נתון ריכוז עיקר התוצאות בבדיקה שערכנו. הטבלה נותנת את ערכי SNR של התמונות עבורן מתאפשר זיהוי טוב של ה-blur. ניתן לראות שמתאפשר זיהוי עד יחסי אות לרעש של 10db.

כאשר מבצעים מיצוע בספקטרום, הרעש המוסף מגיע בדרך כלל לרמה קבועה בכל תחום התדרים. הרעש גורם לכן למיסוך האפסים בספקטרום ההספק והגדלת מספר קטעי התמונה המשתתפים במיצוע לא יכולה לשנות עובדה זו. מסיבה זו לא צפוי שיפור בבליצועים כתלות במספר החלוקות. חיזוק לכך ניתן למצוא בנתונים המופיעים בטבלה 6.4.

טבלה 6.4 - יחס אות לרעש מינימלי ב-db המאפשר זיהוי, בתלות בסוג החלוקה ובשיטת הזיהוי.

Table 6.4 - Minimum SNR (in db) that allows identification as function of division type and identification procedure

שיטת הזיהוי Identification procedure	division type		
	1 x 256 x 256	4 x 128 x 128	טוג החלוקה 16 x 64 x 64
ללא חלונות	17.6	14.7	17.6
חלון על קטעי החמונה	11.6	14.7	17.6
חלון על לוג ממוצע	16	14.7	17.6
הספקטרום			
חלון על קטעי החמונה	14.7	10	13.5
ועל לוג ממוצע			
הספקטרום			

6.5 בדיקת השימוש ב-Slice Projection Theorem לחסכון בחישובים

הבלוק לפני האחרון בדיאגרמת הבלוקים (ציור 6.1) כולל כיווץ או שליפת האינפורמציה בצורה של שורה בודדת במקום מערך דו-מימדי. נבדוק כעת כיצד ניתן לנצל את ה-Slice Projection Theorem על מנת לחסוך בזמן חישוב. המשפט אומר:

אם קיים צמד פורייה כך ש...

$$f(x,y) \xleftrightarrow{F} H(u,v) \tag{6.16}$$

אז:

$$H(u,0) = F\{S(x)\} \tag{6.17}$$

כאשר:

$$S(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)dy \quad (6.18)$$

(המשפט נובע מתוך הגדרת התמרת פורייה הדו מימדית כאשר מציבים $V=0$).
 המשמעות:

- א. אם ברצוננו לקבל את שורת ה- dc' בקפסטריום עלינו לסכם תחילה לאורך ציר y במישור הלוג-ספקטריום ולאחר מכן לעשות התמרת פוריה חד מימדית, הדבר אקויוולנטי לחלוטין להתמרת פוריה דו-מימדית כדי לעבור למישור הקפסטריום ולאחר מכן לקחת רק את שורת ה- dc' .
- ב. הדבר נכון כמובן גם עבור קואורדינטות פולריות (עבור המקרה של יציאה ממיקוד). אנחנו נרצה לקבל את $H(\rho\theta)$, נוכל לרשום:

$$H(\rho\theta) = F\{S(r)\} \quad (6.19)$$

כאשר:

$$S(r) = \int_0^{2\pi} f(r,\theta)d\theta \quad (6.20)$$

ואז במקום לבצע התמרת פוריה דו-מימדית ולאחר מכן למצע לאורך מעגלים, נבצע סיכום לאורך מעגלים במישור הלוג-ספקטריום ולאחר מכן התמרת פורייה חד-מימדית והתוצאות צריכות להיות אקויוולנטיות לגמרי.

- המשמעות העיקרית הנובעת מכך היא חסכון ניכר בזמן חישוב:
- עבור חלוקות של $1 \times 256 \times 256$ מושג חסכון של 45%.
 - עבור חלוקות של $4 \times 128 \times 128$ מושג חסכון של 18%.
 - עבור חלוקות של $16 \times 64 \times 64$ מושג חסכון של 5%.

מימוש ותוצאות:

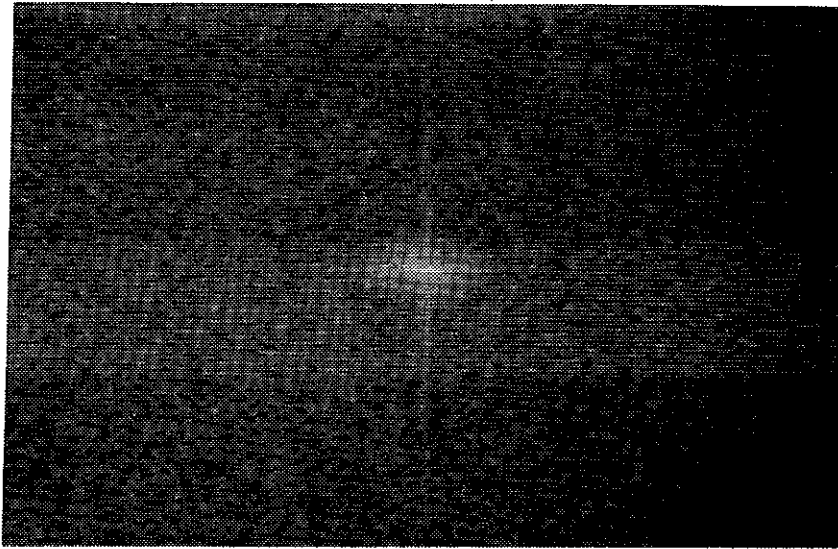
- א. עבור המקרה של motion blur המימוש הוא מיידי ופשוט והתוצאות זהות לחלוטין בשני המקרים (משום שבשני המקרים החישוב למעשה הוא זהה).
- ב. עבור המקרה של out-of-focus blur עלינו לסכם לאורך מעגלים. לצורך כך עלינו לעבור לקואורדינטות פולריות. הסיכום בקואורדינטות פולריות התבצע בצורה הבאה:
- א. בחר רדיוס.
- ב. סכם התוצאות המתקבלות עבור 64 זוויות שונות שבין 0 ל- 90° .

בחירת הרדיוס התבצעה עבור שני מקרים:

1. התקדמות בצעד שלם.
2. התקדמות ב- $\frac{1}{2}$ צעד (רזולוציה כפולה).

המספר המתקבל עבור כל רדיוס וזווית נבחר כנקודת הסריג הקרובה ביותר לנקודה המחושבת על פי הרדיוס והזווית הנתונים.

התוצאות בכל המקרים שנבדקו דומות: עבור תמונה שבמקור היתה חסרת רעש יש דמיון רב (אם כי לא זהות) בין התוצאות עם וללא השימוש במשפט זה (הסיבה היא אי הדיוקים הנגרמים עקב המעבר לקואורדינטות פולריות). אולם: כאשר מוספים רעש לתמונה המקורית אין יכולת לקבל תוצאות כאשר הסיכום נעשה במישור הלוג-ספקטרום בעוד שכאשר פועלים בדרך הארוכה וממצעים רק בסוף במישור הקפסטרום התוצאות הן טובות ומאפשרות זיהוי טוב. הסיבה שוב תמונה במעבר לקואורדינטות פולריות ולמיסוך האפסים בספקטרום ע"י הרעש. בציר 6.4 מובאת תמונת הספקטרום של תמונת המקור AVIR2 לאחר שעברה טשטוש מעגלי עם רדיוס $R=8$ והוסף לה רעש ביחס אות לרעש של 0db. ניתן להבין מתוך כך מדוע הרעש כל כך מפריע. (נזכיר שוב שעבור המקרה של טשטוש קוי החישוב בשני המקרים הוא זהה ולכן התוצאות תמיד זהות).

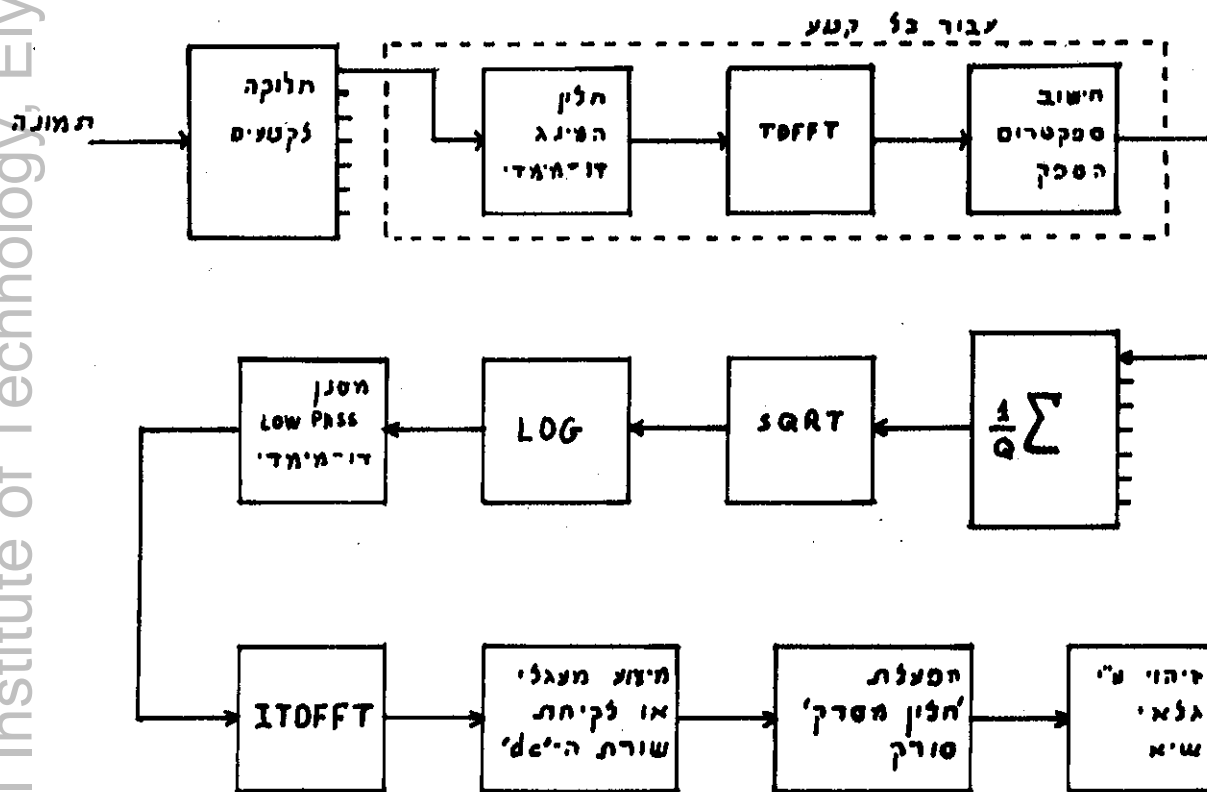


צילור 6.4 - ספקטרום החמונה AVIR2 לאחר שעברה טשטוש מעגלי עם R=8 ותוספת רעש בשיעור של 0db.

Fig. 6.4 - Spectrum of defocused (R=8) and noisy (SNR=0db) 'AVIR2'

6.6.1 שילוב אלגוריתם המסרק בשיטת Cannon

בציור 6.5 מובאת דיאגרמת בלוקים מפורטת של האלגוריתם.



ציור 6.5 - סכמת בלוקים מפורטת לאלגוריתם הזיהוי.

Fig. 6.5 - Detailed block diagram for identification algorithm

להלן הסברים לכמה מן הבלוקים:

- חלון המינג דו-מימדי - זהו חלון המינג ספרבילי הניתן לרישום בהתאם לנוסחה (6.1).

חלון המינג נבחר לאחר שנבחנו מספר סוגי חלונות (ללא חלונות, חלון משולש, חלון הנינג, חלון המינג) והוברר שאין האלגוריתם רגיש לסוג החלון. יחד עם זאת חלון המינג נתן תוצאות טובות במקצת מהחלונות האחרים ולכן נבחר.

- TDFFT - סברוטנה לביצוע FFT דו-מימדי.

- חישוב ספקטרום ההספק - מתבצע ע"י חישוב ריבוע האמפליטודה עבור כל נקודה במישור התדר.

- SQRT - שורש ריבועי לכל נקודה לאחר המיצוע.

- LOG - לקיחת לוג לפי בסיס טבעי, לפני פעולה זו בודקים אם המספר שצריך לעבור את הפעולה נמוך מ- $1E-60$. אם כן, הוא מקבל את הערך $1E-60$. בקשר לכך ראה דיון בסעיף 6.1.

- מסנן מעביר נמוכים - תגובת התדר של מסנן זה נבחרה להיות כדוגמת חלון המינג דו-מימדי ספרבילי אך עם הזזה לראשית. במקום שמרכזו $w(I,J)=1$ יהיה במרכז ספקטרום קטע התמונה, הוא קורה ב-4 פינות הספקטרום (תדרים נמוכים). ניתן לתאר את החלון בצורה הבאה:

$$W(I,J) = [0.54 - 0.46 \cos(2\pi \frac{I-1-N/2}{N-1})] \cdot [0.54 - 0.46 \cos(2\pi \frac{J-1-N/2}{N-1})] \quad (6.21)$$

- ITDFFT - FFT דו מימדי בכוון הפוך.

- מיצוע מעגלי או לקיחת שורת ה-dc - כאשר מדובר על מקרה של טשטוש קוי (motion blur) לאחר ביצוע IFFT על השורות מתקבלות תוצאות דומות מבחינת השיאים השליליים וההתנהגות הכללית בכל השורות. ביצוא IFFT על העמודות גורם להופעת הממוצע של כל השורות (קרי ה-dc) בשורה הראשונה. לפיכך ניתן לחלץ מתוך השורה הראשונה את כל האינפורמציה הדרושה (שיאים שליליים וכו'). כאשר מדובר על מקרה של יציאה ממיקוד מתקבל במישור הקפסטרום מעגל שלילי (ומעגלים בוספים המהווים את הכפולות השלמות שלו). כדי שניתן יהיה להסיק מסקנות בצורה אוטומטית, עלינו לכווץ את כל האינפורמציה לשורה אחת. כוץ זה מתבצע ע"י מיצוע לאורך מעגלים (רדיוס קבוע ביחס לראשית).

- הפעלת חלון מסרק סורק - בהתאם לתיאור בסעיף 6.4.

- Peak Detector - לאחר הפעלת חלון המסרק הסורק מתקבלים שיאים חיוביים כאשר מקום השיא הגבוה ביותר הוא הפרמטר שאותו אנו מחפשים (הפעלת הממד החדש יוצרת סדרת מספרים חיוביים בלבד).

6.6.2 מסקנות

בסעיף 6.6.1 תואר אלגוריתם הזיהוי כפי שגובש עד כה ולאחר בחינת אפשרויות שונות למימושו.

המסקנות העיקריות:

- (1) עדיף למצע במישור הספקטרום מאשר במישור הלוג-ספקטרום.
- (2) יש להשתמש בחלונות (Hamming) על קטעי התמונה כדי לקבל תוצאות בתנאי רעש.
- (3) עבור המקרה של טשטוש קוי השימוש ב-Slice Projection Theorem הוא רצוי וחוסך זמן חישוב (עבור טשטוש של יציאה ממיקוד המעבר לקואורדינטות פולריות פוגע בביצועים).
- (4) אין ודאות שהגדלת מספר קטעי התמונה תורמת לשיפור הזיהוי (ראה טבלה 6.4) כאשר התמונה כוללת רעש.
- (5) אם מעונינים לטפל בתמונות בתנאי רעש יש למצוא שיטה יעילה לסילוק הרעש וע"י כך לאפשר שיפור נוסף בביצועים.

7. שיטה יעילה לדיכוי רעש

כפי שהסתבר בסוף הפרק הקודם, דרושה לנו שיטה יעילה לסילוק הרעש במטרה לאפשר זיהוי טוב של פונקציה הטשטוש עבור רמות SNR במוכות. המדד עבור יעילות השיטה יהיה יכולתנו לבצע זיהוי טוב ללא שיקולים של איכות התמונה המתקבלת לאחר תהליך הניקוי, מבחינה זו אנו רואים את תהליך הניקוי לצורך הזיהוי ותהליך הניקוי לצורך השיחזור כשני תהליכים מקבילים ובלתי תלויים.

בפרק זה נבחן שיטות שונות לדיכוי הרעש ובסופו נמליץ על שיטה יעילה המאפשרת, לאחר הפעלחה, זיהוי טוב של פונקציה הטשטוש.

7.1 שיטות לניקוי הרעש

7.1.1 מסנן מעביר נמוכים על לוג ממוצע הספקטרום

ההנחה היא שהרעש המוסף לתמונה דומה מאד בהתנהגותו לרעש לבן. בתור שכזה, הוא מופיע בעצמה כמעט זהה בכל רוחב הסרט של התמונה. מאחר ועיקר האנרגיה של התמונה מרוכזת בתחום התדרים הנמוכים ולעומת זאת בתדרים הגבוהים עוצמת הספקטרום התמונה שואפת לערכים נמוכים מאד, יוצא שבתדרים הגבוהים הרעש הוא דומיננטי ואילו בתדרים הנמוכים הוא כמעט ולא משפיע. המסקנה המתבקשת מכך היא להעביר את הספקטרום דרך מסנן Low Pass וע"י כך לתרום לדיכוי השפעת הרעש.

מסנן ה-LP יופעל אצלנו על הספקטרום הממוצע לאחר ביצוע פעולת ה-LOG. הסיבה היא שהפעלת המסנן לפני פעולת ה-LOG תגרום להופעת אפסים רבים בתחום התדרים הגבוהים וכתוצאה מכך שיאים שליליים בלתי רצויים שעלולים לגרום לזיהוי שגוי ולא להועיל.

התוצאות בהתאם לשיטה זו מרוכזות בטבלה 7.1.

7.1.2 מסנן מדיאני במישור התמונה

הגדרת המסנן המדיאני:

תהיה $\{x_n\}_1^{2N+1}$ סידרת כניסה.

ניצור מתוכה את הסדרה $\{y_n\}_1^{2N+1}$ ע"י סידורה מחדש בהתאם לכלל:

$$y_{n_2} \geq y_{n_1} \iff n_2 > n_1 \quad (7.1)$$

האיבר האמצעי של הסדרה $\{y_n\}_1^{2N+1}$ הוא תוצאת הסינון המדיאני.
כלומר:

$$\text{median } \{x_n\}_1^{2N+1} = y_{N+1} \quad (7.2)$$

כאשר:

N - מחצית אורך החלון של המסנן.

תכונותיו העיקריות של המסנן:

א. סילוק פולסים שרוחבם אינו עולה על N.

ב. שימור קצוות חדים בסדרת הכניסה.

דיון מפורט ומלא בתכונותיו של המסנן המדיאני ניתן למצוא
ב-[1] וב-[39].

נציין רק שב-[1] נבדקו מסננים מדיאנים חד-מימדיים ודו-מימדיים
עבור שחזור תמונות רועשות ונמצאו כיעילים ביותר בדיכוי רעש
אימפולסיבי.

בטבלה 7.1 מובאות תוצאות עבור מסנן מדיאני חד-מימדי באורך 3
(מדכא פולסים באורך 1 בלבד), שהיה המוצלח ביותר מבין כל
הנורסיות של הסינון המדיאני החד-מימדיים והדו-מימדיים.

7.1.3 מיצוע במישור התמונה

ההנחה היא שהרעש שהתווסף לתמונה הוא רעש לבן ולכן אין קורלציה בין דגימות סמוכות של הרעש. לעומת זאת בין דגימות סמוכות של התמונה קיימת קורלציה גבוהה. אם נמצע 2 נקודות שהיה להן ערך זהה בתמונה המקורית נקבל:

$$X = \frac{1}{2}(a+n_1+a+n_2) = a + \frac{n_1+n_2}{2} \quad (7.3)$$

בהנחה שהרעשים n_1, n_2 הם גאוסים לבנים וב"ת ניתן להראות שסטית התקן של X קטנה פי $\sqrt{2}$ מסטית התקן של a .

עבור המקרה שלנו בהנחה שמקדם הקורלציה בין דגימות סמוכות של התמונה הוא גבוה מתקבל שניתן למצע N דגימות סמוכות וע"י כך לדכא את הרעש פי \sqrt{N} . אמנם ע"י המיצוע הזה נגרם blur נוסף לתמונה אך אנו מכירים אותו ולכן נדע להתעלם ממנו בבואנו לזהות את ה-blur המקורי.

התוצאות של ניסוי זה מובאות גם כן בטבלה 7.1.

7.1.4 תוצאות ומסקנות

בטבלה 7.1 מסוכמות התוצאות של הסעיפים הקודמים:

טבלה 7.1 - יחס אות לרעש מינימלי (ב-db) המאפשר זיהוי, בתלות בסוג החלוקה ובשיטת ניקוי הרעש.

Table 7.1 - Minimum SNR (in db) that allows identification as function of division type and noise cleaning procedure

שיטת ניקוי הרעש Noise cleaning procedure	סוג החלוקה Division type		
	1x256x256	4x128x128	16x64x64
מסנן מעביר נמוכים על $\log\{\text{Spectrum}\}$	14.7	10	13.5
מסנן מדיאני באורך 3	12.5	12.5	12.5
מיצוע של כל 2 דגימות סמוכות	12.5	12.5	12.5

המסקנה העולה מטבלה 7.1 היא שאף אחת מהשיטות לא הצליחה לשפר הביצועים בצורה משמעותית (ראה טבלה 6.4). הסיבה תמונה כנראה בכך שהעוות הנגרם ע"י הרעש מתבטא בעיקר בכך שהאפסים במישור הספקטרום בעלמים (מכוסים ע"י רמת הרעש), והשיטות שניסונו - לא היה בכוחן כדי להסיר "מילוי" זה ולגלות את האפסים מחדש.

שיטה שעשויה לתרום להורדת רמת הרעש ולגילוי האפסים בספקטרום היא החסרה ספקטרלית ובה נדון בסעיפים הבאים.

מסקנה נוספת העולה מטבלה 7.1 היא שאין שיפור משמעותי עם הגדלת מספר קטעי התמונה (ניסונו גם חלוקות של $64 \times 32 \times 32$ והתוצאות היו ללא שיפור או יותר גרועות). בכך אנו חוזרים על המסקנה מפרק 6 עבור תמונות רועשות.

7.2 דיכוי רעש ע"י החסרה ספקטרלית (Spectral Subtraction)

7.2.1 הגדרת החסרה ספקטרלית

בסעיף זה נביא את התיאור העקרוני של השיטה. הפיתוח שיוכא להלן עוקב במידה רבה אחר הפיתוח המוצע ע"י Lim ב-[35] ו-[36].

נסמן: $y(x,y)$ - תמונה מטושטשת.
 $n(x,y)$ - רעש אדילטיבי.
 $g(x,y)$ - התמונה הסופית הכוללת טשטוש ורעש.

$$g(x,y) = y(x,y) + n(x,y) \quad (7.4)$$

מקובל לשערך את $y(\cdot)$ מתוך $g(\cdot)$ ע"י:

$$\tilde{y}(w_1, w_2) = G(w_1, w_2) \cdot \left(\frac{P_y(w_1, w_2)}{P_y(w_1, w_2) + \alpha \cdot P_n(w_1, w_2)} \right)^\beta \quad (7.5)$$

כאשר: $P_n(\cdot), P_y(\cdot)$ - ספקטרומי ההספק של $y(\cdot)$ ו- $n(\cdot)$ בהתאמה.

$G(\cdot), \tilde{Y}(\cdot)$ - התמרות פורייה של $\tilde{y}(\cdot)$ ו- $g(\cdot)$ בהתאמה.

α, β - קבועים. אם $\beta = 1$ מתקבל מסנון וינר פרמטרי.

אם $\alpha = 1, \beta = 1$ מתקבל מסנון וינר פשוט.

אם $\alpha = 1, \beta = \frac{1}{2}$ מתקבל מסנון בשיטת ספקטרום ההספק.

כדי שנוכל להפעיל את משוואה (7.5) עלינו לדעת את $P_y(\cdot)$ ואת $P_n(\cdot)$. אם נניח ש- $P_y(\cdot)$ אינו שונה בהרבה מ- $P_n(\cdot)$ נוכל לקבל משוואה פתירה. נשערך לכן את $P_y(\cdot)$ בצורה הבאה:

$$P_y(w_1, w_2) \approx P_n(w_1, w_2) \approx \frac{1}{K} |\tilde{Y}(w_1, w_2)|^2 \quad (7.6)$$

כאשר K - קבוע כיוול.

מתקבל:

$$\tilde{Y}(w_1, w_2) = G(w_1, w_2) \cdot \left(\frac{|\tilde{Y}(w_1, w_2)|^2}{|\tilde{Y}(w_1, w_2)|^2 + k \cdot \alpha \cdot P_n(w_1, w_2)} \right)^\beta \quad (7.7)$$

ניתן לפתור את (7.7) עבור ערכים שונים של β אך פתרון נוח במיוחד מתקבל עבור $\beta = \frac{1}{2}$:

$$|\tilde{Y}(w_1, w_2)| = (|G(w_1, w_2)|^2 - \alpha \cdot k \cdot P_n(w_1, w_2))^{\frac{1}{2}} \quad (7.8a)$$

$$|G(w_1, w_2)|^2 \geq \alpha \cdot k \cdot P_n(w_1, w_2) \quad \text{וזאת בתנאי:}$$

אחרת:

$$|\tilde{Y}(w_1, w_2)| = 0 \quad (7.8b)$$

$$\hat{Y}(w_1, w_2) = G(w_1, w_2) \quad (7.8c)$$

מקובל בהרבה מקומות לבצע החסרה ספקטרלית בהתאם לנוסחה הבאה:

אם:

$$|G(w_1, w_2)|^2 \geq \alpha \cdot k \cdot P_n(w_1, w_2) + \epsilon \quad (7.9a)$$

אזי מבוצעת החסרה ספקטרלית רגילה כמו ב-(7.8a) אחרת:

$$|\hat{Y}(w_1, w_2)| = \epsilon \quad (7.9b)$$

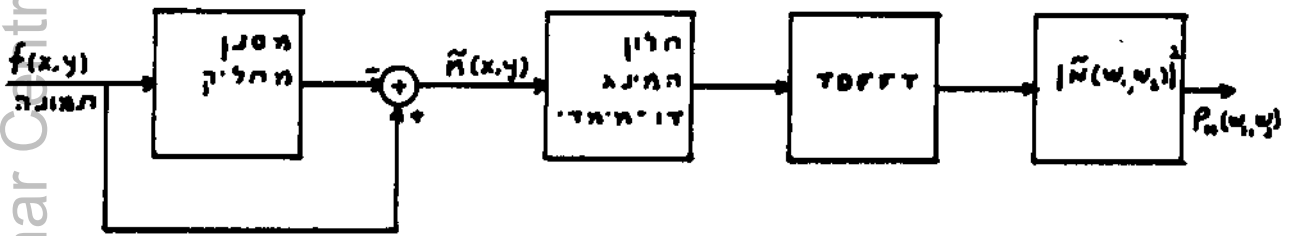
כאשר ϵ - ערך מינימום אליו מצמידים את האמפליטודה של הספקטרום המשוערך.

אצלנו אין הדבר כך, ולהפך: אנו שואפים להגיע למקומות שבהם הספקטרום מתאפס ולהדגיש אותם ולכן נבחר $\epsilon=0$ ובכך נחזור למשוואה (7.8).

נשים לב שעדין נשארה בפנינו בעיה רצינית והיא שערורך הרעש או הספקטרום ההספק שלו $P_n(w_1, w_2)$. שיערוך טוב של הרעש מהווה את המפתח העיקרי לשיחזור יעיל של ספקטרום התמונה המטושטשת ומתוכה לבצע זיהוי של פונקציות הטשטוש בצורה נכונה. בהמשך נרחיב את הדיבור על נושא זה.

7.2.2 שיערוך הרעש

שיערוך ספקטרום הרעש יתבצע בהתאם לסכמה הנתונה בצירור 7.1:



ציור 7.1 - שיטת שיערוך הרעש וספקטרום ההספק שלו

Fig. 7.1 - Method of noise estimation and its power spectrum estimation

נדרש שהמסנן המחליק יהיה פשוט ככל האפשר לשם חסכון בחישובים ולכן הוא נבחר מתוך השיטות הבאות:

- א. מסנן מדיאנלי חד מימדי באורך 3 ובאורך 5.
- ב. החלקה ע"י מיצוע חד-מימדי נע באורך 3, 5.
- ג. החלקה ע"י מיצוע דו-מימדי נע במידות 3×3 .

המסנן שנבחר הוא מסנן מדיאנלי חד מימדי באורך 3. בהשוואה שערכנו היו למסנן זה שני יתרונות על פני שאר המסננים:

- א. בחישוב של סה"כ השגיאה הריכועית הנוצרת בין הספקטרום של תמונה מקורית ללא רעש לבין הספקטרום המתקבל מתמונה רועשת שעברה החסרה ספקטרלית התקבלה התוצאה המינימלית עבור המסנן המדיאנלי באורך 3.
- ב. ספקטרום הרעש הממוצע המשוערך ע"י מסנן זה היה הקרוב ביותר בצורתו ("שטיחות") לספקטרום של רעש לבן. המרד ל"שטיחות" היה הווריאנט של הספקטרום הממוצע (והמסנן הציג את הווריאנט הנמוך ביותר).

7.2.3 גישות שונות בהחסרה ספקטרלית

ההחסרה הספקטרלית במסגרת האלגוריתם שלנו ניתנת לביצוע במספר גישות שונות שהשוני ביניהן הוא בצורת שיערוך הרעש ובצורת שילוב ההחסרה הספקטרלית בתוך האלגוריתם.

עבור כל אחת מהגישות שיפורטו להלן נבדקו מקדמי החסרה שונים
וכן מספר חלוקות שונה של התמונה.

מקדמי ההחסרה (α) שנבדקו הם: $\alpha = 1.0, 0.5, 0.2, 0.1$

החלוקות השונות שנבדקו:

1 X 256 X 265, 4 X 128 X 128, 16 X 64 X 64, 64 X 32 X 32

עיקר התוצאות מובאות בטבלה 7.2 יחד עם זאת עבור כל גישה מפורטים
ביצועיה הטובים ביותר. כל התוצאות הם עבור התמונה 'AVIR2'
שעברה טשטוש קוי ליניארי עם $\ell=8$ ולאחר מכן הוסף לה רעש.

הערה:

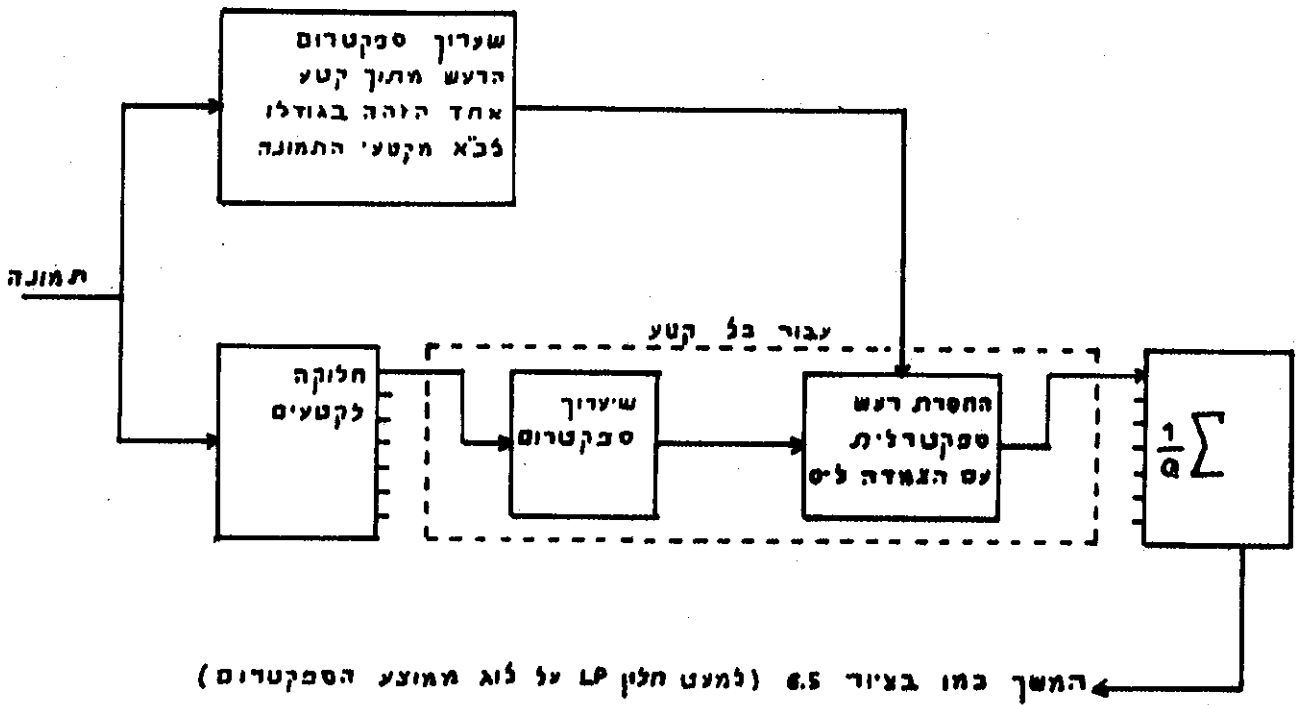
שיערוך הספקטרום בכל הגישות מתבצע בהתאם למסקנות פרק 6.
דהיינו: חלון המינג דו-מימדי על קטע התמונה, TDFFT, חישוב
ריבוע האמפליטודה.

7.2.3.1 גישה מס' 1

האלגוריתם לפי גישה זו מתואר בצירור 7.2. לפי גישה זו
משערכים את הרעש מתוך קטע תמונה המתאים בגודלו לגודלם
של קטעי התמונה המיועדים לעבור מיצוע. ספקטרום ההספק
של הרעש מוחסר מספקטרום ההספק של כל אחד מהקטעים לפני
המיצוע.

התוצאות הטובות ביותר עבור גישה זו התקבלו עבור:

$\alpha = 0.5$	מקדם החסרה
1 X 256 X 256	שיטת חלוקה
7.5db,	SNR הגרוע ביותר המאפשר זיהוי

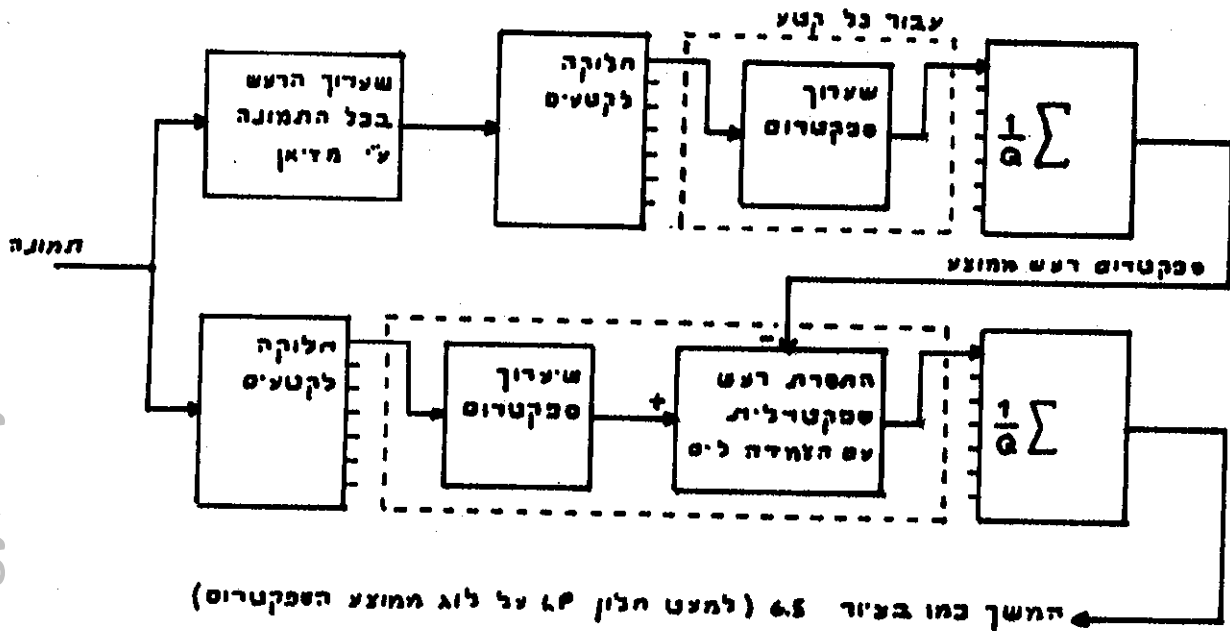


ציור 7.2 - גישה מס' 1 להחסרה ספקטראלית
 Fig. 7.2 - Approach #1 to spectral subtraction

7.2.3.2 גישה מס' 2

האלגוריתם לפי גישה זו מתואר בציור 7.3. גישה זו דומה לגישה מס' 1 פרט לשיערוך ספקטרום ההספק של הרעש. כאן משערכים את הרעש על פני כל התמונה ומקבלים "תמונת רעש משוער". תמונה זו מחולקת לקטעים. בכל קטע משערכים את ספקטרום ההספק ולאחר מכן ממצעים על פני כל הקטעים ומקבלים ספקטרום רעש ממוצע \bar{P}_n . ספקטרום ממוצע זה הוא אשר מוחסר מספקטרומי קטעי התמונה לפני מיצועם.

- התוצאות הטובות ביותר עבור גישה זו התקבלו עבור:
- מקדם החסרה $\alpha = 1.0$
- שיטת חלוקה $1 \times 256 \times 256$
- SNR הגרוע ביותר המאפשר זיהוי 0.45db



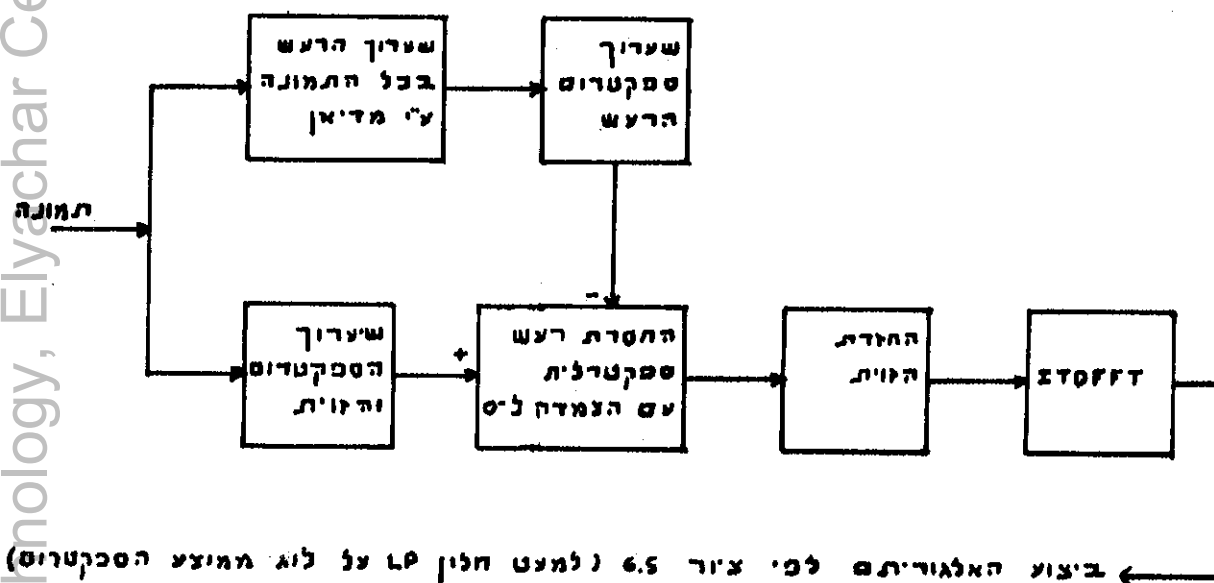
צילור 7.3 - גישה מס' 2 להחסרה ספקטרונית

Fig. 7.3 - Approach #2 to spectral subtraction

7.2.3.3 גישה מס' 3

האלגוריתם לפי גישה זו מתואר בצירור 7.4. לפי גישה זו משערכים את הרעש על פני כל התמונה, ואת ספקטרום ההספק שלו. לאחר מכן משערכים את ספקטרום ההספק של התמונה (ללא חלוקות), מחסירים ממנו את ספקטרום הרעש ששיערכנו וחוזרים לתחום המרחב. התמונה שקבלנו בתחום המרחב אמורה להיות "נקיה" מרעש ועליה מפעילים את האלגוריתם השלם המופיע בצירור 6.5. יש לציין שעל מנת לחזור לתחום המרחב עלינו לשמר את הפאזה של התמונה שלפני ההחסרה.

התוצאות הטובות ביותר עבור גישה זו התקבלו עבור:
 מקדם החסרה $\alpha = 1.0$
 שיטת חלוקה 16X64X64 או 4X128X128 או 1X256X256
 SNR הגרוע ביותר המאפשר זיהוי -8db



ביצוע האלגוריתם לפי ציור 7.4 (למעט חלון LP על לוג המיצע הספקטרום)

ציור 7.4 - גישה מס' 3 להחסרת ספקטרלית

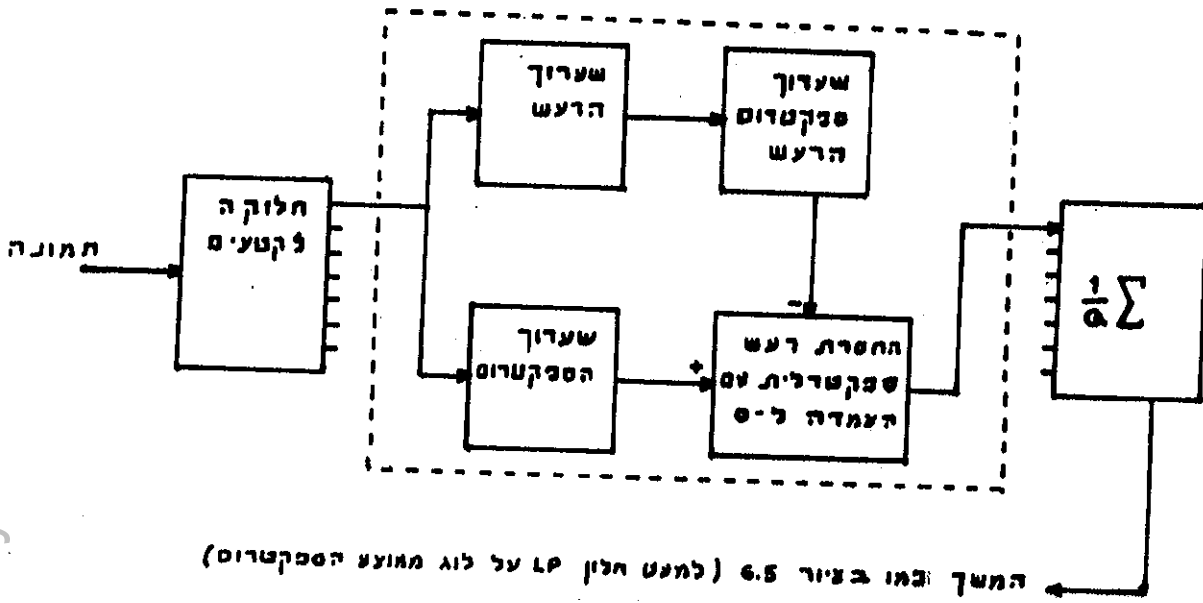
Fig. 7.4 - Approach #3 to spectral subtraction

7.2.3.4 גישה מס' 4

האלגוריתם לפי גישה זו מופיע בציור 7.5. לפי גישה זו מחלקים את התמונה לקטעים ובכל קטע משערכים את ספקטרום הרעש ומחסירים אותו עם הצמדה ל-0.5. לאחר מכן עושים מיצוע של ספקטרוםי כל הקטעים.

התוצאות הטובות ביותר עבור גישה זו התקבלו עבור:

מקדם החסרה $\alpha = 1.0$
 שיטת החלוקה 1 X 256 X 256
 SNR הגרוע ביותר המאפשר זיהוי 0.45db



צילור 7.5 - גישה מס' 4 להחסרת ספקטראלית
 Fig. 7.5 - Approach #4 to spectral subtraction

7.2.4 תוצאות ומסקנות

בטבלה 7.2 מרוכזות התוצאות העיקריות שהתקבלו עבור הגישות השונות בהחסרת הספקטראלית.

טבלה 7.2 - יחס אות לרעש מינימלי (ב-db) המאפשר זיהוי בחלוח בסוג החלוקה ובגישות ניקוי הרעש בהחסרת ספקטראלית.

Table 7.2 - Minimum SNR (in db) that allows identification as function of division type and the approach # for spectral subtraction

Approach # מספר הגישה (α=1.0)	Division type			
	1X256X256	4X128X128	16X64X64	64X32X32
#1	7.5*	13.5	14.7	12.5
#2	0.45	12.5	9.3*	14.7
#3	-8	-8	-8	2.6
#4	0.45	13.5	10	16

α = 0.5 *

המסקנות העולות מהתוצאות הן:

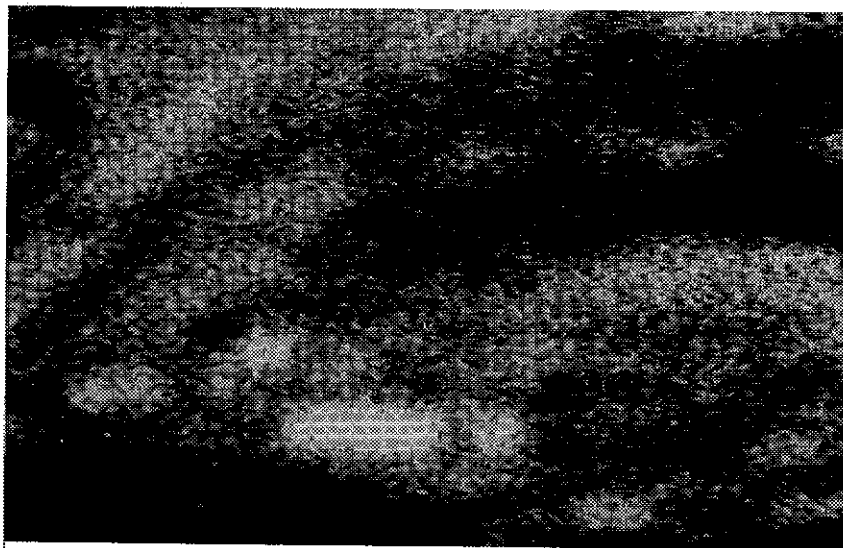
- א. גישה מס' 3 טובה לאין שיעור מהגישות האחרות.
- ב. שיטת ההחסרה הספקטרלית עפ"י גישה מס' 3 אכן יעילה לצורך זיהוי הפרמטרים ומאפשרת זיהוי ביתסי אות לרעש נמוכים ביותר.

7.3 הדגמת ביצועי השיטה הנבחרת

השיטה הנבחרת על סמך התוצאות היא גישה מס' 3 בהחסרה ספקטרלית בטעיף זה נדגים את ביצועיה.

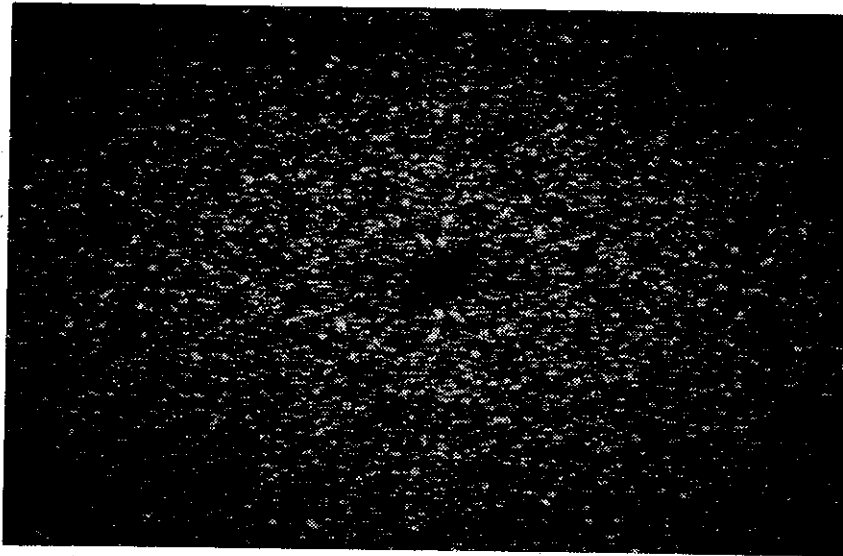
יציאה ממיקוד

בציור 2.4 נתונה תמונת הספקטרום של תמונת המקור 'AVIR2' לאחר שעברה טשטוש מעגלי עם $R=8$. בתמונה זו ניתן להבחין בקלות במעגלים הקונצנטריים המאפיינים טשטוש זה. בתמונה 5.2 נתונה תמונת החלק השלילי של הקפסטרום ושוב ניתן להבחין בבירור במעגלים הקונצנטריים. כאשר מוספים רעש ברמה גבוהה לתמונה המטושטשת ($SNR = 0db$) מתקבלת התמונה המופיעה בציור 7.6. הספקטרום שלה כבר ניתן בציור 6.4 והקפסטרום מופיע בציור 7.7. הן בציור 6.4 והן בציור 7.7 לא ניתן לזהות שום מעגל.



ציור 7.6 - התמונה 'AVIR2' לאחר שעברה טשטוש מעגלי עם $R=8$ וקבלה תוספת רעש כך ש- $SNR = 0db$.

Fig. 7.6 - Defocused and Noisy Image ('AVIR2'). $R=8$, $SNR=0db$



צירור 7.7 - החלק השלילי של הקפסטרום של התמונה בצירור 7.6

Fig. 7.7 - Negative part of cepstrum of image in fig. 7;6

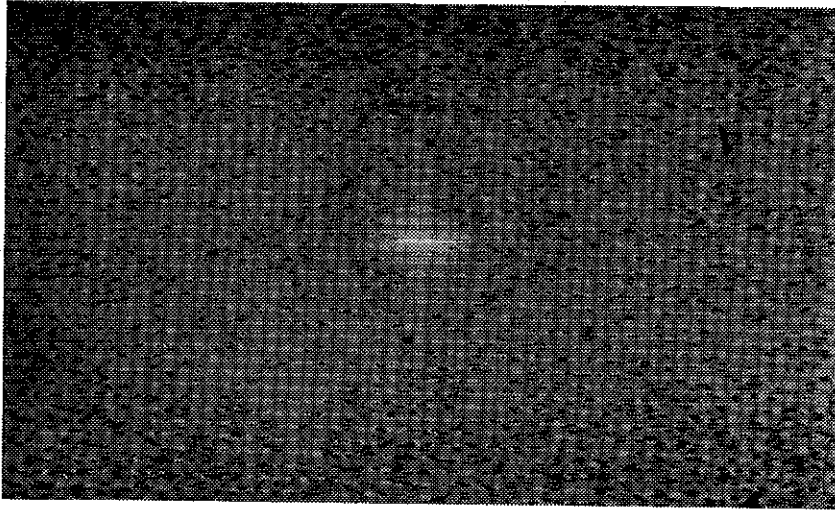
בצירור 7.8 מובא הספקטרום של התמונה לאחר ניקוי הרעש בעזרת החסרה ספקטרלית. עדין קשה להבחין כאן במעגלים אך בקפסטרום המופיע בצירור 7.9 ממעגל מופיע כבר בצורה כזו שלאחר הפעלת חלון המסרק הסורק מתקבלות תוצאות המביאות אותנו לסף הזיהוי.

טשטוש קוי

בצירור 2.5 מופיעה התמונה 'AVIR2' (צירור 5.1) לאחר שעברה טשטוש קוי ליניארי עם $\ell=19$. ספקטרום התמונה מופיע בצירור 2.6. בצירור 7.10 מופיעה התמונה כשהיא כוללת רעש כק ש-SNR=0db.

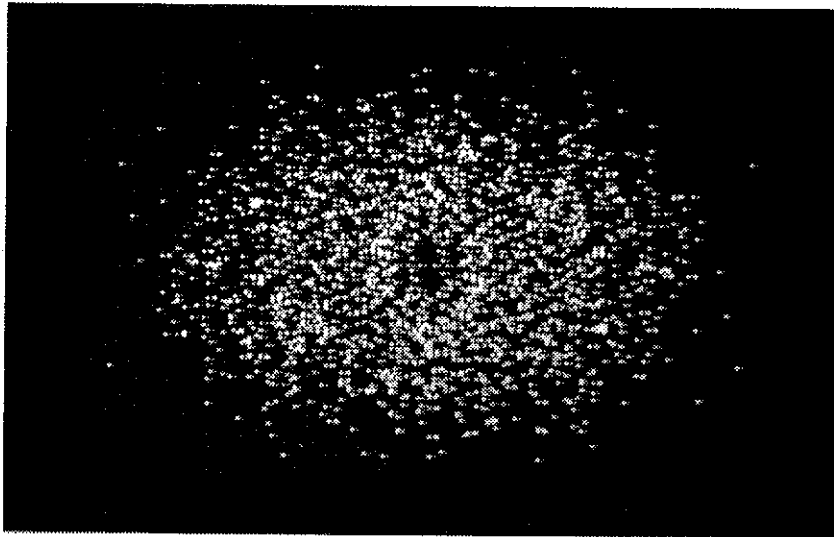
בצירור 7.11 מופיעה שורת הקפסטרום הראשונה של התמונה בצירור 2.5 כאשר השרטוט מכיל רק את החלקים השליליים של השורה ומחזוריות השיאים ברורה.

בצירור 7.12 מופיעה שורת הקפסטרום עבור התמונה שבצירור 7.10 (קשה להבחין בשיא ברור או במחזוריות) ובצירור 7.13 מופיעה שורה אך לאחר ניקוי הרעש וכאן ניתן להבחין בבירור בפולס הנדרש ובמחזוריות.



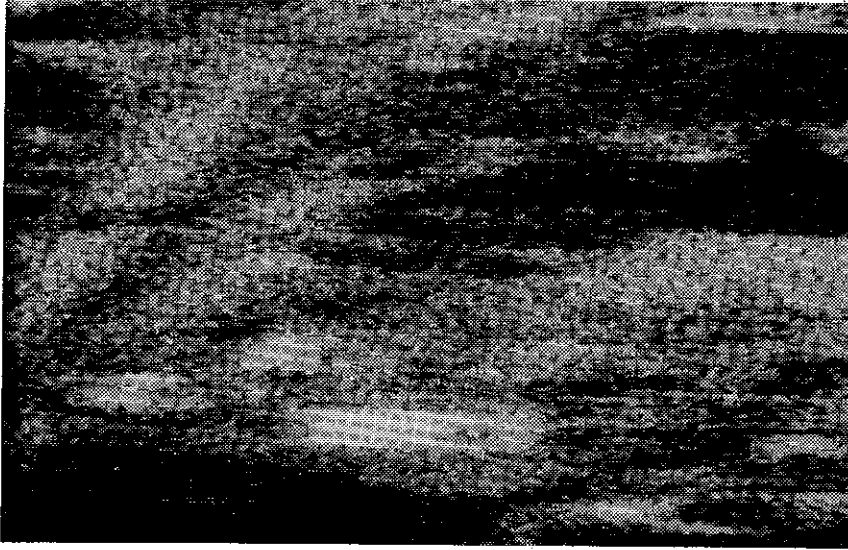
ציור 7.8 - ספקטרום התמונה שבציור 7.6 לאחר ניקול הרעש

Fig. 7.8 - Spectrum of image in fig. 9.7 after spectral Subtraction



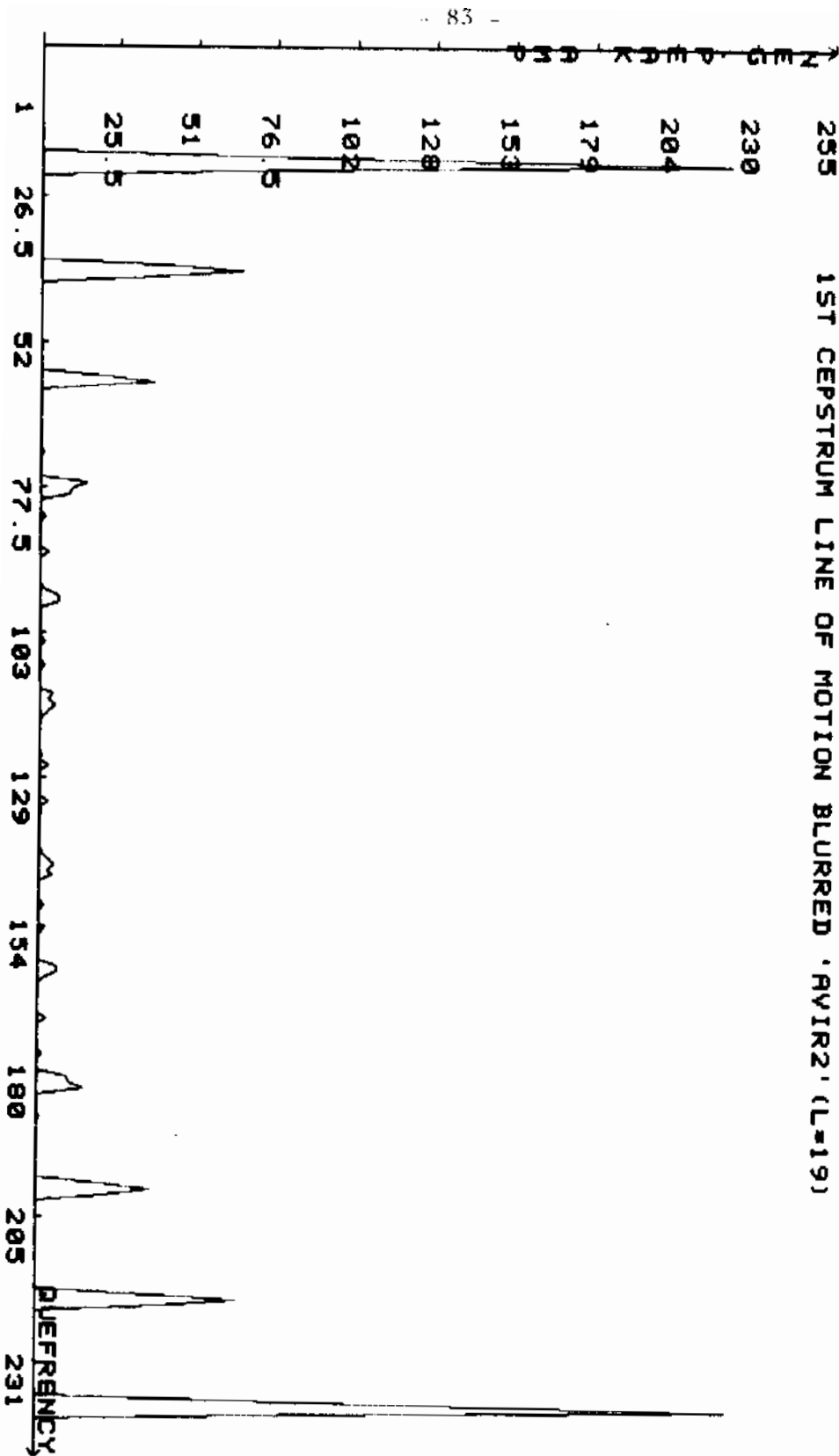
ציור 7.9 - החלק השלילי של הקפסטרום של התמונה בציור 7.6 לאחר החסרה
ספקטרלית של הרעש

Fig. 7.9 - Negative part of cepstrum of image in fig. 7.6 after spectral subtraction of noise



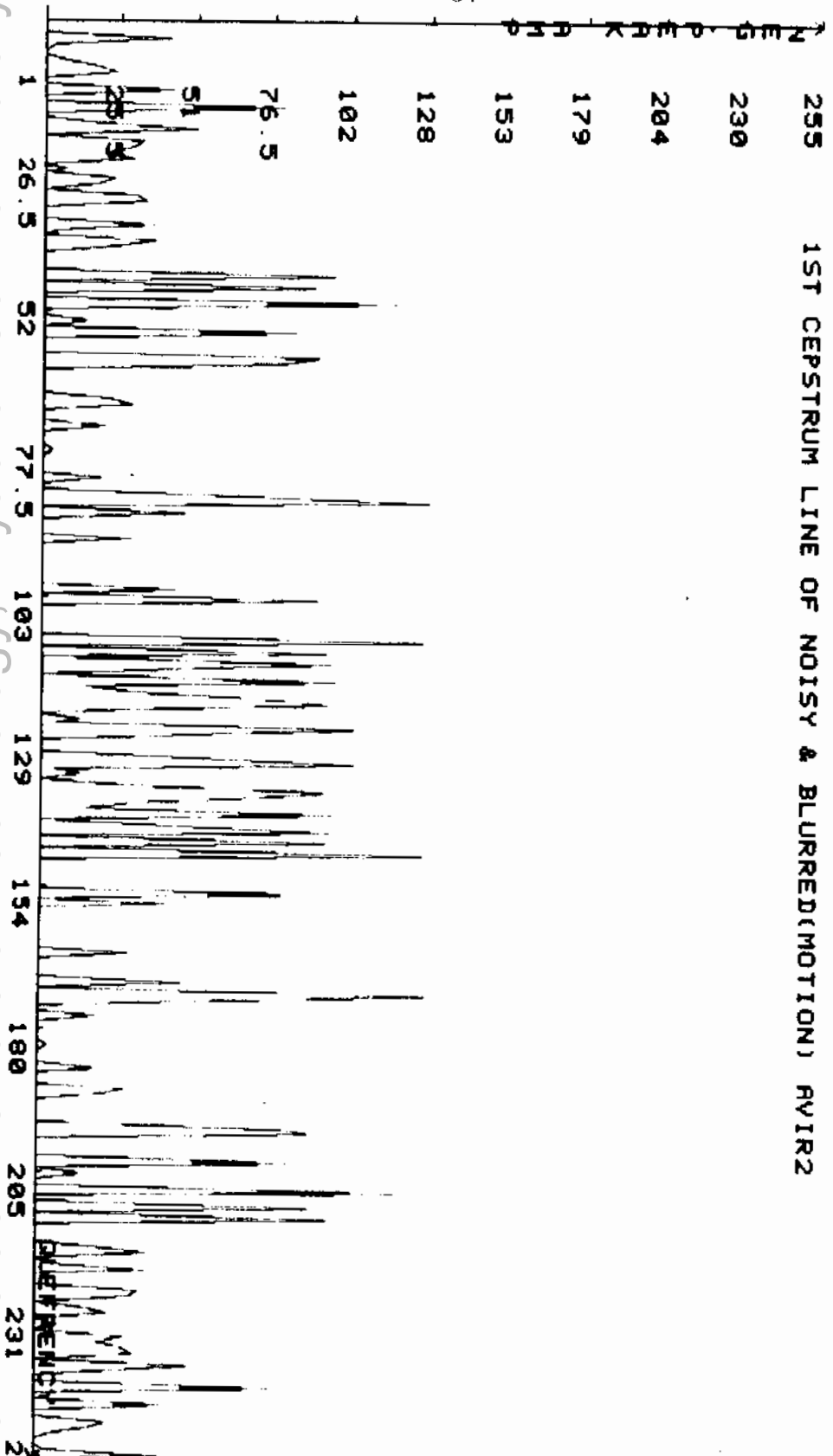
צילום 7.10 - התמונה 'AVIR2' לאחר שעברה טשטוש קולי ליניארי באורך $\lambda=19$
וחוספת רעש (SNR = 0db).

Fig. 7.10 - Noisy and motion blurred ($\lambda=19$) 'AVIR2' (SNR=0db)



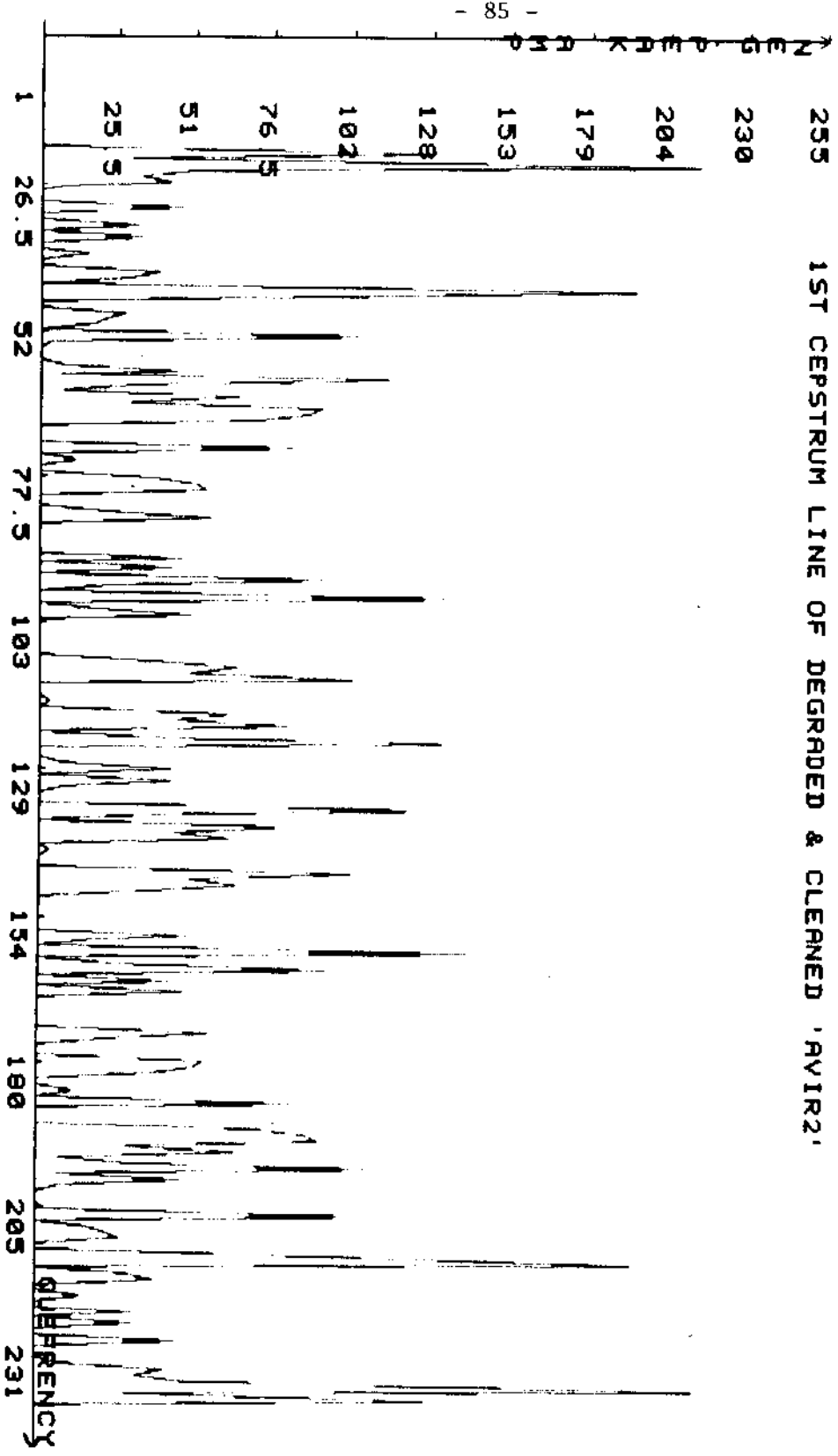
ציור 7.11 - אמפליטודת השיאים השליליים בשורת הקפסטרם הראשונה של התמונה בציור 2.5

Fig. 7.11 - Negative peaks amplitude of 1st cepstrum line of image in fig. 2.5.



ציור 7.12 - אמפליטודת השיאים השליליים בשורת הקפסטרם הראשונה של התמונה בציור 7.10.

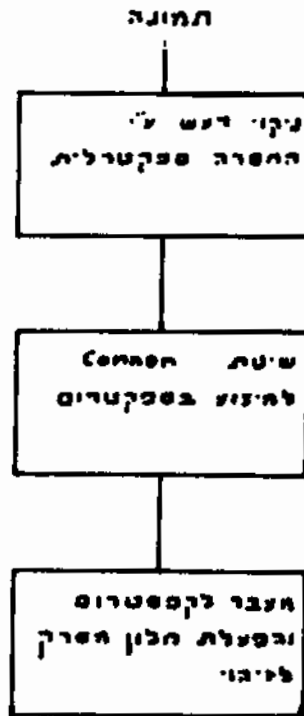
Fig. 7.12 - Negative peaks amplitude of 1st cepstrum line of image in fig.7.10



צירור 7.13 - אמפליטודת השיאים השליליים בשורת הקפסטרום הראשונה של התמונה
 בצירור 7.10 לאחר שעברה ביקורי ע"י החסרה ספקטרלית של הרעש.
 Fig. 7.13 - Negative peaks amplitude of 1st cepstrum line of image in
 fig. 7.10 after subtracting the noise spectrum

8. תאור האלגוריתם המוצע

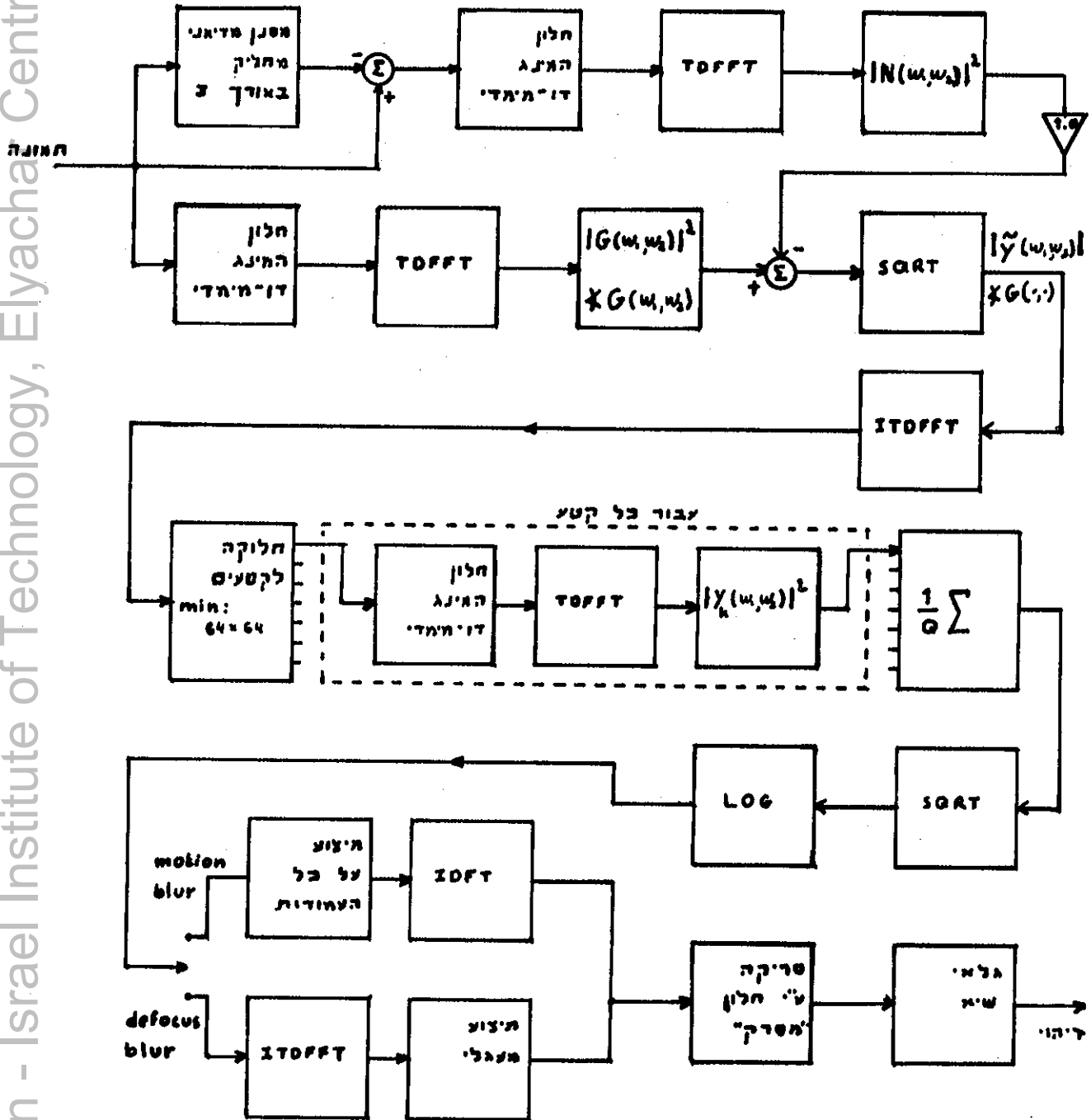
האלגוריתם המוצע על ידינו בנוי משלושה חלקים עיקריים (ראה ציור 8.1). בחלק הראשון מבצעים החסרה ספקטרלית בתור קדם עיבוד לניקוי הרעש. תוצאת חלק זה היא תמונה "מנוקה". בחלק השני מפעילים מיצוע בספקטרום בהתאם לשיטת Cannon ובחלק השלישי עוברים למישור הקפסטרום משתמשים ב-Slice Projection Theorem במקרה הצורך ומפעילים את חלון המסרק לשם הזיהוי.



ציור 8.1 - מבנה כללי של האלגוריתם המוצע

Fig. 8.1 - General structure of proposed algorithm

בציור 8.2 מובא תאור מפורט של האלגוריתם המוצע על ידנו.



ציור 8.2 - תאור האלגוריתם המוצע

Fig. 8.2 - Block diagram of proposed algorithm

הסבר:

בהתאם למסקנות פרק 7 בחרנו בגישה מס' 3 להחסרה ספקטרלית. לפי גישה זו משערכים את הרעש בכל התמונה (ע"י החסרת התמונה המוחלקת בעזרת מסנן מדיאני מהתמונה המקורית), משערכים את ספקטרום ההספק שלו ומחסירים אותו מספקטרום ההספק המשוערך של התמונה המקורית. האמפליטודה המתקבלת לאחר ההחסרה מסומנת ע"י $|\hat{Y}(w_1, w_2)|$. משתמשים בזווית של התמונה המקורית $G(w_1, w_2)$ וחוזרים לתחום המרחב (ע"י ITDFFT). כעת מפעילים את האלגוריתם שתוארנו בסעיף 6.6 בשינויים קלים: סוג החלוקה מוגבל כך שהגודל המינימלי של תת התמונה יהיה 64×64 , אין מפעילים חלון מעביר נמוכים על לוג ממוצע הספקטרום, ומנצלים את ה-Slice Projection Theorem כדי לחסוך בזמן ביצוע. החסכון האחרון מתאפשר כפי שראינו בסעיף 6.5 רק עבור המקרה של טשטוש קוי ליניארי.

8.2 בדיקת ביצועי האלגוריתם המוצע

הבדיקות שערכנו נעשו עבור motion blur עם $\ell=8$ וזאת כדי לאפשר לאפסים במישור הספקטרום "ליפול" בנקודות שהן מספרים שלמים ומדויקים ולכן משוחררים מאפקטים של קוונטיזציה.

במצאות הדבר לא קורה ולכן נבדוק מהם ביצועי האלגוריתם הסופי עבור טשטושים בעלי אורכים ורדיוסים שונים. עבור המקרה של 'motion blur' בחרנו את האורכים $\ell=11$ ו- $\ell=19$ (מספרים ראשוניים). עבור המקרה של 'Out-of-focus blur' בחרנו את הרדיוסים $R=8$ ו- $R=12$. עבור מקרה זה אין חשיבות למספר עצמו משום שבכל מקרה אין האפסים, נופלים, על דגימות שלמות ומדויקות במישור הספקטרום (תלויים בפונקצית בסל). הרדיוסים נבחרו כדי לתת אפקט של טשטוש רציני ביותר. [עבור $R=8$ מבוצע למעשה ממוצע נע מעגלי על פני 200 פיקסלים בקירוב ועבור $R=12$ על פני כ-450 פיקסלים].

8.1 התוצאות מרוכזות בטבלה

טבלה 8.1 - יחסי אות לרעש מינימליים המאפשרים זיהוי עבור מידות טשטוש שונות

Table 8.1 - Minimum SNR for blur identification for various blurs

Blur type סוג הטשטוש	Division type סוג החלוקה		
	1 X 256 X 256	4 X 128 X 128	16 X 64 X 64
'motion' $\ell=11$	0.7db	0.7db	1.1db
'motion' $\ell=19$	-0.4db	-2.3db	0 db
'Defocus' R=8	3.1db	3.1db	4.0db
'Defocus' R=12	2.8db	3.5db	4.7db

העובדה שמושגות תוצאות טובות יותר עבור טשטוש קוי מאשר עבור טשטוש מעגלי מוסברת בכך שבטשטוש מעגלי מבצעים למעשה ממוצע נע על פני מספר גדול מאד של פיקסלים (לפי R^2) בעוד שבטשטוש קוי הממוצע הנע הוא על פני מספר קטן יחסית של פיקסלים (L). תרומה נוספת יש לעובדה שפונקציית בסל (על פיה מתנהגים האפסים בספקטרום איננה מחזורית לגמרי ולכן בקפסטרום מתקבלת עוצמה יותר נמוכה ל"מעגל השלילי" הרצוי.

8.3 זיהוי ושיחזור

בסעיף זה נביא מספר דוגמאות לתמונות שעברו טשטוש אמיתי בעזרת מצלמה שהוצאה ממיקוד או בעזרת תנועה יחסית של המצלמה והתמונה (ולא בעזרת מחשב). התמונות שנדגמו בצורה זו כוללות רעש אך רמת ה-SNR (16db) גבוהה באופן יחסי לרמת ה-SNR המינימלית שבה עבדנו. מתוך התמונות המטושטשות שנדגמו זיהינו את פונקציית ה-'blur' בעזרת האלגוריתם המוצע ושיחזרנו בעזרת מסנן וינר הופכי (סעיף 3.1.2) - (Inverse Wiener Filter).

נוסחת השיחזור ששימשה אותנו היא גרסא שונה במקצת מ-(3.5) או (3.8) (הוספנו את K כדי להמנע מחלוקה במספר קטן מדי במקרים שבהם מתקבל הספק רעש נמוך).

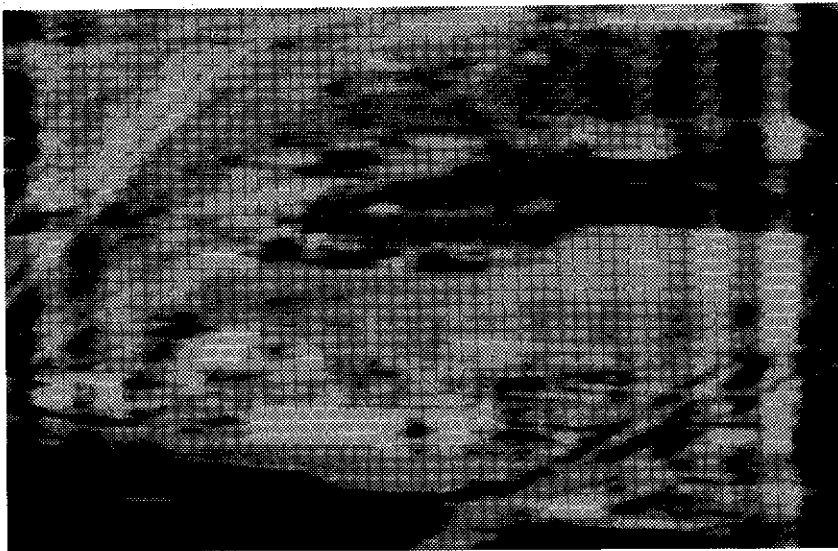
$$\hat{F}(u,v) = G(u,v) \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + P_N(u,v)/P_F(u,v) + K} \quad (8.1)$$

את $P_N(u, v)$ שיערכנו בדיוק באותה דרך ששוערך $P_N(\cdot)$ עבור ההחסרה הספקטרלית (ראה סעיף 7.2.7).

K קבל ערך של - 0.01 עבור motion blur.
- 0.007 עבור defocus blur.

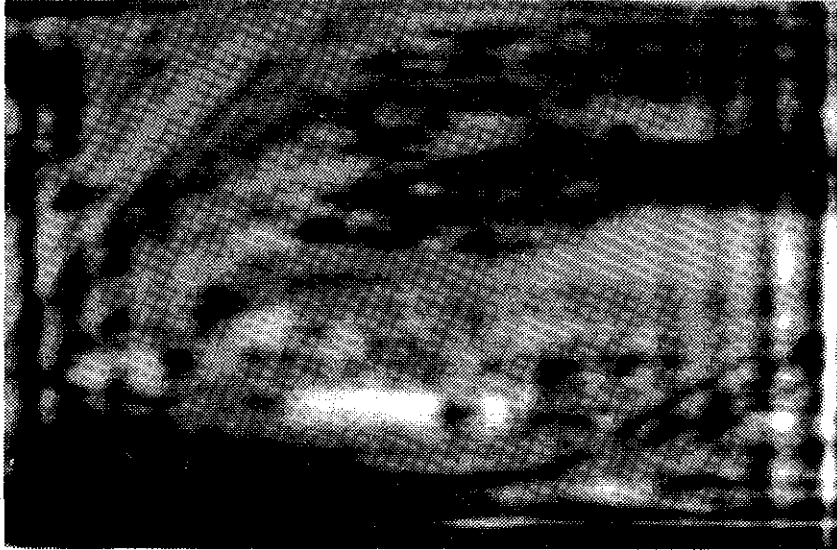
על מנת שהקורא יוכל להעריך נכונה את איכות הזיהוי והשיחזור, נביא תחילה 2 תמונות שטושטשו בעזרת המחשב ושוחזרו בעזרת אלגוריתם זה כאשר עבורן ידענו מראש מהי פונקצית הטשטוש.

- בציור 8.3 מופיע שחזור של התמונה המופיעה בציור 2.5.
- בציור 8.4 מופיע שחזור של התמונה המופיעה בציור 2.3.



ציור 8.3 - שיחזור התמונה המטושטשת קולית (באופן סינטתי) המופיעה בציור 2.5 ($\lambda=19$).

Fig. 8.3 - Restoration of image from fig. 2.5 (Synthetic motion blur $\lambda=19$).



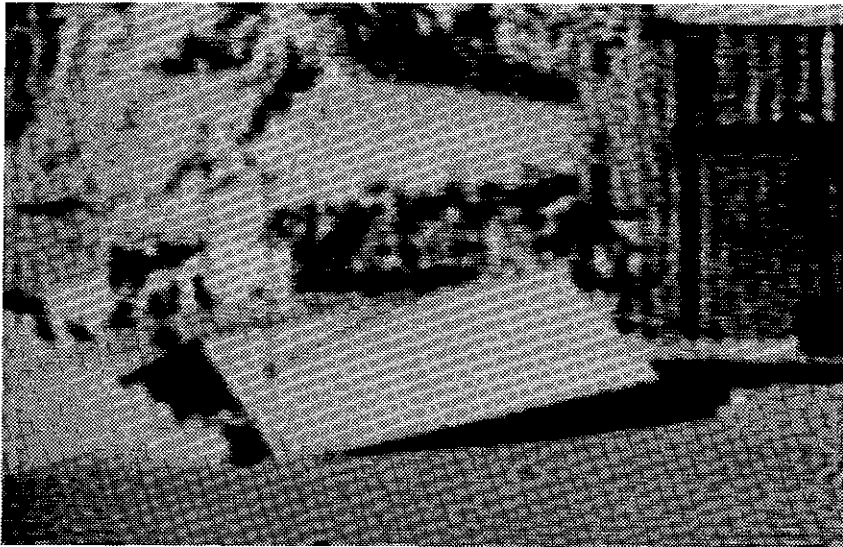
ציור 8.4 - שיחזור של התמונה המטושטשת מעגלית (באופן סינטטי) מציור 2.3 (R=8).

Fig. 8.4 - Restoration of image from fig. 2.3 (Synthetic defocus blur R=8)

בציור 8.5 מופיעה תמונה שנדגמה בצורה מטושטשת. כאשר המצלמה לא הייתה ממוקדת. רדיוס הטשטוש זוהה כ- $R=3.5$. השיחזור מופיע בציור 8.6.



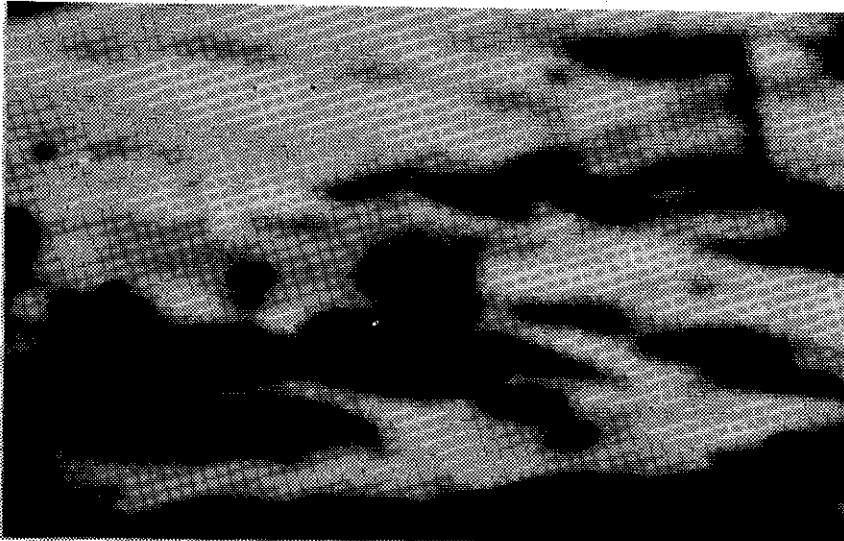
Fig. 8.5 - Image of Ski area photographed with out-of-focus camera



צילור 8.6 - שיחזור התמונה מצילור 8.5 (R=3.5)

Fig. 8.6 - Restored image from Fig. 8.5 (R=3.5)

בצילור 8.7 מופיעה תמונה שצולמה ע"י מצלמה בלתי ממוקדת. רדיוס הטשטוש
זוהה להיות R=5.0. השיחזור מופיע בצילור 8.8.



צילור 8.7 - תמונה שצולמה ע"י מצלמה לא ממוקדת.

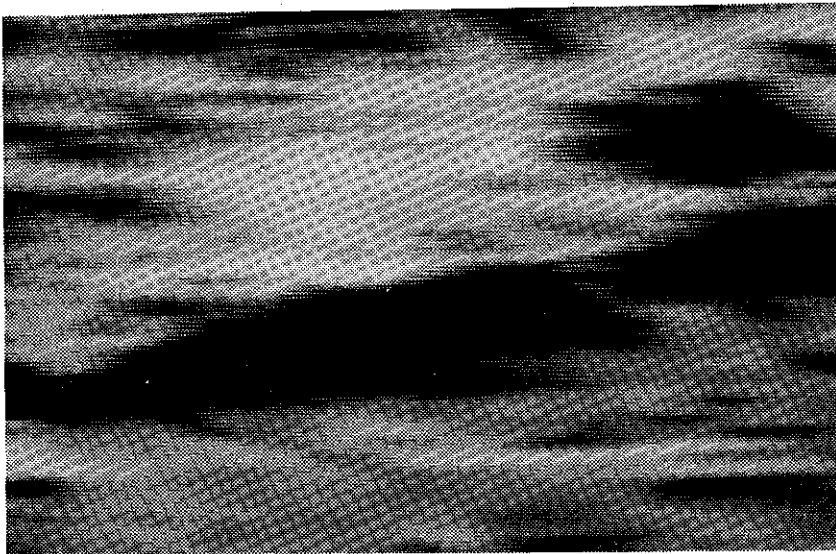
Fig. 8.7 - Image photographed by an out-of-focus camera



צילום 8.8 - שיחזור התמונה מצילום 8.7 (R=5)

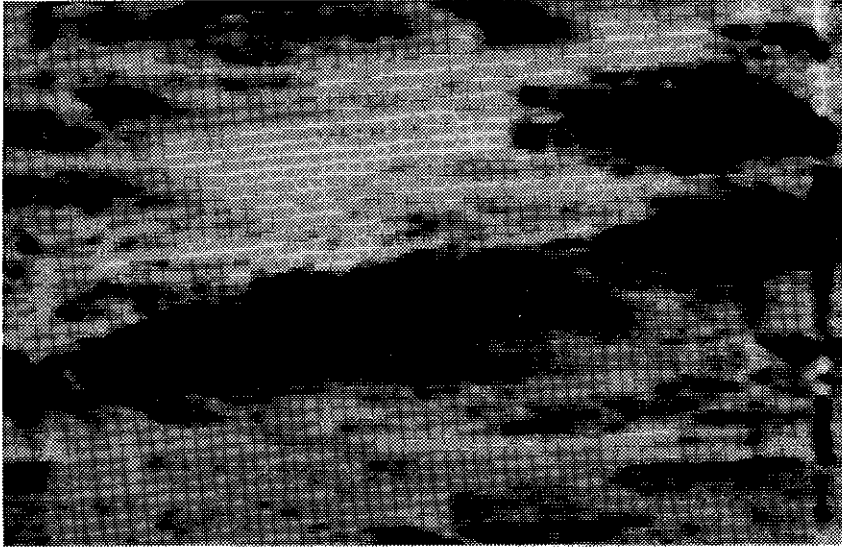
Fig. 8.8 - Restored image of fig. 8.7 (R=5)

בצילום 8.9 מופיעה התמונה מצילום 8.7 הפעם התמונה נדגמה תוך כדי תנועה.
מרחק הטשטוש זוהה להיות $L=19$. השיחזור מופיע בצילום 8.10.



צילום 8.9 - תמונה שצולמה תוך כדי תנועה

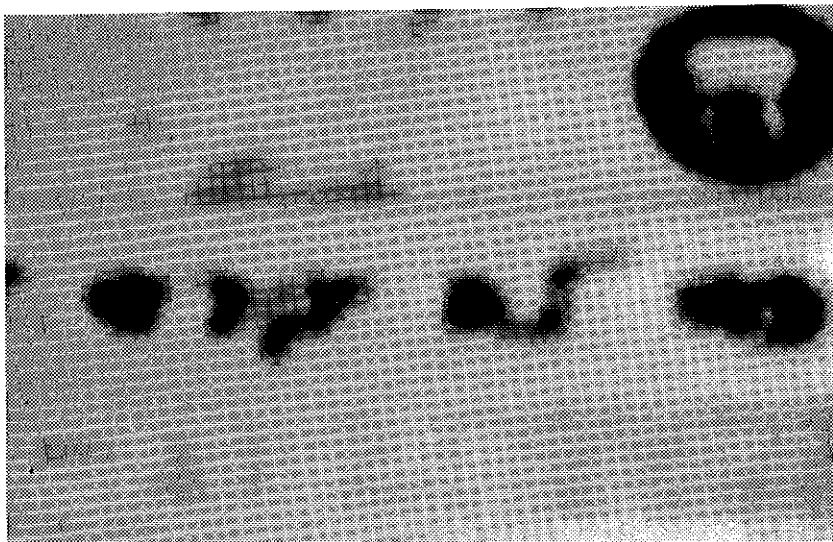
Fig. 8.9 - Image photographed while moving.



ציור 8.10 - שיחזור התמונה מצילום 8.9 ($\lambda=19$)

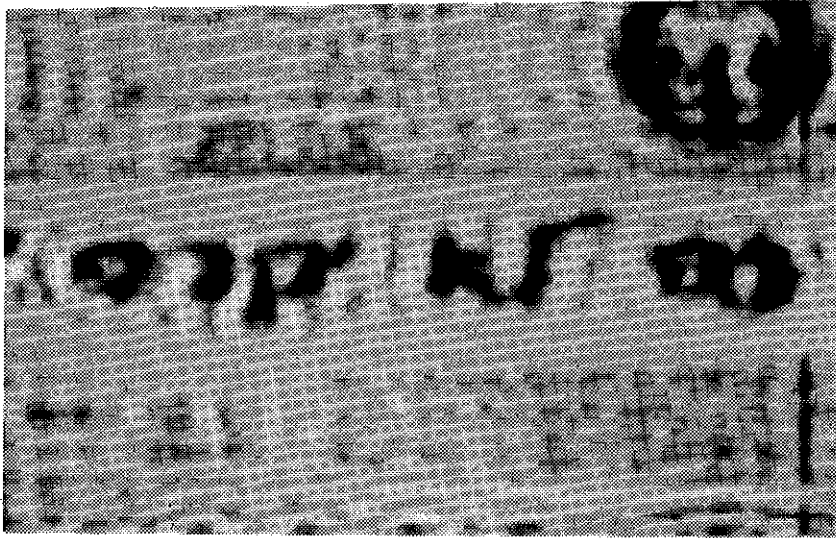
Fig. 8.10 - Restored image of fig. 8.9 ($\lambda=19$)

בציור 8.11 מופיעה תמונת כרזה שצולמה תוך כדי יציאה קשה ממיקוד. רדיוס
המטוש זוהה להיות $R=7.5$. השיחזור מופיע בציור 8.12.



ציור 8.11 - תצלום כרזה תוך כדי יציאה קשה ממיקוד.

Fig. 8.11 - Photograph of a poster with severe out-of-focus blur



צילום 8.12 - שיחזור התמונה מצילום 8.11 (R=7.5)

Fig. 8.12 - Restored image from fig. 8.11 (R=7.5)

9. סיכום ומסקנות

בעבודה זו הצענו אלגוריתם משופר לזיהוי פונקציות טשטוש מרחביות (PSF - Point Spread Function) חד-מימדיות ודו-מימדיות מתוך תמונות מטושטשות ורועשות כאשר האינפורמציה היחידה הנתונה לנו היא התמונה המעוותת עצמה.

המודל למערכת המעוותת מופיע בציר 2.2 וזהו מודל מפושט אך מספיק נאמן עבור סוגי הטשטוש שבהם טפלנו. עקרו: התמונה המקורית $f(x,y)$ עוברת טשטוש (קונבולוציה) ע"י פונקציה בלתי ידועה $h(x,y)$. לתוצאת הקונבולוציה $y(x,y)$ מתווסף רעש $n(x,y)$ ומתקבלת התמונה הנתונה $g(x,y)$. המשוואה תהיה:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \quad (9.1)$$

הבעיה הכללית שבה אנו מטפלים היא בעיית השיחזור, דהיינו מציאת $\tilde{f}(x,y)$ כאשר פונקצית הטשטוש $h(x,y)$ מוגבלת לאחד משני מקרים:

- א. טשטוש עקב תנועה ליניארית אחידה (motion blur)
- ב. טשטוש עקב יציאה ממיקוד (out-of-focus blur)

מתוך סקר שיטות שיחזור (פרק 3) שכלל שיטות 'קלאסיות' ושיטות מודרניות על פי פרסומים מהשנים האחרונות התברר שרוב שיטות השיחזור המוכרות לנו דורשות ידע מוקדם לגבי ה-PSF ולמעשה זהו תנאי לקיום תהליך השיחזור עבורן.

מסיבה זו פנינו, בפרק 4, לבדיקת השיטות הקיימות לזיהוי ה-PSF. נבדקו שיטות במרחב התמונה, במרחב התדר ובמרחב הקפסטרום. השיטה שנבחרה כמבטיחה ביותר הוצעה ע"י Cannon ([8] 1974, [11] 1975, [10] 1976).

שיטה זו מתבססת על העובדות הבאות:

- א. טשטוש קוי ליניארי ניתן לדימוי ע"י מלבן במישור המרחב. להתמרת פורייה של מלבן יש אפסים מחזוריים בהתאם לפונקציה $\text{SinC}(\cdot)$ כאשר המחזוריות של האפסים תלויה באורך המלבן.

ב. טטוש עקב יציאה ממיקוד ניתן לדימוי ע"י גליל במישור המרחב. להתמרת פורייה של גליל יש אפסים מחזוריים כמעט בהתאם לפונקציה $J_1(\cdot)$ כאשר המחזוריות של האפסים תלויה ברדיוס הגליל.

ג. ספקטרום התמונה המטושטשת יכול אפסים בהתאם לפונקציה המטושטשת.

ד. כאשר עוברים למישור הקפסטרום הממשי ע"י (9.2) המחזוריות של האפסים גורמת להופעת פולס שלילי בולט במקרה א' או מעגל שלילי בולט במקרה ב' במימדים ובמרחק מהראשית המאפיינים את פונקצית הטטוש בצורה חד משמעית.

$$C_b(p,q) = F^{-1} \{ \log |B(u,v)| \} \tag{9.2}$$

$$|B(u,v)| - \text{אמפליטודת התמרת פורייה של האות } b(x,y) \\ C_b(p,q) - \text{הקפסטרום הממשי של } b(x,y)$$

הרעיון המרכזי של Cannon היה לחלק את התמונה להרבה תת-תמונות. לשערך את ספקטרום ההספק הדו-מימדי של כל תת-תמונה למצע בספקטרום ואח"כ לעבור לקפסטרום. מאחר ש- $h(x,y)$ נוכח בכל אחת מתת-התמונות, הרי שהמיצוע בספקטרום לא ישנה לגביו אולם מאחר שבדרך כלל לתת-תמונות שונות יש ספקטרומים מעט שונים, המיצוע בספקטרום יגרום ליצירת ספקטרום תמונה מוחלק מאד. בצורה זו קווה Cannon לחסל הפרעות הנובעות מהתמונה עצמה וגורמות לקשיים בזיהוי במקרים שבהם לא מבצעים חלוקות.

בבדיקה שערכנו לאלגוריתם זה בפרק 6 התברר שגישתו של Cannon מתאימה אך ורק עבור תמונות נקיות מרעש. הגורמים העיקריים המפריעים לשיטה זו היו:

- א. כפולות שלמות של הפולס העיקרי הרצוי.
- ב. רעש - ניתן היה לקבל זיהוי רק עבור SNR גבוה מ-20db.

כדי להתגבר על הגורם הראשון, הצענו סריקה של סדרת התוצאה במישור הקפסטרום בעזרת חלון בצורת מסרק. עבור כל נקודה בסדרה זו שהיא בעלת ערך שלילי מבוצע החישוב של היחס שבין עוצמת הפולס בנקודה זו לבין שורש ממוצע הריבועים של כל הנקודות השליליות בסדרה העונות לתנאים הבאים:

- מספרן הסידורי גדול מ-3=No.
- הן אינן מתלכדות עם הנקודה הנבדקת.
- אינן בתחום ± 1 של כפולה שלמה של המספר הסידורי של הנקודה הנבדקת.

הנקודה המקבלת את הערך הגבוה ביותר מתוך הנקודות שנבדקו היא הנקודה אותה אנחנו מחפשים.

כתוצאה מהפעלת מסנן המסרק הסורק הושג שיפור של עד 10db בביצועיהאלגוריתם וניתן היה לזהות מתוך תמונות מטושטשות שיחס האות לרעש שלהן עלה על 10db.

כדי להתגבר על הבעיה השניה באלגוריתם של Cannon בדקנו שיטות שונות לסילוק הרעש (בפרק 7). נבדקו סינון מדיאני, ממוצע נע וסינון במישור הספקטרום. שיטות אלו לא הוכיחו עצמן כיעילות ולכן בדקנו את שיטת ההחסרה הספקטרלית (Spectral Subtraction). הגדרת ההחסרה הספקטרלית מופיעה ב-(7.8).

השילוב האופטימלי של ההחסרה הספקטרלית באלגוריתם הזיהוי נבדק גם כן בפרק 7. שיערוך הרעש התבצע ע"י מסנן מדיאני מחליק והחסרה מהתמונה המקורית (ראה ציור 7.1). שיערוך ספקטרום הרעש התבצע בעזרת חלון המינג על פני כל "תמונת" הרעש.

השילוב היעיל באלגוריתם הזיהוי אפשר שיפור נוסף של ביצועי אלגוריתם הזיהוי בשיעור של 10db לערך.

סה"כ השיפור המושג ע"י האלגוריתם המומלץ בעבודה זו הוא בשיעור של כ-20db לעומת האלגוריתם המקורי. כעת ניתן לזהות את פונקציית ה-PSF מתוך תמונות שיחס האות לרעש שלהן הוא בסביבות ה-0db.

הישג נוסף המתקבל מהשילוב היעיל של ההחסרה הספקטרלית באלגוריתם הזיהוי הוא שלא אלגוריתם אין כעת שום הגבלה על מימדי ה-PSF במרחב התמונה ובאופן תיאורטי הוא מסוגל לטפל בפונקציות טשטוש שמימדיהן עד מחצית ממימדי התמונה.

יש לציין שבבדיקות שערכנו התברר שעבור תמונות שיחס האות לרעש שלהן נמוך מ-20db, אין שיפור בביצועים בתלות במספר קטעי התמונה. בנוסף לא הצלחנו וגם מחברים אחרים (Cole[7] ו-Cannon[8]) לא הצליחו לפתח מדד טיב כזה שיראה על שיפור השיערוך בתלות במספר החלוקות.

כיווני המשך המוצעים לעבודה זו הם:

- א. פיתוח אלגוריתם יעיל לשיחזור תמונות מטושטשות ורועשות על סמך הזהוי המוצע בעבודה זו.
- ב. בדיקת שיפור הביצועים^{ע"י שימוש ב-Vector Spectral Subtraction} לשיערוך האמפליטודה והפאזה של התמונה המקורית מתוך התמונה הרועשת כפי שמוצע ב-[40] וב-[41].

מקורות

1. W.K. Pratt: "digital Image Processing", John Wiley & Sons, New-York, New York, 1978.
2. R.C. Gonzalez & P. Winz: "Digital Image Processing". Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1977.
3. H. Andrews, B.R. Hunt: "Digital Image Restoration", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New-Jersey, 1977.
4. A. Rosenfeld, A.C. Kak: "Digital Picture Processing", Academic Press, New York, 1982, (Second Edition).
5. D.B. Gemery: "Determination of Optical Transfer Function by Inspection of Frequency-Domain Plot". Journal of the Optical Society of America, Vol. 63, No. 12, Dec. 1973, pp. 1571-1577.
6. A. Papoulis: "Approximation of point spread for deconvolution", J. Opt. Soc. of Am. Vol. 62. No. 1. Jan. 1972, pp. 77-80.
7. E.R. Cole: "The removal of unknown image blurs by homomorphic filtering", Ph.D. dissertation. Department of E.E., University of Utah, Salt Lake city, ARPA Tech. Report UTEC-CSc-74-091, 1974.
8. T.M. Cannon: "Digital Image deblurring by non-linear homomorphic filtering", Ph.D. dissertation, Department of E.E., University of Utah, Salt Lake City. ARPA Tech. Report UTEC-CSc-74-091, 1974.
9. R. Rom: "On the Cepstrum of two dimensional functions: IEEE Trans. on Information Theory. Vol. IT-21. pp. 214-217, Mar. 1975.

10. M. Cannon: "Blind Deconvolution of Spatially Invariant Image blurs With Phase", IEEE Trans. on ASSP. Vol. ASSP-24 No.-1, Feb. 1976.
11. T.G. Stockham, T.M. Cannon, R.B. ingebretsen: "Blind Deconvolution Through Digital Signal Processing". Proc. of the IEEE Vol. 63. No.4. April 1975.
12. D.G. Childers, D.P. Skinner, R.C. Kemerait: "The Cepstrum; A Guide to Processing". Proc. IEEE Vol. 65. No. 10. Oct. 1977.
13. A.V. Oppenheim, R.W. Schafer: "Digital Signal Processing", Prentice-Hall N.J. 1977.
14. R.W. Schafer: "Echo Removal by discrete generalized linear filtering". M.I.T. Research Lab. of Elect., Tech. Report 466. Feb. 1969.
15. H. Mitre, J. Fleuret: "Identification of Image degradations". In Digital Image Processing and Analysis! Noordhoff-Leyden, Netherlands 1977, J. Simon, A. Rosenfeld Editors.
16. T.S. Huang, W.F. Schreiber, O.J. Tretiak: "Image Processing". Proc. of the IEEE Vol. 59, No. 11, Nov. 1971, pp. 1586-1609.
17. M.M. Sondhi: "Image Restoration: The removal of Spatially invariant degradations, Proc. IEEE, Vol. 60, pp. 842-853, 1972.
18. D. Slepian: "Restoration of Photographs Blurred by Image Motion", The Bell system tech. J., Dec. 1967, pp. 2353-2362.
19. J.F. Boulter: "Interactive Digital Image Restoration and Enhancement". computer Graphics and Image Processing 11, 1979, pp. 301-312.
20. D.C. Ghiglia: "Space Invariant Deblurring given N independently blurred Images of a Common Object". J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 1, No. 4, April 1984, pp. 398-402.

21. L.R. Berriel, J. Bescos, A. Santisteban: "Image Restoration for a defocused Optical System". Applied Optics, Vol. 22, No. 18, 15 Sept. 1983, pp. 2772-2780.
22. A.F. Lehar, R.J. Stevens: "Image Processing System for Enhancement and Deblurring of Photographs", Optical Engineering, Vol. 23, No.3, May-June 1984, pp. 303-308.
23. J. Maeda, K. Murata: "Image restoration by an iterative regularized pseudo-inverse method", Applied Optics, Vol. 23, No.6, 15 Mar. 1984, pp. 857-861.
24. G. Thomas: "application of the Optimal Control Theory to the Deconvolution Problem". Proc. of ICASSP-80, Denver (CO), Mar. 1980, pp. 947-949.
25. G.Thomas: "A positive Optimal Deconvolution Procedure". Proc. of ICASSP-83, Boston, 1983, pp. 651-654.
26. R.M. Mersereau, R.W. Schafer: "Some Techniques for Digital Deconvolution of Positive Constrained Multi-Dimensional Sequences". Proc. of Conf. on Circuits Theory and Design, Lausanne, Switzerland, Sept. 1978.
27. M.A. Richards, R.W. Schafer, R.M. Mersereau: "An Experimental Study of the Effects of Noise on a Class of Iterative Deconvolution Algorithms". Proc. 1979, Intn. Conf. ASSP. pp. 401-404, April 1979.
28. R.W. Schafer, R.M. Mersereau, M.A. Richards: "Constrained Iterative Restoration Algorithms". Proc. IEEE, Vol. 69, april 1981, pp. 432-450.
29. A.K. Katsaggelos, J. Biemond, R.M. Mersereau, R.W. Schafer: "An Iterative method for Restoring Noisy Blurred Images". Proc. of the ICASSP-84, March 1984, San-Diego (CA.), pp. 37.2.1 - 37.2.4.

30. J. Biemond, J. Rieszke, J.J. Gerbrands: "A Fast Kalman Filter for Images Degraded by Both Blur and Noise". IEEE Trans. on ASSP, Vol. ASSP-31, No.5, Oct. 1983, pp. 1248-1356.
31. A.M. Tekalp, J.W. Woods, H.Kaufman: "A Multiple Model Algorithm for the Adaptive Restoration of Images", Proc. of the ICASSP-83, Boston 1983, pp. 832-835.
32. S. Cooke, T.S. Durrani: "A Two-Dimensional Adaptive Image Deblurring Filter", Proc. of the ICASSP-84, San-Diego (CA), Mar. 1984, pp. 37.10.1-37.10.4.
33. N.N. Abdelmalek, T. Kasvand, P.A. Merril, J.F. Boulter: "Restoration of a Noisy Blurred Image of a Flying Aeroplane", Proc. of PATREC-82, Vol. 2, 1982, p. 1205.
34. A.M. Tekalp, H. Kaufman: "Maximum Likelihood Identification of Unknown Blurs". An Unpublished Paper based upon research under Support from National Science Foundation Grant No. ECS 80-12569.
35. J.S. Lim: "Image Restoration by Short Space Spectral Subtraction", IEEE Trans. on ASSP. Vol. ASSP-28, No.2, April 1980, pp. 191-197.
36. J.S. Lim, H.Nawab: "Techniques for Speckle Noise Removal", SPIE Vol. 243, 1980, pp. 35-44.
37. P. Chan, J.S. Lim: "One Dimensional Processing for Addaptive Image Restoration", Proc. of the ICASSP-84, San-Diego (CA), Mar. 1984, pp. 37.3.1-37.3.9.
38. P.D.Welch: "The use of the FFT for the Estimation of Power Spectra", IEEE Trans. on Audio Electronics, Vol. AU-15, pp. 70-73, June 1967.

39. B.I. Justusson: "Median Filtering Statistical Properties", In Topics in Applied Physics, Two-Dimensional Digital Signal Processing II, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981.
40. Y. Ephraim, D. Malach: "Speech Enhancement Using Vector Spectral Subtraction Amplitude Estimation". Proc. IEEE 13th Conv. Elect. Electron. Eng. in Israel, Tel-Aviv, Mar. 1983.
41. Y. Ephraim, D. Malach: "Speech Enhancement Using a Minimum Mean Square Error Short-Time Spectral Amplitude Estimator", IEEE Trans. on ASSP, Vol. ASSP-32, No.6, Dec. 1984. pp. 1109-1121.

This work was carried out in the Signal and Image Processing Laboratory of the Faculty of Electrical Engineering under the supervision of Prof. David Malach.

I am greatly indebted to prof. David Malach for his devoted supervision.

I am grateful to the laboratory staff and especially to Mrs. Ziva Avni, Miss Zippy Portnoy and Mr. Yoram Or-Chen for their help.

My gratitude to the Ministry of Defence for financing my studies and for allowing me the time to advance this work.

C O N T E N T

	<u>Page no.</u>
Abstract	I
Abbreviations and Significant Notation	3
<u>Chapter 1: Introduction</u>	6
1.1 Definition of Restoration Problem	7
1.2 Thesis Structure	8
<u>Chapter 2: Degradation Model</u>	10
2.1 Image Acquisition	10
2.2 Blurring Sources	13
2.2.1 Out-of-focus Blur	14
2.2.2 Linear Motion Blur	16
<u>Chapter 3: Restoration Methods Survey</u>	19
3.1 Classic Restoration Methods	19
3.1.1 Inverse Filter	19
3.1.2 Wiener Filter (MMSE)	20
3.1.3 Homomorphic Filter	22
3.2 Interactive Methods	23
3.3 Modern Restoration Methods	24
3.3.1 Applying Optimal Control Techniques for Restoration	24
3.3.2 Using Image Model for Iterative Restoration	25
3.3.3 Recursive Method for Parameters Estimation and Restoration	28
3.4 Summary and Conclusions	29
<u>Chapter 4: Method for PSF or OTF Identification</u>	30
4.1 Identification Methods in the Image Plane	30
4.1.1 Identification Using Image Details	30
4.1.2 Adjusting The Autocorrelation Function to a Model	31
4.1.3 Adjusting The Image and The Blurring Function to an ARMA Model	31

4.2 Identification Methods in the Frequency Domain	33
4.3 Identification Methods in the Cepstral Domain	35
4.3.1 Identification in the Log-Spectrum plane.	35
4.3.2 Identification in the Cepstral plane.	37
4.4 Summary - The Selected Method.	41

Chapter 5: Description of Experiment Method 42

5.1 Equipment	42
5.2 Simulation Procedure	43
5.3 Definitions	44
5.3.1 Signal-to-Noise Ratio Definition	44
5.3.2 Blurring Functions Representation in Different Planes	45

Chapter 6: Examination and Enhancement of Cannon's Method for
Identification in the Cepstral Domain 48

6.1 Method Description	48
6.2 Performance Tests	51
6.3 Examination of improvement possibility by Averaging in the Log-Spectrum Instead of the Spectral Domain	53
6.4 Improvement by Sweeping with a "Comb" Window in the cepstral plane.	57
6.5 Examination of the Use of the Slice Projection Theorem for Computation economy	60
6.6 Summary	64
6.6.1 Integration of the "Comb" Algorithm with Cannon's Algorithm	64
6.6.2 Conclusions	66

Chapter 7: Efficient Method for Noise Cleanning 67

7.1 Noise Cleanning Methods	67
7.1.1 Low-Pass Filter in the Log - Spectrum plane	67
7.1.2 Median Filter in the Image Plane.	68
7.1.3 Averaging in the Image Plane	69
7.1.4 Results and Conclusions	69

<u>CONTENT (Cont.)</u>	<u>Page no.</u>
7.2 Noise Cleanning by Spectral Subtraction	70
7.2.1 Definition of Spectral Subtraction	70
7.2.2 Noise Estimation	72
7.2.3 Different Approaches in Spectral Subtraction	73
7.2.3.1 Approach #1	74
7.2.3.2 Approach #2	75
7.2.3.3 Approach #3	76
7.2.3.4 Approach #4	77
7.2.4 Results and Conclusions	78
7.3 Examples of Selected Method Performance	79
<u>Chapter 8: Description of Proposed Algorithm</u>	86
8.1 Algorithm Description	87
8.2 Performance of the Proposed Algorithm	88
8.3 Identification and Restoration	89
<u>Chapter 9: Summary and Conclusions</u>	96
<u>References</u>	100

IDENTIFICATION OF POINT SPREAD FUNCTIONS
FROM BLURRED IMAGES

Final Paper
Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Science
in
Electrical Engineering

by
RAM FABIAN

Submitted to the Senate of the Technion - Israel Institute of Technology

Tishray 5746

Haifa

October 1985

A B S T R A C T

In this dissertation we examine an improved method for identifying one dimensional and two dimensional blur functions (Point Spread Functions - PSF) from blurred and noisy images.

We assume that the blurring system is linear, unknown while the only supplied information is the blurred and noisy image.

The conclusion from a literature survey of classic restoration methods and some recently developed methods reported in this work is that the key for satisfying restoration of image blurred by the type of system considered is precise knowledge of the blurred function. After a careful examination of known algorithms for PSF identification we choose the method of identifying the PSF in the cepstrum domain.

This method is based on the fact that the power spectrums of blurring functions we deal with, motion blur and out-of-focus blur, include periodic zeros or almost periodic zeros. This periodicity shows in the cepstrum domain as a single negative pulse or a set of negative pluses. The location of these pulses in this domain allows the identification of the blur function parameters.

The main problem in this method is its sensitivity to noise. In this work we present two main innovations:

- a. Employing a comb-like window in the cepstrum domain that its main task is to eliminate the influence of the integer multiples of the desired negative pulse. This window contributes a significant enhancement in the overall performance.
- b. Employing additional processing for noise removal. This processing is based on spectral subtraction of the noise. The main innovation is in efficient integration of the spectral subtraction algorithm in the identification algorithm and in efficient estimation of the noise. This integration gives an additional improvement in the overall performance.

The proposed algorithm allows to identify blurring functions from noisy images with signal-to-noise ratio of down to 0 db. In previous works this could have been done only with signal to noise ratios of over 20 db.

Another quality of the proposed algorithm is that there is no practical restriction on the PSF dimensions in the image plane, as theoretically the algorithm can deal with PSFs with dimensions up to half the image dimensions.

The work includes demonstrations of image representations in the spatial, spectral and cepstral domains.