

**תרגיל למוסמכים: פיתוח מערכת LSTM לחילוץ
תדרים מסיגナル מעורב**

**M.Sc. Assignment: Developing an LSTM System for
Frequency Extraction from a Mixed Signal**

ד"ר סgal יoram

כל הזכויות שמורות © Dr. Segal Yoram

November 2025

תוכן העניינים

3	1 רקע ומטרת התרגיל: <i>Background and Goal</i>	1
3	הבעיה: Problem Statement	1.1
3	העקרון: The Principle	1.2
3	דוגמה שימוש: Usage Example	1.3
3	2 יצירת מערך הנתונים: Dataset Creation	2
3	פרמטרים כלליים: General Parameters	2.1
4	יצירת סיגナル S (מעורב ורועש): Noisy Signal Creation	2.2
4	יצירת תוויות האמת (Targets) - ללא רעש: Ground Truth Targets	2.3
4	הבדלים בין סט נתונים: Train vs. Test Sets	2.4
4	3 מבנה מערך הנתונים לאימון: Training Dataset Structure	3
4	4 דגשים פדגוגיים: ניהול מצב פנימי (Internal State)	4
5	המצב הפנימי (Internal State) של LSTM :LSTM (Internal State)	4.1
5	דרישות קריטיות לישום ($L = 1$): Critical Implementation Requirements	4.2
5	המלצה לשיפור ודרישת נימוק: Alternative and Justification	4.3
6	5 הערכת ביצועים: Performance Evaluation	5
6	מדד הצלחה: Success Metrics	5.1
6	גרפים מומלצים: Recommended Graphs	5.2
6	6 סיכום המשימה: Assignment Summary	6
7	7 מקורות בעברית	7

1 רקע ומטרת התרגיל: Background and Goal

1.1 הבעיה: Problem Statement

נתון סיגナル מעורב ורועש S המורכב מ-4 תדרים סינוסואידליים שונים. הרעש משתנה באופן אקראי בכל דגימה. המטרה היא לפתח רשת רשות LSTM (Long Short-Term Memory) שמסוגלת לחצץ כל תדר טהור בנפרד מתוך הסיגナル המעורב, תוך הצלמת מוחלטת מהרעש.

1.2 העקרון: The Principle

המערכת נדרשת לבצע Regression (רגרסיה מותנית):

טבלה 1: מבנה קלט/פלט של המערכת: System Input/Output Structure

Target Output / פלט נדרש / Target _i [t]	תיאור / Description דגימה מהסיגナル הרועש	קלט / Input $S[t]$
— וקטור בחירה C (One-Hot) לבחירת תדר	וקטור בחירה C (One-Hot) לבחירת תדר	C

1.3 דוגמת שימוש: Usage Example

אם וקטור הבחירה הוא $C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, אנו רוצים לחצץ את התדר f_2 הטהור:

$$\text{Input: } \begin{pmatrix} S[t] \\ C \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{LSTM}} \text{Output: } \text{Sinus}_2^{\text{pure}}[t]$$

. (רועל) $S[0] + C \rightarrow \text{LSTM} \rightarrow \text{Sinus}_2^{\text{pure}}[0]$ (טהור)

. (רועל) $S[1] + C \rightarrow \text{LSTM} \rightarrow \text{Sinus}_2^{\text{pure}}[1]$ (טהור)

2 ייצור מערך הנתונים: Dataset Creation

2.1 פרמטרים כלליים: General Parameters

- תדרים: $f_1 = 1 \text{ Hz}, f_2 = 3 \text{ Hz}, f_3 = 5 \text{ Hz}, f_4 = 7 \text{ Hz}$ -

- תחום זמן: $0 - 10 \text{ שניות}$ -

- קצב דגימה (Fs): 1000 Hz -

- סה"כ דגימות: $10,000$ -

2.2 ייצור סיגנל S (מעורב ורועש):

▲ נקודת קריטית: הרעש (אמפליטודה $A_i(t)$ ופазה $\phi_i(t)$) חייב להשנות בכל דגימה t .

1. הסינוס הרועש בדגם t :

$$A_i(t) \sim \text{Uniform}(0.8, 1.2)$$

$$\phi_i(t) \sim \text{Uniform}(0, 2\pi)$$

$$\text{Sinus}_i^{\text{noisy}}(t) = A_i(t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t + \phi_i(t))$$

2. סכימה ונירמול (קלט המערכת):

$$S(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \text{Sinus}_i^{\text{noisy}}(t)$$

2.3 ייצור תוויות האמת (Targets) - ללא רעש:

היעד הטהור לכל תדר i הוא:

$$\text{Target}_i(t) = \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t)$$

2.4 הבדלים בין סטי נתונים:

- סט אימון: משתמש בסט אקראי #1 (Seed #1).

- סט בבחינה: משתמש בסט אקראי #2 (Seed #2). (אותם תדרים, רעש שונה לחלוטין!)

3 מבנה מערך הנתונים לאימון:

סה"כ שורות בסט אימון: 40,000 (10,000 דגימות $4 \times$ תדרים). **פורמט הנתונים:** כל שורה מייצגת דגימה בודדת. קלט הרשות הוא וקטור בגודל 5: $\begin{pmatrix} S[t] & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \end{pmatrix}$.

4 דגשים פדגוגיים: ניהול מצב פנימי (Internal State) ו-Sequence Length

במסגרת תרגיל זה, אנו מגדירים את אורך הרצף (Sequence Length) כ- $L = 1$ כברירת מחדל מתודית.

טבלה 2: פורמט נתונים לדוגמה (סט אימון)

שורה	(sec t)	S[t] (קלט רועש)	C (בחירה)	פלט טהור Target
1	0.000	0.8124	[1, 0, 0, 0]	0.0000
...	[1, 0, 0, 0]	...
10001	0.000	0.8124	[0, 1, 0, 0]	0.0000
10002	0.001	0.7932	[0, 1, 0, 0]	0.0188
40000	9.999	0.6543	[0, 0, 0, 1]	0.0440

4.1 המצב הפנימי (Internal State) של LSTM :LSTM

ה מצב הפנימי של LSTM מורכב מה- h_t (Hidden State) ומ- c_t (Cell State). מצב זה מאפשר לרשת למדו תלות סדרתית (Temporal Dependency) בין דוגמאות.

4.2דרישות קריטיות ליישום ($L = 1$):

כאשר עובדים עם $L = 1$, علينا לנצל את המצב הפנימי ידנית בלולאת האימון כדי שהרשת תוכל לנצל את האזכור שלו:

- ✓ יש לוודא שה מצב הפנימי (h_t ו- c_t) אינו מאופס (Reset) בין דוגמה לדוגמה עוקבת.

טבלה 3: השוואה: ניהול מצב (State Management) במודל LSTM

תרחיש	פעולה נדרשת	הסבר מהותי
LSTM רגיל ($L > 1$)	מאפסים מצב בכל הזנת רצף.	הרשת מנicha שאין קשר סדרתי בין רצפים.
תרגיל זה ($L = 1$)	שומרים מצב ומעבירים אותו כקלט לצעד הבא.	הרשת כן יכולה ללמידה דפוסים סדרתיים על ידי ניהול המצב.

4.3 המלצה לשיפור ודרישת נימוק: Alternative and Justification

הסתיגות: אימון עם רצפים ארוכים ($L > 1$) יUIL יותר חישובית ופדגוגית להמחשת היתרון המלא של LSTM.

- סטודנטים מוזמנים לעבוד עם $L = 10$ בגודל Sliding Window ($L \neq 1$) או $L = 50$ במקום $L = 1$.

- דרישת נימוק: אם נבחר $1 \neq L$, יש לכלול נימוק מפורט בעבודה המציג את הבחירה, כיצד היא תורמת ליתרון ה-Temporal LSTM של ה-.

5 הערבת ביצועים: Performance Evaluation

5.1 מדדי הצלחה: Success Metrics

.1 MSE על סט האימון (רעד #1):

$$\text{MSE}_{\text{train}} = \frac{1}{40000} \sum_{j=1}^{40000} (\text{LSTM}(S_{\text{train}}[t], C) - \text{Target}[t])^2$$

.2 MSE על סט הבדיקה (רעד #2):

$$\text{MSE}_{\text{test}} = \frac{1}{40000} \sum_{j=1}^{40000} (\text{LSTM}(S_{\text{test}}[t], C) - \text{Target}[t])^2$$

.3. בדיקת הכללה (Generalization): אם $\text{MSE}_{\text{test}} \approx \text{MSE}_{\text{train}}$, אז המערכת מقلילה טוב!

5.2 גרפים מומלצים: Recommended Graphs

יש להציג השוואה ויזואלית על סט הבדיקה (רעד #2), כגון:

1. גרפּ 1: השוואת תדר בודד (f_2): הצגת שלושה רכיבים על אותו גרפּ: 1. טהור (קו), 2. LSTM Output (נקודות), 3. S מעורב ורוועש (רקע כאוטי).

2. גרפּ 2: כל 4 התדרים המומלצים: 4 תת-גרפים, כל אחד מציג את החילוץ של תדר f_i בנפרד.

6 סיכום המשימה: Assignment Summary

הסטודנטים נדרשים:

- ✓ ייצור נתונים: לייצר 2 מערכות נתונים (אימון ובדיקה) עם רעד המשתנה בכל דגימה.

- ✓ בניית מודל: לבנות רשת LSTM שמקבלת $(S[t] \quad C)$ ומחזירה דגימה טהורה $.\text{Target}_i[t]$.

- ✓ ניהול מצב: לוודא שהמצב הפנימי נשמר בין דוגמאות עוקבות (Sequence Length) לצורך למידה סדרתית. $L = 1$.

- ✓ הערפה: להעריך ביצועים באמצעות MSE וגרפים ולנתח את הכללת המערכת לרעד חדש.

המפתח להצלחה הוא ניהול מצב פנימי נכון ולימוד המבנה התדידותי העקבי של Target_i והתعلمות מהרעיון האקראי!

