עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 4, סתיו

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם קורס סמסטריאלי לשנה האחרונה באוויוניקה ובהנדסת מערכות. הוא בנוי לפי הנושאים והעומק של MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (חינם ב־MIT OpenCourseWare) ושל NASA Systems Engineering Handbook, שאליהם אנו מקשרים היכן שהם מועילים. לא MIT ולא NASA מעניקים חסות לדף זה.

מה שאנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט (Landsat 9, האבל, Dragonfly ומערכת התעבורה האווירית של ה־FAA), כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני פרסומו, ולכל מעבדה יש הדמיה חינמית או גיליון אלקטרוני.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

לווייני תצפית על כדור הארץ, חלליות מזג אוויר ותעבורה אווירית יעילה תלויים כולם באוויוניקה שפועלת שנים בלי ביקור תיקון, ובהנדסת מערכות שגורמת לאלפי רכיבים להתנהג כאחד.

דרישות טובות, יתירות ובדיקות הן שמאפשרות ללוויין להמשיך למדוד יערות, קרח ואוקיינוסים הרבה אחרי אורך החיים התכנוני שלו. כל יחידה מסתיימת בקטע קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה או כערכי ספר לימוד.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (AERO 450).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.

- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- מעגלים: מתח, זרם, התנגדות ואותות ספרתיים.
- הסתברות וסטטיסטיקה: כללי הסתברות, התפלגות מעריכית ושונות.
- דינמיקת טיסה ובקרה: משוב, חיישנים ומפעילים.
- מבוא לתכנות: לולאות, פונקציות ותזמון.

איך ללמוד

- התחילו כל בעיה מהדרישה שהיא משרתת.
- שרטטו דיאגרמות בלוקים וממשקים לפני כל חישוב.
- שמרו על הסתברויות כמספרים בין 0 ל־1 ובדקו שהן נשארות שם.
- עקבו אחר יחידות: ביטים, בתים, שניות, הרץ, דציבלים.
- שאלו "מה קורה אם רכיב זה כושל?" על כל בלוק שאתם משרטטים.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

מה צריך

- מחשב או טאבלט להדמיה החינמית PhET Circuit Construction Kit: DC.
- תוכנת גיליון אלקטרוני (כל תוכנה חינמית מתאימה), או Python.
- NASA Systems Engineering Handbook החינמי בדפדפן.
- מחשבון.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	מחזור החיים של הנדסת מערכות ודרישות	מחזור חיים ודרישות	NASA SE Handbook
2	ארכיטקטורה, ממשקים ואינטגרציה	ארכיטקטורה וממשקים; מעבדה A	MIT 16.842

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
3	אמינות ויתירות	מודלים של אמינות	NASA SE Handbook
4	אמינות ויתירות	יתירות; מעבדה B	NASA Hubble
5	ניתוח בטיחות: FMEA ועצי תקלות	FMEA ועצי תקלות; מעבדה C	NASA SE Handbook
6	אוויוניקה ספרתית ואפיקי נתונים	אוויוניקה ספרתית	MIT 16.842
7	אוויוניקה ספרתית ואפיקי נתונים	אפיקי נתונים; מעבדה D; תרגול לבוחן אמצע	NASA Landsat 9
8	חיישני ניווט: יחידות מדידה אינרציאליות, GNSS, מצלמות ולידאר	חיישני ניווט	NASA Dragonfly
9	היתוך חיישנים ומסנן קלמן	היתוך חיישנים ומסנני קלמן; מעבדה E	MIT 16.842
10	תקשורת ומעקב: ADS-B	תקשורת ו־ADS-B	FAA ADS-B
11	תוכנת טיסה בזמן אמת	תוכנה בזמן אמת	MIT 16.842
12	תוכנת טיסה בזמן אמת	הגנה מפני תקלות; מעבדה F	NASA Hubble
13	אינטגרציה, אימות ותפעול	אינטגרציה ואימות	NASA SE Handbook
14	אינטגרציה, אימות ותפעול	עמדות ניסוי והזרקת תקלות	NASA Dragonfly
15	אינטגרציה, אימות ותפעול	חזרה; תרגול למבחן הסופי	MIT 16.842

ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

יחידות

מחזור החיים של הנדסת מערכות ודרישות

בעלי עניין, מודל V, שלבי מחזור החיים וסקרים, דרישות טובות, מדדי ביצועים טכניים ומרווחים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- תארו את מודל ה־V.
- כתבו דרישות ניתנות לאימות.
- חשבו מרווחים ביחס לדרישה.
- עקבו אחר מדד ביצועים טכני.

מושגי מפתח

- הנדסת מערכות הופכת את צורכי בעלי העניין למערכת שעובדת, בזמן ובתקציב, לאורך כל חייה.
- מודל ה־V יורד בצד שמאל (דרישות, ארכיטקטורה, תכן) ועולה בצד ימין (אינטגרציה, אימות, תיקוף).
- דרישה טובה היא הכרחית, ברורה, ישימה וניתנת לאימות, עם מספר, יחידה ושיטת בדיקה.
- מדדי ביצועים טכניים כמו מסה, הספק וקצב נתונים נמדדים מול הקצאות עם מרווח.
- סקרים (תפיסה, תכן מקדמי, תכן קריטי) מהווים שער לכל שלב; סטודנטים ב־MIT 16.842 מכינים תכן ברמת סקר תכן מקדמי.

משוואות מפתח

$$\text{Margin} = \frac{C - N}{N}$$

```
Margin=(C-N)/(N)
```

מרווח מעל הצורך

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

```
m_alloc=m_est(1+M)
```

הקצאה עם מרווח

$$S = \sum w_i s_i$$

```
S= w_is_i
```

ציון פשרה משוקלל

$$\sum w_i = 1$$

```
w_i=1
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 NASA דורשת ש־Landsat 9 יאסוף לפחות 400 סצנות ביום; הוא אוסף 740. מצאו את המרווח.

1. (740 − 400)/400.

תשובה: 85% מעל הדרישה.

דוגמה 1.2 קופסת אוויוניקה מוערכת ב־12 kg. הקצו עם מרווח של 25% (ערכים לדוגמה).

1. 12 × 1.25.

תשובה: 15 kg.

דוגמה 1.3 אפשרות A מקבלת 7 (עלות) ו־8 (אמינות); B מקבלת 9 ו־6. משקלות 0.3 ו־0.7. מי מנצחת?

1. A = 2.1 + 5.6 = 7.7.
2. B = 2.7 + 4.2 = 6.9.

תשובה: A, 7.7 מול 6.9.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אורך החיים התכנוני של Landsat 9 הוא 5 שנים והמתכלים מחזיקים 10 שנים. היחס?

2.

2. הקצו 400 W הספק עם מרווח של 30%.

520 W.

3. נסחו מחדש ”הרדיו יהיה מהיר” כדרישה ניתנת לאימות.

לדוגמה: ”הרדיו ישדר בערוץ היורד לפחות 300 Mbit/s, באימות בבדיקה.”

4. באיזה צד של ה־V נמצא האימות?

בצד ימין.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: דרישות מתארות את התכן.

בפועל: הן קובעות מה נדרש, לא איך.

מיתוס: מרווח הוא בזבוז.

בפועל: הוא סופג גדילה והפתעות.

מיתוס: אימות ותיקוף הם אותו דבר.

בפועל: אימות: נבנה נכון; תיקוף: נבנה הדבר הנכון.

כרטיסיות

מודל V

פירוק בירידה, אינטגרציה ואימות בעלייה.

דרישה

צורך ניתן לאימות.

TPM

מדד ביצועים טכני במעקב.

PDR

סקר תכן מקדמי.

אימות

נבנה נכון.

אימות

נבנה הדבר הנכון.

בוחן לבדיקה עצמית

1. המרווח של Landsat 9…

85%

74%

40%

185%

.85%. (740 − 400)/400

2. 12 kg + 25%…

15 kg

13 kg

12.25 kg

16 kg

15 kg. הכפילו.

3. המנצח בפשרה…

A

B

תיקו

אף אחד מהם

A. 7.7 > 6.9.

4. דרישה טובה היא…

ניתנת לאימות

מעורפלת

תכן

רשות

ניתנת לאימות. ניתנת לבדיקה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מפרטת את דרישות Landsat 9, ובהן לפחות 400 סצנות ביום ואורך חיים תכנוני של 5 שנים; Landsat 9 אוסף 740 סצנות ביום, כמעט כפול מהמינימום, ונושא די דלק לפעול לפחות 10 שנים.

יחד עם Landsat 8 הוא צופה באותו מקום כל 8 ימים, מה שמאפשר התרעות כמעט שבועיות על כריתת יערות טרופיים, ניטור איכות מים ודוחות גידולים, פירות של דרישות שנכתבו ומולאו עם מרווח.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · תכנון חלליות

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך NASA חינמי, סעיפים 4–3.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.

צפו בהרצאה

Lecture 21: Systems Engineering for Space Shuttle Payloads (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-21/) (באנגלית)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

ארכיטקטורה, ממשקים ואינטגרציה

ארכיטקטורה פונקציונלית ופיזית, בקרת ממשקים, דיאגרמות N², הנדסת מערכות מבוססת מודלים ומדוע ממשקים גדלים מהר.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מפו פונקציות לרכיבים.
- ספרו ממשקים אפשריים.
- קראו דיאגרמת N².
- הסבירו הנדסת מערכות מבוססת מודלים.

מושגי מפתח

- ארכיטקטורה פונקציונלית אומרת מה המערכת עושה; ארכיטקטורה פיזית אומרת אילו קופסאות עושות זאת.
- כל זוג רכיבים עשוי לדרוש ממשק, ולכן הממשקים האפשריים גדלים כמו n(n − 1)/2.
- דיאגרמת N² מציבה רכיבים על האלכסון ואת הנתונים או ההספק ביניהם מחוץ לאלכסון.
- מסמכי בקרת ממשקים קובעים מחברים, אותות, תזמון ותבניות נתונים כדי שצוותים יוכלו לבנות במקביל.
- NASA מציינת שעדכון המדריך שלה כולל הנדסת מערכות מבוססת מודלים (MBSE), השומרת דרישות, ארכיטקטורה וניתוחים במודל מקושר אחד.

משוואות מפתח

$$I = \frac{n(n-1)}{2}$$

```
I=(n(n-1))/(2)
```

ממשקים דו־כיווניים אפשריים

$$N_{cells} = n(n-1)$$

```
N_cells=n(n-1)
```

תאי N² מחוץ לאלכסון

$$B = \sum_{i} r_i$$

```
B=_i r_i
```

עומס אפיק כולל

$$U = B / B_{max}$$

U=B/B_max

ניצולת אפיק

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 לחבילת אוויוניקה יש 8 קופסאות. כמה ממשקים אפשריים?

1. 7/2 × 8.

תשובה: 28.

דוגמה 2.2 הוסיפו 4 קופסאות (n = 12).

1. 11/2 × 12.

תשובה: 66, יותר מפי שניים.

דוגמה 2.3 שלוש קופסאות שולחות 20, 35 ו־15 kbit/s על אפיק של 100 kbit/s. ניצולת?

1. 70/100.

תשובה: 70%.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. תאי N² מחוץ לאלכסון עבור n = 8?

56.

2. ממשקים עבור n = 4?

6.

3. מדוע לשמור על ניצולת אפיק מתחת ל־100%?

מקום לגדילה, לשידורים חוזרים ולריצוד תזמון.

4. מהו ICD?

מסמך בקרת ממשק.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: ממשקים גדלים באופן ליניארי.

בפועל: הם גדלים בערך כמו n^2.

מיתוס: ארכיטקטורה היא רק רשימת חלקים.

בפועל: היא כוללת פונקציות וחיבורים.

מיתוס: MBSE מחליפה מהנדסים.

בפועל: היא מקשרת את עבודתם.

כרטיסיות

ארכיטקטורה

פונקציות הממופות לרכיבים.

דיאגרמת N²

מטריצת ממשקים.

ICD

מסמך בקרת ממשק.

MBSE

הנדסת מערכות מבוססת מודלים.

אינטגרציה

חיבור רכיבים.

עומס אפיק

סכום קצבי הנתונים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. ממשקים ל־8 קופסאות…

28

56

16

64

28. $n(n-1)/2$.

2. ל־12 קופסאות...

66

132

24

144

11/2 × 12 .66.

3. ניצולת אפיק...

70%

35%

100%

7%

70/100 .70%.

4. MBSE פירושו...

הנדסת מערכות מבוססת מודלים

תקציב מסה

בסיס המשימה

שגיאת אפיק ממוצעת

הנדסת מערכות מבוססת מודלים. NASA.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת שה־Systems Engineering Handbook שלה עודכן כך שיכלול הנדסת מערכות מבוססת מודלים, בהסתמך על לקחים ממשימות ומתקלות.

ממשקים ברורים מאפשרים לצוותי המכשירים והחללית לבנות במקביל, וכך משימות תצפית על כדור הארץ כמו Landsat 9 מגיעות למסלול בזמן.

ב־Saving Planets: תכנון חלליות · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך NASA חינמי, סעיף 4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.

צפו בהרצאה

Session 8: Systems Integration and Interface Management (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-8-systems-integration-and-interface-management/) (באנגלית)

MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

אמינות ויתירות

שיעורי כשל, אמינות מעריכית, MTBF, מערכות טוריות ומקבילות, יתירות מודולרית משולשת, מערכות k מתוך n וזמינות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו אמינות משיעור כשל.
- שלבו בלוקים טוריים ומקבילים.
- חשבו אמינות של הצבעת 2 מתוך 3.
- חשבו זמינות.

מושגי מפתח

- עם שיעור כשל קבוע λ, האמינות יורדת כמו e^(−λt) והזמן הממוצע בין כשלים הוא 1/λ.
- מערכות טוריות כושלות אם רכיב כלשהו כושל, ולכן האמינויות מוכפלות.
- מערכות מקבילות (יתירות) כושלות רק אם כל הרכיבים כושלים.
- יתירות מודולרית משולשת מצביעה 2 מתוך 3; היא עדיפה על יחידה בודדת בתחילת החיים אך לא אחרי ש־R יורד מתחת ל־0.5.
- זמינות היא חלק הזמן שבו מערכת פועלת: MTBF/(MTBF + MTTR).

משוואות מפתח

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

```
R(t)=e^- t
```

אמינות מעריכית

$$R_s = \prod R_i,\ R_p = 1 - \prod (1 - R_i)$$

```
R_s= R_i,\ R_p=1-(1-R_i)
```

טור ומקביל

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

```
R_2/3=3R^2-2R^3
```

הצבעת שניים מתוך שלושה

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

```
A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 ליחידה $\lambda = 10^{-5}$ לשעה. אמינות לאורך 10000 h?

1. $e^{(-0.1)}$.

תשובה: 0.905.

דוגמה 3.2 שתי יחידות כאלה במקביל?

1. $1 - (1 - 0.9048)^2$.

תשובה: 0.991.

דוגמה 3.3 שלוש יחידות בהצבעת 2 מתוך 3?

1. $3(0.9048)^2 - 2(0.9048)^3$.

תשובה: 0.975.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. MTBF עבור $\lambda = 10^{-5}$ /h?

   100,000 h.

2. יחידה בודדת, כפולה ו־TMR ב־50000 h?

   0.607, 0.845, 0.657.

3. זמינות עם MTBF של 1000 h ו־MTTR של 2 h?

   0.998.

4. האבל זקוק לג'ירוסקופ פועל אחד מתוך שלושה. איזה מודל?

   1 מתוך 3 (מקבילי).

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: יתירות תמיד עוזרת.

בפועל: TMR מפסידה ליחידה בודדת כאשר $R < 0.5$.

מיתוס: MTBF הוא אורך חיים מובטח.

בפועל: זהו ממוצע; רבים כושלים מוקדם יותר.

מיתוס: אמינות טורית מתחברת.

בפועל: היא מוכפלת.

כרטיסיות

שיעור כשל

כשלים לשעה.

MTBF

זמן ממוצע בין כשלים.

יתירות

יחידות גיבוי.

TMR

יתירות מודולרית משולשת, הצבעת 2 מתוך 3.

זמינות

חלק הזמן בפעולה.

k מתוך n

פועלת אם k מתוך n פועלים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. R(10,000 h)…

0.905

0.990

0.1

0.5

.0.905. e^(−0.1)

2. זוג במקביל…

0.991

0.819

0.905

1

.0.991. 1 − 0.0952²

3. TMR…

0.975

0.905

0.991

0.857

.0.975. 3R² − 2R³

4. MTBF…

100,000 h

10,000 h

1000 h

10^{-5} h

.100,000 h. 1/λ

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת שהאבל קיבל שישה ג׳ירוסקופים חדשים ב־2009, שלושה נותרו פעילים, וכשאחד החזיר קריאות שגויות NASA העבירה את האבל למצב ג׳ירוסקופ יחיד תוך שמירת אחר ברזרבה.

האבל שוגר ב־1990 ויותר מהכפיל את אורך החיים התכנוני הצפוי שלו; יתירות שתוכננה עשרות שנים קודם לכן שומרת מצפה פעיל במסלול במקום תחליף.

ב־Saving Planets: דינמיקת טיסה ובקרה · תכנון חלליות

מקורות: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס״א.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): הכתבה של NASA על הג׳ירוסקופים של האבל.

סיימתי את היחידה הזו

ניתוח בטיחות: FMEA ועצי תקלות

סיכונים, ניתוח אופני כשל והשפעותיהם, מספרי עדיפות סיכון, עצי תקלות עם שערי AND ו־OR, ותכן קריטי לבטיחות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- בצעו FMEA פשוט.
- חשבו מספר עדיפות סיכון.
- העריכו שערי AND ו־OR.
- בחרו אמצעי מיתון.

מושגי מפתח

- FMEA עובד מלמטה למעלה: לכל רכיב, פרטו כיצד הוא עלול לכשול, מה ההשפעה וכיצד הכשל יזוהה.
- מספר עדיפות סיכון מכפיל את ציוני החומרה, ההתרחשות והגילוי (כל אחד 1–10, סולם ספר לימוד).
- עץ תקלות עובד מלמעלה למטה מאירוע לא רצוי; שערי OR מוסיפים סיכון, שערי AND (יתירות) מקטינים אותו.
- להסתברויות קטנות ובלתי תלויות, שער OR שווה בקירוב לסכום ושער AND למכפלה.
- לקחים מתאונות מעצבים את הפרקטיקה; NASA מציינת שהמדריך שלה נשען על Columbia Accident Investigation Board ועל דוחות נוספים.

משוואות מפתח

$$RPN = S \times O \times D$$

```
RPN=S× O× D
```

מספר עדיפות סיכון

$$P_{OR} = 1 - \prod (1 - p_i)$$

```
P_OR=1-(1-p_i)
```

שער OR

$$P_{AND} = \prod p_i$$

```
P_AND= p_i
```

שער AND

$$P_{OR} \approx \sum p_i$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 לכשל חיישן הציונים $S = 8$, $O = 4$, $D = 5$. מהו RPN?

1. $5 \times 4 \times 8$.

תשובה: 160.

דוגמה 4.2 כל אחת משתי תקלות ($p = 10^{-3}$ ו־2×10^{-3}) גורמת לאובדן נתונים. הסתברות?

1. $1 - (0.999)(0.998)$.

תשובה: 2.998×10^{-3}.

דוגמה 4.3 האובדן דורש את שתי התקלות (תכן יתיר).

1. $2 \times 10^{-3} \times 10^{-3}$.

תשובה: 2×10^{-6}.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. גילוי טוב יותר מוריד את D ל־2. RPN חדש?

   64.

2. קירוב אירועים נדירים לשער OR?

   3×10^{-3}.

3. איזה שער יוצרת יתירות?

   AND.

4. מלמעלה למטה או מלמטה למעלה: עץ תקלות?

   מלמעלה למטה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: RPN הוא הסתברות.

בפועל: זהו ציון דירוג.

מיתוס: שערי OR מכפילים.

בפועל: שערי AND מכפילים.

מיתוס: רכיבים יתירים כושלים באופן בלתי תלוי.

בפועל: גורמים משותפים עלולים להכשיל את שניהם.

כרטיסיות

FMEA

ניתוח אופני כשל והשפעותיהם.

RPN

חומרה × התרחשות × גילוי.

עץ תקלות

לוגיקת כשל מלמעלה למטה.

שער OR

כל קלט גורם לאירוע.

שער AND

כל הקלטים נדרשים.

גורם משותף

אירוע אחד המכשיל כמה רכיבים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. RPN…

160

17

40

320

5 × 4 × 8 .160.

2. שער OR…

$\approx 3 \times 10^{-3}$

2×10^{-6}

10^{-3}

0.5

$1 - \prod(1 - p) \approx 3 \times 10^{-3}$.

3. שער AND…

2×10^{-6}

3×10^{-3}

10^{-3}

2×10^{-3}

2×10^{-6}. מכפלה.

4. עובד FMEA…

מלמטה למעלה

מלמעלה למטה

הצידה

באקראי

מלמטה למעלה. רכיב אחר רכיב.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת שהלקחים שתיעדו Columbia Accident Investigation Board, NASA Integrated Action Team ואחרים, וכן תקלות בפעולות קרקע ובטיסות חלל מסחריות, עיצבו את מדריך הנדסת המערכות שלה.

אותם כלי בטיחות מגנים על הלוויינים העוקבים אחר שרפות, סופות וקרח ים. ההסתברויות ביחידה זו הן ערכים לדוגמה.

ב־Saving Planets: פתרונות · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך NASA חינמי, סעיף 6.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

אוויוניקה ספרתית ואפיקי נתונים

נתונים בינאריים, המרה אנלוגית־ספרתית, קוונטיזציה, אפיקי נתונים טוריים (ARINC 429, MIL-STD-1553), תזמון הודעות ונפח נתונים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו רזולוציה ו־SNR של ADC.
- חשבו זמן שידור הודעה.
- השוו סוגי אפיקים.
- העריכו נפח נתונים.

מושגי מפתח

- ממיר של N ביטים מחלק את תחום הכניסה שלו ל־2^N רמות; צעד אחד הוא הסיבית הפחות משמעותית.
- SNR הקוונטיזציה האידיאלי הוא כ־$6.02N + 1.76$ dB.
- ARINC 429 הוא אפיק עם משדר אחד ומקלטים רבים ב־100 kbit/s במהירות גבוהה (ערך ספר לימוד); MIL-STD-1553 הוא אפיק פקודה/תגובה ב־1 Mbit/s (ערך ספר לימוד).
- זמן הודעה הוא מספר הביטים חלקי קצב הביטים; תקורה ומרווחים מתווספים.
- רזולוציה רדיומטרית גבוהה יותר (יותר ביטים) מראה הבדלים עדינים יותר אך מייצרת יותר נתונים.

משוואות מפתח

$$\Delta V = \frac{V_{FS}}{2^N}$$

```
Δ V=_FS2^N
```

צעד ADC

$$SNR \approx 6.02N + 1.76 \text{ dB}$$

SNR קוונטיזציה

$$t = \frac{bits}{R_b}$$

```
t=(bits)/(R_b)
```

זמן שידור

$$L = 2^N$$

`L=2^N`

מספר רמות

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 ADC של 12 ביט מכסה 10 V. גודל הצעד?

1. 10/4096.

תשובה: 2.44 mV.

דוגמה 5.2 ה־SNR האידיאלי שלו?

1. 1.76 + 12 × 6.02.

תשובה: 74.0 dB.

דוגמה 5.3 כמה זמן לוקחת מילת ARINC 429 של 32 ביט ב־100 kbit/s?

1. 32/100,000.

תשובה: 0.32 ms.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ל־Landsat 9 רזולוציה רדיומטרית של 14 ביט. רמות?

   16,384.

2. SNR עבור 8 ביט?

   49.9 dB.

3. אותה מילה של 32 ביט על אפיק של 1 Mbit/s?

   0.032 ms.

4. צעד עבור 16 ביט על 10 V?

   0.153 mV.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: יותר ביטים פירושם אוטומטית יותר דיוק.

בפועל: גם רעש וכיול מגבילים אותו.

מיתוס: קצב הביטים שווה לקצב הנתונים המועילים.

בפועל: התקורה לוקחת חלק.

מיתוס: אפיק אחד מתאים לכול.

בפועל: בחרו לפי תזמון, שלמות ועלות.

כרטיסיות

ADC

ממיר אנלוגי־ספרתי.

LSB

צעד הסיבית הפחות משמעותית.

ARINC 429

אפיק אוויוניקה חד־כיווני.

MIL-STD-1553

אפיק פקודה/תגובה.

קוונטיזציה

עיגול לרמות.

קצב ביטים

ביטים לשנייה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. צעד 12 ביט על 10 V…

2.44 mV

24.4 mV

0.244 mV

10 mV

10/4096 .2.44 mV.

2. SNR של 12 ביט…

74.0 dB

72 dB

49.9 dB

98 dB

74.0 dB. 6.02N + 1.76.

3. זמן מילת ARINC…

0.32 ms

3.2 ms

32 ms

0.032 ms

$32/10^5$ ms. 0.32.

4. רמות ב־14 ביט…

16,384

4096

65,536

14

2^{14} .16,384.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מציינת ל־Landsat 9 רזולוציה רדיומטרית של 14 ביט, 11 רצועות ספקטרליות ויותר מ־700 סצנות ביום, כל אחת 185 km על 180 km.

צעדים רדיומטריים עדינים מאפשרים למדענים לראות שינויים עדינים באיכות המים ובבריאות הצמחייה, במחיר של יותר נתונים שהאוויוניקה צריכה לאחסן ולשדר.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · מעגלים חשמליים

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.

סיימתי את היחידה הזו

חיישני ניווט: יחידות מדידה אינרציאליות, GNSS, מצלמות ולידאר

ג'ירוסקופים ומדי תאוצה, סחיפה בניווט אינרציאלי, מדידת טווח בניווט לווייני, וחיישני ראייה ולידאר לאוטונומיה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו סחיפה מהטיית מד תאוצה.
- קשרו שגיאת תזמון לשגיאת טווח.
- השוו את חוזקות החיישנים.
- הסבירו מדוע משלבים חיישנים.

מושגי מפתח

- יחידת מדידה אינרציאלית (IMU) מודדת קצבי סיבוב (ג'ירוסקופים) וכוח סגולי (מדי תאוצה).
- אינטגרציה כפולה הופכת הטיה קטנה של מד תאוצה לשגיאת מיקום הגדלה עם t².
- ניווט לווייני מודד טווח לפי זמן מעבר האות; 1 µs של שגיאת שעון הוא כ־300 m של טווח.
- מצלמות ולידאר מודדים ישירות את הסביבה ונותנים מידע מיקום וסכנות שאינו נסחף.
- אף חיישן אינו מספיק לבדו: IMU מהירות אך נסחפות; חיישנים חיצוניים איטיים יותר אך שגיאתם חסומה.

משוואות מפתח

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

e=12bt^2

שגיאת מיקום מהטיית מד תאוצה

$$\rho = c\,\Delta t$$

ρ=c Δ t

טווח מזמן מעבר

$$\theta_e = \omega_b t$$

θ_e=ω_bt

שגיאת כיוון מהטיית ג'ירוסקופ

$$b = 10^{-3} g$$

b=10^-3g

הטיה לדוגמה של 1 מילי־g

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 הטיית מד תאוצה של 1 מיליg (9.807 × 10⁻³ m/s²) לא מתוקנת במשך 60 s. שגיאת מיקום?

1. ½ × 9.807 × 10⁻³ × 60².

תשובה: 17.7 m.

דוגמה 6.2 אחרי 600 s?

1. ½ × 9.807 × 10⁻³ × 600².

תשובה: 1765 m, פי 100 גרוע יותר עבור פי 10 זמן.

דוגמה 6.3 שעון של מקלט סוטה ב־1 µs. שגיאת טווח?

1. 299,792,458 × 10⁻⁶.

תשובה: 300 m.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. שגיאה אחרי 10 s עם אותה הטיה?

0.49 m.

2. הטיית ג׳ירוסקופ של 0.01°/h במשך 10 h?

0.1° בכיוון.

3. מדוע Dragonfly זקוקה ללידאר בטיטאן?

כדי למדוד גובה ושיפוע של פני השטח ולזהות סכנות.

4. שגיאת שעון עבור 3 m טווח?

10 ns.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: IMU אף פעם לא צריכות תיקון.

בפועל: השגיאות שלהן גדלות עם הזמן.

מיתוס: GNSS עובד בכל מקום.

בפועל: לא בתוך מבנים, מתחת למים או בטיטאן.

מיתוס: הסחיפה גדלה ליניארית.

בפועל: סחיפה מהטיה גדלה עם t^2.

כרטיסיות

IMU

ג'ירוסקופים ומדי תאוצה.

ניווט משוער

ניווט באינטגרציה.

GNSS

ניווט לווייני.

לידאר

מדידת טווח בלייזר.

הטיה

היסט קבוע של חיישן.

פסאודו־טווח

טווח הכולל שגיאת שעון.

בוחן לבדיקה עצמית

1. שגיאה ב־60 s…

17.7 m

0.59 m

1765 m

35 m

.17.7 m. ½bt²

2. שגיאה ב־600 s…

1765 m

177 m

17.7 km

600 m

×100 .1765 m.

3. שגיאת שעון של 1 µs…

300 m

3 m

30 km

0.3 m

.300 m. c Δt

4. החיישן שנסחף…

IMU

לידאר

התאמת מפה במצלמה

GNSS

IMU. אינטגרציה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת שניסוי "הטיסה הראשונה" האחרון של Dragonfly הריץ את תוכנת הטיסה ואוויוניקה דמוית־טיסה עם נתונים מדומים ממצלמות הניווט, מיחידות המדידה האינרציאליות ומהלידאר.

הלידאר מודד גובה ושיפוע של פני השטח ומזהה סכנות, ומאפשר לכלי הטיס בעל הרוטורים לבחור אתר נחיתה בטוח בטיטאן, שאליו הוא אמור להגיע ב־2034.

ב־Saving Planets: דינמיקת טיסה ובקרה · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): הכתבה של NASA על Dragonfly.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

היתוך חיישנים ומסנן קלמן

שילוב מדידות רועשות, שקלול לפי הופכי השונות, מסנן קלמן סקלרי ומחזור החיזוי־עדכון שלו.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- התיכו שתי מדידות לפי שונות.
- חשבו הגבר קלמן.
- בצעו צעד חיזוי־עדכון אחד.
- הסבירו מדוע היתוך עדיף על כל חיישן לבדו.

מושגי מפתח

- שתי הערכות בלתי תלויות משולבות בצורה הטובה ביותר כששוקלים כל אחת לפי הופכי השונות שלה.
- השונות המותכת קטנה מכל אחת משונויות הקלט.
- מסנן קלמן חוזה את המצב קדימה ואז מתקן אותו במדידה בעזרת ההגבר K.
- K = P/(P + R): סמכו יותר על המדידה כשהחיזוי אינו ודאי (P גדול) והחיישן טוב (R קטן).
- מערכות ניווט מתיכות חיזויי IMU מהירים עם עדכונים איטיים יותר ממצלמה, לידאר או GNSS.

משוואות מפתח

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

שונות מותכת

$$K = \frac{P}{P + R}$$

K=(P)/(P+R)

הגבר קלמן סקלרי

$$\hat{x}^+ = \hat{x}^- + K(z - \hat{x}^-)$$

x^+= x^-+K(z- x^-)

עדכון

$$P^+ = (1 - K)P$$

P^+=(1-K)P

שונות מעודכנת

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 חיישנים עם $\sigma = 4$ m ו־3 m מותכים. σ מותכת?

1. $\sigma^2 = 16 \times 9/25 = 5.76$.
2. $\sigma = \sqrt{5.76}$.

תשובה: 2.4 m.

דוגמה 7.2 שונות חיזוי $P = 16$ m², מדידה $R = 9$ m². הגבר?

1. 16/25.

תשובה: 0.64.

דוגמה 7.3 חיזוי 100 m, מדידה 105 m. עדכון ושונות חדשה?

1. $x = 100 + 0.64 \times 5 = 103.2$ m.
2. $P = 0.36 \times 16$.

תשובה: 103.2 m עם שונות 5.76 m².

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. התיכו שני חיישנים זהים עם $\sigma = 2$ m.

   $\sigma = 1.41$ m.

2. הגבר אם $R = 0$?

   1: לסמוך לגמרי על המדידה.

3. הגבר אם R עצום?

   קרוב ל־0: לשמור על החיזוי.

4. מה מגדיל את P בין עדכונים?

   רעש התהליך בחיזוי.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: למצע חיישנים במשקל שווה.

בפועל: שקללו לפי הופכי השונות.

מיתוס: היתוך לא יכול לעלות על החיישן הטוב ביותר.

בפועל: הוא עולה על שניהם.

מיתוס: מסנני קלמן מסירים כל שגיאה.

בפועל: הם ממזערים שונות תחת הנחות.

כרטיסיות

היתוך חיישנים

שילוב מדידות.

הגבר קלמן

המשקל שניתן למדידה.

קוריאנס

אי־הוודאות של ההערכה.

חיזוי

קידום המצב.

עדכון

תיקון בעזרת מדידה.

חידוש

מדידה פחות חיזוי.

בוחן לבדיקה עצמית

1. σ מותכת…

2.4 m

3.5 m

1 m

5 m

.2.4 m .√5.76

2. הגבר קלמן…

0.64

0.36

1.78

0.5

.0.64. P/(P + R)

3. הערכה מעודכנת...

103.2 m

105 m

100 m

102.5 m

.103.2 m. 100 + 0.64 × 5

4. שונות חדשה...

5.76 m²

16 m²

9 m²

25 m²

.5.76 m². (1 − K)P

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מדווחת שצוות Dragonfly הוסיף חיישנים ויכולות צעד אחר צעד, וסיים בלידאר, החלק האחרון הדרוש כדי לדמות במלואו את מה שכלי הטיס יפגוש בטיטאן.

אמולטור מצלמה יצר כל סצנה מדומה של טיטאן בזמני חשיפה של כ־20 עד 70 מילישניות, כמו שהמצלמות ישתמשו, כך שתוכנת ההיתוך ראתה תזמון מציאותי. השונויות ביחידה זו הן ערכים לדוגמה.

ב־Saving Planets: דינמיקת טיסה ובקרה · תכנון חלליות

מקורות: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): הכתבה של NASA על Dragonfly.

סיימתי את היחידה הזו

תקשורת ומעקב: ADS-B

מכשירי קשר במטוסים, טווח בקו ראייה, הנחתה במרחב חופשי, ADS-B Out ו־In, וכיצד מעקב תומך בבקרת תעבורה אווירית.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו טווח אופק רדיו.
- חשבו הפסד מרחב חופשי.
- הסבירו ADS-B Out ו־In.
- העמידו בפרופורציה את נתוני התעבורה של ה־FAA.

מושגי מפתח

- VHF ותדרים גבוהים יותר מתפשטים בקו ראייה, ולכן הטווח תלוי בגובה האנטנות.
- הנחתה במרחב חופשי גדלה עם המרחק והתדר, $20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.
- עם ADS-B Out מטוס משדר את מיקומו הנגזר מלוויינים; ADS-B In מאפשר למטוסים אחרים ולקרקע לקלוט אותו.
- ה־FAA מכנה את ADS-B בזמן אמת שיטת המעקב המועדפת לבקרת תעבורה אווירית ב־National Airspace System.
- בארה"ב מטוסים חייבים לשאת ADS-B Out כדי לטוס במרחב האווירי המוגדר ב־14 CFR 91.225.

משוואות מפתח

$$d \approx 4.12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)\ \text{km}$$

אופק רדיו (h במטרים)

$$L = 20\log_{10}\frac{4\pi d}{\lambda}$$

```
L=20_10(4π d)/()
```

הפסד מרחב חופשי

$$\lambda = c/f$$

אורך גל

$$\bar{n} = N/24$$

```
n=N/24
```

ממוצע טיסות לשעה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 מטוס ב־10000 m ואנטנת קרקע ב־10 m. אופק רדיו?

1. $4.12(100 + 3.162)$.

תשובה: 425 km.

דוגמה 8.2 הנחתת מסלול ב־1090 MHz לאורך 200 km.

1. $\lambda = 0.2750$ m.
2. $20\log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^5 / 0.2750)$.

תשובה: 139.2 dB.

דוגמה 8.3 ה־FAA משרת יותר מ־44000 טיסות ביום. ממוצע לשעה?

1. $44{,}000/24$.

תשובה: כ־1833.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. הכפילו את המרחק: הנחתה נוספת?

   6.02 dB.

2. אורך גל ב־1090 MHz?

   0.275 m.

3. נוסעים לטיסה מתוך 3 מיליון ו־44000?

   כ־68.

4. מה ADS-B Out דורש על הסיפון?

   משדר המשדר מיקום.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: טווח הרדיו בלתי מוגבל.

בפועל: קו הראייה מגביל אותו.

מיתוס: ADS-B משתמש במכ"ם.

בפועל: מטוסים משדרים את מיקומם בעצמם.

מיתוס: הנחתת מסלול ליניארית במרחק.

בפועל: היא גדלה כמו $20 \log_{10} d$.

כרטיסיות

ADS-B

מעקב תלוי אוטומטי בשידור.

ADS-B Out

משדר את מיקומו.

ADS-B In

קולט תעבורה ומזג אוויר.

הפסד מסלול

הפסד התפשטות אות.

אופק רדיו

גבול קו הראייה.

NAS

מערכת המרחב האווירי הלאומית של ארה"ב.

בוחן לבדיקה עצמית

1. אופק רדיו…

425 km

42.5 km

4250 km

100 km

103.2 × 4.12 km. 425.

2. הנחתת מסלול…

139.2 dB

119 dB

160 dB

13.9 dB

$20 \log_{10}(4\pi d/\lambda)$. 139.2 dB.

3. טיסות לשעה…

≈ 1833

≈ 440

≈ 44,000

≈ 183

44,000/24 ≈ 1833.

4. ADS-B Out נועד ל…

שידור מיקום

שיבוש מכ"ם

מעקב אחר מזג אוויר בלבד

הנחתת המטוס

שידור מיקום. FAA.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־FAA אומר ש־ADS-B משפר בטיחות ויעילות באוויר ועל המסלולים, מפחית עלויות ומקטין השפעות מזיקות על הסביבה.

ה־Air Traffic Organization של ה־FAA משרת יותר מ־44000 טיסות ויותר מ־3 מיליון נוסעי תעופה ביום על פני יותר מ־29 מיליון מייל רבוע של מרחב אווירי (נתוני FY24), כך ששיפורי יעילות קטנים מצטברים.

ב־Saving Planets: ביצועי מטוסים · פתרונות

מקורות: FAA: Air Traffic · FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb) · FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers)

מקורות לימוד חינמיים

- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): סקירה של ה־FAA.
- FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers): עובדות מה־FAA.

סיימתי את היחידה הזו

תוכנת טיסה בזמן אמת

משימות, מחזורים ומועדי סיום, ניצולת מעבד, תזמון rate-monotonic, קצבי פריימים, טיימרי watchdog והגנה מפני תקלות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו ניצולת מעבד.
- החילו את חסם ה־rate-monotonic.
- קשרו קצב פריימים למחזור.
- תארו הגנה מפני תקלות.

מושגי מפתח

- תוכנת טיסה מריצה משימות מחזוריות שחייבות להסתיים לפני מועד הסיום שלהן, ולא רק להיות מהירות בממוצע.
- ניצולת היא סכום זמן הריצה של כל משימה חלקי המחזור שלה.
- תזמון rate-monotonic נותן עדיפות גבוהה יותר למחזורים קצרים יותר; הוא מובטח כאשר U ≤ n(2^(1/n) − 1).
- טיימרי watchdog מאתחלים מעבד שהפסיק להגיב; הגנה מפני תקלות מעבירה חללית למצב בטוח.
- אוטונומיה חשובה כשעזרה מהקרקע רחוקה; NASA אומרת ש־Dragonfly חייבת לטוס ללא עזרה בזמן אמת מכדור הארץ.

משוואות מפתח

$$U = \sum \frac{C_i}{T_i}$$

`U=(C_i)/(T_i)`

ניצולת

$$U \le n(2^{1/n} - 1)$$

חסם rate-monotonic

$$f = 1/T$$

`f=1/T`

קצב פריימים

$$\text{slack} = 1 - U$$

`slack=1-U`

קיבולת פנויה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 משימות נמשכות 2, 3 ו־5 ms עם מחזורים של 10, 20 ו־50 ms. ניצולת?

1. 0.1 + 0.15 + 0.2.

תשובה: 0.45.

דוגמה 9.2 חסם rate-monotonic לשלוש משימות?

1. 3(2^(1/3) − 1).

תשובה: 0.780, ולכן 0.45 ניתן לתזמון בוודאות.

דוגמה 9.3 זמני החשיפה של מצלמות Dragonfly הם כ־20 עד 70 ms. קצבי הפריימים המתאימים?

1. 1/0.07 ו־1/0.02.

תשובה: כ־14.3 עד 50 Hz.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חסם עבור n = 2?

.0.828

2. חסם עבור n = 4?

.0.757

3. מרווח עם U = 0.45?

.0.55

4. למה מצב בטוח?

כדי לשמור על יציבות הכלי ולחכות לעזרה או לתיקון.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: להיות מהיר בממוצע זה מספיק.

בפועל: כל מועד סיום חשוב.

מיתוס: $U \le 1$ תמיד פירושו ניתן לתזמון ב־RMS.

בפועל: רק החסם מבטיח זאת.

מיתוס: מצב בטוח פירושו כישלון.

בפועל: הוא מגן על המשימה.

כרטיסיות

מועד סיום

זמן הסיום המאוחר ביותר.

ניצולת

חלק המעבד המנוצל.

Rate-monotonic

מחזור קצר יותר, עדיפות גבוהה יותר.

Watchdog

טיימר איפוס.

מצב בטיחות

תצורת הגנה.

אוטונומיה

פעולה ללא עזרה מהקרקע.

בוחן לבדיקה עצמית

1. ניצולת…

0.45

0.10

1.0

0.78

.0.45. Sum C/T

2. חסם RM עבור n = 3…

0.780

0.693

0.828

1

.0.780. n(2^(1/n) − 1)

3. פריים של 70 ms…

14.3 Hz

70 Hz

7 Hz

50 Hz

.14.3 Hz. 1/0.07

4. ה־watchdog…

מאתחל מעבד תקוע

סופר ביטים

מודד ג'ירוסקופים

מקרר קופסאות

מאתחל מעבד תקוע. טיימר.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מדווחת שהאבל נכנס כמה פעמים למצב בטוח כשג'ירוסקופ נתן קריאות שגויות, והמדע הושהה בזמן שהטלסקופ חיכה להוראות; ההגנה מפני תקלות שמרה עליו בטוח.

NASA אומרת שמהנדסי Dragonfly יכניסו תקלות בכוונה בניסויים כדי שכלי הטיס יוכל להגיב באופן אוטונומי, כי כל מה שהוא עושה בטיטאן חייב לקרות ללא עזרה בזמן אמת מכדור הארץ.

ב־Saving Planets: מבוא לתכנות · דינמיקת טיסה ובקרה

מקורות: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/) · NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): הכתבה של NASA על Dragonfly.

סיימתי את היחידה הזו

אינטגרציה, אימות ותפעול

אינטגרציה הדרגתית, שיטות אימות, בדיקות חומרה־בלולאה, הזרקת תקלות, הפעלה ראשונית והארכת חיים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מנו את ארבע שיטות האימות.
- תכננו אינטגרציה הדרגתית.
- הסבירו בדיקות חומרה־בלולאה.
- קשרו תפעול לאורך חיי המשימה.

מושגי מפתח

- דרישות מאומתות בבדיקה, בניתוח, בבחינה או בהדגמה.
- האינטגרציה מתקדמת צעד אחר צעד כדי שאפשר יהיה לייחס בעיה לדבר האחרון שנוסף.
- חומרה־בלולאה ועמדות ניסוי דמויות־טיסה מריצות את תוכנת הטיסה האמיתית מול חיישנים מדומים.
- בדיקות הזרקת תקלות מוכיחות שהמערכת מגיבה נכון כשמשהו נשבר.
- תפעול טוב, חלקי חילוף ומתכלים יכולים להאריך משימה הרבה מעבר לאורך החיים התכנוני שלה.

משוואות מפתח

$$t_{arr} = t_{launch} + t_{cruise}$$

```
t_arr=t_launch+t_cruise
```

שנת הגעה

$$L_{ext} = \frac{L_{actual}}{L_{design}}$$

```
L_ext=_actualL_design
```

יחס הארכת חיים

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

```
A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)
```

זמינות

$$V = \{T, A, I, D\}$$

```
V=,A,I,D\
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 NASA אומרת ש־Dragonfly תשוגר לא לפני 2028 למסע של שש שנים. הגעה מוקדמת ביותר?

1. 6 + 2028.

תשובה: 2034, בהתאם ל־NASA.

דוגמה 10.2 המתכלים של Landsat 9 מחזיקים לפחות 10 שנים מול אורך חיים תכנוני של 5 שנים. יחס הארכה?

1. 10/5.

תשובה: 2.

דוגמה 10.3 Dragonfly תבלה שלוש שנים בטיסה בטיטאן. סיום המשימה המוקדם ביותר?

1. 3 + 2034.

תשובה: 2037 (מחושב).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מנו את ארבע שיטות האימות.

   בדיקה, ניתוח, בחינה, הדגמה.

2. מדוע לבצע אינטגרציה הדרגתית?

   כדי לייחס בעיות לשינוי האחרון.

3. האבל שוגר ב־1990; באיזו שנה חל יום השנה ה־34 שלו?

   2024.

4. מהי הזרקת תקלות?

   גרימת תקלות בכוונה בבדיקה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: לבדוק הכול בסוף.

בפועל: בצעו אינטגרציה ובדיקה בשלבים.

מיתוס: ניתוח חלש יותר מבדיקה.

בפועל: כל שיטה מתאימה לדרישות אחרות.

מיתוס: אורך החיים התכנוני הוא הסוף.

בפועל: משימות נמשכות לעתים קרובות יותר.

כרטיסיות

אימות בבדיקה

למדוד זאת.

ניתוח

להוכיח בחישוב.

בחינה

להסתכל על זה.

הדגמה

להראות שזה עובד.

HIL

חומרה־בלולאה.

הפעלה ראשונית

בדיקת תקינות אחרי השיגור.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הגעת Dragonfly…

2034

2028

2030

2040

6 + 2028 .2034.

2. היחס של Landsat 9…

2

0.5

5

10

.2. 10/5

3. מספר השיטות...

4

2

3

6

.T, A, I, D .4

4. עמדת ניסוי עם תוכנה אמיתית...

חומרה־בלולאה

FMEA

דיאגרמת N^2

ניתוח חלופות

חומרה־בלולאה. HIL.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת שצוות Dragonfly בנה את יכולות הטיסה בהדרגה, מסיבוב רוטור יחיד ועד טיסה ראשונה מדומה מלאה, ומתכנן לחזור על כך במערכת הטיסה האמיתית.

NASA מציינת שהכיול המובנה והיתירות של Landsat 9 שומרים על נתוניו מדויקים ואמינים לאורך חיי המשימה, ומאריכים את רצף התצפיות הארוך ביותר על כדור הארץ.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · תכנון חלליות

מקורות: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך NASA חינמי, סעיף 5.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. מחזור החיים של הנדסת מערכות ודרישות
   4 תרגילים
2. ארכיטקטורה, ממשקים ואינטגרציה
   4 תרגילים
3. אמינות ויתירות
   4 תרגילים
4. ניתוח בטיחות: FMEA ועצי תקלות
   4 תרגילים
5. אוויוניקה ספרתית ואפיקי נתונים
   4 תרגילים
6. חיישני ניווט: יחידות מדידה אינרציאליות, GNSS, מצלמות ולידאר
   4 תרגילים
7. היתוך חיישנים ומסנן קלמן
   4 תרגילים
8. תקשורת ומעקב: ADS-B
   4 תרגילים
9. תוכנת טיסה בזמן אמת
   4 תרגילים
10. אינטגרציה, אימות ותפעול
    4 תרגילים

המעבדה (Avionics and systems lab)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד, ללא נקודות זכות.

כל מעבדה מתבצעת בהדמיה חינמית או בגיליון אלקטרוני, כך שאין סכנות חשמל. אל תפתחו ואל תשנו אלקטרוניקה של מטוס, רחפן או רכב אמיתיים בקורס זה. קחו הפסקות מהמסך, שבו ביציבה טובה והרחיקו כבלים ממעברים.

מקור בטיחות: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

מעבדה A: גדילת ממשקים ודיאגרמת N²

שבוע 2

מטרה: בנו דיאגרמת N² לחבילת אוויוניקה קטנה וראו כיצד ממשקים אפשריים גדלים עם מספר הקופסאות.

$$I = n(n-1)/2$$

```
I=n(n-1)/2
```

ממשקים אפשריים

מהלך הניסוי

1. פרטו את הקופסאות: מחשב טיסה, IMU, מקלט GNSS, רדיו, צג, יחידת הספק, נתוני אוויר, טייס אוטומטי.
2. שרטטו רשת 8 × 8 עם הקופסאות על האלכסון וסמנו אילו זוגות מחליפים נתונים.
3. חשבו n(n − 1)/2 עבור n = 4, 8 ו־12.
4. ספרו את התאים שסימנתם והשוו למרבי.

טבלת נתונים

קופסאות n	ממשקים אפשריים
4	6
8	28
12	66

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 8 × 7/2 = 28.
2. 12 × 11/2 = 66.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: עדכון המדריך שלה כולל הנדסת מערכות מבוססת מודלים. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

- [ ] השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)

מעבדה B: אמינות של יחידות בודדות, כפולות ומשולשות

שבוע 4

מטרה: השוו בגיליון אלקטרוני יחידה בודדת, זוג מקבילי והצבעת 2 מתוך 3 לאורך זמן.

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

R_2/3=3R^2-2R^3

הצבעת שניים מתוך שלושה

מהלך הניסוי

1. הזינו λ = 10^{-5} לשעה.
2. חשבו R = e^(−λt) עבור t = 1000, 10000 ו־50000 h.
3. חשבו את הזוג המקבילי ואת הצבעת 2 מתוך 3.
4. מצאו היכן 2 מתוך 3 יורד מתחת ליחידה בודדת (R = 0.5).

טבלת נתונים

t (h)	בודדת	כפולה	2 מתוך 3
1000	0.990	0.9999	0.9997
10,000	0.905	0.991	0.975
50,000	0.607	0.845	0.657

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. R(50,000) = e^(−0.5) = 0.607.
2. 2 מתוך 3 = $3(0.607)^2 - 2(0.607)^3$ = 0.657.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: האבל יכול לבצע תצפיות מדעיות עם ג'ירוסקופ פועל אחד בלבד. NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-sp

ace-telescope/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה C: מעגלים יתירים

שבוע 5

מטרה: השתמשו ב־PhET Circuit Construction Kit: DC כדי להשוות נורות בטור ובמקביל כשאחת כושלת.

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

`R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)`

התנגדות במקביל

מהלך הניסוי

1. חברו שתי נורות של 10 Ω בטור לסוללה של 12 V, ואז נתקו חוט.
2. חברו אותן מחדש במקביל ונתקו ענף.
3. מדדו את הזרם לפני כל כשל ואחריו.
4. קשרו את התוצאה לאמינות טורית ומקבילית.

טבלת נתונים

מעגל	התנגדות (Ω)	זרם ב־12 V (A)
מקבילי, שתיהן תקינות	5	2.4
מקבילי, אחת כשלה	10	1.2
טורי, שתיהן תקינות	20	0.6

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 10 × 10/20 = 5 Ω.
2. 12/5 = 2.4 A.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- רץ בדפדפן.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

הקשר לכדור הארץ: NASA: היתירות המובנית של Landsat 9 שומרת על נתוניו אמינים. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

- [ ] השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)

מעבדה D: רזולוציית ADC ונפח נתונים

שבוע 7

מטרה: חשבו גודל צעד ו־SNR עבור כמה רזולוציות של ממיר.

$$\Delta V = V_{FS}/2^N$$

```
Δ V=V_FS/2^N
```

צעד ADC

מהלך הניסוי

1. הזינו סקאלה מלאה של 10 V.
2. חשבו צעד ו־SNR עבור 8, 12 ו־16 ביט.
3. חשבו זמן מילה של 32 ביט ב־100 kbit/s וב־1 Mbit/s.
4. דונו מדוע Landsat 9 משתמש ב־14 ביט.

טבלת נתונים

ביטים	צעד (mV)	SNR (dB)
8	39.06	49.9
12	2.441	74.0
16	0.1526	98.1

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 10/256 = 39.06 mV.
2. 6.02 × 16 + 1.76 = 98.1 dB.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: ל־Landsat 9 רזולוציה רדיומטרית של 14 ביט. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

- [ ] השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)

מעבדה E: סחיפה אינרציאלית והיתוך חיישנים

שבוע 9

מטרה: מדלו סחיפת מיקום מהטיית מד תאוצה, ואז התיכו שני חיישני מיקום.

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

e=12bt^2

סחיפה מהטיה

מהלך הניסוי

1. הזינו b = 9.807 × 10⁻³ m/s² (1 מילי־g).
2. חשבו את השגיאה ב־10, 60 ו־600 s.
3. התיכו חיישנים עם σ = 4 m ו־3 m וחשבו את הגבר קלמן עבור P = 16, R = 9.
4. הוסיפו רעש בעמודת מספרים אקראיים וצפו במסנן.

טבלת נתונים

t (s)	שגיאה (m)
10	0.49
60	17.65
600	1765

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. ½ × 9.807 × 10⁻³ × 100 = 0.49 m.
2. σ מותכת = √5.76 = 2.4 m.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: הניסוי של Dragonfly השתמש בנתוני מצלמה, IMU ולידאר מדומים. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה F: יכולת תזמון rate-monotonic

שבוע 12

מטרה: חשבו חסמי ניצולת ובדקו קבוצות משימות בגיליון אלקטרוני.

$$U \le n(2^{1/n} - 1)$$

חסם rate-monotonic

מהלך הניסוי

1. חשבו את החסם עבור n = 1 עד 4.
2. הזינו את קבוצת המשימות מיחידה 9 וחשבו את U.
3. הוסיפו משימה עד ש־U עובר את החסם.
4. דונו מה לעשות כשהחסם אינו מתקיים.

טבלת נתונים

n	חסם
1	1.000
2	0.828
3	0.780
4	0.757

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 2(√2 − 1) = 0.828.
2. 4(2^(1/4) − 1) = 0.757.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: Dragonfly חייבת לטוס באופן אוטונומי, ללא עזרה בזמן אמת מכדור הארץ. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. ממשקים אפשריים ל־10 קופסאות?

   1. 9/2 × 10.

תשובה: 45.

2. זוג מקבילי, λ = 2 × 10⁻⁵ /h לאורך 5000 h?

   1. R = e^(−0.1) = 0.905.
   2. 1 − 0.095² 1.

תשובה: 0.991.

3. RPN עבור S = 6, O = 3, D = 7?

   1. 7 × 3 × 6.

תשובה: 126.

4. צעד של ADC של 10 ביט על 5 V?

   1. 5/1024.

תשובה: 4.88 mV.

5. SNR אידיאלי עבור 10 ביט?

   1. 1.76 + 10 × 6.02.

תשובה: 62.0 dB.

סדרת תרגול מסכמת (יחידות 10–1)

1. סחיפה אחרי 30 s עם הטיה של 2 מילי־g?

   1. ½ × 0.01961 × 900.

תשובה: 8.83 m.

2. התיכו שני חיישנים עם σ = 5 m.

1. σ² = 12.5.

תשובה: 3.54 m.

3. הגבר קלמן עבור P = 4, R = 1?

1. 4/5.

תשובה: 0.8.

4. אופק רדיו מ־1000 m לאנטנה ב־10 m?

1. 4.12(31.62 + 3.162).

תשובה: 143.3 km.

5. ניצולת עבור המשימות 1/5, 2/10, 3/30 ms?

1. 0.1 + 0.2 + 0.2.

תשובה: 0.5.

6. זמינות, MTBF של 500 h, MTTR של 5 h?

1. 500/505.

תשובה: 0.990.

דף נוסחאות

$$\text{Margin} = (C - N)/N,\ m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

$$I = n(n-1)/2,\ U_{bus} = B/B_{max}$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1 - \prod(1 - R_i),\ R_{2/3} = 3R^2 - 2R$$

$$RPN = SOD,\ P_{OR} = 1 - \prod(1 - p_i),\ P_{AND} = \prod$$

$$\Delta V = V_{FS}/2^N,\ SNR = 6.02N + 1.76$$

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2,\ \rho = c\Delta t$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2\sigma_2^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2),\ K = P/(P + R)$$

$$d = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),\ L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$$

$$U = \sum C_i/T_i \le n(2^{1/n} - 1)$$

$$A = MTBF/(MTBF + MTTR)$$

קבועים

קבוע	ערך
מהירות האור	c = 299792458 m/s (מדויק)
כבידה תקנית	g = 9.80665 m/s²
תדר ADS-B (ערך ספר לימוד)	1090 MHz
ARINC 429 מהיר (ערך ספר לימוד)	100 kbit/s
MIL-STD-1553 (ערך ספר לימוד)	1 Mbit/s
שעות בשנה	8760 h

מקור: NIST: CODATA value, speed of light in vacuum (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c)

טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בטקסטים, בהרצאות ובהדמיות החינמיים האלה לצד הקורס.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס״א.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundam entals-of-systems-engineering-fall-2015/): הרצאות MIT חינמיות.
- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): סקירה של ה־FAA.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): מעגלים ויתירות.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): כתבה על בדיקות אוויוניקה.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): יתירות בפועל.

מילון מונחים

ADS-B

מעקב תלוי אוטומטי בשידור.

ARINC 429

אפיק נתוני אוויוניקה חד־כיווני.

זמינות

חלק הזמן שבו מערכת פועלת.

FMEA

ניתוח אופני כשל והשפעותיהם.

עץ תקלות

לוגיקת כשל מלמעלה למטה.

חומרה־בלולאה

תוכנה וחומרה אמיתיות עם קלטים מדומים.

IMU

יחידת מדידה אינרציאלית.

מסמך בקרת ממשק

הסכמה על ממשק.

מסנן קלמן

אומד רקורסיבי אופטימלי.

לידאר

מדידת טווח בלייזר.

MBSE

הנדסת מערכות מבוססת מודלים.

MIL-STD-1553

אפיק נתוני פקודה/תגובה.

MTBF

זמן ממוצע בין כשלים.

דיאגרמת N²

מטריצת ממשקים.

תזמון rate-monotonic

המחזור הקצר יותר מקבל עדיפות גבוהה יותר.

יתירות

יחידות נוספות לגיבוי.

דרישה

הצהרת צורך הניתנת לאימות.

מצב בטיחות

תצורת הגנה של חללית.

מודל V

לפרק, ואז לשלב ולאמת.

טיימר watchdog

מאתחל מעבד תקוע.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	מקשר כל החלטת תכן לדרישה, בודק ממשקים ומקרי כשל, שומר על עקביות יחידות והסתברויות ומסביר שקלולי תמורות במילים פשוטות.

רמה	איך זה נראה
3 · מיומן	פותר את סדרות התרגול והמבחן עם טעויות קלות ובודק יחידות.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אך מבלבל בין אמינות טורית למקבילית או בין שערי OR ו־AND.
1 · מתחיל	מחשב בלי דרישה או דיאגרמת בלוקים; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

חלק	משקל
תרגילים	20%
מעבדות	25%
מערך תרגול לאמצע הקורס	25%
מערך תרגול מסכם	30%

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- מעבר חום AERO 440
- פרויקט גמר (מטוס או CubeSat) AERO 490
- הנעה AERO 410
- כל הקורסים