

מטוסים חמקניים STEALTH AIRCRAFTS

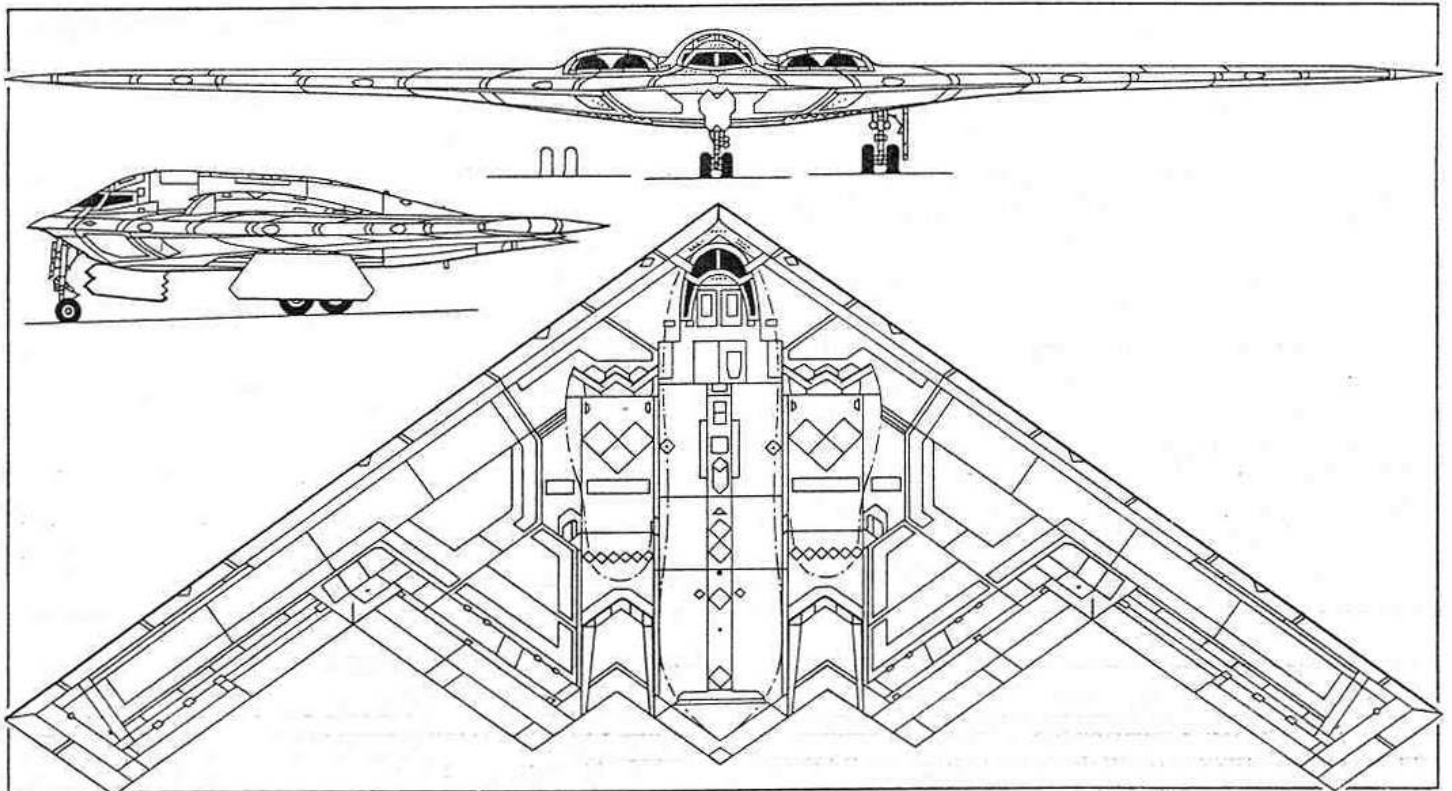
כתב: דרור ארצי

הכותב הוא מהנדס אווירונאוטי, עסק שנים רבות בפיתוח ותיכון כלי טייס בתעשייה האווירית. ראש הנדסת מטוסים צבאיים, מנכ"ל כרכום, מנהל פיתוח עיסקי ומהנדס ראשי של חברת ראדום, מרצה בטכניון בחיפה וטייס פרטי.

במאמר זה ננסה לתת הצצה לנושא מעניין שמעצם טבעו הוא די חמקמק ומסווג. נעשה זאת בהתבסס על חומר גלוי ובלי להיכנס לנוסחאות פיסיקליות כאלה ואחרות. ננסה להבין מה זה מטוס חמקן, למה זה טוב ונכיר כמה מטוסים וכמה פתרונות.

מטוס חמקן (STEALTH) הוא מטוס שתוכנן כך שיחמוק מעיני המכ"ם של האויב. אז נתחיל דווקא מהסוף, **ממטוס ה-B2** שהוא מפציץ בתצורת כנף מעופפת שמוטת כנפיו 52.43 מ' ואורכו 21 מ'.

בתמונה להלן אפשר לראות את צורתו המעניינת. אם נבחן אותה מקרוב נמצא שכל הקווים היוצרים את המטוס מקבילים לשני קווים בלבד – לשתי שפות ההתקפה של הכנפיים.



Northrop Grumman B-2A Spirit strategic penetration bomber (*Jane's/Mike Keep*)

כל שפות הזרימה, כל ה"זיג-זג", כל קו של פתח תחזוקה, כל קו של כונס אויר, כל קו של דלתות כני נסע, כל קו ציר של הגה ומדף, כולם נוצרו במקביל לשתי שפות ההתקפה.

כך שכל ההחזרים שהמטוס מחזיר למכ"ם האויב שמחפש אותו יהיו רק בשני כיוונים ברורים ולא יפוזרו לכל ה-360 מעלות ובכך יקלו על גילוי של המטוס. יותר מכך, תצורת הכנף המעופפת של ה-B2 היא ללא בליטות אנכיות מיותרות כגון מייצב כיוון שכפי שנראה בהמשך הוא אחד מהתורמים להגדלת חתימת המכ"ם.

למטוס ה-B2 יש כמובן עוד כמה וכמה אמצעים להקטנת חתימת המכ"ם שלו אבל האמצעי הבסיסי הוא כפי שאפשר לראות - צורתו והגיאומטריה של המטוס.

אחרי שנתנו הצצה ראשונה לחמקנות של מפציץ ה-B2 נציץ קצת יותר ונכיר כמה מושגים נוספים, כמו שטח חתך מכ"ם (RCS – RADAR CROSS SECTION) או חתימת מכ"ם.

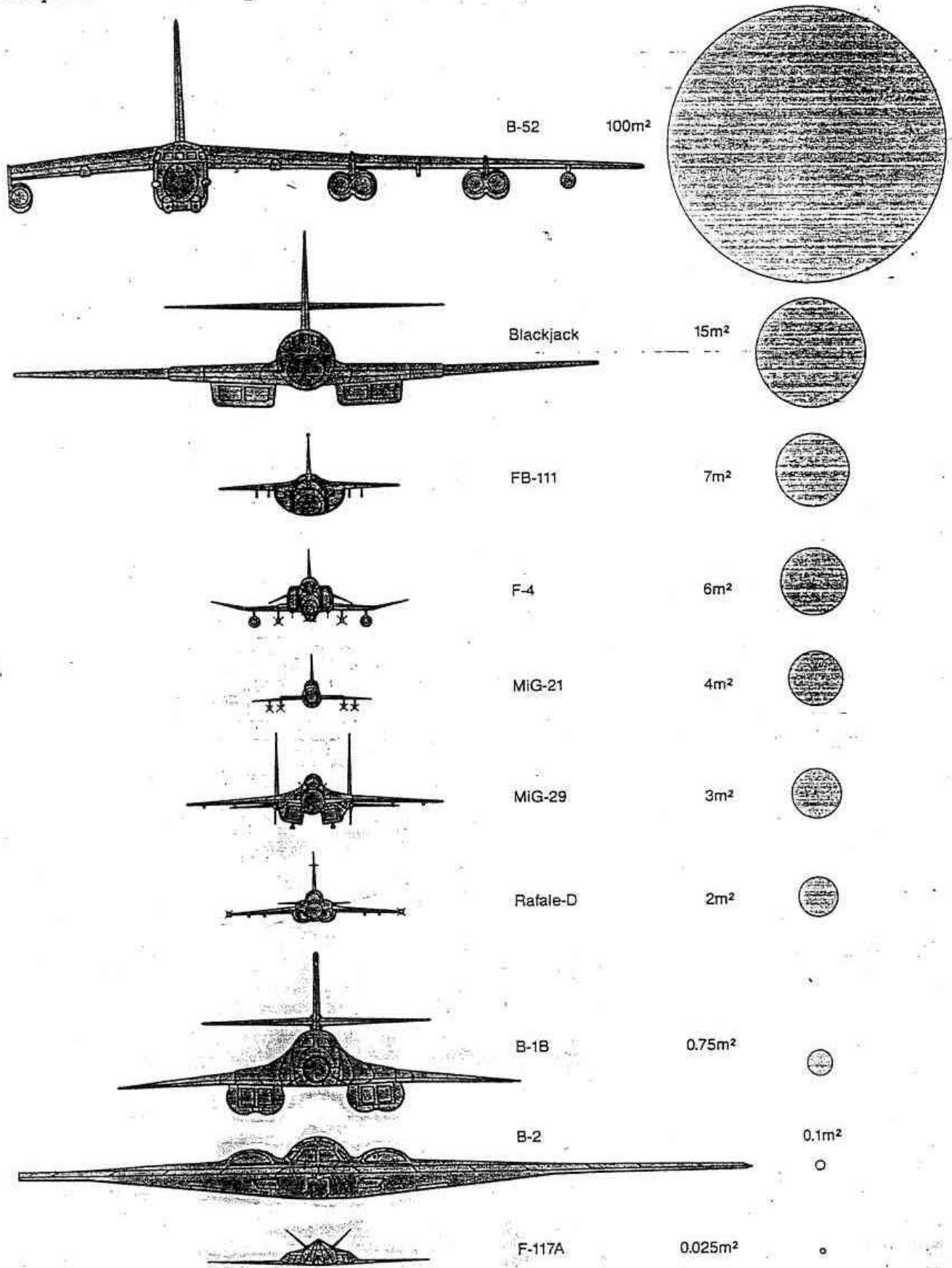
ככל שמטוס גדול יותר פיסית כך קל יותר לגלותו בראייה. באופן דומה, ככל שהמטוס גדול יותר קל יותר למכ"ם לגלותו, אך מסתבר שאפשר לתכנן מטוסים עם גיאומטריה מתאימה, לבנותם מחומרים מיוחדים ועוד ועוד פתרונות כך שלמרות גודלם הפיסי הם ייראו קטנים יותר על המכ"ם או בשפה מקצועית יותר שטח חתך המכ"ם שלהם – שח"מ (חתימת המכ"ם) יהיה קטן יותר. שטח חתך המכ"ם נמדד במטרים רבועים.

בדיאגרמה להלן אפשר לראות מטוסים בגדלים פיסיים שונים עם שטח חתך מכ"ם שאינו בהכרח יחסי לגודלם הפיסי. לדוגמא: מפציץ ה-B52 גדול פיסית ובנוסף תוכנן ללא שום התייחסות לנושא "החמקנות", ולכן גם שטח חתך המכ"ם שלו גדול – 100 מ"ר. מאידך מפציץ ה-B-1 שגם הוא גדול, תוכנן תוך התייחסות לנושא החמקנות ולכן שטח חתך המכ"ם שלו הרבה יותר קטן והוא – 0.75 מ"ר.

ה-B2, שכאמור תוכנן ספציפית כמטוס חמקן, למרות גודלו הפיסי הגדול יחסית, חתך המכ"ם שלו רק עשירית = 0.1 מ"ר.

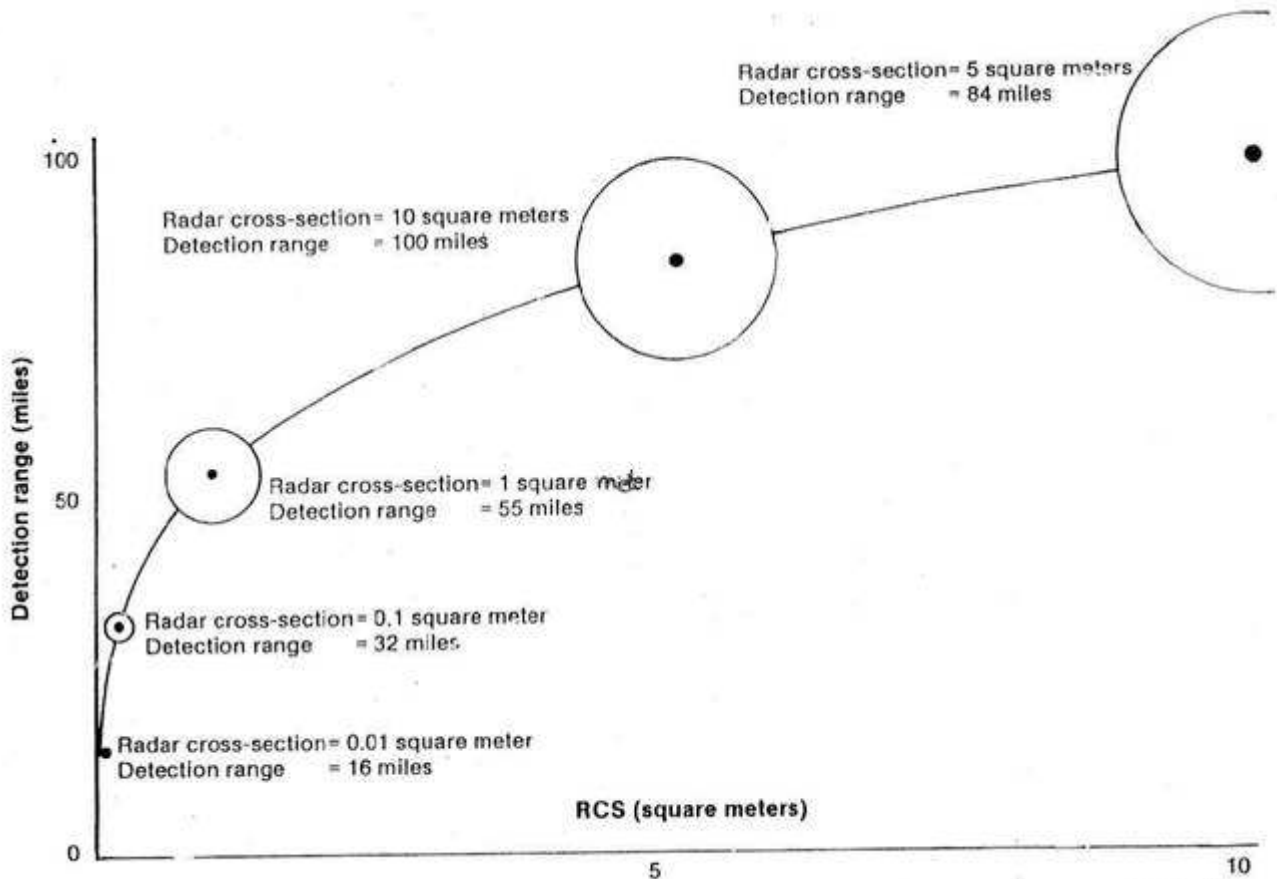
המטוס החמקן המפורסם ה-F117A משלב גם גודל פיסי קטן יחסית וגם תכנון אינהרנטי לחמקנות ושטח חתך המכ"ם שלו הוא מזערי: 0.025 מ"ר.

Physical Size Compared to RCS



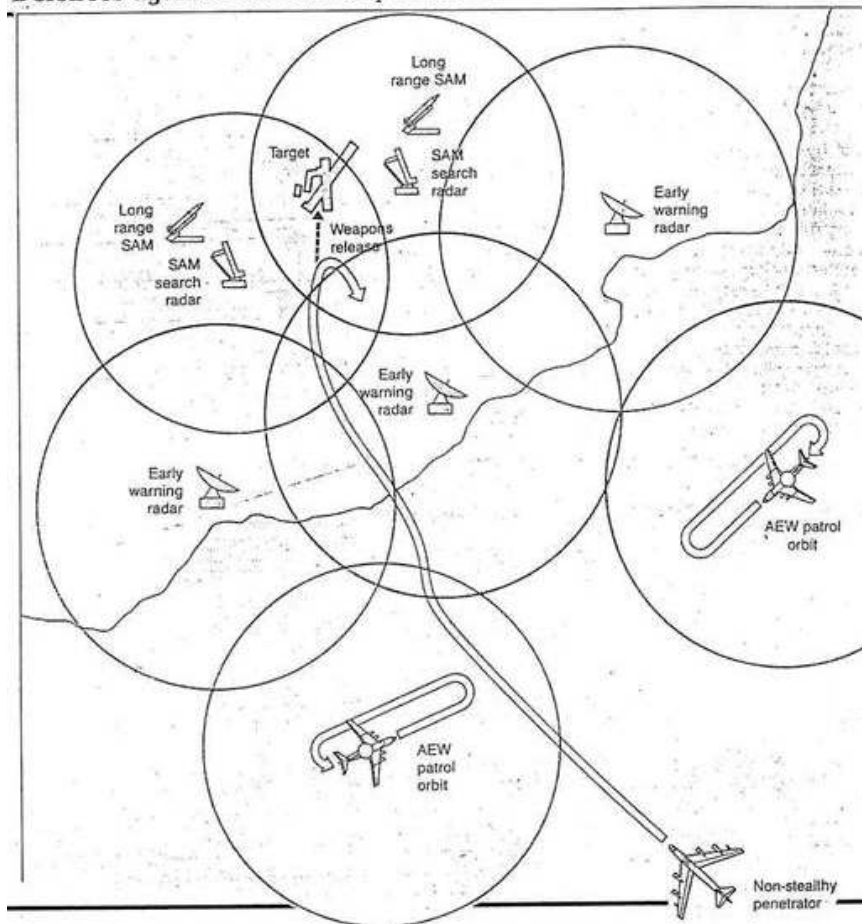
כאמור, ככל שחתך המכ"ם של המטוס קטן יותר קשה יותר לגלותו. הוא מתגלה במרחק קטן יותר מהמטרה (ולכן קשה יותר להתגונן בפניו) או בראיית המטוס התוקף קל לו יותר לחמוק בין מערכי המכ"ם של האויב (הקרקעיים והאוויריים) ולתקוף את היעד בשטח האויב.

התמונה הבאה מראה גרף המראה את תלות טווח הגילוי בשטח חתך המכ"ם – RCS. לדוגמה: מטוס בעל שטח חתך מכ"ם של 0.01 מ"ר (דומה ל- F117 או קצת טוב יותר) אפשר לגלותו רק מ-16 מיילים, ומאידך מטוס בעל שטח חתך מכ"ם של 5 מ"ר (כגון מטוס הפנטום F4) אפשר לגלותו כבר מ-84 מיילים.



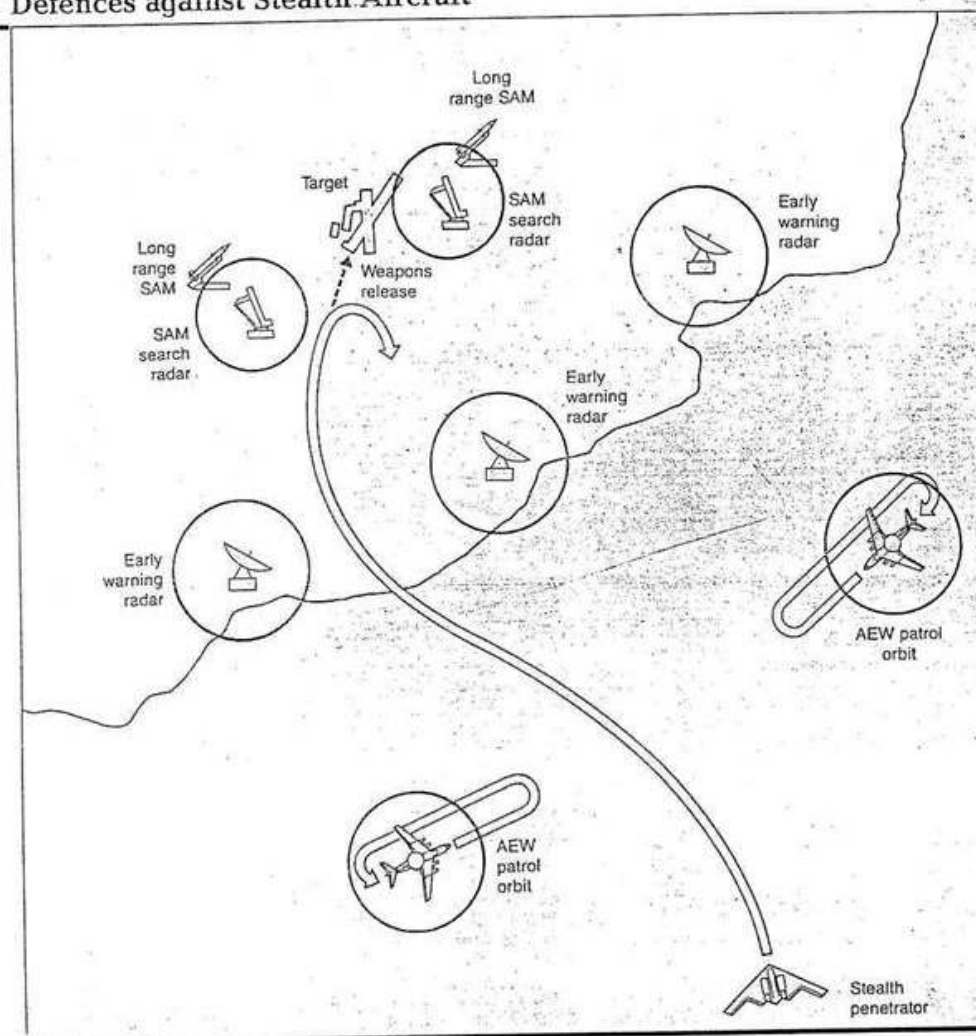
בשתי התמונות הבאות אפשר לראות יכולת חדירה של מטוסים שונים. מטוס "לא חמקן" שמנסה לחדור דרך מערך הגנה, אך בגלל שטח חתך המכ"ם שלו יכול כל מכ"ם לגלותו מטווחים גדולים ולכן נוצרת חפיפה בין שטחי הגילוי של מכשירי המכ"ם, חפיפה שלא מאפשרת למטוס לחמוק בין המכ"סים ולהגיע ליעד לתקיפה.

Defences against Non-Stealthy Aircraft



מאידך מטוס "חמקן" יכול לחדור בין מעגלי הגילוי של כל המכ"מ ולתקוף לפני שהוא מתגלה.

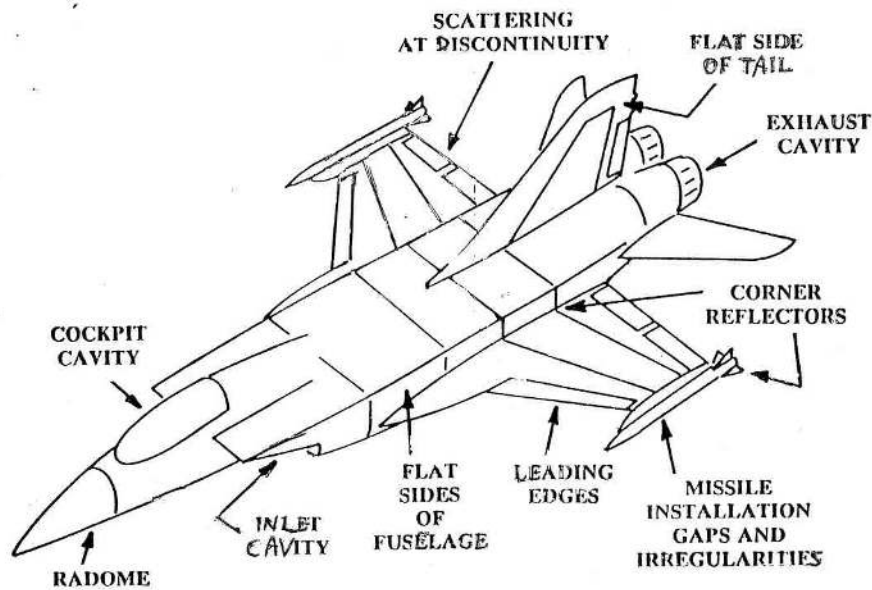
Defences against Stealth Aircraft



לגודל חתך המכ"ם של המטוס יש משמעות נוספת. ככל שנקטין את חתך המכ"ם ואולי נגיע לחתימת מכ"ם בגודל של ציפור מעופפת, המטוס יתגלה על מסך המכ"ם כ"רעש" או כציפור ומפעיל המכ"ם יתייחס אליו כהתראת שווא או כ"רעש".

ננסה לבחון את הגורמים המשפיעים על גודל חתך המכ"ם של המטוס. באופן כללי אפשר לומר שככל שהמטוס חלק יותר, ללא פינות ובליטות, חורים, חריצים וכו', חתך המכ"ם שלו יהיה קטן יותר. ולכן לדוגמא, ה"חור" של כונס האוויר, ה"פינה" בחיבור הכנף לגוף, מיצב הכיוון ש"עומד" זקוף אנכית, חופת המטוס שמאחוריה ה"חור" של תא הטייס, פצצות וטילים התלויים על המטוס, החריצים של משטחי ההיגוי ותנועת ההגאים ואפילו חריצים ואי התאמות בין פחי המעטה של גוף וכנף המטוס, כל אלה שוברים את החלקות של המטוס ויוצרים הפרעה והחזר מכמ"י.

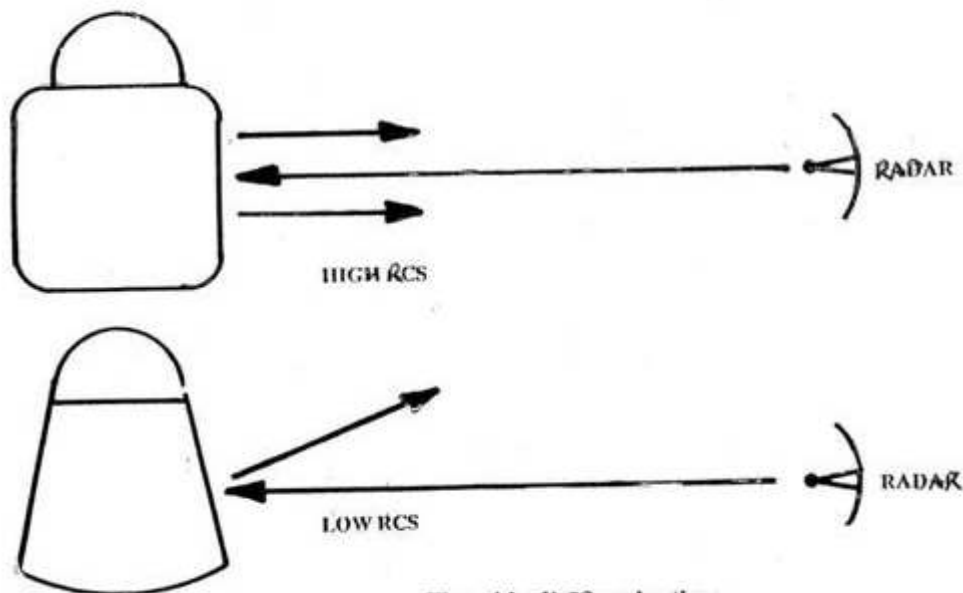
התמונה הבאה מתארת את ה"תורמים" העיקריים לחתך המכ"ם RCS.



Major RCS contributors.

להלן סידרה של סקיצות המתארות עקרונות בסיסיים בתיכון תצורה וגיאומטריה של כלי טייס במטרה להקטין את חתך המכ"ם שלהם:

1. הקטנת החזר מכמ"י מדופן שטוחה אנכית בעזרת דופן משופעת, כך שההחזר יהיה כלפי מעלה ולא מטה לכיוון מכ"ם החיפוש הקרקעי.

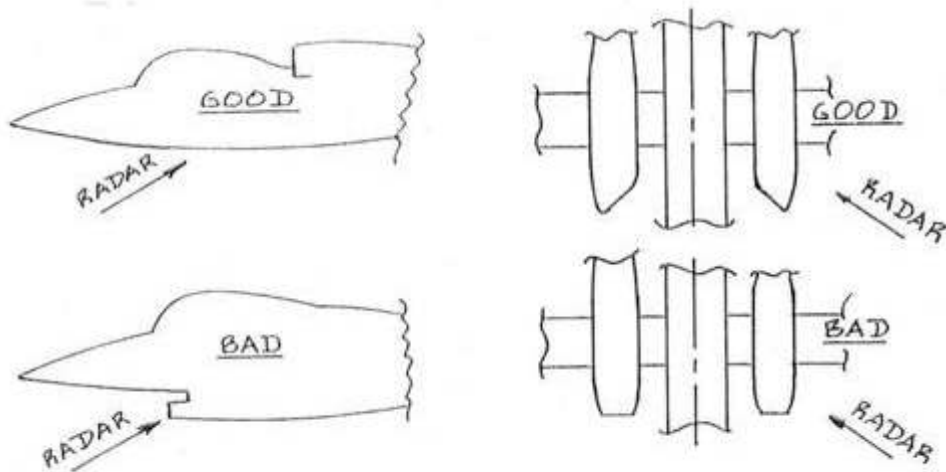


Flat side RCS reduction.

2.

הקטנת החזר מכ"ם מכונס האוויר. כונס אוויר תחתי (דוגמת ה-F16) מחזיר מכ"ם ולעומתו כונס אוויר מעל גוף המטוס (דוגמת ה-B2) מוסתר ע"י הגוף ומקטין את החזר המכ"ם (כמובן שלכונס עילי יש מגרעות מבחינה אווירודינמית ויעילות כונס ומנוע, וכשהמטוס ירים אף לזווית התקפה גבוהה, פחות אוויר יכנס לכונס, אך אנו מנסים כאן לשפר חתך מכ"ם). באופן דומה כונס אוויר הניצב לזרימה פחות טוב מבחינת החזר מכ"ם מכונס שמופנה פנימה ופתחו מוסתר יותר מגלי המכ"ם.

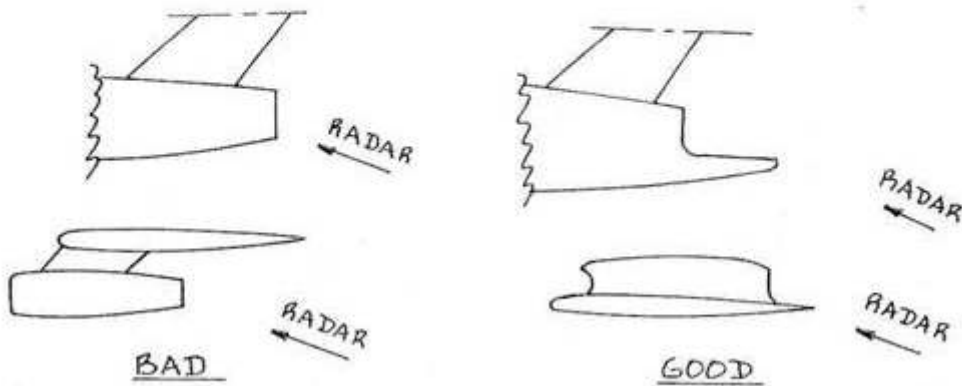
RCS: Good and Bad Inlet Design



3.

בדומה גם צינור הפליטה של מנוע המטוס הוא אחד מהתורמים לחתך המכ"ם וככל שנסתיר אותו הוא יתרום פחות לחתך המכ"ם.

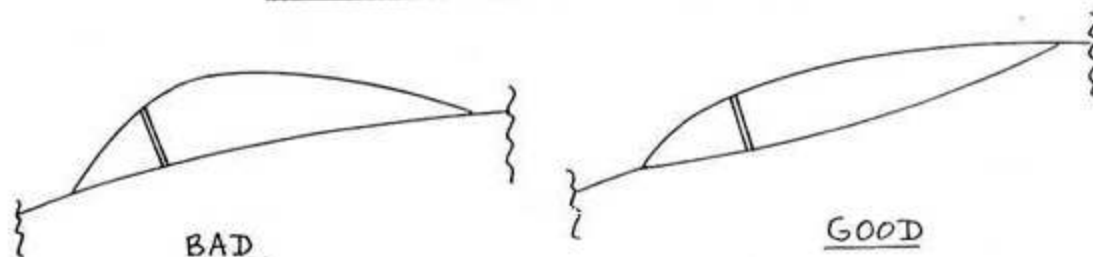
RCS: Good and Bad Exhaust Nozzle Design



4.

חופת המטוס השקופה גם היא "חור" שגורם להגדלת חתך המכ"ם ולכן ככל שנקטין את בליטת החופה כך נשפר את חתך המכ"ם של המטוס. (מאידך הטייס רוצה "חופת בועה" בולטת המאפשרת לו לראות החוצה ומסביב טוב ככל האפשר). אחד הפתרונות להקטנת "חור" החופה הוא ציפוי החופה בזזהב, כך שמבחינת החזר מכ"ם נוצרת רציפות בין גוף המטוס והחופה ולא מתגלה ה"חור" ואי הרציפות של תא הטייס.

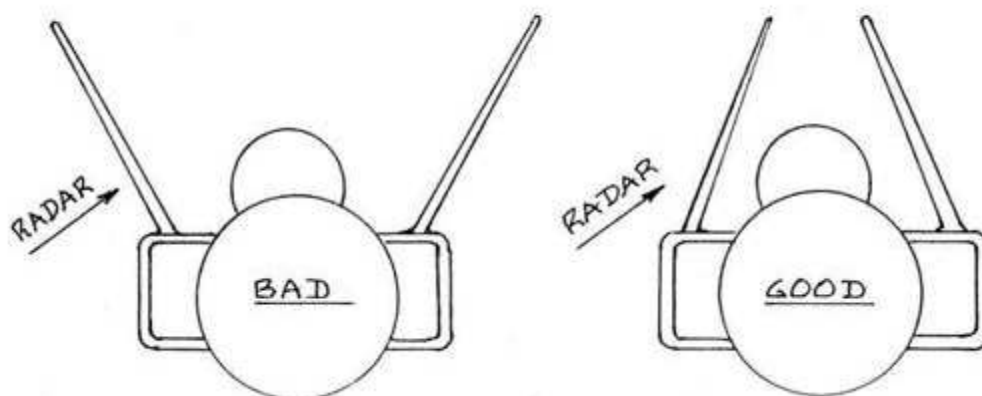
RCS: Good and Bad Canopy Design



5.

מיצב הכיוון כמשטח אנכי גדול תורם רבות לחתך המכ"ם ולכן מיצב כיוון מוטה כלפי פנים עדיף. כמובן שהפתרון הטוב ביותר בבחינת חתימת מכ"ם הוא הפתרון נוסח B2 שבו בוטל לגמרי מיצב הכיוון.

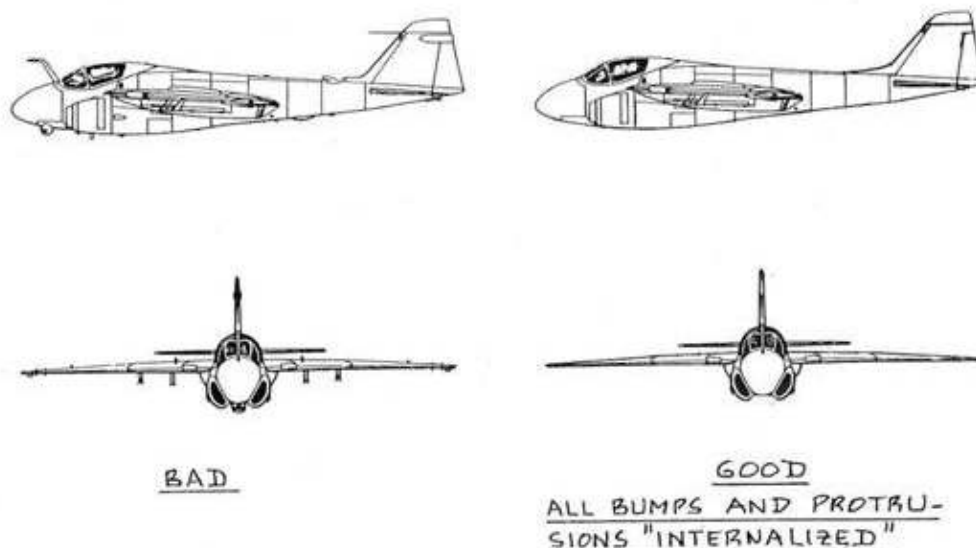
RCS: Good and Bad Vertical Tail Design



6.

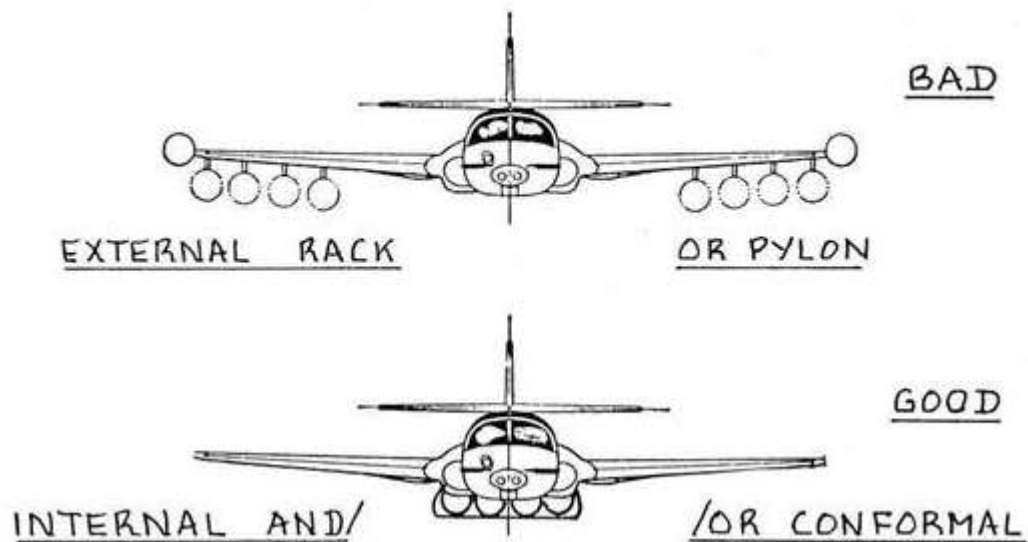
בליטות חיצוניות – כל בליטה חיצונית מגדילה את חתך המכ"ם ולכן בליטות כגון צינור תדלוק חיצוני, אנטנות, סנסור מצלמה, צינור פיתון, פיילונים לפצצות ומכלי דלק התלויים על הכנף והגוף, כל אלה מגדילים את חתך המכ"ם ויש לתכנן את המטוס עם פתרונות אחרים כך שהבליטות יוסתרו ויבלעו בגוף המטוס.

RCS: Good and Bad Bumps and Protrusions

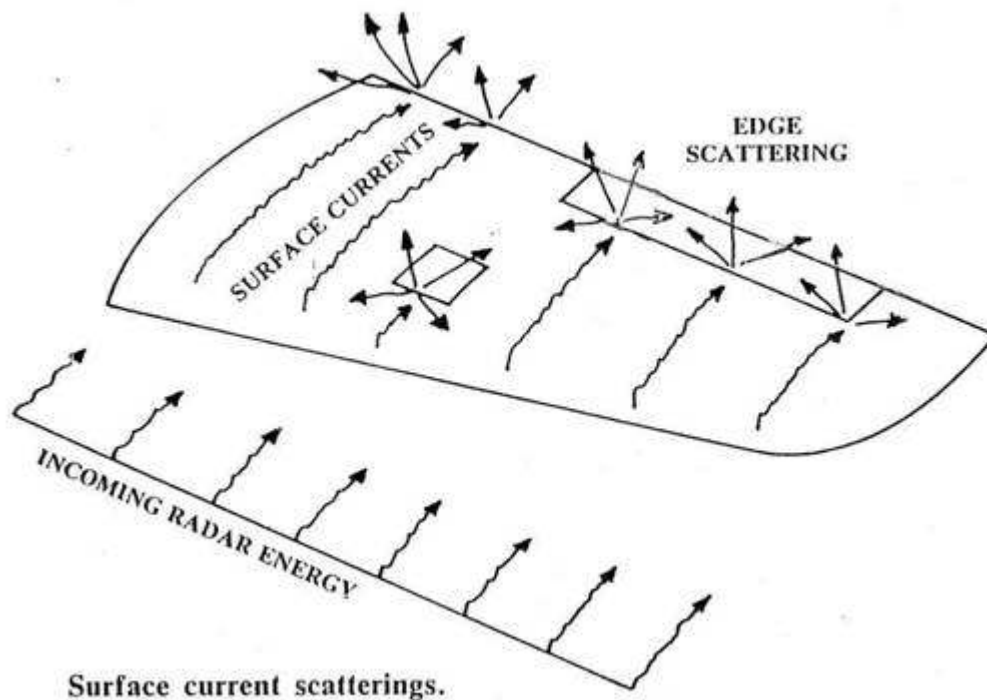


7. פצצות – כל פצצה שתלויה על המטוס מגדילה את אי הרציפות הגיאומטרית ולכן מגדילה את שטח חתך המכ"ם. לכן במטוסים חמקניים מעדיפים לאכסן את הפצצות בתוך גוף המטוס ורק בזמן הטלתם לפתוח דלתות ולהטילם, או בפתרון דוגמת הסקיצה כשהפצצות צמודות זו לזו ולגוף בתצורה קונפורמית.

RCS: Good and Bad Ordnance Installations



8. חריצים ואי רציפויות – כל חריץ בין חלקי הפח המרכיבים את המטוס (SKINS) בהיקף פתחי התחזוקה השונים, בין משטחי ההיגוי של המטוס, כל שקע של ראש מסמרה ואפילו קו שפת הזרימה של כנף המטוס, כל אלה תורמים להגדלת חתך המכ"ם.



גלי המכ"ם פוגשים את מעטה המטוס ויוצרים "גלים זוחלים" "SURFACE CURRENTS" על פני המטוס. כשהגלים הזוחלים פוגשים כאמור אי רציפות הם יוצרים פיזור והחזר מוגבר דבר המגדיל את חתך המכ"ם.

עד כאן דיברנו רק על צורת המטוס והשפעת צורתו על חתך המכ"ם. כמובן שגם חומר המטוס משפיע רבות על החזר המכ"ם שלו. אם לדוגמה המטוס היה לא מתכתי כולו ("מטוס מפלסטיק") כולל מנוע, מערכות וכו', הוא לא היה מתגלה כלל ע"י המכ"ם. אך מאידך מבנה המטוס צריך לעמוד בעומסים ובטמפרטורות שבדרך כלל רק מתכות יכולות לעמוד בהן, ועדיין לא יצרנו מנוע סילון מ"פלסטיק". ולכן עדיין רוב המטוסים החמקניים מתבססים על מבנה מתכתי או מבנה עשוי "מחומרים מרוכבים" (סיבי פחמן מוקשים באפוקסי). קיימים במטוסים שונים פתרונות נוספים של ציפוי המטוס ב"חומרים בולעים" כלומר חומר שבולע את אנרגיית המכ"ם המשדר ומקטין את ההחזר מהמטוס. כמובן שחומרים אלה הם מאוד ייחודיים ולכן הרכבם וצורת יישומם במטוסים נשמרת בזהירות ובקפידה על ידי כל יצרן מטוס חמקן. לדוגמה: מטוס ה-B2 בנוי ברובו מחומרים מרוכבים (גרפיט / אפוקסי) וכולל מבנה ומעטים מחומרים בולעים במבנה של חלת דבש. כמו כן מטופל ומצופה מעטה המטוס בציפוי להורדת קרינת החום של המטוס.

בואו ונכיר כמה מהמטוסים החמקניים ונבחן את הפתרונות השונים שישומו בכל מטוס להקטנת חתך המכ"ם שלו.

מטוס הביון SR-71 הוא אחד מהמטוסים הראשונים שתוכנן תוך התחשבות בנושא חתך מכ"ם. אפשר להתרשם מצורת גוף המטוס ושני מיצבי הכיוון המוטים פנימה שנעשה ניסיון להקטין את חתך המכ"ם שלו.



מטוס ה-F117 הידוע תוכנן כולו בקפדנות במטרה להקטין באופן משמעותי את חתימת המכ"ם שלו, ואומנם למרות גודלו, חתימת המכ"ם שלו היא רק 0.025 מ"ר.

מהתבוננות במטוס אפשר ללמוד כמה שיטות ופתרונות להקטנת חתך המכ"ם שלו. לדוגמה גיאומטריית המטוס כולו מורכבת ממשטחים, משטחים שכיוונם ניקבע כך שההחזר מהם יהיה מינימלי ולא בכיוון האיומים. כונסי האוויר נמצאים מעל הכנף והם מכוסים בסבכה שמקטינה את החזר המכ"ם שיוצרים כונסי האוויר. חופת תא הטייס בנויה ברצף גיאומטרי עם המשטחים היוצרים את גוף המטוס ובנוסף היא מצופה זהב.



במקום צינור פליטה עגול למנועי המטוס תוכנן צינור פליטה צר וארוך וגם הוא בדומה לכונס האוויר כולל מעין סבכה .

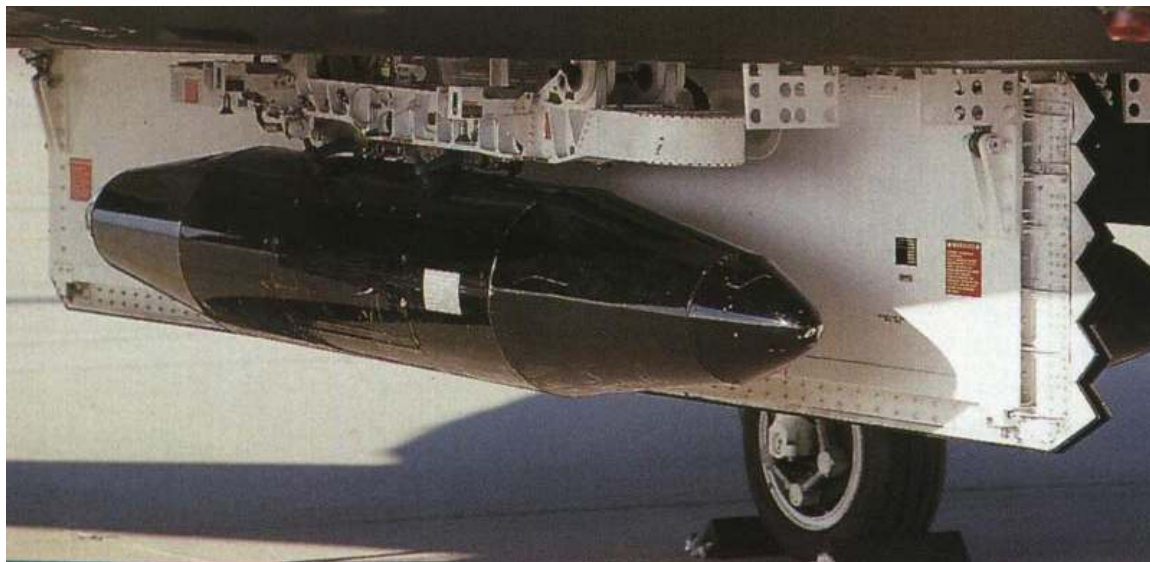


גם צינורות הפיטו של המטוס תוכננו תוך ניסיון להקטין את ההחזרים שהם יוצרים ובהתבוננות מקרוב לראות את צורתם המיוחדת.

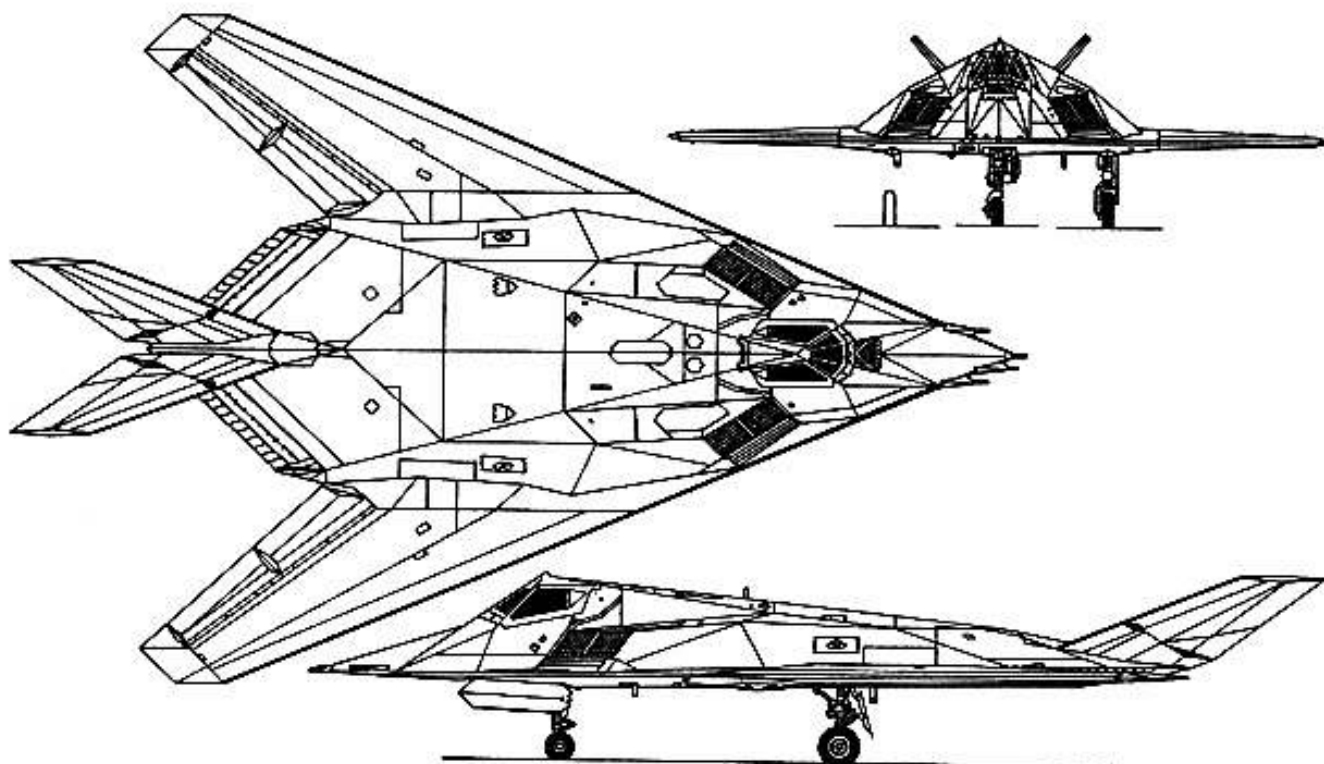
אפשר לראות במסגרת החופה גם את קווי ה"זיג-זג" האופייניים למטוסים חמקניים שמטרתם לא להוסיף חריצים והחזרים אלא בכיוונים ספציפיים (שממילא קיימים כגון כיוון מקביל לשפת ההתקפה)



פתרון נוסף אופייני להקטנת חתך המכ"ם הוא הקטנת כל הבליטות ובכלל זה הסתרת המטענים החיצוניים (פצצות) בתוך גוף המטוס. גוף המטוס נשאר חלק ורק ברגע הטלת הפצצה נפתחת דלת תא הפצצות, הפצצה מוטלת והדלת נסגרת. גם דלת זו חתוכה ב"זיג-זג" ואפשר להבחין בעובי המעטה (SKIN) שלה המצביע על שימוש בחומרים בולעים.



נתבונן בשלושת המבטים של המטוס, אפשר לראות במבט פנים ובמבט צד את מבנה הפירמידה של גוף המטוס המורכב כאמור ממשטחים המופנים כולם כלפי מעלה, אפשר לראות במבט על ששפות ההתקפה של הכנפיים מקבילות לשפות ההתקפה של מיצב הגובה ובאופן דומה גם שפות הזרימה מקבילות, ואפשר להבחין גם בצורתם המיוחדת של כונסי האוויר וצינור הפליטה.



מטוס ה-B2 תוכנן גם הוא כמטוס עם חתימת מכ"ם נמוכה במיוחד. חתך המכ"ם שלו הוא 0.1 מ"ר בלבד למרות שמוטת כנפיו היא 52.43 מ'.
המטוס הוא בתצורת כנף מעופפת ללא בליטות מיצבי כיוון. כאמור כל הקווים היוצרים שלו מקבילים לשתי שפות ההתקפה. כונסי האוויר מוקמו מעל הגוף כך שהם מוסתרים, באופן דומה גם צינורות הפליטה מוקמו מעל הכנף וקדימה בהרבה משפות הזרימה כך שהם מוסתרים בצורה מרבית. המטוס בנוי מחומרים מרוכבים תוך שימוש נרחב בגרפיט אפוקסי. מעטה המטוס עשוי מחומרים בולעים על בסיס מבנה "חלת דבש" (HONEYCOMB)



אפשר לראות את הצורה המשוננת המיוחדת של כונסי האוויר וכן את החריצים בבסיס כונסי האוויר המשמשים לפינוי שכבת הגבול, שגם הם עוצבו בצורה משוננת, כל זאת כדי להקטין את חתימת המכ"ם.



מטוס ה B2 נושא כ 18 טון פצצות מסוגים שונים כולן מאוכסנות בביטנו, כך שבגחונו של המטוס אין שום בליטות כתוצאה מנשיאת חימוש חיצוני כמו ברב המפציצים. בעת הטלת הפצצות נפתחות דלתות תאי הפצצות, עם סיום ההטלה נסגרות הדלתות והמטוס חוזר לצורתו החלקה עם החזר מכ"ם מזערי.



בתמונה זו אפשר לראות את שלבי ציפוי המטוס במעטה החומר הבולע.



כחלק מתהליך תיכון מטוס לשח"מ נמוך, נבנה דגם של המטוס (בדרך כלל בגודל זהה או מעט קטן מגודלו האמיתי של המטוס) שנמדד במטווח מיוחד למדידת החזר המכ"ם שלו. בתמונה אפשר לראות מודל למדידת שח"מ של מטוס ה- **X-32 BOEING**. אורכו של הדגם כ-15 מטרים ומוטת כנפיו כ-12 מטרים.



במהלך שנות ה-80 פותח ע"י GENERAL DYNAMICS מטוס לשח"מ נמוך במיוחד שנקרא **A-12**. המטוס שפותח עבור הצי האמריקאי היה בתצורת כנף מעופפת. תצורת הכנף המשולשת עם תא טייס משולב כחלק מהכנף ללא בליטות, נמצאה כתצורה מועדפת לכלי טייס עם שח"מ נמוך. הפרויקט בוטל ב 1991.



מטוס ה F - 22 תוכנן גם הוא עם חתימת מכ"ם נמוכה



בתמונה מתוך קו הייצור וההרכבה של מטוס ה-F-22 אפשר לראות את המקטע המרכזי של גוף המטוס, הכולל את התפר המחבר את מקטעי הגוף של המטוס ואת מעטי הפח (SKIN) וכן גבולות פתחי התחזוקה, כולם חתוכים בקו ה"זיג-זג"



כפי שהוסבר, כל חריץ או מדרגה במעטה המטוס יוצרים אי רציפות ומגדילים את החזר המכ"ם של המטוס. כדי להבטיח עמידה בדרישות ולוודא מירווח מינימלי בין הפחים, מבצעים מדידה של המרווחים ואי ההתאמות בעובי פח המעטה ופתחי התחזוקה בעזרת מכשיר מדידה אופטי. בתמונה מדידת מרווחים במטוס F-22.



מטוס ה-F-22 מצויד בתותח המוסתר בתוך המטוס, רק בעת הירי נפתחת הדלת, התותח מתגלה, יורה וחוזר למקומו המוסתר. כל זאת כדי להימנע מתוספת לחתימת המכ"ם שבליטת התותח בהתקנה קונבנציונלית עלולה להוסיף.



באופן דומה גם הטיילים במטוס 22F נישאים בתליה פנימית ובעת שיגורם נפתחת דלת תא הטייל, הטייל משוגר, הדלת נסגרת והמטוס חוזר לתצורתו החלקה.



מטוס X-32A גם הוא מתוכנן כמטוס עם שח"מ נמוך



גם מסוקים מתוכננים לאחרונה לשח"מ נמור



וכמובן גם מטוסים ללא טייס (מלטי"ם ומזלטי"ם) מתוכננים לשח"מ נמור.
בתמונה מל"ט Northrop Grumman Pegasus בעל יכולת נשיאת חימוש בשני תאי פצצות פנימיים.



גם כלי שיט מתוכננים לשח"מ נמוך כפי שאפשר לראות בתמונה



לסיום: תמונת מטוס החמקן האולטימטיבי.....

