

اعتراض مرحلة التعزيز (BPI) للصواريخ الباليستية

إن اعتراض الصواريخ والقذائف في المرحلة الأولى من إطلاقها هو عمل هجومي له طابع دفاعي واضح. ويتلخص هدفه في منع الأضرار المباشرة أو الجانبية في الدولة التي تتعرض للهجوم مع إلحاق أقصى قدر من الضرر بالمعتدي. وبالنسبة لإسرائيل، تتمتع طريقة الاعتراض هذه بميزة مركبة بسبب صغر حجمها، والتهديدات التي تشكلها إيران ووكلائها في "حلقة النار" القريبة والبعيدة، والإمكانات العالية للضرر الناجم عن الضربات على البنية التحتية المدنية والعسكرية. وتستعرض هذه المقالة التحديات والتطورات التكنولوجية في مجال اعتراض الصواريخ والقذائف، والجوانب الجيوسياسية ذات الصلة، والدروس المستفادة لدولة إسرائيل.

تعتبر دولة إسرائيل الدولة الأكثر تعرضاً للتهديد والهجوم في العالم من خلال الأسلحة الصاروخية من مختلف الأنواع، والتي يتم إطلاقها على أهداف مدنية وعسكرية. ويُعرّف الصاروخ بأنه جهاز مقذوف يتم إطلاقه بدون أنظمة توجيه، ويسافر عبر الغلاف الجوي باتجاه هدف بري على طول مسار باليستي. وعندما يتضمن الصاروخ أنظمة ملاحية، فإنه يُعرّف بأنه صاروخ. ويُعرّف الصاروخ الذي يتجاوز مداه التشغيلي 100 كيلومتر بأنه "صاروخ باليستي".

لقد أدركت إيران ووكلائها المختلفون - أي المنظمات الإرهابية في مختلف أنحاء الشرق الأوسط - فضلاً عن الدول الأخرى فيما يسمى "محور الشر"، المزايا الكامنة في الأسلحة الصاروخية. ويمثل تطوير وتشغيل هذه الأسلحة تحدياً تكنولوجياً يتطلب معرفة واسعة ومتعددة التخصصات في الفيزياء والكيمياء وعلوم المواد والديناميكا الحرارية والحوسبة وأنظمة التحكم والإلكترونيات، فضلاً عن أفراد مهرة لتصميم وبناء نظام الأسلحة الصاروخية. وعندما يكون الصاروخ قابلاً للمناورة، فإن الأمر يتطلب خبرة إضافية في تكنولوجيا الدفع المتجه - أي القدرة على إعادة توجيه غازات العادم في الصاروخ في اتجاهات مختلفة، وبالتالي تغيير مسار طيرانه نحو الهدف المقصود.

إن هذه التقنيات متاحة بسهولة، وتتضمن عمليات إنتاج تتطلب مواد خام متاحة وطرق تصنيع ليست معقدة بشكل خاص. كما أن تشغيلها وصيانتها بسيطتان نسبياً، ونشرها مرن ومباشر، ولا يتطلب تدريباً مهنيّاً متخصصاً. وهذه المزايا تجعل استخدام الأسلحة الصاروخية وسيلة جذابة للحرب، ولهذا السبب استحوذ أعداء إسرائيل على كميات هائلة من الصواريخ والقذائف القصيرة والطويلة المدى لمهاجمة الأهداف العسكرية والمدنية على حد سواء.

التحدي الذي تواجهه إسرائيل

إن اعتراض الصواريخ الباليستية يشكل تحدياً تكنولوجياً وأمنياً بالغ الأهمية نظراً للضرر الهائل الذي يمكن أن تسببه هذه الأسلحة، فضلاً عن سهولة إنتاجها وتشغيلها نسبياً. وتعتبر إسرائيل رائدة عالمية في تطوير وتنفيذ أنظمة الدفاع الصاروخي من خلال الاعتراض الحركي - تدمير صاروخ في منتصف رحلته باستخدام أنظمة مضادة للصواريخ مثل القبة الحديدية، ومقلاع داود، ونظام صواريخ أرو. وفي المستقبل، وكجزء من إطار الدفاع الإسرائيلي، سوف يتم تنفيذ بعض عمليات الاعتراض باستخدام أسلحة الطاقة الموجهة - وخاصة أسلحة الليزر - ضد التهديدات القصيرة والمتوسطة والبعيدة المدى.

إن نظام الدفاع الصاروخي الإسرائيلي المتعدد الطبقات يلعب دوراً حاسماً في التخفيف من الأضرار الناجمة عن الهجمات الصاروخية من خلال اعتراض الصواريخ أثناء طيرانها. ومع ذلك، حتى عندما يتم تحديد

التهديدات، فإن عمليات الاعتراض فوق الأراضي الإسرائيلية لا تزال قادرة على التسبب في أضرار غير مباشرة بسبب سقوط الحطام من الصاروخ المعترض أو الصاروخ المعترض. بالإضافة إلى ذلك، فإن الأضرار الاقتصادية غير المباشرة تنجم عن التعليق المؤقت للأنشطة في المناطق المستهدفة لفترات زمنية بسبب صفارات الإنذار من الغارات الجوية والحاجة إلى البحث عن ملجأ.

وتواجه إسرائيل سيناريوهين رئيسيين للتهديد: التهديد الذي يشكله "حزام النار" بالقرب من حدودها، والذي يشمل الصواريخ والقذائف التي يتراوح مداها بين 0 و 250 كيلومترا والصواريخ الباليستية بعيدة المدى التي تطلق من إيران واليمن (وربما العراق)، والتي يصل مداها إلى 2000 كيلومتر. ويعتمد التعامل مع هذا الطيف الواسع من التهديدات على تحديد فئات المدى ذات الصلة وتحديد نقطة انطلاق الهجوم. ويتم تحديد الإطار الزمني للاعتراض في كل سيناريو تشغيلي وفقاً لذلك.

إن اعتراض صاروخ ما على مسافة بعيدة قدر الإمكان عن هدفه له ميزتان رئيسيتان. ولهذا السبب فإن الهدف المثالي هو تحييد الصاروخ أثناء مرحلة التعزيز - الفترة بين الإطلاق وإيقاف تشغيل المحرك، عندما ينفصل الصاروخ عن جسمه الرئيسي. ولكن ما الذي يجعل اعتراض الصاروخ في مرحلة التعزيز مفيداً؟ في هذه المرحلة، لا تزال سرعة الصاروخ منخفضة نسبياً، ويفتقر إلى القدرة على المناورة، كما أن الضغوط الحرارية والميكانيكية الناجمة عن تشغيل المحرك واحتراق الوقود تجعل بنيته أكثر عرضة للخطر. وبمجرد إيقاف تشغيل المحرك وانفصال الصاروخ عن جسمه الرئيسي، تصبح عملية الاعتراض أكثر تعقيداً، وتزداد احتمالات الأضرار الجانبية - وخاصة في الحالات التي تنطوي على أسلحة نووية. وفي أي سيناريو، وخاصة عند التعامل مع الأسلحة النووية أو غيرها من أسلحة الدمار الشامل، فإن الهدف الأساسي هو احتواء الأضرار الجانبية داخل أراضي المعتدي.

ورغم أن مفاهيم اعتراض الصواريخ الباليستية في مرحلة الدفع تعود إلى ستينيات القرن العشرين، إلا أن التقدم المحرز في ذلك الوقت كان ضئيلاً. ثم عاد الاهتمام بالموضوع إلى الظهور خلال إدارة ريغان مع إطلاق مبادرة الدفاع الاستراتيجي - المعروفة شعبياً باسم "حرب النجوم" - والتي ركزت على الدفاع الصاروخي، بما في ذلك اعتراض الصواريخ في مرحلة الدفع. وعلى مر السنين، قدمت الولايات المتحدة برامج مختلفة لمواجهة تهديد الصواريخ الباليستية في هذه المرحلة، ولكن باستثناء الاختبارات الميدانية المحدودة، لم ينضج أي منها إلى نظام مثبت عملياً.

إن الكثير من المعلومات الواردة في هذه المقالة مستمدة من [تقرير صدر عام 2022](#) عن مركز الدراسات الاستراتيجية والدولية وكتاب [مرجعي رئيسي](#) حول هذا الموضوع.

اعتراض مرحلة التعزيز

التحدي التكنولوجي

تستغرق مرحلة التعزيز للصاروخ عادة من دقيقة إلى خمس دقائق - وهي الفترة التي يكون فيها محرك الصاروخ نشطاً ويسرع الصاروخ. وفي هذه المرحلة يظل الصاروخ داخل الغلاف الجوي، ويظل محركه متصلاً بالجسم الرئيسي، وتظل سرعته منخفضة نسبياً، وتكون قدرته على المناورة محدودة. وبالإضافة إلى ذلك، ونظراً لارتفاع استهلاك الوقود، يتحول مركز ثقل الصاروخ بسرعة، مما يخلق قدراً كبيراً من عدم الاستقرار أثناء الإطلاق. ومن حيث المبدأ، يمكن اعتراض صاروخ باليستي في مراحل مختلفة من رحلته

التحديات التكنولوجية لاعتراض مرحلة التعزيز

إن استخدام تقنية BPI يواجه في الوقت الحالي قيوداً تقنية واقتصادية وتكنولوجية كبيرة. وفي المستقبل القريب، قد لا يكون استخدام تقنية BPI ممكناً إلا من خلال أنظمة اعتراضية فضائية أو أنظمة محمولة جواً، الأمر الذي يتطلب القرب من موقع الإطلاق، وأنظمة استشعار شديدة الحساسية ومتقدمة ذات نطاق طيفي واسع (أي قدرة على اكتشاف "الألوان")، ومعالجة سريعة للصور والإشارات، والقدرة على إطلاق صواريخ اعتراضية عالية السرعة. ويتطلب الاعتراض الناجح وقت استجابة سريع، والذي يشمل الكشف والتحديد، والتتبع، وتخطيط الاستجابة، واتخاذ القرار بالاعتراض؛ وتقييم الإصابة - بما في ذلك الوقت اللازم لتأكيد ما إذا كان الاعتراض ناجحاً. وتشكل كل خطوة في هذا التسلسل تحدياً تقنياً، كما هو ملخص في الجدول 3.

وبسبب قرب الصاروخ المعترض المحمول جواً من الهدف، فإن المتطلبات الحركية أقل كثيراً من متطلبات الصواريخ المعترضة الأرضية. ويمكن للطائرات استخدام صواريخ معترضة صغيرة وأسرع، والتي، على عكس الأنظمة الأرضية، لا تحتاج إلى التسارع من وضع ثابت عبر الغلاف الجوي السفلي الكثيف. وعلاوة على ذلك، يوفر استخدام الطائرات مرونة أكبر وتكاملاً أكثر مباشرة بين مستشعر الصاروخ المعترض ومنصة الإطلاق، وبالتالي تبسيط عملية الاعتراض.

وبما أننا نركز على نظام BPI ومزاياه فيما يتعلق باعتراض الصواريخ في مراحل لاحقة، فلا بد من التأكيد على عدة نقاط رئيسية:

خلال مرحلة التعزيز لصاروخ باليستي يعمل بالوقود السائل، تتراوح درجة الحرارة المتوسطة في غرفة الاحتراق عادةً بين 2000 و3200 درجة مئوية، بينما يصل الضغط الداخلي إلى 50 إلى 200 ضغط جوي. تُظهر الحسابات الفيزيائية أن القوة المبذولة لكل وحدة مساحة في غرفة الاحتراق أثناء التعزيز تعتمد على تركيبة خليط الدافع؛ بالنسبة للوقود السائل، يمكن أن تتراوح من حوالي 3 إلى 1000 طن لكل متر مربع، بينما مع الوقود الصلب، قد يصل الضغط الداخلي إلى عدة آلاف من الأطنان لكل متر مربع. تجعل هذه الضغوط العالية للغاية من السهل إتلاف غلاف الصاروخ - وخاصة حول منطقة المحرك، حيث يتعرض لضغط شديد - مما قد يتسبب في حدوث أعطال لا رجعة فيها وحتى تمزق جسم الصاروخ أثناء الإقلاع.

وعلاوة على ذلك، تسبق مرحلة التعزيز النقطة التي يفصل عندها الرأس الحربي إلى رؤوس حربية متعددة تعود بعد ذلك إلى الغلاف الجوي بسرعة عالية، مما يجعل اعتراضها أكثر صعوبة. ويقلل الاعتراض المبكر من احتمال سقوط الحطام أو الرؤوس الحربية التالفة على الدولة المستهدفة (على سبيل المثال، إسرائيل) أو على أراضي طرف ثالث صديق، وبالتالي تقليل الأضرار الجانبية. ويمكن أن يؤدي اعتراض مرحلة التعزيز أيضاً إلى سقوط الرأس الحربي على أراضي المهاجم، مما قد يتسبب في أضرار جسيمة هناك.

وتسلط تحديات اعتراض الصواريخ في المراحل اللاحقة من طيرانها الضوء بشكل أكبر على فوائد نهج BPI. فبعد مرحلة التعزيز - أثناء مرحلتي الصعود ومنتصف المسار حتى يصل الصاروخ إلى ارتفاعه الأقصى - تستطيع الصواريخ أن تستخدم أدوات التضليل أو غيرها من التدابير المضادة (مثل الأهداف الوهمية، والتشويش على الإشارات، والتداخل مع الرادار، والصواريخ المضيفة) كما تستطيع أن تقوم بمناورات مراوغة، وكل هذه الأمور تعوق قدرات الكشف والاعتراض التي تتمتع بها أنظمة الدفاع الجوي.

إن اعتراض الصواريخ الباليستية العابرة للقارات التي تعمل بالوقود الصلب يشكل تحدياً أكبر كثيراً من اعتراض الصواريخ التي تعمل بالوقود السائل، ويرجع هذا في المقام الأول إلى أن مراحل التحضير والدفع للصواريخ التي تعمل بالوقود الصلب أقصر كثيراً. فضلاً عن ذلك فإن [مرحلة الدفع](#) للصواريخ الباليستية قصيرة ومتوسطة المدى - التي تستمر من دقيقة إلى ثلاث دقائق - أقصر كثيراً من مرحلة الدفع للصواريخ الباليستية العابرة للقارات، التي تستمر من ثلاث إلى خمس دقائق. والإطار الزمني المحدود والارتفاع المنخفض الذي تكمل عنده الصواريخ قصيرة ومتوسطة المدى مرحلة الدفع يجعل اعتراضها أكثر صعوبة مقارنة بالصواريخ طويلة المدى. وبالتالي فإن اعتراض الصواريخ التي تعمل بالوقود الصلب والصواريخ قصيرة إلى متوسطة المدى أثناء مرحلة الدفع يمثل تحديات كبيرة ويتطلب استخدام صواريخ اعتراضية أسرع متركزة أقرب إلى موقع الإطلاق.

إن التحسينات في تكنولوجيات الاستشعار عبر نطاق طيفي واسع، جنباً إلى جنب مع الاعتراض باستخدام تقنيات الليزر عالية الطاقة - التي من المحتمل نشرها في الفضاء أو على منصات محمولة جواً - من شأنها أن تمكن من تحسين أداء الاعتراض، وأوقات الاستجابة الأسرع، وخفض التكاليف الاقتصادية. وهذا من شأنه أن يجعل BPI أكثر جدوى واستدامة. وعلاوة على ذلك، يمكن دمج BPI في نظام دفاع صاروخي متعدد الطبقات، مكملاً لأنظمة الاعتراض الحالية. سيسمح نظام الدفاع متعدد الطبقات باعتراض التهديدات المختلفة في مراحل مختلفة من طيران الصاروخ، وبالتالي تحسين معدلات نجاح الاعتراض وتعويض الثغرات في أنظمة الدفاع الحالية.

التطورات التكنولوجية: الحاضر والمستقبل

اعتراض جوي وبحري

[وقد تم اقتراح عدة طرق](#) لاعتراض الصواريخ الباليستية خلال مرحلة التعزيز، بما في ذلك الأسلحة الحركية الأرضية، والأسلحة الحركية المحمولة جواً، والأنظمة الفضائية، وأنظمة الليزر المحمولة جواً. وفي الوقت الحالي، لا يوجد نظام أرضي قادر على اعتراض صاروخ باليستي خلال هذه المرحلة المبكرة. وقد صُممت أنظمة الدفاع الجوي الأمريكية (ثاد، إيجيس، باتريوت) والأنظمة الإسرائيلية (مقلاع داود، أرو) لاعتراض الصواريخ الباليستية بعيدة المدى سواء داخل الغلاف الجوي أو خارجه.

بالنسبة لاعتراض الصواريخ الحركية الأرضية - أي إطلاق الصواريخ الاعتراضية من الأرض - لابد أن تكون الصواريخ الاعتراضية أسرع كثيراً من تلك التي تُطلق من منصات محمولة جواً. وعلى النقيض من الاعتراض الجوي أو الفضائي، لا تدعم الأنظمة الأرضية اعتراض الليزر، الذي يتطلب خط رؤية ممتد إلى الهدف - وهو أمر لا يمكن تحقيقه إلا على ارتفاعات عالية. وعلاوة على ذلك، ونظراً لانحناء الأرض والإطار الزمني المحدود للاعتراض، فلا توجد أجهزة استشعار أرضية قادرة على اكتشاف الصواريخ أثناء مرحلة التعزيز. ونتيجة لهذا، يتطلب الاعتراض الأرضي تكاملاً وتواصلاً سريعين بين أنظمة القيادة والتحكم والأصول المحمولة جواً العاملة داخل الغلاف الجوي أو في الفضاء.

يوجد حالياً نظام كشف قائم على الأقمار الصناعية مزود بأجهزة استشعار بالأشعة تحت الحمراء وبصرية كجزء من برنامج دعم الدفاع الأمريكي (DSP). يكتشف هذا النظام إطلاق الصواريخ من خلال [الاستشعار عن بعد للحرارة المنبعثة](#) من محرك الصاروخ أثناء الإطلاق. تستغرق عملية اكتشاف الإطلاق ونقل الإشارات ومعالجة المعلومات من لحظة اشتعال محرك الصاروخ ما متوسطه 30 ثانية. يتطلب إعداد

وإطلاق صاروخ اعتراضى بعد ذلك حوالي 100 ثانية من لحظة تلقي التنبيه. وهذا يعني أن الاعتراض ممكن في إطار زمني لمرحلة التعزيز لصاروخ باليستي بعيد المدى. والافتراض السائد هو أن الصاروخ الاعتراضى يجب أن يكون له سرعة تبلغ حوالي 7 كم في الثانية، مما يسمح له بالتمركز على مسافة 700-1000 كم من موقع إطلاق الصاروخ الباليستي.

إن تطوير أنظمة اعتراض أرضية من شأنه أن يخفف من المخاطر الأمنية والقيود الفنية المرتبطة بالاعتراض الجوي. ومن المعقول أن نفترض (في انتظار مزيد من التحقيق) أن هذا من شأنه أيضاً أن يقلل من التكاليف الإجمالية للحفاظ على الدوريات الجوية المستمرة. والمزايا المحتملة للاعتراض الأرضي من شأنها أن تزيد من جدوى أنظمة اعتراض الطائرات بدون طيار لكل من الولايات المتحدة وإسرائيل، وخاصة في أوقات السلم. وعلاوة على ذلك، فإن تطوير أنظمة اعتراض الطائرات بدون طيار الأرضية من شأنه أن يتيح تعاوناً أوسع مع الحلفاء في الشرق الأوسط حيث يمكن نشر مثل هذه الأنظمة، فضلاً عن خيار وضعها على حاملات الطائرات الأميركية أو الغواصات العاملة في المنطقة.

إن تطوير صواريخ اعتراضية محمولة جواً أسرع يمكن أن يعزز بشكل كبير قدرات BPI من خلال تقليل الوقت اللازم لإكمال الاعتراض. لتحقيق هذا الهدف، يجب أن يكون الصاروخ الاعتراضى خفيف الوزن قدر الإمكان، ومجهزاً بأجهزة استشعار بصرية وحرارية شديدة الحساسية للكشف عن التوقيع بالأشعة تحت الحمراء للصاروخ الباليستي المطلق، ومصمم بديناميكيات هوائية متقدمة وأنظمة دفع قابلة للمناورة لتوجيه الصاروخ الاعتراضى بدقة نحو الصاروخ الباليستي، وخاصة [بالقرب من منطقة العادم "الساخنة" للمحرك](#). تم تقديم مثال على التقدم التكنولوجي الذي يمكن دمجه في نظام BPI في معرض باريس الجوي في يونيو 2023 من قبل [رافائيل](#) (انظر الشكل 2). تم تصميم هذا النظام، صاروخ جو-جو Sky Spear، بقدرات الاستحواذ على الهدف والتوجيه والهجوم بعيد المدى. كما هو موضح في الشكل 2، فهو يهدف على وجه التحديد إلى تحييد منصات الهجوم المعادية قبل أن تتمكن من الإطلاق.

الليزر

وعلى النقيض من الأسلحة الحركية، يعتمد شعاع الليزر على تسخين الهدف، مما يتطلب منه البقاء مركّزاً على الصاروخ لعدة ثوانٍ لإحداث فشل هيكل في غلاف الصاروخ. بالإضافة إلى ذلك، تعمل أشعة الليزر على تقليل وقت الاعتراض بشكل كبير، حيث يمكنها ضرب الصاروخ بشكل شبه فوري، نظراً لأن أشعة الليزر تسافر بسرعة الضوء. ونظراً لأن أسلحة الليزر لا تستنفذ الذخيرة التقليدية (فهى غير قابلة للاستهلاك)، فإن استخدامها يمكن أن يقلل بشكل كبير من تكاليف الاعتراض ويحسن القدرة على مواجهة عمليات إطلاق متعددة في وقت واحد. ومع ذلك، وعلى الرغم من هذه المزايا، فإن أسلحة الليزر لها عدة قيود. فهي مقتصرة على المنصات المحمولة جواً (أو الأنظمة الفضائية المحتملة في المستقبل البعيد) بسبب الحاجة إلى خط رؤية مباشر للهدف. يمكن أن يؤدي التداخل الجوي والتشوهات البصرية إلى تقليل كثافة الطاقة التي يتم توصيلها إلى نقطة محددة على الصاروخ بشكل كبير، مما يحد من فعالية الليزر.

تقدم الليزرات الكيميائية، مثل ليزر اليود والأكسجين الكيميائي، مزايا بسبب مداها الطويل وقوتها العالية. ومع ذلك، فإنها تفرض أيضاً تحديات، بما في ذلك تعقيد نقل وتخزين المواد الكيميائية المطلوبة، وبعضها خطير، والتوافر المحدود لهذه المواد. تحد هذه العوامل من استخدامها على نطاق واسع وتتطلب منصات جوية كبيرة لنشرها. لا تزال تقنيات الليزر الأخرى، مثل ليزر الإلكترون الحر (FELs) وليزر النبضات

القصيرة للغاية، في المراحل الأولى من التطوير ولا يمكن تشغيلها بعد. وعلى غرار الليزر الكيميائي، تتطلب هذه الأنظمة بنية تحتية كبيرة ومعقدة، مما يمنع دمجها في منصات جوية صغيرة.

كان أحد الاستثناءات هو نظام الليزر المحمول جواً (ABL) ، وهو ليزر ملفوف مثبت على طائرة بوينج 747، والذي كان يعمل على ارتفاع حوالي 12 كم. ومع ذلك، كان عرضة بشكل كبير للاضطرابات الجوية، مثل الاضطرابات الجوية والرياح القوية، مما استلزم أنظمة تصحيح بصرية معقدة للتعويض عن التشوهات. بالإضافة إلى ذلك، كان أداء النظام ضعيفاً نسبياً مقارنة بتكلفته - المقدرة بنحو 3 مليارات دولار - مما أدى إلى إلغاء البرنامج في عام 2012.

إن الليزر ذات الحالة الصلبة والألياف (والتي يشار إليها غالباً باسم "الليزر الكهربائي") أكثر عملية للاستخدام على المنصات المحمولة جواً الأصغر حجماً، مثل الطائرات الشبحية أو الطائرات بدون طيار. ومع ذلك، فإن ناتج الطاقة المنخفض لها يحد من فعاليتها في BPI. إن نطاقها التشغيلي قصير نسبياً ويعتمد بشكل كبير على الظروف البيئية والطقس. هذه الليزرات مقيدة بطبيعتها بالانتقال الجوي المحدود، حيث تمتص جزيئات الماء والغازات الجوية المختلفة أشعة الليزر الخاصة بها، وتنتشر بواسطة الجسيمات المحمولة جواً، وتتأثر بالاضطرابات الجوية. تم إحراز تقدم كبير في تطوير الليزر ذات الحالة الصلبة والألياف المضخوخة بالديود، بالإضافة إلى أنواع الليزر الأخرى. ومع ذلك، وعلى الرغم من التقدم التكنولوجي المستمر، لا يبدو أن أي نظام ليزر موجود قريب من تلبية متطلبات الاعتراض لمرحلة التعزيز في الأمد القريب.

اعتراض من الفضاء

إن تحقيق اختراق مستقبلي في تطوير أنظمة اعتراض الصواريخ الفضائية، والتي قد تسعى الولايات المتحدة إلى تحقيقها في الأمد البعيد لمواجهة التهديدات من روسيا والصين، من شأنه أن يحسن بشكل كبير من قدرات الاعتراض ويفيد إسرائيل أيضاً. توفر أنظمة الاعتراض الحركية الفضائية ميزة تحديد المواقع الأمثل للاعتراض، خالية من القيود الجغرافية. ومع ذلك، فإن تطوير مثل هذا النظام غير ممكن في المستقبل القريب بسبب التحديات الهندسية والتكاليف العالية للتطوير والصيانة. إن تحقيق تغطية عالمية مستمرة يتطلب كوكبة كبيرة من الأقمار الصناعية، ولكل منها تكاليف إنتاج وإطلاق كبيرة. بالإضافة إلى ذلك، فإن أنظمة الاعتراض الفضائية ستكون عرضة للهجمات المضادة للأقمار الصناعية، مما يقلل من جدواها على المدى الطويل.

طائرات بدون طيار

في الوقت الحالي، تشمل المنصات المحمولة جواً الأكثر ملاءمة لـ BPI الطائرات المقاتلة مثل طائرات الشبح F-35I و F-15، فضلاً عن الطائرات بدون طيار مثل Eitan و Global Hawk وسلسلة Hermes. ومن المتوقع أن تعمل التطورات في الطائرات الموجهة عن بعد عالية الارتفاع وطويلة الأمد (HALE) - (RPA) والتي يمكن أن تظل في الجو لفترات طويلة على ارتفاعات عالية وتكاليف تشغيلية أقل - على تعزيز جدوى وعملية استخدام الطائرات بدون طيار لاعتراض الصواريخ في مرحلة التعزيز. ستساعد هذه التطورات في تقليل تكاليف الإنتاج والتشغيل، وتحسين دقة وسرعة الاعتراض، والحد من المخاطر الأمنية المرتبطة بالاعتراض القائم على الطائرات بدون طيار.

وتنعكس هذه التحسينات في تحسين الديناميكا الهوائية للطائرة، والتقدم في أداء المحرك وكفاءة الوقود، وتطوير هيكل أخف وزناً وأكثر موثوقية وأذكى قادر على التعامل مع التحديات المعقدة. [الجيل القادم](#) من الطائرات بدون طيار الأمريكية - المقرر أن تحل محل طائرات غلوبال هوك بدون طيار المقرر إيقاف تشغيلها بين عامي 2027 و 2029 - إلى جانب أسطول الطائرات بدون طيار الذي طورته القوات الجوية الإسرائيلية وصناعات الطيران الإسرائيلية كجزء من [مشروع "Storm Clouds"](#) ، بما في ذلك طائرة Spark ("Nitzotz") بدون طيار، لديها القدرة على تحسين الأداء بشكل كبير (انظر الشكل 3).

نظام COIL المثبت على منطاد

يمكن أن يعمل نظام COIL (ليزر الأكسجين واليود الكيميائي) المثبت على منطاد عالي الارتفاع (HAA) كطريقة قابلة للتطبيق لاعتراض الصواريخ الباليستية أثناء مرحلة التعزيز. يجمع هذا النظام بين مزايا ليزر COIL، الذي يتميز بمدى طويل وقوة عالية، وفوائد استخدام زبلين. على عكس الأنظمة المحمولة جواً الأخرى التي تتطلب لوجستيات أكثر تعقيداً للبقاء بالقرب من موقع الإطلاق، يمكن لزبلين الحفاظ على موقع ثابت على ارتفاع عالٍ، مما يوفر حماية مستمرة فوق منطقة محددة.

في الوقت الحالي، يعد استخدام ليزر COIL أو غيره من الليزر الكيميائي، مثل تلك القائمة على أنظمة تعتمد على فلوريد الهيدروجين، على المنصات المحمولة جواً محدوداً بسبب التحديات اللوجستية، بما في ذلك الاستهلاك العالي للطاقة لمضخات التفريغ واستهلاك المياه للتبريد. تشير المحاكاة إلى أن استخدام غاز عازل محايد عند ضغط أعلى من الغلاف الجوي المحيط يمكن أن يلغي الحاجة إلى مضخة تفريغ في المنطاد، مما يسمح له بالعمل بشكل مستمر على ارتفاع 20 كم. على هذا الارتفاع، يكون الضغط الجوي منخفضاً، والتشوهات البصرية ضئيلة، ويمكن استخدام البصريات البسيطة لضرب أهداف تصل إلى 100 كم، بتكلفة اعتراض منخفضة تبلغ 100 دولار لكل طلقة عند أقصى خرج ليزر يبلغ 1000 كيلووات. يمكن تمديد مدة تشغيل النظام عن طريق إعادة إمداد المواد الكيميائية من منطاد آخر أو سفينة.

ومع ذلك، فإن تركيب نظام COIL على منطاد زبلين يأتي مع العديد من العيوب ولم يتم اختباره بعد في ظروف التشغيل. النظام عرضة لظروف الطقس أثناء الإقلاع والهبوط، وحجمه الكبير وقربه من أراضي العدو يجعله عرضة لهجمات الصواريخ أرض-جو. بالإضافة إلى ذلك، فإن سعة تخزين المواد الكيميائية محدودة، مما يتطلب إعادة التزود بالوقود بشكل دوري.

تطوير المستشعرات

إن أحد التطورات التكنولوجية الرئيسية في أنظمة BPI المبكرة ينطوي على تحسين أداء المستشعر للكشف عن الصواريخ وتتبعها أثناء مرحلة التعزيز. وستعمل هذه التحسينات على تقليل الوقت اللازم لتحديد الصاروخ وتحديد مساره بشكل كبير من لحظة الإطلاق. إن فترة الاعتراض أثناء مرحلة التعزيز قصيرة للغاية - تتراوح من 160 إلى 300 ثانية للصاروخ الباليستي العابر للقارات. وبشكل الكشف المبكر تحدياً بسبب التوهين الإشعاعي بالأشعة تحت الحمراء (IR)، والذي يحدث في المقام الأول بسبب بخار الماء في الغلاف الجوي؛ والضوضاء الخلفية من انعكاسات الأرض؛ وانحناء الأرض، مما يفرض قيوداً على الكشف المبكر عن الهدف. ستساعد التطورات في تكنولوجيا أجهزة الاستشعار بالأشعة تحت الحمراء في التغلب على هذه التحديات، وتحسين دقة الاعتراض وزيادة جدوى BPI.

إن المزيد من التقدم في تصنيع أجهزة الاستشعار عبر نطاقات طيفية إضافية، وتحديثات الرادار، وتحسينات المكونات البصرية من شأنه أن يخفف تكاليف الإنتاج، مما يجعل هذه الأنظمة متاحة على نطاق أوسع. ومن المتوقع أن تعمل التطورات الجارية على تسريع هذه التحسينات في الأمد القريب والمتوسط.

إن دمج تقنيات الرادار الجديدة، مثل الرادار شبه الموصل الذي يعتمد على نتريد الغاليوم، من شأنه أن يختصر بشكل كبير الوقت اللازم لكشف الصواريخ الباليستية. ويوفر الرادار الذي يعتمد على نتريد الغاليوم العديد من المزايا، بما في ذلك تحمل الجهد العالي، وزيادة كفاءة الطاقة، وتحسين قدرات تبديل التردد. وعلاوة على ذلك، فإنه يقلل من وزن النظام ويعزز الدقة والمدى، مما يؤدي إلى قدرات تتبع أكثر دقة وأسرع. وهذا يسمح أيضاً بدمج الرادار على منصات جوية أصغر.

تؤدي التطورات الجارية والمستقبلية في أجهزة استشعار الأشعة تحت الحمراء عالية الدقة إلى تحسين الحساسية والدقة والكفاءة مع تقليل تكاليف الإنتاج في نفس الوقت. توفر مجموعات كاشفات الأشعة تحت الحمراء ذات الموجات القصيرة (SWIR) والأشعة تحت الحمراء ذات الموجات المتوسطة (MWIR) كشفًا أكثر دقة وحساسية للإشارات وسط ضوضاء الخلفية. بالإضافة إلى ذلك، تسمح تقنيات القراءة المتقدمة باستخدام مجموعات المستوى البؤري (FPA) بمعالجة البيانات بشكل أسرع وتحسين قدرات تحديد الهدف وتتبعه، حتى عند التعامل مع كميات كبيرة من البيانات.

وستعمل هذه التطورات، إلى جانب دمج الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي وخوارزميات التعرف على الصور عالية الدقة، على تعزيز أداء أجهزة استشعار الأشعة تحت الحمراء، مما يتيح اكتشاف الصواريخ أثناء مرحلة التعزيز باستخدام الأقمار الصناعية الحالية دون الحاجة إلى إطلاق أقمار جديدة.

التحديات الدبلوماسية

إن التحديات الدبلوماسية والتكنولوجية المرتبطة بـ BPI مرتبطة ارتباطاً وثيقاً. إن اعتراض التهديد الباليستي بنجاح في مراحله المبكرة يتطلب وضع أنظمة اعتراض محمولة جواً أو أرضية على مسافة مثالية حتى يتمكن المعارض من ضرب الصاروخ قبل احتراق المحرك. وهذا أمر بالغ الأهمية لأنه بمجرد تسارع الصاروخ أكثر، يصبح اعتراضه أصعب بكثير. ومع ذلك، فإن وضع أنظمة الاعتراض في مواقع مثالية غالباً ما يفرض تحديات دبلوماسية، وخاصة بالنسبة للدول ذات العمق الاستراتيجي المحدود - مثل إسرائيل في مواجهتها مع إيران أو المتمردين الحوثيين في اليمن.

بالنسبة لإسرائيل، فإن الافتقار إلى العمق الاستراتيجي يستلزم الاعتراض السريع. ومع ذلك، فإن المسافة الكبيرة من إيران تفرض تحديات دبلوماسية ولوجستية تتعلق بنشر أنظمة اعتراض خارج حدود إسرائيل. إن BPI أكثر فائدة للدول الواقعة بالقرب من الحلفاء الصديقين أو المياه الدولية، وخاصة تلك التي تواجه خطراً كبيراً للهجوم الجوي. يتطلب هذا السيناريو الحفاظ على دوريات جوية مستمرة بالقرب من أراضي العدو، مما يفرض مخاطر أمنية ويفرض عبئاً اقتصادياً كبيراً، يقدر بعشرات المليارات من الدولارات. وبالتالي، فإن BPI أكثر جدوى أثناء التوترات المتصاعدة أو وقت الحرب بدلاً من كونها عملية مستمرة في وقت السلم.

ولن نناقش هنا نظام اعتراض صاروخي فضائي، لأن جدواه ما زالت احتمالاً بعيد المدى. ولكن على بعد بضع مئات من الكيلومترات من موقع إطلاق صاروخي، لا يشكل نظام اعتراض الصواريخ الباليستية تهديداً مباشراً للدول العميقة استراتيجياً مثل الصين أو روسيا، والتي تستطيع إطلاق الصواريخ من داخل أراضيها.

إن الدوريات الجوية المنتظمة بالقرب من حدود العدو في أوقات السلم قد تزيد من التوترات وخطر التصعيد. وقد يُنظر إلى مثل هذا النشاط على أنه استفزاز أو انتهاك للسيادة، مما قد يؤدي إلى حوادث أمنية غير مرغوب فيها. وهذا يخلق فجوة بين النية الدفاعية لهذه الدوريات وتفسيرها الخاطئ المحتمل على أنها موقف هجومي. بالإضافة إلى ذلك، تواجه الطائرات الدورية تهديدات أمنية مختلفة، بما في ذلك أنظمة الدفاع الجوي والحرب الإلكترونية وظروف الطقس السيئة. وكلما طالبت مدة بقاء الطائرة في الجو وكلما كانت العمليات أكثر شمولاً، زاد التعرض لهذه المخاطر.

وعلى النقيض من ذلك، تعمل الدوريات الجوية على تعزيز قدرات الضربات في أراضي العدو وتعمل كرادع، مما يثبط الهجمات المحتملة خوفاً من الانتقام الفوري. وعلاوة على ذلك، فإن القدرة على اعتراض الصواريخ أثناء مرحلة التعزيز من خلال استراتيجية الوجود المتقدم المعزز (eFP) من الممكن أن تضعف بشكل كبير فعالية استخدام الصواريخ الباليستية المعادية، مما يخلق تأثير الردع بالعقاب الذي قد يمنع الخصوم من شن الهجمات في المقام الأول.

ونظراً لقصر وقت الاستجابة لـBPI، فإن صناع القرار لا يجدون أمامهم سوى نافذة ضيقة لاتخاذ القرارات البشرية، كما أن التعاون الدولي في الوقت الفعلي يشكل تحدياً كبيراً. ونتيجة لهذا، لا بد من الترتيب المسبق لتنسيق BPI، وهو ما يتطلب من كل دولة أن تتصرف بشكل مستقل في التنفيذ. وسوف تعمل التحسينات في تكنولوجيا الاستشعار على تقصير وقت اكتشاف الصواريخ، مما يسمح بفترة أطول قليلاً لاتخاذ القرار.

بالنسبة لإسرائيل، في حالة إطلاق الصواريخ من مواقع قريبة (مثل سوريا ولبنان)، فسوف يتعين عليها التعامل مع عملية الاعتراض بشكل مستقل. ومع ذلك، فإن الإطلاقات بعيدة المدى من إيران أو اليمن تمثل سيناريو أكثر تعقيداً، وقد تتطلب تعاوناً إقليمياً. كما أن BPI ذات صلة بشرق آسيا، وخاصة في مواجهة قدرات كوريا الشمالية على الصواريخ الباليستية والرؤوس الحربية النووية. يمكن أن تكون الحاجة المشتركة لمثل هذه الأنظمة بين حلفاء الولايات المتحدة (إسرائيل واليابان وكوريا الجنوبية) بمثابة أساس للتعاون في مجال البحث والتطوير.

الاعتبارات التشغيلية والدبلوماسية للتطبيق الإقليمي

إيران

إن اعتراض صاروخ باليستي إيراني أثناء مرحلة التعزيز يشكل تحديات كبيرة. فالعمق الاستراتيجي لإيران يسمح لها بإطلاق الصواريخ من عمق أراضيها، مما يجعل من الصعب وضع أنظمة BPI بالقرب من حدودها. وسوف تتطلب أنظمة BPI الفعالة قيام الطائرات بدوريات منتظمة بالقرب من المجال الجوي الإيراني.

يوضح الشكل 4 أهمية التضاريس في التخطيط التشغيلي لصاروخ اعتراض في مرحلة التعزيز. إن التوجه الزاوي لإطلاق الصاروخ الاعتراضي أمر بالغ الأهمية: فالاعتراض من الخلف يتطلب حركية أسرع من الاعتراض من الأمام، وفي بعض الأحيان تملئ الظروف التشغيلية الهندسة التي تتطلب صواريخ اعتراضية عالية السرعة للغاية. ومن المفترض أن تواجه إسرائيل صعوبة في نشر مثل هذا النظام بمفردها بسبب القيود الاقتصادية والتحديات الفنية المترتبة على التشغيل على مسافات طويلة، مما يجعلها تعتمد على الولايات المتحدة في هذه الحالة.

وتشمل قواعد الإطلاق المحتملة للطائرات الاعتراضية حاملات الطائرات الأميركية في الخليج العربي، إلى جانب الدول المجاورة مثل المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة وأذربيجان، حيث يمكن للطائرات أن تعمل فوق بحر قزوين بالقرب من إيران. وتشمل الخيارات الإضافية حاملات الطائرات أو الغواصات. ومع ذلك، ونظراً للتكاليف المرتفعة والقيود الفنية والمخاطر الأمنية الكبيرة، فإن استمرار عمليات BPI بالقرب من إيران أمر غير مرجح.

وفي أوقات التوتر المتزايد، أو الحرب، أو التحذيرات الاستخباراتية الموثوقة - مثل الهجمات الصاروخية الإيرانية على إسرائيل في 14 أبريل/نيسان 2024، و 1 أكتوبر/تشرين الأول 2024 - تصبح إمكانية استخدام BPI للطائرات الدورية أكثر جدوى.

المتعمدون الحوثيون في اليمن

إن القرب الجغرافي لليمن من المملكة العربية السعودية ومنطقة القرن الأفريقي، إلى جانب افتقاره إلى العمق الاستراتيجي، يجعله هدفاً أكثر سهولة بالنسبة لـ BPI. ومع ذلك، فإن التكاليف التشغيلية المرتفعة للحفاظ على الدوريات الجوية المستمرة بالقرب من اليمن تجعل عمليات الاعتراض الروتينية غير محتملة. ومع ذلك، فإن التحذيرات الاستخباراتية المبكرة قد تمكن BPI من تنفيذ مهام محددة لإطلاق صواريخ.

وبحسب صحيفة/الأخبار اللبنانية، فإن إسرائيل والإمارات والسعودية ودول أخرى تخطط للتعاون العسكري في أرخبيل سقطرى، بالقرب من اليمن. وتشير التقارير إلى أن إسرائيل تبني قاعدة عسكرية في جزيرة عبد الكوري داخل الأرخبيل، والتي يمكن أن تكون بمثابة موقع لإطلاق للطائرات الاعتراضية الإسرائيلية في حالة وجود تحذيرات استخباراتية مبكرة.

سوريا ولبنان

وبسبب قربها من إسرائيل، فإن اعتراض الصواريخ من سوريا ولبنان خلال مرحلة التعزيز باستخدام الطائرات بدون طيار والطائرات المقاتلة أكثر جدوى. وهذا مهم بشكل خاص في أوقات الحرب أو فترات التوتر المتزايد عندما تكون العديد من الطائرات في الجو بالفعل. ومع ذلك، فإن مرحلة التعزيز للصواريخ القصيرة والمتوسطة المدى التي يتم إطلاقها من هذه المواقع قصيرة للغاية، مما يشكل تحدياً تقنياً كبيراً لاعتراض الصواريخ من الجو.

وإذا تم دمج هذا النظام في نظام دفاعي متعدد الطبقات، فإنه قد يعزز قدرة إسرائيل على مواجهة ترسانة حزب الله من الصواريخ الدقيقة والقدرات الصاروخية السورية إلى جانب أنظمة "حيثس" و"مقلاع داود". ونظراً للمستقبل غير المؤكد للجهة الشمالية، فإن نظام "ب. ب. أي" يظل من الاعتبارات ذات الصلة.

التوصيات والدروس المستفادة لإسرائيل

تُعد إسرائيل الدولة الأكثر تعرضاً للتهديد في العالم فيما يتعلق بالصواريخ والقذائف من جميع الأنواع. والهدف من هذه التهديدات هو تطويق إسرائيل في "حلقة أو حزام ناري"، وفقاً للمبدأ الذي روج له قاسم سليماني، الذي كان قائداً لحرس الثورة الإسلامية الإيراني، إلى جانب حرب استنزاف مطولة تنفذها جهات فاعلة غير حكومية - وكلاء إيران - هدفها النهائي هو تدمير إسرائيل. لمواجهة هذا التهديد الصاروخي متعدد المدى، والذي يعرض البنية التحتية المدنية والعسكرية للخطر، نشرت إسرائيل أنظمة دفاع متعددة الطبقات. إن دمج نظام BPI في شبكة الدفاع الإسرائيلية من شأنه أن يضيف طبقة حماية إضافية بمزايا تشغيلية

واضحة. يقدم نظام BPI العديد من الفوائد الرئيسية: ستقع حطام الصواريخ أو أجزاء المحرك أو بقايا جسم الصاروخ والرأس الحربي داخل أراضي العدو، مما يمنع الأضرار المباشرة والجانبية للمدنيين والبنية التحتية الإسرائيلية؛ يلغي الاعتراض المبكر داخل أراضي العدو الحاجة إلى إرسال أعداد كبيرة من المدنيين إلى مناطق محمية، مما يقلل من الاضطرابات الاقتصادية والنفسية.

عند تصميم نظام اعتراض مبكر، من الضروري تقييم المسار المستقبلي للصاروخ الاعتراضي لتجنب عمليات الاعتراض غير الضرورية للصواريخ التي لا تستهدف المناطق المأهولة بالسكان أو المواقع الاستراتيجية. تشير التقارير في الصحافة الإسرائيلية إلى أنه في عام 1995، بدأت رافائيل في تطوير صاروخ "موأب" للاعتراض المبكر للصواريخ والقذائف، ولكن بخلاف التقارير التي تتحدث عن تحديات معينة، لا توجد معلومات بشأن تقدم المشروع. ونظراً للمزايا الواضحة للاعتراض المبكر أثناء مرحلة التعزيز، فمن المستحسن النظر في دمج هذه القدرة كجزء من شبكة الدفاع النشطة في إسرائيل، الأمر الذي من شأنه أن يخفف العبء بشكل كبير على الأنظمة الحالية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يعمل صاروخ Sky Spear كحل محتمل لنظام BPI. ومع ذلك، فإن دمجها يتطلب أنظمة كشف وتتبع متقدمة تعمل عبر نطاقات طيفية متخصصة، إلى جانب قدرات معالجة البيانات عالية السرعة، لأن نافذة الفرصة لنظام BPI قصيرة للغاية.

ونظراً للمزايا التي يتمتع بها نظام BPI والنطاق الواسع من التهديدات التي تواجه إسرائيل، فيتعين على وزارة الدفاع أن تخصص التمويل والموارد اللازمة للبحوث من أجل تطوير هذه القدرة. وفي الوقت نفسه، ينبغي لنا أن ندرس بعناية الجوانب العسكرية والدبلوماسية المترتبة على التنفيذ السريع لنظام BPI.