

運用CMO模擬雷射 反制無人機威脅之研究

賀增原、林傳凱、謝沛學

提要

- 一、依據美國推演中共於2030年武力犯臺兵棋場景為基礎，第一波攻擊為網路攻擊、其次是導彈攻擊、再接下來是登陸艦橫越臺灣海峽，在時序上出現攻擊間隙，未提到無人系統的攻擊。中共竭盡心力發展各式無人機，是否在導彈這一波發起時，就伴隨空戰與無人機登場，本文列舉說明中共翼龍2型與土耳其TB2差異。
- 二、簡述雷射的原理，以及高能雷射的優缺點，同時改進的現況。並說明美軍高能野戰防空戰鬥車、俄羅斯高能雷射武器系統，與以色列地面和客機上的高能雷射系統。
- 三、運用CMO模擬三種不同想定，紅方皆為中共派遣翼龍2型10架，搭配20枚藍箭飛彈襲擊臺灣；我方則有三種不同的想定，分別為想定一：部署6輛復仇者防空飛彈系統；想定二：派遣3輛高能雷射系統；想定三：部署6輛復仇者防空飛彈系統與派遣3輛高能雷射系統；利用三種不同想定去探討防空飛彈系統與高能雷射系統，整理分析彼此之間接戰能力，可供國內設計與建案單位參考。

關鍵詞：高能雷射系統、無人機、模式模擬

圖片來源：F.KSCAN

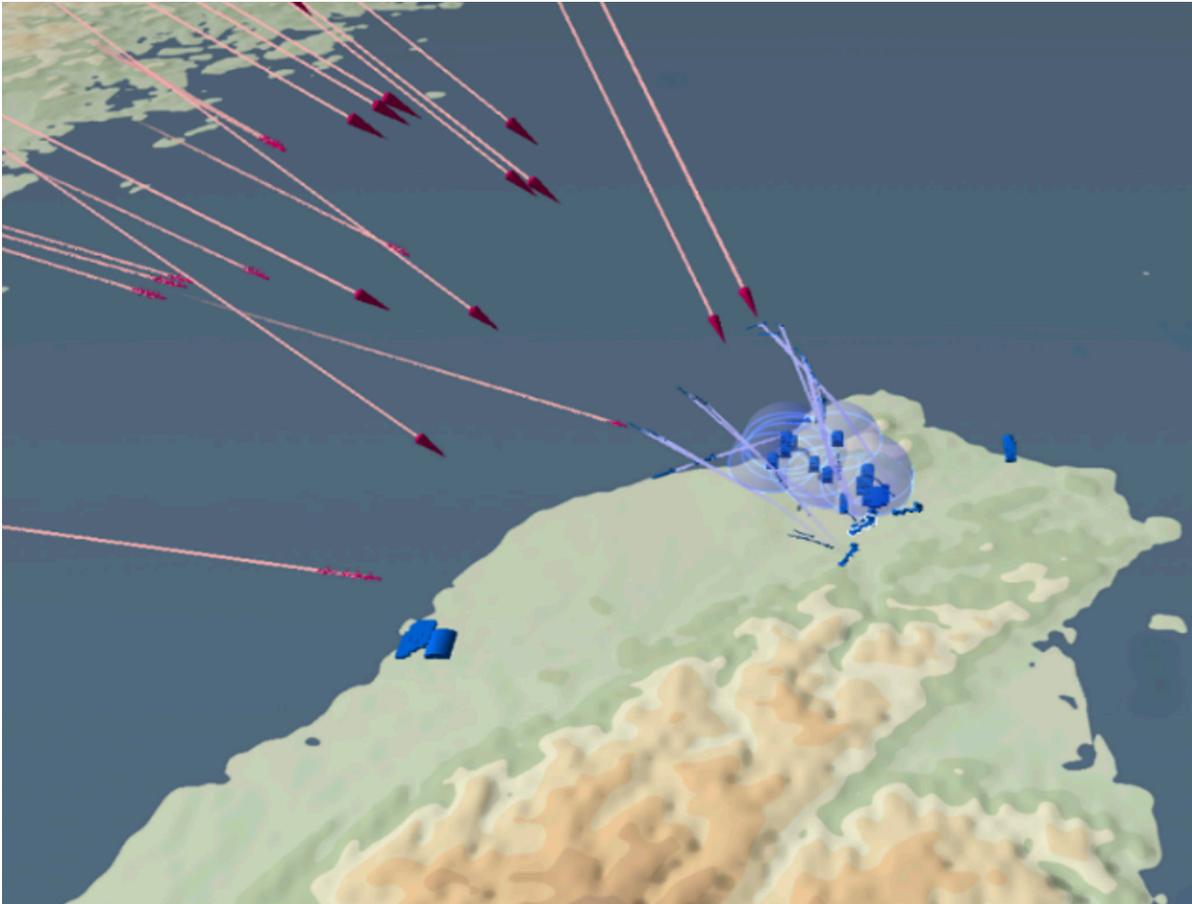


前言

伴隨中共在無人機迅速發展，其功能與性能也不斷地提升，面對來勢洶洶的威脅，隨著網攻造成斷電、斷網、斷通訊局面，接著來自中國大陸本土的導彈攻擊，場景如圖一。再接下來是登陸艦航渡臺灣海峽，這是美國兵棋推演2030年中共武力

犯臺場景。¹ 不過如果我方聯合截擊戰力尚存，對方絕不至於派出船團當成目標讓我方攻擊，因此偵打一體的無人機伴隨著空戰登場將是最可能發生的情況。

中共無人機的技術究竟多先進？從利比亞內戰交戰雙方都大量使用各種無人機進行偵察及攻擊的任務，同時出現交戰雙方分別以無人機互攻，因此此次行動



圖一 Tacview顯示的接戰場景

圖片來源：作者執行Tacview軟體示意圖

1 張佑生編譯，〈美國防部兵棋推演中共犯臺，四種不同場景定輸贏〉，聯合新聞網，<https://udn.com/news/story/10930/6227431>，檢索日期：西元2022年7月5日。

被視為“首次無人機戰爭”。² 整理雙方所採用的無人機，其規格如表一，可以發現中共無人機的優勢。

2021年6月7日，法國陸軍於推特發表將德國Heckler & Koch 40mm榴彈機槍搭配挪威康斯堡(Kongsberg)的M151遙控槍塔(Remote Weapon Station, RWS)如表

二，整合光電感測系統、左右兩側各8枚煙霧彈發射器，以空爆(airburst)對抗微型(micro)與小型(mini)無人機的測試，³ 不過當來襲無人機是蜂群呢？在如此高密度的攻擊波次，我國該如何防禦？甚至如表一大型無人機，該型遙控槍塔將無能力接戰。

表一 土耳其TB2與中共翼龍2型性能諸元

| 性能諸元 | 土耳其TB2 | 中國翼龍2型 |
|--------|---|--|
| 最大起飛重量 | 650 kg | 4,200 kg |
| 翼長 | 12 m | 20.7 m |
| 機身 | 6.5 m | 10.8 m |
| 飛行速度 | 200 km/hr | 370 km/hr |
| 飛行高度 | 5,000 m | 9,000 m |
| 滯空 | 24 hr | 20 hr |
| 標準配備 | 精確導引飛彈 反戰車飛彈 雷射導引火箭 | 合成孔徑雷達(SAR) 雷射導引飛彈 全球定位導引炸彈 |
| 外觀 |  |  |

資料來源：作者自行整理

2 〈人類首次無人機戰爭，利比亞成中國武器試驗場〉，《BBC NEWS中文》，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world-53097510>，檢索日期：西元2022年7月5日。

3 許智翔，〈遙控武器站整合反無人機能力之發展值得臺灣注意〉，國防安全研究院，<https://indsr.org.tw/focus?typeid=24&uid=11&pid=180>，檢索日期：西元2022年7月5日。

表二 M151遙控槍塔配備

| 外觀 | M151遙控槍塔配備 |
|---|---|
|  | <p>1.40mm榴彈機槍</p> <p>2.彈箱</p> <p>3.光電感測系統</p> <p>4.煙霧彈發射器</p> <p>5.伺服系統</p> |

資料來源：作者整理自註4

因此本文擺脫無人槍塔的限制，擬用高能雷射武器系統，面對中共偵打一體的無人機，嘗試用COMMAND專業版模式分析無人機來襲，我方派遣復仇者防空飛彈系統與高能雷射武器系統，彼此之間的優劣勝負；然需要說明的是目前國內在高能雷射武器系統仍在發展階段，⁵ 因此本文是採用軟體內建搭載在美國陸軍2017年測試車輛上的雷射武器系統60kW Solid State Laser，作為模擬想定，執行的結果可供國內設計與建案單位參考。

一、雷射簡介

所謂雷射(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Laser)是通過受激輻射進行放大產生的光線且所有光子具有相同的相位、方向與振幅；另雷射具有高強度、方向性、單光性與同調性等特質。⁶ 光速是目前物理中最快的速度，可以達到 3×10^8 米/秒，而雷射是以光速傳播，所以鎖定目標可以瞬間打擊，比起最快的洲際彈道飛彈終端速度25馬赫，大約8500米/秒，實在無法相提並論。整理雷射器的種類如表三，與雷射武器系統(Laser Weapon System, LaWS)的優缺點如表四。

4 Jean-Marc Tanguy, “French Army tests VAB armed with 40 mm AGL against UAVs,” *Jane’s Defence Weekly*, June 10, 2021.

5 朱明，〈強化防禦能量，中科院以「雷護專案」進行雷射武器研發〉，上報，https://www.upmedia.com/news_info.php?Type=1&SerialNo=81074，檢索日期：西元2022年7月5日。

6 雷射刻印學堂，〈雷射的原理〉，雷射刻印機活用資訊網站，<https://indsr.org.tw/focus?typeid=24&uid=11&pid=180>，檢索日期：西元2022年7月5日。

表三 雷射器的種類

| 項次 | 種類 | 說明 | 備考 |
|----|---|---|----------------------------------|
| 1 | 固態雷射器 | 介質是固體晶體，如紅寶石或鈦鋁石榴石(YAG)，發射波長為1.06微米(μm)。 | |
| 2 | 氣體雷射器 | 介質是氣體組合，例如氦氖或二氧化碳，發射波長為10.6微米(μm)。 | 二氧化碳鐳射器可切割金屬。 |
| 3 | 準分子雷射器 | 介質是活性氣體(如氟或氯)和惰性氣體(如氬)的組合。氟化氬雷射器發射波長0.193微米(μm)。 | |
| 4 | 染料雷射器 | 通常由有機染料作為雷射介質，例如羅丹明。它們可以調諧到一定範圍內的各種波長。染料羅丹明6G雷射器波長可以從0.57微米(μm)(綠黃色)到0.65微米(μm)(澄紅色)。 | |
| 5 | 化學氧碘鐳射器 (Chemical Oxygen Iodine Laser, COIL) | 由氫氧化鉀和過氧化氫、分子碘和氣態氯的水溶液混合物組成。能量來源是化學反應，雷射介質是分子碘。輸出波長為1.315微米(μm)。 | 雷射器向目標發射兆(10 ¹²)瓦光束。 |

資料來源：作者整理自註7

表四 雷射武器系統的優缺點

| 項次 | 優點 | 理由 | 缺點 | 理由 | 現況 |
|----|------|--|------|--|--|
| 1 | 攻擊快速 | 雷射是以光速傳播；功率足夠強大不需反應時間。 | 體積龐大 | 產生大量的功率，需要龐大電力系統與冷卻系統。 | 以色列已經部署於客機上，表示可以利用合適種類雷射器突破體積龐大問題。 |
| 2 | 打擊精準 | 通過系統發射高能照射到目標關鍵部位，並在該處產生高熱造成損傷。 | 射程有限 | 1. 雷射武器系統發射功率決定射程。 2. 雷射武器是直射型武器，易受地球曲率影響，產生攻擊死角。 | 1. 目前使用化學氧碘雷射器可以產生兆瓦級雷射。 2. 機載雷射系統，可以解決地球曲率的影響。 |
| 3 | 成本低廉 | 以色列資料顯示每次射擊僅需2美元，比起東風21D飛彈500萬美元，或者愛國者MSE300萬美元。 | 干擾嚴重 | 雷射在空氣中傳播的過程，會受到塵埃，霧霾，水汽等雜質影響，從而發生散射，導致能量銳減。 | 通過光學系統，紅外線，水平系統，物聯網傳感器以及結合AI演算法來減少大氣的干擾。 |

資料來源：作者整理自註8

7 Craig Freudenrich, <How Laser Weapons Work>, howstuffworks, <https://science.howstuffworks.com/laser-weapon.htm>, 檢索日期：西元2022年7月5日。

8 軍事, <全方位透徹分析：終極武器之雷射武器的優勢，不足和未來>，資訊咖， <https://inf.news/military/ae8ac0dee26afebd34bbad54db6c1027.html>, 檢索日期：西元2022年7月5日。

二、世界各國雷射武器介紹

美軍於2022年底預計接收第一批4輛直射能量野戰防空戰鬥車(DEM-SHORAD)，其上搭載50KW高能雷射可以接戰無人機，足以證明該型武器已進入小批量產的階段，如圖二所示。⁹

不過高能雷射不僅美國正在發展，網路中也有發現俄羅斯在研發新型高能雷射武器系統，該系統旨在摧毀射程達5公里的敵對目標。俄國的雷射是使用化學氧碘雷射器(COIL)，如表三其可以發射兆瓦光束，與防空飛彈相比，雷射的好處是射擊



圖二 直射能量野戰防空戰鬥車

圖片來源：註9

成本更低、「彈藥」數量不受限制（只要足夠的電力），人力更少，而且更精準，俄羅斯高能雷射武器系統如圖三。¹⁰



圖三 俄羅斯高能雷射定向武器系統

圖片來源：註11

- 9 李思平，〈美國陸軍機動野戰防空金三角：飛彈、雷射、微波〉，尖端科技軍事雜誌社，<https://www.dtmddatabase.com/News.aspx?id=1051>，檢索日期：西元2022年7月5日。
- 10 江飛宇，〈俄羅斯高能雷射武器曝光，可攔截5公里內目標〉，中時新聞網，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20201214004956-260417?chdtv>，檢索日期：西元2022年7月1日。
- 11 Bart Hendrickx, < Kalina: a Russian ground-based laser to dazzle imaging satellites>, The Space Review, https://www.thespacereview.com/article/4416/1?_trms=103d672deae6f92a.1659224750936,檢索日期：西元2022年7月7日。

今年6月以色列前總理納夫塔利·貝內特(Naftali Bennett)表示，雷射系統可以阻擋敵人火箭和無人機，每次攔截成本僅需2美元。他在推文中說：“如果向以色列發射火箭使恐怖分子損失20,000美元”，並且“攔截該火箭使以色列損失100,000美元”；那麼“如果以色列新的‘鐵束(iron Beam)雷射系統’能夠以每次射擊2美元價格攔截該火箭，會發生什麼情況？”以色列希望最終將其反火箭和反無人機防禦系統（如鐵穹）轉向雷射，這種系統比制導導彈更便宜並且發射頻率更高，其相關設備已經部署在地面載具與Grand Caravan 客機，相關示意圖如圖四，因此世界各國都瞭解高能雷射武器系統的重要性，並且紛紛競相研究。

三、CMO模式模擬推演

本文的想定中共執行大量導彈、巡弋飛彈、反輻射飛彈攻擊之後，派遣共10架翼龍2型無人機，飛行高度與攻擊高度為4572公尺至7620公尺，每架搭配2枚藍箭飛彈速度為每秒132公尺，具有偵打一體的功能；主要目的摧毀我灘岸的機動部隊，此處機動部隊指我方的復仇者防空飛彈系統與高能雷射武器系統。我方有三種不同想定，分別為：想定一為部署6輛復仇者防空飛彈系統，防禦高度為60.9公尺至4876.8公尺；想定二為派遣3輛高能雷射系統（此處是採用軟體內建搭載在美國陸軍2017年測試車輛上的雷射武器系統）（雷射的防禦高度3公尺至7407.8公尺）（電力的耗損可以無限次補充）（60kW

地面載具



Grand Caravan客機



圖四 以色列雷射系統

圖片來源：以色列的國防部官網與Elbit Systems的視頻

Solid State Laser); 想定三為部署6輛復仇者防空飛彈系統，以及派遣3輛高能雷射系統。此三種不同的攻擊系統（防禦系統）與數量，以及武器與數量如表五，將這些資料匯入COMMAND專業版模式模擬軟體，另外Tacview是COMMAND軟體中不同視角。

(一) 想定一

部署3排復仇者防空飛彈系統，每排有2輛發射車，發射車如圖五，其發射刺針飛彈準備接戰的情況如圖六。

利用軟體執行蒙地卡羅30次來模擬隨機分布，想定一為派遣6輛復仇者防空飛彈系統搭配48枚刺針飛彈，接戰10架翼龍2型搭配20枚藍箭飛彈，整理無人機毀損如表六。想定執行2小時，翼龍2型2

表五 CMO模式作戰想定

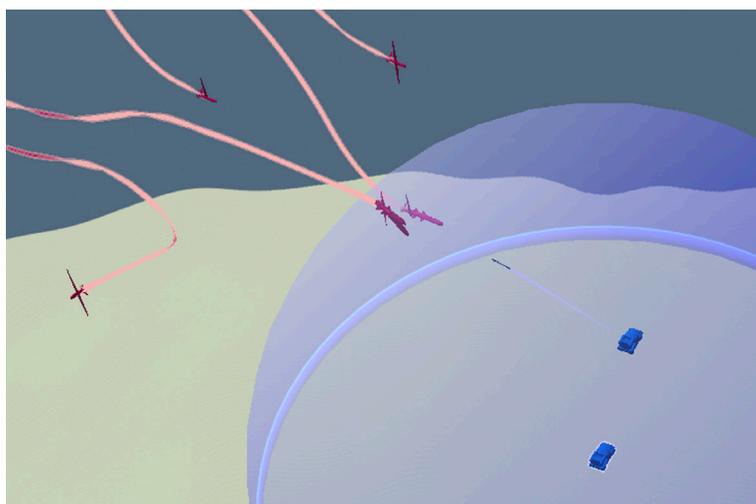
| 紅方 | | 藍方 | | | |
|----------------|------|-----------|------|-----------|------|
| 想定一至三(不變) | | 想定一 | 想定二 | 想定三 | |
| 攻擊系統 (防禦系統) | 翼龍2型 | 復仇者防空飛彈系統 | 雷射系統 | 復仇者防空飛彈系統 | 雷射系統 |
| 數量 | 10架 | 6輛 | 3輛 | 6輛 | 3輛 |
| 武器 | 藍箭 | 刺針 | 雷射 | 刺針 | 雷射 |
| 數量 | 20枚 | 48枚 | 無限 | 48枚 | 無限 |

資料來源：作者整理



圖五 復仇者防空飛彈系統

圖片來源：110年國防報告書—漫畫版



圖六 Tacview復仇者防空飛彈系統發射刺針飛彈接戰的情況

圖片來源：作者執行Command軟體

架為1個小隊，依序進擊，無人機編號不代表進擊順序，對於無人機反擊包含有：沒有命中(miss)、擊中(hit)、甚至是擊毀(kill)，擊中表示無人機受損，或許仍可以執行任務；當復仇者防空系統如果全被殲滅，則無人機將在我方上空盤旋執行偵查，或者返回基地。表六中編號1無人機可視為復仇者防空飛彈系統已經全被摧毀，因此所有的攻擊情況皆為0。

(二) 想定二

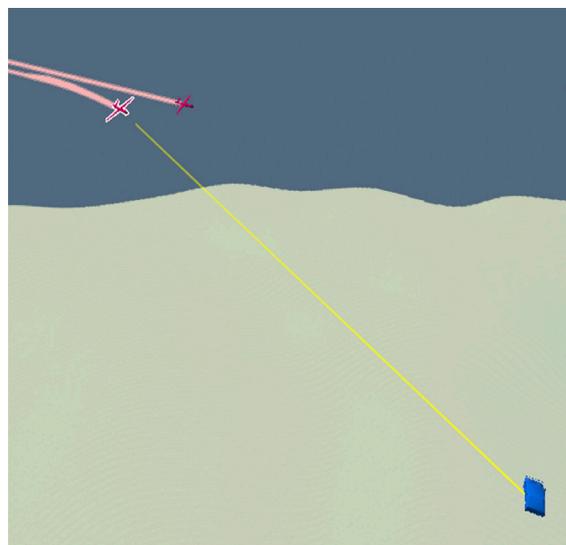
派遣3輛高能雷射系統，圖七代表高能雷射系統發射雷射（黃色直線）擊毀無人機，紅色代表對方來襲的翼龍2型無人機。

想定二派遣3輛高能雷射系統，接戰10架翼龍2型無人機搭配20枚藍箭飛彈，整理無人機毀損如表七。想定二接戰武器我方全是雷射，所以無論是引擎

故障或者結構損壞原因皆由雷射所造成，另外系統中雷射系統是可以攻擊敵方藍箭飛彈。

(三) 想定三

派遣3輛高能雷射系統(60kW Solid



圖七 Tacview軟體雷射系統擊毀無人機

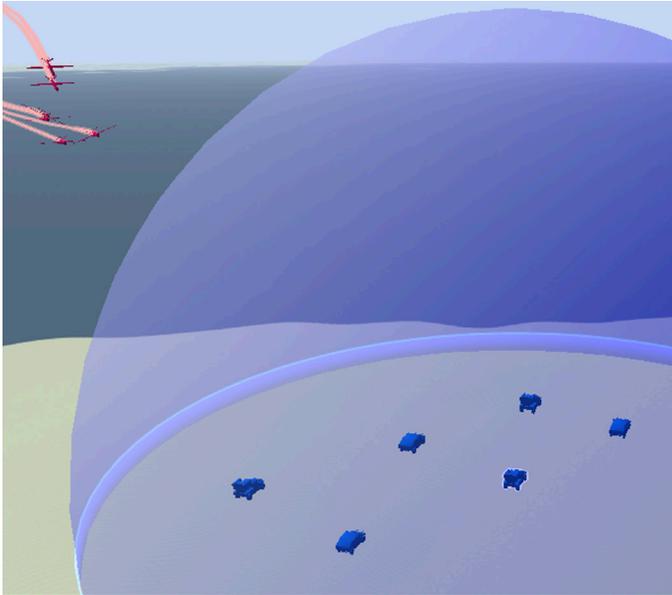
圖片來源：作者執行Command軟體

表六 想定一無人機毀損情況

| 無人機編號 | 沒有命中(miss) | 擊中(hit) | 擊毀(kill) |
|-------|------------|---------|----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 |
| 3 | 5 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 9 | 6 | 3 |
| 6 | 9 | 5 | 0 |
| 7 | 22 | 4 | 2 |
| 8 | 25 | 3 | 6 |
| 9 | 34 | 10 | 2 |
| 10 | 36 | 12 | 6 |

資料來源：作者整理Command軟體執行結果

State Laser)與3排復仇者防空飛彈系統(Avenger),由於兩套系統具有不同的防禦高度,所以交錯部署如圖八所示。圖八中第1列有2排復仇者防空飛彈系統以及1輛高能雷射系統;第2列有1排復仇者防空飛彈



圖八 Tacview藍方部署圖

圖片來源:作者執行Command軟體

系統以及2輛雷射系統。藍色圈代表復仇者防空飛彈系統防禦範圍。

整理想定三無人機毀損如表八,對方來襲的無人機飛行高度遠超過防空飛彈系統,除了下降高度執行攻擊時,方能被防空飛彈擊中,因此表八資料中幾乎多數的無人機都是由雷射系統所擊中。

以上三種想定,整理雙方毀損結果如表九,表中可以得到想定一欠缺高能雷射系統的支援,幾乎復仇者防空飛彈系統全數毀損,而無人機毀損的架數也最少;想定二雖然僅有雷射系統防禦,但是卻造成無人機毀損的數量最多;想定三同時存在復仇者防空飛彈系統與高能雷射系統,不僅高能雷射系統完全沒有毀損,同時復仇者防空飛彈系統毀損數量也大為減少,充分展現高能雷射系統的效能。

表七 想定二無人機毀損情況

| 無人機編號 | 引擎故障 | 雷射攻擊 | 結構損壞 | 無人機返回 |
|-------|-------|-------|------|-------|
| 1 | 10/30 | 18/30 | 1/30 | 1/30 |
| 2 | 11/30 | 18/30 | 0 | 1/30 |
| 3 | 6/30 | 24/30 | 0 | 0 |
| 4 | 7/30 | 23/30 | 0 | 0 |
| 5 | 14/30 | 16/30 | 0 | 0 |
| 6 | 6/30 | 24/30 | 0 | 0 |
| 7 | 7/30 | 23/30 | 0 | 0 |
| 8 | 8/30 | 22/30 | 0 | 0 |
| 9 | 9/30 | 21/30 | 0 | 0 |
| 10 | 14/30 | 16/30 | 0 | 0 |

資料來源:作者整理Command軟體執行結果

表八 想定三無人機毀損情況

| 無人機編號 | 引擎故障 | 引擎故障理由 | 雷射攻擊 | 刺針攻擊 | 無人機返回 |
|-------|-------|---------------------------------------|-------|------|-------|
| 1 | 17/30 | 雷射攻擊。 | 13/30 | 0 | 0 |
| 2 | 17/30 | 其中一架為刺針攻擊，不過造成60%損傷，最後由雷射擊毀；其餘皆由雷射攻擊。 | 12/30 | 0 | 1/30 |
| 3 | 7/30 | 雷射攻擊。 | 23/30 | 0 | 0 |
| 4 | 6/30 | 雷射攻擊。 | 24/30 | 0 | 0 |
| 5 | 12/30 | 雷射攻擊。 | 17/30 | 0 | 1/30 |
| 6 | 11/30 | 其中一架為刺針攻擊造成。 | 18/30 | 0 | 1/30 |
| 7 | 6/30 | 雷射攻擊。 | 24/30 | 0 | 0 |
| 8 | 16/30 | 其中一架為刺針攻擊，不過造成60%損傷，最後由雷射擊毀；其餘皆由雷射攻擊。 | 14/30 | 0 | 0 |
| 9 | 12/30 | 雷射攻擊。 | 18/30 | 0 | 0 |
| 10 | 13/30 | 雷射攻擊。 | 16/30 | 1/30 | 0 |

資料來源：作者整理Command軟體執行結果

四、結語

本文從中國大陸發射大量導彈、巡弋飛彈、反輻射飛彈之後，派遣無人機對我方陸地發起尋殲，列舉其中一型翼龍2型直接飛越臺灣海峽，而非艦載機搭載中小型的無人機來襲，補充美國推演中共於2030年武力犯臺兵棋中在時序上攻擊間隙。

文章第二部分提到高能雷射武器的

優缺點，不可否認目前仍然存在許多亟待克服的技術問題，從文獻當中也可以看到一些系統在經過測試評估之後，專案終止，例如：2011年12月下旬，美國國防部決定終止機載雷射武器研發專案；¹²當然也有繼續研發，例如：2014年至2017年最初30kW雷射武器系統在美國第5艦隊使用，至2020年已經發展至60kW高能雷

表九 雙方毀損情況

| 想定 | 無人機毀損 (初始10架) | 復仇者防空飛彈系統毀損 (初始6輛) | 雷射系統毀損 (初始3輛) |
|-----|------------------|-----------------------|------------------|
| 想定一 | 59/300 | 180/180 | |
| 想定二 | 298/300 | | 27/90 |
| 想定三 | 297/300 | 20/180 | 0/90 |

資料來源：作者整理Command軟體執行結果

射。¹³以及文中舉出美國於今年年底預計接收第一批次4輛直射能量野戰防空戰鬥車(DE M-SHORAD)，其上搭載50kW高能雷射接戰無人機，正足以證明該型武器已進入小批量產的階段；與以色列希望最終將其反火箭和反無人機防禦系統（如鐵穹）轉向雷射系統，這種系統比制導導彈更便宜且發射頻率更高，其相關設備皆已經部署在地面載具與Grand Caravan 客機機體艙內。

文章最後的重點在於模擬高能雷射武器系統的優勢，在此運用CMO模擬對岸發起偵打一體的翼龍2型無人機10架搭配20枚藍箭飛彈，對我方陣地與機動部隊發起尋殲，以及復仇者防空飛彈系統與高能雷射武器系統彼此接戰的情況。此處的高能雷射武器系統是採用系統中美國陸軍2017年測試車輛上的高能雷射武器系統。未來我國有相關的系統部署，則可以謹慎地思考在電力的限制、環境的限制、

成本的限制，應該部署幾套系統於所需要的位置，再進行更精確的模擬，方可以造成最佳的打擊效果。

本文內容及建議，屬作者意見，不代表財團法人國防安全研究院立場。

作者簡介

賀增原博士，曾任職於國防大學理工學院動力及系統工程學系副教授、國防大學管理學院運籌管理學系副教授、國家中山科學研究院材料暨光電研究所工程師，現任職於國防安全研究院網路安全與決策推演所研究員。

作者簡介

林傳凱備役上校，曾任職於國防部整合評估司效益評估處處長、國防部整合評估司模式模擬處處長、現任職於國防安全研究院網路安全與決策推演所委任副研究員。

作者簡介

謝沛學博士，美國內布拉斯加大學林肯分校政治學博士，現任職於國防安全研究院網路安全與決策推演所助理研究員。

12 <機載鐳射武器>，維基百科，<https://www.wikicc.cool/archives/1064/>，檢索日期：西元2022年7月5日。

13 <High Powered Laser Weapons>，DEFENCE PROCUREMENT INTERNATIONAL，<https://www.defenceprocurementinternational.com/features/maritime/us-navys-amphibious-ship-uss-portland-shoots-down-a-drone-with-a-laser-weapon-during-test>，檢索日期：西元2022年7月7日。