

## 光纖制導低空無人機技術展望

方友霖<sup>1</sup> 楊嘉智<sup>2</sup> 洪兆宇<sup>3</sup> 趙嘉琦<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國防大學理工學院機械及航空工程學系

<sup>2</sup> 淡江大學國際事務與戰略研究所

<sup>3</sup> 空軍軍官學校航空太空學系

<sup>4</sup> 陸軍軍官學校機械系

### 摘要

鮮有議題像光纖無人機般意見分歧。加裝線控之無人機已主導戰場，在俄烏戰爭中，超過 20% 之改裝無人機都至少有部份部件來自光纖飛彈。有鑑於此，確有探究此些改變導引構型之技術，驗之實用與理論是否會造成不利影響。當論及實用，佐證顯示其用處極大，針對其所進行之詳盡統合分析，基本上認定其神風式戰耗和戰果有密切關聯。然而有若干但書值得注意。其一是用兵者亦是改裝者，更是設計參與者。因此，系統工程的利益衝突有可能掩蓋實況，此外，許多學者多認為更廣泛的實用性仍無定論。另一項因素是，關於理論風險的評估完全依據個人經驗，通常是短期觀察，有可能仍潛存風險，然此類問題需要長期觀察方能呈現，因之未能建立兩者間的因果關係。本文前瞻光纖制導低空無人機的工作原理和應用前景，論述光纖制導武器的獨特優勢、反干擾技術及其解決問題的途徑。遑論如何紙上談兵，看來突擊飛手躍躍欲試，企圖將行動技能帶往新的境界-不對稱作戰，此情此景已非紙上談兵。吾人需要大眾支持啟發新一代的工程師與科學家，俾利實現陸軍抱負遠大的計畫。

關鍵詞：光纖制導無人機，反坦克，反直升機，反干擾技術

### 一、前言

俄烏戰爭爆發至今已逾三年，初由俄軍閃擊入侵拉開序幕，隨著歐美大力軍援烏軍，雙方形成拉鋸戰，終至今日陣地戰之局面。兩軍陣地間佈滿雷區、阻絕、壕溝，戰爭型態產生了巨大變化，形成對耗之勢。雖是古老傳統陸上陣地戰之重新出場，但由於無人機之大量投入實戰，大放異彩，且顯示出極大的作戰能力，戰爭型態隨之改變。無人機廣布使得干擾其飛控無線電的電子作戰因應而生，俄烏都部署成千上萬的干擾器，除了干擾無人機飛控訊號，使得敵方飛手無法準確擊中目標，

同時針對 GPS、軍事通信、導航、雷達、監視等電磁頻譜進行干擾。電戰與反電戰為一體兩面，俄烏兩軍也相繼使用光纖纜線無人機閃躲干擾器之古老技術，光纖纜線長達 10 多英里以上。雖然光纖尾巴很長，不過無人機仍與飛手保持通聯，不需要動用無線電訊號，免除遭受干擾問題。光纖制導無人機通常帶頭摧毀敵方電戰系統，再由無線電制導無人機接續展開攻擊[1]。在俄烏戰場中最常被雙方使用之無人機，按美軍分類標準，屬第一、二類無人機，亦微、小型無人機，本文概以光纖制導低空無人機稱之。

顧名思義，精準武器是經無線電波、光波(可見光、紅外光、雷射、紫外光)或導線(光纖)制導接近目標的一種射後路徑可控彈藥，其命中精度取決於採用的導控技術和系統。多年來精準武器的射導系統和技術已經歷多代改進和發展。遠程、中程和短程戰術精準武器已由分米波、厘米波及導線制導發展到毫米波、紅外光( $1\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ ,  $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ )、雷射、可見光和紫外光以及光纖制導。精準武器上也裝有多功能高速積體電路(HSIC)微處理器和微波/毫米波積體電路(MIMIC)以及可見光電視攝影機、前視紅外線(Forward looking infrared, FLIR)成像尋標系統和紅外線搜索跟蹤(IRST)點源探測系統，精準武器系統本身就可以搜索、捕獲、識別、分選和跟蹤目標，進行自適應射導控制，實現了高性能自主導控[2,3]。而光纖制導低空無人機(Fiber Optics Guided Drone, FOG-D)具有導線制導和無線電波、紅外光、可見光及雷射制導武器所不具有的獨特優點，如保密性強、隱蔽性好、導引經度高、訊號傳輸容量大，抗電磁、核輻射和化學作戰的干擾，以及成本低、體積小、重量輕等。觀察俄烏戰場，光纖無人機通過光纖鏈路傳輸數據，完全避開了電磁干擾的威脅。俄軍使用光纖無人機在烏軍強電磁壓制下仍保持穩定通信，成功引導炮兵摧毀目標，這種電子隱身特性使其成為複雜電磁環境中的可靠偵察及攻擊工具。光纖的理論頻帶寬可達 100Tbps 級別，遠超無線電通信的極限。

查低空攻擊型無人機在俄烏戰場大放異彩，正當世人目不暇給之際，FOG-D 異軍突起，令人錯愕不已。然 FOG-D 屬有線導引，異於常規無人機之無線導引，眾知，精準武器之有線導引技術在國內外學術研究上均極冷門，從不在顯學之列。國

內產官學研向來忽視有線導引，除少數早期線導反坦克飛彈及線導魚雷有些報導性介紹外，並無論文探討，況該等仍屬前代之銅纜(絲)類導引技術。當外電報導俄烏雙方最新使用 FOG-D 時，尋蛛絲馬跡，見微知著，判斷無人機之導引由無線回首有線，技術突飛猛進，直接使用 FOG 者，必然得力於 FOG-M 之發展經驗。FOG-M 本身雖未於實戰中揚名立萬，但其累積的豐厚技術底蘊，成就了 FOG-D 應急出場，一鳴驚人，此為科技之新應用(New application)，與新原理(New principle)、新學說(New theory)及新方法(New method)同列原創之定義。有關設計應用細節本文以重新發現(Rediscovery)方式呈現，學術上不乏先例。本文主要借重新發現 FOG-M 來論述 FOG-D 的工作原理、應用前景、關鍵技術及存在的限制條件與干擾與反干擾等項目。

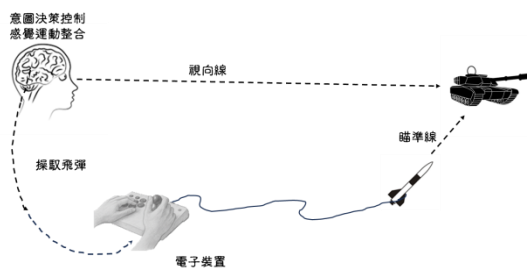
## 二、技術溯源

發展光纖制導無人機的過程，是將原有光纖制導飛彈的技術加以改良與運用，而光纖制導飛彈的前身為線導控制飛彈。所以回顧其技術源流，就要從線導控制飛彈談起[4-6]。

視向線指揮導引(CLOS)是導引武器開始發展以來就廣泛用於各型飛彈的一種導引方法[7-9]，其簡化構型頗適合小型反坦克飛彈，其運用時可再細分為：手控指揮至視向線導引(MCLOS)、半自動指揮至視向線導引(SACLOS)、自動指揮至視向線導引(ACLOS)等。

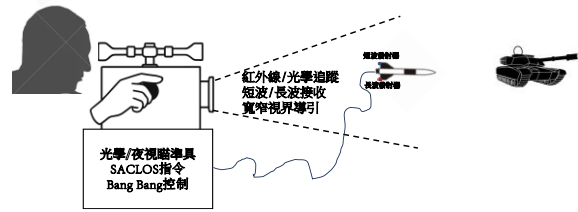
早期的反坦克線導飛彈屬於 MCLOS，用操作手肉眼(可以有或沒有光學系統的幫助)觀測目標和飛彈的相對方向，加上操作手的估計，概略得出將飛彈導入視向線所需的修正。線導 MCLOS 飛彈工作原理

示意如圖一。



圖一：線導 MCLOS 飛彈工作原理

線導控制飛彈進步至 SACLOS 者，BGM-71 拖式飛彈 (Tube launched, Optically tracked and Wire command link guided missile, TOW) 為其代表產品，針對第一代反坦克飛彈作改良，利用光學指揮儀將人工手動導引改為半自動導引，導引方式乃射手利用光學瞄準具或夜視瞄準鏡追蹤目標，待飛彈發射後由尾端兩個紅外線發射器分別發出短波及長波紅外線，由光學瞄準具紅外線追蹤器及夜視瞄準鏡熱能追蹤器接收，接收之訊號會由導線傳至飛彈飛控系统處理，並將處理後之訊號，下達氣動力系統執行。光學瞄準具追蹤儀先以寬視界 ( $\pm 2^\circ$ ，偵測波長範圍  $1.05\mu\text{m}$  至  $1.4\mu\text{m}$  間之紅外線) 在 1.75 秒內捕捉飛彈位置 (外彈道約 360m)，待飛行穩定後，為能獲得更精確的追蹤資料，飛控系统會控制光學瞄準具轉換至窄視界 ( $\pm 0.25^\circ$ ，可偵測波長範圍在  $0.65\mu\text{m}$  至  $1.05\mu\text{m}$  間之紅外線) 追蹤飛彈。夜視瞄準鏡是以熱源來成像及追蹤，因此當遇干擾源時光指儀會自動由短波追蹤器轉換成長波追蹤器 (波長為  $8\mu\text{m}$  至  $12\mu\text{m}$ )，並會控制飛彈後端長波熱源燈之遮斷器作用發出識別碼，以辨別熱源燈與干擾源。射手的任務是把瞄準鏡十字線的中心點對準目標，直到飛彈命中目標為止。拖式飛彈 SACLOS 工作原理示意如圖二。



圖二：拖式飛彈 SACLOS 工作原理

光纖制導飛彈 (Fiber Optics Guided Missile, FOG-M) 再進步為 ACLOS，其發展於 1970 年代中後期，1980 年代初美國開始進行展示驗證，1985 年美國陸軍首先將列入前沿區域的防空系統 (FAADS) 計畫，採用非瞄準線 FOG-M 來對付坦克和武裝直升機。與此同時，各國也相競發展 FOG-M，其後美國休斯公司和波音公司於 1988 年聯合研製的 FOG-M 被陸軍選用後開始進入全面工程發展階段。目前技術較為先進的有美規 FOG-M 與法、德、意三國聯合研製的 POLYPEM，概採光纖直徑  $0.25\text{mm}$ ，抗拉強度  $200\text{Kg/mm}^2$ ，飛彈飛行速度  $100\text{m/s} \sim 200\text{m/s}$ ，作戰距離  $10\text{Km} \sim 20\text{Km}$ ，尋標器由可見光 TV 攝影機或 CCD 成像探測器邁向 FLIR 成像探測頭方向發展，即時攝取目標圖像後經光纖送給射導系統，然後根據目標圖像與飛行彈道的偏差形成控制命令，再經光纖送回飛彈，控制飛彈飛行，擊中目標。

### 三、借鑑 FOG-M 發展與前景

#### 1. FOG-M 構型發展

FOG-M 工作原理如圖三，導控方塊圖如圖四所示。全系統由發射制導系統、光纖和飛彈等組成。圖三中飛彈從不可見目標之發射點垂直向上空發射到  $100\text{m} \sim 200\text{m}$  (隨地形障礙物高度而定) 後經光纖將飛彈探測頭拍攝到之包含目標在內的場景圖像傳送到發射點，射手以此識別、選擇、跟蹤目標，對飛彈發出

控制指令，再經光纖傳送回飛彈，並控制飛彈飛向目標。

- (a) 飛彈發射制導系統由雷射發射接收器、雙向耦合器、訊號處理和指令形成及目標自動跟蹤器、目標圖像顯示器等部份組成，其中雷射發射接收器用於發射、接收  $1.5\mu\text{m}$  的上行訊號和  $1.3\mu\text{m}$  的下行訊號；雙向耦合器是完成雷射訊號的相互轉換；訊號處理、指令形成和目標自動跟蹤器用於由飛彈傳送給發射點的目標訊息和彈上儀器訊息，並將這些訊息進行修正處理後，形成飛彈運動控制和彈上探測頭轉動方向控制等指令訊號，對目標進行自動跟蹤並控制飛彈命中目標；目標圖像顯示器用於即時顯示目標圖像和探測頭的飛行軸向。

- (b) 飛彈由尋標探測頭、穩定環架、慣性量測裝置、控制器和雷射發射、接收器等組成，其中探頭是飛彈探測目標的關鍵組件，一般用可見光 TV 攝影機、FLIR 紅外線熱像儀、IRST 紅外點源追蹤儀或毫米波雷達等，用於即時獲取目標圖像，環架用於控制和穩定飛彈的飛行軸向；慣性測量裝置用於量測並即時提供飛彈運動狀態的訊息；控制器是根據地面發射制導系統的指令，控制飛彈的飛行姿態；雷射發射接收器由下行發送雷射訊號的雷射發射器和接收來自上行發送雷射訊號的接受器以及光導纖維雙向耦合介面組成，並經由光纖介面發射和接收雷射訊號，提供電子訊號和雷射訊號的相互轉換。

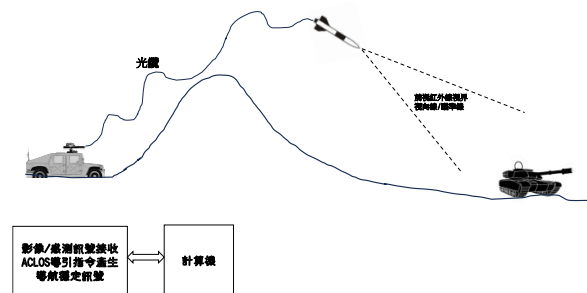
- (c) 光纖包括光纖捲盤和光纜兩部份。其中光纜是經光纖捲盤連接飛彈和地面發射至導系統之間的光導纖維，一條光纜通過兩個分複用通導可以同時發送上行

$1.5\mu\text{m}$  的雷射訊號和下行  $1.3\mu\text{m}$  的雷射訊號；光纖捲盤主要用於收捲、釋放光纜。

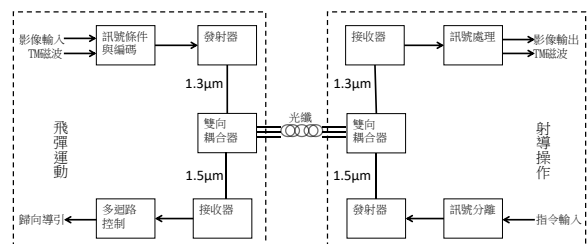
## 2. FOG-M 前景

由於 FOG-M 具有保密性強、發射點隱蔽、抗電磁、抗輻射和抗化學戰干擾等，制導精度高，訊號傳輸容量大，攻擊目標的變換速度快，能晝夜工作及設備簡單、體積小、重量輕、成本低和機動靈活等獨特優勢。其看好之前景包括：

- (a) 用來攔截隱蔽物遮擋滯空、盤旋或梳頂露頭的武裝直升機。這一點是其他飛彈很難做到的。
- (b) 在地形相當複雜的條件下，用頂攻方式攻擊和摧毀目標。這一點其他飛彈也無法達成。
- (c) 反艦，反電子作戰。



圖三：FOG-M 之 ACLOS 工作原理



圖四：FOG-M 之導控示意

## 四、FOG-M 關鍵技術與限制條件

FOG-M 的關鍵技術主要是光纜和尋標探測頭，其次是發射制導系統。但無法克服的限制條件是光纜。



## 1. 光纜

光纜是傳輸大容量指令訊號和將飛彈精確制導到目標的唯一通路，其制導體系的保密性、隱蔽性、抗干擾性、精度、訊號傳輸、變換速率、晝夜工作以及機動靈活等獨特優點都取決於光纜。而光纜的芯線是光導纖維，其制導飛彈的性能直接受光纖本身製造品質水準的限制，因此光導纖維決定了 FOG-M 的發展與應用。

### (a) 光纖類型及其傳輸性能

單模光纖 (Single-mode fiber) 和多模光纖 (Multi-mode fiber) 是光纖中最常用的兩種光纖類型。單模與多模差異主要在於光纖核心的直徑不同。單模光纖的光纖核心通常只有  $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  的直徑，僅能容納一束光線在光纖中傳輸，波長約為  $1300\text{nm}\sim 1550\text{nm}$ 。這種設計使得光線可在單模光纖傳輸十幾公里，但製造成本因為其精密程度高也相對昂貴。通常用於長距離的遠程通信和高速數據傳輸。相比之下，多模光纖線的核心直徑通常在  $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$  之間，可以容納多條光線同時傳輸，波長約為  $850\text{nm}\sim 1300\text{nm}$ 。直徑較大使得多模光纖成本較低，但也限制了其傳輸距離和速度。多模光纖可傳輸距離約為幾百公尺至數公里，當使用單模光纖線的成本過高時可考慮使用。FOG-M 則可依任務需求採用二者，單模與多模光纖相比，頻帶寬 100 倍，芯徑約小 10 倍，損耗低 2 倍且傳輸性能好，抗輻射性能強，抗拉强度高。然而單模光纖對耦合器的對接要求嚴格，光纖本身及所用光電元件的價格較高。單模與多模光纖的技術比較見表一。

表一：單模與多模光纖之技術性能比較

類型	芯徑 ( $\mu\text{m}$ )	外徑 ( $\mu\text{m}$ )	損耗 (dB/Km)	頻寬 (GHz $\times$ Km)
單模	5	125	0.4	100
多模	50	125	0.8	1

### (b) 抗拉強度

美軍要求 FOG-M 用光纜全長任何部位的抗拉強度大於  $246\text{Kg}/\text{mm}^2$ ，即光纖承受的壓力強度為  $1.39\text{GPa}$  且無任何裂紋。其玻璃芯徑為  $6\mu\text{m}\sim 35\mu\text{m}$ ，光纖芯包一層玻璃後直徑增至  $125\mu\text{m}$ ，在加聚合體包裹後直徑達  $200\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ ，重量為  $0.142\text{g}/\text{m}$ ，釋放光纜的工作壓力強度為  $1.4\text{GPa}\sim 2.1\text{GPa}$ ，光纖壓力強度為  $4.2\text{GPa}$ 。

### (c) 光纖長度及其對接

光纖的長度必須滿足作戰距離的要求。目前生產整根光纖的連續長度只有幾公里，必須對接拼裝後才能製成數十公里長的光纜。而 FOG-M 用光纖對接觸的直徑和抗拉強度應與原光纖完全相同，其製作工藝極為複雜，成本比一般商用通訊光纖高 10 倍。

### (d) 光纖捲盤的繞線和放線

FOG-M 光纜通常收捲在專用捲盤上，於制導過程中能順利地釋放，以滿足飛彈飛行速度要求。光纖在製造過程中經量產及繞製，通常為高溫製程；而 FOG-M 作戰過程中釋放光纜的溫度隨週遭環境而變化，通常遠低於製程溫度。如何解決光纜在高溫密繞過程中保持各條光纜

的間隔和各層光纜之間的黏合力，以滿足 FOG-M 釋放光纜的速度要求。軍規級光纜是採用一種工作溫度極寬且不影響光纜釋放的新型單模光纖。其二是分別在飛彈和發射制導裝置上各裝一捲盤釋放光纜，以避免光纜拉得過緊急減輕飛彈負載。再者要考量飛彈推進劑排氣損傷光纜的問題。

## 2. 尋標器探測頭

探頭是決定飛彈能否發現、識別、和命中目標的關鍵裝置總成，根據其工作原理是用光纖來傳輸探頭與地面發射制導系統之間的全部訊息，而光纖的傳輸性能具有任何一種能直接產生影像訊號或由探頭訊號轉換影像訊號的傳輸能力。因此 FOG-M 探頭可以配備可見光 TV 攝影機、感光電耦合 CCD(Charge Coupled Devices)相機、FLIR 紅外線熱像儀、MMW 毫米波雷達等，以提供足夠辨識率的影像圖資來搜索、發現、識別和跟蹤目標，並制導飛彈命中目標。

### (a)可見光 TV 攝影機

TV 攝影機是 FOG-M 早期採用的探頭，由於結構簡單、技術成熟、成本很低。

### (b)CCD 相機

CCD 是一種類似積體電路(IC)的半導體電子元件。主要的功能可以把光轉換成電，而電的訊號經過各式的電路就可以成為數位訊號，配合電腦加以處理，便可以有多样化的影像出現。CCD 的解像力決定於像素(pixel)的多寡，愈多則影像解析度愈高。傳統相機的底片(35mm 的底片,  $35 \times 24 \text{mm}^2$ )上約有 2500 萬個像素，每個像素等效大小約  $6 \mu\text{m}^2$ ；而 CCD 的像素數目  $1536 \times 1024$  點陣之像素已經是目

前高級產品的規格，受限於目前半導體產業的製作技術，更小像素，更大的晶片不易製作。另外從數位信號儲存的觀點來看，若每一像素有 16bit 的類比/數位轉換 A/D(Analog/Digital)來計算，若有傳統底片 2500 萬像素的 CCD 影像，則影像所佔的資料量約 48MB，相當驚人。中階的數位相機的像素在 35~41 萬點。高階的數位相機的像素在 80~140 萬點。專業的數位相機的像素有的超過 300 萬點。一般來講 35 萬畫素的 CCD 輸出信號  $640 \times 480$  點陣，80 萬畫素的 CCD 輸出信號  $1024 \times 768$  點陣。軍規 CCD 像素經多重考慮為  $484 \times 510$  點陣。

### (c)FLIR 熱像儀

紅外線熱像儀是把  $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$  波段或  $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$  波段的 FLIR 線列式焦平面陣列偵測器裝於 FOG-M 探頭中，並由偵測器訊號轉換成影像訊號，操作首藉顯示器螢幕來發現、識別和跟蹤目標並導引飛彈命中目標。FLIR 探頭不僅能有效地加大偵測距離，還可全天候工作，較為先進，美軍規格要求採用鑲嵌式凝視紅外線焦平面陣列  $256 \times 256$  點陣偵測器裝於探頭。其與可見光 TV 攝影機比較，偵測和發現目標距離增大 3~4 倍，靈敏度提高一個數量級，辨識率提高 2 倍，正朝  $1024 \times 1024$  點陣發展，但像素越多，凝視芯片越複雜，高速多路訊號處理也越困難，此外其易受煙塵、霧霾和溼度等氣候條件影響，使性能有所下降。

### (d)MMW 毫米波雷達

毫米波波長位於微波和紅外光波之間，大氣傳輸性能與微波接近，受煙幕、霧霾和雨雪的影響很小，具有準全天候工作的能力，同時又具有紅外光波的傳輸

數據容量大，偵測、識別和跟蹤目標的精度高，影像辨識率接近紅外光譜，為 FOG-M 之最新發展，但為主動式尋標，有源探測，部件複雜。

### 3. 發射制導系統

FOG-M 發射制導系統包括訊號傳輸、發設置導、數位地圖產生與校正等：

(a) 訊號傳輸的作用是傳輸發射控制中心與運載升降發射架之間的數據，其作用包括：與操控盤儀器進行訊號對接；將訊號進行多路轉換，使之成為連續的數據流，便於將電流訊號轉換成光波訊號；給操控盤接收儀器訊號分離與分配。訊號傳輸有三條同時雙向傳輸的通道：第一條線路連接數據處理器，第二條負責數位音頻訊號，第三條發射關鍵性指令、安全和控制的訊號。

(b) 數位地圖產生器(DMG)是用來選擇飛彈的接敵路線，計畫從發射點到進入目標區的可行路線，提供飛彈飛行路線下方之地貌特徵，其可採用兩種地圖模式：一種是根據傳統圖資數據(Cultural data)來進行數位特徵分析；另一種是影像數位處理地圖。

(c) 數位校正器是把探頭所偵測到之各種路線與所儲存的數據進行比較，當飛彈進入歸向階段時即對探頭傳輸多種基準數據，使飛彈飛向並命中目標。

### 4. FOG-M 限制條件

FOG-M 的獨特優點都集中在光纖的訊息傳輸和發射制導，但光纖本身如光纜長度，捲盤的釋放速度以及抗拉強度等存在以下無法克服的缺點，從而限制

FOG-M 的作戰距離、飛行和攻擊目標的速度等。

(a) 光纜經捲盤釋放，捲盤的運轉速度限制了 FOG-M 的飛行速度，目前能達成 125m/s~220m/s，這樣低的飛行速度，不僅容易遭受攻擊，亦容易受到干擾。

(b) 光纜長度及其抗拉強度限制了 FOG-M 的制導距離，實際操作中大多僅能到達 200kg/mm<sup>2</sup> 加上飛行慢等原因，若要攻擊較遠目標就需要較長時間，在此情況下，發射點的生存能力將受威脅。

(c) 裝有可見光 TV 攝影機探頭之 FOG-M 易受戰場環境煙幕、霧、雨等自然環境條件之影響；裝有紅外線 FLIR 熱像儀探頭者則易受煙塵、霧、濕度等自然環境影響。

## 五、國造 FOG-D 策略地圖

FOG-D 是一成功的系統整合，對既有的 FOG-M 及無線導控 Drone 技術做部分剪裁及分系統選配，經造兵與用兵的結合，達成新構想的嘗試。驗諸以往工作心得，誠哉斯言，其利用無線低空 Drone 為主體，加裝 FOG-M 的光纜及訊號轉換器，並吸收 3C 產品盛行的趨勢(液晶電視、筆記型電腦...)，訊號傳輸能標配/選配天線或光纖接頭，方便無線/有線轉用。機體裝置如雲臺設計、飛手搖控器均沿用原無線無人機，光纖捲盤因無人機移動速度較慢甚至未加裝或為 FOG-M 之簡化型，其架構為最簡化之 FOG-M，概同圖四。就武器系統工程發展而言，FOG-D 已省略概念設計(含可行性分析)、展示確認、工程及製造發展、測評等各階段，直接進入操作與支援階段，所以能快速跳級通關者，因有

FOG-M 技術背書且已實際取得刮目相看之戰果。見賢思齊，經驗移轉至國造 FOG-D 之可行性分析，因國內同時具有無線無人機之技術與世界知名品牌光纖代工之能量，內心判斷：自無不可行之理由。

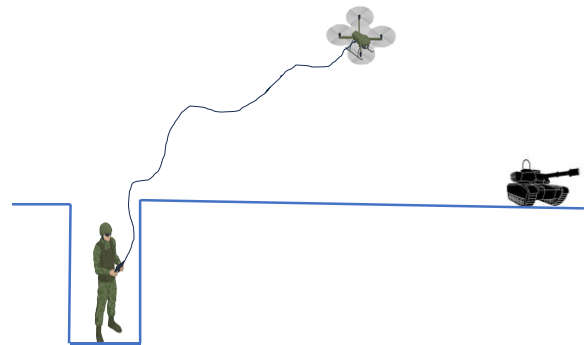
策略地圖 (Strategy Map) 概念是一種將 FOG-D 國造策略化的工具，可以幫助制訂和傳達其核心戰略和目標。其提供一整合的框架，將系統的使命、願景、價值觀與各個面向的策略目標連接起來，並顯示出其間的相互關係和影響。透過策略地圖運用，系統能夠更清晰地了解發展方向，並能夠將策略有效地傳達，瞭解與任務連結，強化戰略目標的協作關係，提供清晰的方向。策略地圖並可以幫助 FOG-D 將策略轉化為具體的行動計劃，並監控和評估執行的進度和結果，從而提高執行能力。故策略地圖是一個強大的工具，結合作戰場景想定、買砲造彈政策、技術備便水準等三個面向來制定，使之由作戰構想經有計畫、有步驟的作為，成為戰列武器。

#### (a) 作戰場景想定

作戰場景想定須綜合威脅分析、任務需求[10]，就敵灘岸登陸、垂側落地後，歷城鎮、淺山作戰，所可能採取的戰術進行分析。假設敵空優已成全面壓制式摧毀，制海能騷擾並半包圍封鎖，電戰亦獲得電磁權。我陸戰守土部隊仍憑藉主場地形、民情，頑強抵抗，伺機創造有利戰機，形成局部主動，累逆襲而小勝，積小勝而大勝，遂行臺澎防衛作戰目標。其間對我威脅最大者為坦克及武裝直升機。依據俄烏作戰經驗。原有低空無人機已成戰場反擊新寵，迫使此二者幾無還手之力。

最新反坦克作戰型態是無人機穿梭低層空域，攜帶反裝甲的高爆戰防彈

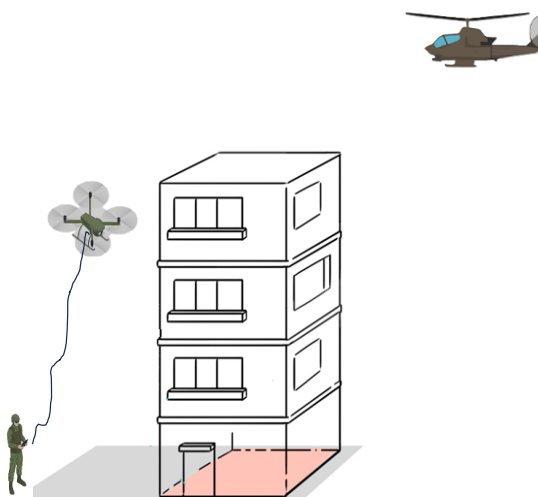
(HEAT)，從空中採攻頂方式摧毀戰車最脆弱的頂部，造成坦克的嚴重威脅。然而面對低空無人機威脅，最新的反制是運用大量的電子干擾軟殺，確能有效阻斷無人機進犯。無人機科技為突破此一反制，推陳出新，紛紛改裝為 FOG-D，以求反反制，觀察其作戰效益，頗值得我仿效。繼承無人機之作戰方式，FOG-D 反坦克作戰場景想定如圖五。



圖五：FOG-D 之反坦克作戰場景想定

俄烏戰場，烏軍曾數次以無人機成功擊中了俄羅斯攻擊直升機 (Mi-28 Havoc) 的尾旋翼，檢討原因，俄軍的一些直升機機型比較大且飛行速度較慢，駕駛目視或儀器飛行無法通視機身下方與後方，又未掛載電戰英艙無法早期預警，這都可能為無人機增加成功的攻擊機會。更要指出，無人機成功擊落直升機，除飛手技術高超之外，戰術也起了很大作用。通常情況下，直升機的飛行速度與高度都超過無人機的能力範圍，此外，直升機還配備複合裝甲，憑藉無人機攜帶的炸藥威力，通常難以直接摧毀，需巧妙撞擊其旋翼等脆弱部位。FOG-D 的運用為即使在電子對抗環境下，該無人機仍能有效摧毀直升機，其作戰場景想定如圖六。





圖六：FOG-D 之反直升機作戰場景想定

#### (b) 買砲造彈政策

國軍自政府播遷來臺後，對於大型傳統武器系統發展，大致遵循「買砲造彈」政策，此處「砲」與「彈」是國防科技領域中經常被提到的常用名詞，但兩者的意義與內涵卻大不相同，不可不察。概略而言，「彈(藥)」是能對目標產生殺害或破壞效果的硬體；而「(火)砲(武器系統)」則是使「彈」正確地對目標產生其功能所必需的硬體與軟體的總和，「彈(藥)」只是「(火)砲(武器系統)」中主要之一部分。任何一種武器—無論最簡單或最複雜者，若不能發展為完整的武器系統，皆將無法有效地發揮其功能。武器系統包含其相關的裝備、人員訓練、操作技術書刊，直接支援的設施與服務等，完整齊備，才能有效地施展其戰力。察大型傳統武器系統獲得脈絡，國軍早期依賴軍援，後國家經濟起飛，國防預算增加，轉為軍、商購獲得，無論軍售或商售，仍非研製生產。此因除武器本身外，尚需零附件等整體後勤、通聯指揮網路、各種教材與技術書刊等等，致系統龐大、構型管理複雜，自行

研發所需時間甚長且經費無法掌握，而投資所冒之風險也甚高，多般考量，多以外購獲得。至於「彈藥」是一種作戰中，用以摧毀、傷害、擊敗或威脅敵軍的器具；通常彈藥是武器系統真正摧毀目標殺害敵軍的硬體，因其屬一次性使用，消耗、補充、存量均須高度考量，故國軍傾全力建立自主生產能力，此為形成「買砲造彈」之由來。依作戰場景想定，FOG-D 仍扮演遊蕩彈藥角色，但係擔任任何種角色？投放炸彈飛行載臺抑或攜帶炸藥的自殺式神風機，使「彈藥」範圍的界定有所區別，也使設計方向不同。針對國造 FOG-D 之自主產能建立，首先要明白界定「彈藥」範圍。國造 FOG-D 若僅為可重複使用的載具，「彈藥」就侷限為搭載的空投炸彈；若擔任自殺神風機，則「彈藥」擴及無人機、炸藥鏈與光纜。

#### (c) 科技備便水準

首先評鑑現有無人機功能之缺點，是否改進其性能即可滿足 FOG-D 的需求；或分析與檢討外國已有或正在發展中的 FOG-D 是否合用，是否確可獲得。如果兩者答案皆是否定的，則必須借助科技備便觀念來發展國造 FOG-D 系統。因任務需求與作戰模式，雖異於原無人機，利用已有的經驗、技術資料、可靠的現品，採模組化系統之型態，以縮短時程、經費，較易成為合用的國造 FOG-D。也可以說，對現有無人機，做部份的剪裁及部份加裝的研發，僅做關鍵性技術的開發，達成新構想的嚐試，強調儘量利用現成之資源(已有之元件、主件、研究與製造設施、已成熟之科技、工藝等)。

FOG-D 類屬於攻擊型無人機，國造

FOG-D 亦須植基於國造攻擊型無人機之發展。現有國造攻擊型無人機皆屬「軍用軍規」模式製造，包括「劍翔」、「巡飛彈」、「騰雲」、「銳鳶」、「銳鳶二型」、「紅雀三型」等皆屬定翼機，適合高負載、長航程任務，但無法懸停，需要起降場地或投擲起飛、攔截降落設備。至於現有「軍用商規」模式無人機均非攻擊型，尺寸屬於微型或中小型，不適合攜帶炸藥或其他武器，而多用於偵察、觀測。其皆屬多軸旋翼機，一般是複數4旋翼、6旋翼，可垂直起降、停懸，但抗風能力較差，受限機載電池容量，負載能力與飛行時間、航程較差。目前國內廠商有能力生產90%的零組件，但無法做到之關鍵零件是光電球（相機雲臺），這是無人機最重要的部件之一；另穩定環架結合光學鏡頭、熱感應器，形成雲台支架保持拍攝穩定等技術，亦無自主能量。此皆為達成目獲的瓶頸，有了這組「眼睛」，才能執行夜間拍攝、測量距離等任務。國內不乏製造鏡頭、晶片的厲害廠商，但執行拍攝的影像控制系統，仍需進口。「軍用商規」現況雖然如此，若能技術升級，其實具有較大潛力，成為國造 FOG-D 之載具。光纖、光纜是 FOF-D 的命脈！在網際網路普及因素帶動下，全球光纖市場巨大成長，國內的光纖產業也在近幾年開始出類拔萃，產品推陳出新，品質優異，光纖主動、被動元件的生產都具有國際水準。其中鎧裝光纜（Armored Fiber Optic Cable）具有額外的金屬保護層，用於增強光纜的機械強度和抗環境能力。加

強層光纜（Reinforced Fiber Optic Cable）通常使用高強度纖維材料，如功夫龍（Kevlar），以增強電纜的抗拉強度和機械保護能力。這些新產品都使國造 FOG-D 容易就地取材，前景看好。

任何武器系統都必須具有摧毀力量，攻擊型無人機更不例外，其摧毀力量便是彈頭。攻擊無人機之功能在於載運彈頭或酬載，對目標產生殺傷或摧毀的效果，以達克敵、制敵的目的。彈頭是攻擊型無人機的首要功能組件，彈頭的大小、重量、種類要與無人機的載運能力匹配，除具備摧毀能量外，需要引信、安全備炸裝置。此外目標種類繁多、防護方式各異，必須針對不同類型來設計最適用的彈頭，才能得到最佳的終端效應。國造「軍用軍規」攻擊無人機之彈頭由機載發射之 2.75in 火箭投送之。國造 2.75in 火箭參照美軍 MK-4 型 2.75in 摺翼空用火箭（Folding Fin Aerial Rocket, FFAR）與 MK-66 型 2.75in 捲翼空用火箭（Wrap-Around Fin Aerial Rocket, WAFAR）而成，原設計為空對空任務，後改為空對地任務，針對面目標火力覆蓋、人海目標火海壓制，使用高爆破片、群鏢、催淚、黃磷、煙幕等彈頭；而對點目標如車輛、地面飛機、油彈庫等則使用高爆戰防彈（HEAT）彈頭[11]。其體積、重量均較大，需多管發射器發射，平射外彈道未具頂攻軌跡設計，較不適用「軍用商規」攻擊無人機之前瞻匹配。依俄烏戰場經驗，中小型無人跡多採空投小型榴彈或綁掛炸藥包方式執行攻擊任務。小型榴彈包括手榴彈、槍榴彈彈頭、輕迫擊砲彈等。經檢討，小型榴彈均為國造制式彈藥，為配合國造 FOG-D 發展者，40mm 槍榴彈頭比較

合適且易於改裝，因其重量輕、體積小，無發射裝置亦可藉本身重力空投，空投軌跡與原設計軌跡相似，無須變動引信與安全備炸設計，就地取材容易獲得。

作戰兩人一組之作法，原有飛手外增加領航員(觀測手)，兼負觀測環境、選擇航路、躲避障礙、保護光纖等任務，成功化解威脅，在複雜環境均能適應。

## 六、討論

1.原無人機作戰完全依賴無線電技術，無論目獲、監視、警戒，協同、調配、聯繫、指令、控制等均透過無線電波傳遞執行。隨之而起的是電子反制，包括電子偵察、干擾、摧毀等，使無人機頓時失措。見招拆招，FOG-D 是一種視覺指令結合光纖鏈路系統，毋須借助無線電訊號。電子反制是防禦性電子戰，其作用係當敵人採取電子軟、硬殺反制時，我方仍能有效地使用電子設施，其主要為發射訊號隱蔽與訊號安全傳遞[12]。旨在任務達成前提下，尋求無人機最佳使用方式，FOG-D 使用光纖制導，完全不使用無線電訊號，致敵無機可乘，難以偵知我方行動的特性與預警。

2.FOG-D 橫空出世，俄烏雙方均採「用兵」與「造兵」密接之特性，運用「發揮優勢」(Strength)、「克服弱點」(Weakness)、「利用機會」(Opportunity)、「化解威脅」(Threats)之策略，針對戰場需求及本身性能，採創新觀念與作法，制定策略地圖。FOG-D 優勢為命中率由無線無人機之 30%驟升至 60%且無懼電子軟殺干擾；弱點確為光纖羈絆，克服之道完全借用 FOG-M 經驗與光纖成熟技術，使 FOG-D 飛行距離完全符合戰術需求，因光纖來源不同，烏軍約 15 km，俄軍約 30 km，但仍有「扯(勾)線」、「剪線」等困擾威脅；所幸機會到來，雙方都大量使用電子干擾軟殺，迫切需要 FOG-D 上場應急；面對詬病之危脅，戰場經驗促成運用狙擊

3.各類感測器對應任務的優劣比較如表二。其選型標準為不對稱作戰之指導方針－「損小、效高、價廉、易行」，亦分析如表三。

表二:探頭原理性能比較分析

名稱	原理與特性
CCD	CCD系統是一種在可見光頻譜上對景物光學特性錄取與顯示的系統，其核心部件數位攝影機。這種可視化系統在軍事上有許多特殊的應用，如戰場偵查與監控、射擊瞄準、場景紀錄。由於具有角分辨率高，可對超低空目標或低輻射能量的目標進行探測、跟蹤和在廣泛的光譜波段上工作，為被動技術之一，使其在精確制導領域中佔有重要的一席之地。
FLIR	由於各種物體的特性和溫度不同，所發射出的紅外線波長也各不相同，物體的紅外輻射能力與其溫度的4次方成正比，溫度越高，輻射波長越短，其輻射能力越強。紅外輻射熱效應易於被光敏電阻等遙感儀器測到，此為紅外線制導的物理基礎。實戰情況下，不僅需要探測紅外輻射訊號的強弱，而且還希望看到紅外輻射體的圖像，以便於武器對目標的識別和跟蹤，紅外探測成像由景物各部份的溫度差異而形成的溫度不均勻分佈叫做紅外熱像圖。也就是說，由於景物各部份

	的溫度不同，因此不同的部分發射不同頻率或不同強度的紅外線，這樣當用FLIR探測時，將得到一幅關於該目標的紅外能量分佈圖。FLIR依據目標與背景的熱像圖，實現對目標的捕獲和跟蹤。	FLIR	紅外焦平面陣列問世，其性能明顯提高，成像效果直追電視系統，這就為紅外成像系統的應用開拓了廣闊的前景。焦平面陣列的概念，實際是一系列敏感熱能之微小探測器的集成，多元面陣列式的紅外系統已經有極強的功能，只是體積仍然龐大一些，不利於空拍機商業化運用，連帶影響FOG-D之轉用。此外由於大氣傳輸的限制，紅外系統的利用均限制在比較窄的波段，雖如此仍為極有潛力成為下一代FOG-D之探頭。
MMW	在毫米波段，雷達在成像分辨力、成像速度和小型化方面都優於微波波段，毫米波精確制導具有微波雷達制導與紅外線制導的綜合優勢。超高速飛行體在大氣中飛行時將使自身周圍的空氣「電離」形成「離子殼」，微波以下的電磁波不能穿透離子殼，只有毫米波可以不受離子殼的影響。另外，超高速飛行體的「氣動加熱」非常嚴重，飛行體周圍的熱空氣影響紅外線探頭對其他熱源的探測，因此，採用紅外線探頭也比較困難。對付超高速飛行體，MMW成為唯一選項。	MMW	設備過於精密昂貴，恐不利於不對稱作戰。

表三:探頭匹配FOG-D分析

名稱	用途比較
CCD	CCD被大量使用於數位相機、攝影機、智慧型手機、空拍機，轉換為FOG-D而言，製作簡便，容易大量生產，因而成本低。CCD遙控制導技術原已運用現今飛手無線迴路遙控系統，其精度高，可對付超低空目標、低輻射能量目標，可工作在廣泛的光譜波段，體積小、重量輕、電源消耗低，但也有不足之處，如對氣候條件要求高，在雨霧天氣和夜間不能用。現服役中FOG-D已採用之。

4.冷戰時期反電戰研究，美蘇兩強曾投入光纖導引技術的研發，但未有太多細節公開，後隨蘇聯解體而塵封，淡出人們記憶。俄烏戰爭爆發，瞬間開啟無人機主導戰場時代，但由於雙方均運用大量電子干擾反制，一般無線導引無人機頓時無用武之地，雙方都想起往日 FOG-M 技術化身 FOG-D 重新披掛上陣打前鋒。俄軍由於有過去蘇聯遺留的大量家底，技高一籌；烏軍或為前蘇聯成員僅分享部份技資，或由歐美過水，致技術稍遜。然由 FOG-D 戰場成績而言，烏軍可謂大獲全勝，最有名的作戰為「蜘蛛網行動」。雖兩國官方均未透漏細節，但有太多之觀察與評論表述，這場大膽的襲擊行動是在 18 個月前就開始籌畫布局，一夕之間炸毀俄軍十分之一的戰術轟炸機與三分之一的戰略轟炸機。官方並未說明為何本次作戰取名為蜘蛛網行動，但是從這次作戰的要角，以光纖有線操縱的第一視角無人機（FPV drone）來看，蜘蛛

- 網也許便是指這些無人機出動時交織的光纖網線，歌頌者多，甚有建議列入史詩級戰史[13]。檢討其勝出原因，實為成熟科技的創新應用與戰術構想的出奇不意。
5. 配合作戰場景想定，伏擊頂攻坦克，突襲底衝直升機，盤旋至為重要。國造 FOG-D 發展方向以改裝國造「軍用商規」無人機為佳。
6. 國造 FOG-D 之制導，由飛手於地面控制，採無人機探測經光纖下行至影像顯示器後以飛手判斷發出指令，上行回無人機。導引方式介於 SACLOS 與 ACLOS 間，導控方塊圖仿如圖四。
7. 感測器軍用無人機最重要的部分，用以感測來自目標的物理能源(如熱、光、電磁等)，而所有的感測器都有其優缺點，故其選用大有學問。通常能即時傳回影像的雲臺攝影機是首選，因其裝設在環架上，能隔離機體的繞動又能對準目標，但其無自製能力，選配時應注意工作距離、條件、訊號種類、精準度、照準度、大小、重量與商源穩定性等。
8. 彈頭是無人機送達目標的酬載，並用以擊毀目標，考量空拍攝影無人機之載重能力，估算彈頭部分為 0.5kg~0.6kg。針對 FOG-D 反坦克任務，結合以往研究經驗，選配 M430、M430A1 或 M433 式 40mm 高爆雙效(HEDP)彈頭，具有可行性。前二彈種供 M79、M203(國造 T85)式槍榴彈發射器使用，後者供 MK19 式榴彈機槍使用。此三全彈皆約 340g，卸除底火塞總成、發射藥、彈殼後，彈頭將更輕，設計每架無人機可裝置二枚。
- 但須注意者，該等彈頭之安全備炸設計須經較高射速始可開門，空投距離過低，墜落速度不足，不利完成安全備炸，需要專業調校。另其等雖名高爆雙效(HEDP)彈，但內部設計偏向高爆戰防(HEAT)彈，即錐孔裝藥設計，對一般鋼板而言，穿甲深度可達 2in~3in，攻擊戰車頂部，具有威力。再針對 FOG-D 反直升機任務，無人機原多直接綁掛炸藥包，由下往上撞擊直升機槳葉，若葉片損傷不大，直升機仍能脫逃。如能研改為連續桿(Continuous rod)彈頭，因其作用為彈頭伸展如同鋸齒，有效切斷葉片或纏住絞死，造成直升機無法穩定控制，自行墜毀。
9. 國造 FOG-D 光纜的選配宜先參考美軍 FOG-M 光纜規格，從市面商規現貨取得，如無法滿足或價格過高，可逐步經實驗驗證下修規格，因低空無人機不若飛彈火箭般具有高推力、高速度、高側向 G 力，光纜抗拉強度不需過高。相同者，因不需快速釋放光纜，捲盤亦可省略，將光纜收納於地面軟袋中，由無人機自行將其拖曳而出。衍生者為光纜重量，必須嚴格取捨，因其會增加 FOG-D 的負重，限制了運動性。
10. 光纖長度暫不考慮對接，以市售現貨長度為準，此因考量作戰場景，先以短程突襲著手，爾後視科技備便水準，逐步增加。



## 七、結論

FOG-D 在訊號傳輸上比無線電訊號傳輸更快，更因為其具有方便連結、不怕電磁干擾，可以將訊號快速傳回，且因解析度高，可以提供戰區人員更快辨識敵情，以達到指管情監偵有效傳達、分析、管制等戰場作用。依戰場想定，因 FOG-D 較原有裝備更輕所以在攜帶與維修上更為便捷，可以達到低成本及高效率節約戰場資源。預報估測法方面，因為能夠傳遞更清楚的戰場資訊，所以在低空無人機的位置估算上，更具準確性，另因不易被干擾所以訊號傳遞上可以給予更準確的戰場量測數據。綜上，FOG-D 具避免人員傷亡、精巧靈活、隱密性高、費用少、機動性高等多項優點，各國均積極研發，以執行情蒐、早期預警及攻擊等任務。最重要的是，其多面向的戰術彈性及價值，為我建構「不對稱戰力」之重要關鍵，FOG-D 能量將是重中之重。我相關產業之強項是代工生產，但「系統整合」有待加強，如讓 FOG-D 順利國產，就是系統整合之成功指標。

## 參考文獻：

- [1] 洪嘉豪，"【前瞻軍談】烏俄無人機創新戰法 臺海防衛借鏡" 青年日報，軍事論壇 20250413，2025.
- [2] Garnell, P., Guided Weapon Control System, 2<sup>nd</sup> Edition, Chapter 7, Pergamon Press, p. 161, 1980.
- [3] Lee, R. G., Garland-Collins, T. K., Johnson, D. E., Archer, E., Sparkes, C., Moss, G. M., and Mowat, A. W., Guided Weapon, Chapter 5, Brassey's Defence Publishers, p. 107 & 144, 1988.
- [4] 嚴政雄、徐言、薛乾昌、曾水田、段伴虬、袁敏事、周瑞雄、夏筱明、楊克勤、戴昌賢，國軍基礎院校飛彈教育基本教材，飛彈系統，第五章，國防部，p. 133,137 & 222, 1985.
- [5] 機械系主編，武器系統課程授課教材，第七章，陸軍軍官學校，pp. 270-271, 2021.
- [6] 曹魯屏(編授)，趙嘉琦(抄錄)，導引與控制筆記，第七章，國防大學中正理工學院國防科學研究所兵器組，pp. 121-125, 2001.
- [7] 趙嘉琦、李守誠、宋真堯，"CLOS 導引律用於 TVM 終端歸向之解析研究，" 中正嶺學報，34 卷 1 期，pp. 1-16, 2005.
- [8] Chia-Chi Chao, Sou-Chen Lee, and Chen-Yaw Soong, "Analytical Study of CLOS Guidance Law against Head-on High-Speed Maneuvering Targets," Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 50, No. 168, pp. 88-96, 2007.
- [9] Chia-Chi Chao, Sou-Chen Lee, and Chen-Yaw Soong, "Closed-form Solution for Head-on High-speed Target Maneuvering Using CLOS Trajectory," Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A, Vol.39, No.3, pp.185-194, 2007.
- [10] 莫辭中、宋真堯，武器系統工程短期講座，中正理工學院，1995.
- [11] 趙嘉琦，2.75 英吋火箭系統，中正理工學院兵器系統工程研究所，1995.
- [12] 趙嘉琦、夏永寧、盧振民、方凱賢、詹益賢、王昭程、陳玉山、林憲昭，"電戰時代兵工生產轉型之構思，"第 21 屆國防科技學術研討會論文集，2012.
- [13] 陳家齊，【一文看懂】AI、不可能的任務與無人機巢穴 烏克蘭怎樣炸掉俄軍十分之一的轟炸機-光纖交織的蜘蛛網，2025-06-03 新聞，太報，2025.

## Survey of FOG-D Technical Development

Yu-Lin Fang<sup>1</sup>, Chia-Chih Yang<sup>2</sup>, Chao-Yu Hung<sup>3</sup>, Chia-Chi Chao<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Aerospace Engineering, ROC NDU CCIT

<sup>2</sup>Graduate Institute of International Affairs and Strategic Studies, Tamkang University

<sup>3</sup>Department of Aeronautics and Astronautics, ROC Air Force Academy

<sup>4</sup>Department of Mechanics, ROC Military Academy

### Abstract

Few topics are as divisive as fiber optics guided engineering. Drones that have had their cable adaptively altered now dominate the field of war. In Russo-Ukrainian War, over 20% of processed drones contain at least some components derived from fiber optics guided missile. Given all this, it makes sense to ask whether or not these altered forms of guide technology have deleterious effects on practice and theory. When it comes to practice, the evidence suggests FOG-Ds are very helpful. Exhaustive meta-analyses of case studies on FOG-Ds have found more links between their kamikaze consumption and positive operation outcomes. However, there are some caveats. One is that the firearm users responsible for the creation of FOG-Ds have also been responsible for a large portion of the design on their handicraft. Therefore, system engineering conflicts of interest may have tainted the research. Additionally, many scholars feel that the jury is still out on the availability of FOG-Ds. Another factor is that subjective experience on FOG-Ds related theory risks have generally been short term. It could still be that FOG-Ds are causing theory issues, but we've failed to establish a causal link because of how long these issues take to manifest. The paper gives a brief account of working principle and application prospects of FOG-D, discusses their unique superiority, key technology and countermeasure technologies. Whatever the conversations in the office, it seems like commando drone pilots are in talks to take their action skills to the new frontier: asymmetric warfare. And not in the CGI sense. We need popular support to inspire a new generation of engineers and scientists to make army's ambitious plans a reality.

Key words : FOG-D, antitank, anti-helicopter, counter measure technology