



捍衛台海空域：防禦策略與同時接戰多類戰術飛彈問題之研析

教授 孟昭宇 助理教授 張珈進 陸軍少校 鄧兆延

提 要

彈道飛彈以及巡航導彈系統(Ballistic and cruise missile systems)已被許多國家認為是一種具成本效益之威赫武器及國力展現之符號。自1992年起，中共陸續部署M-7、M-9、M-11、M-18等戰術地對地飛彈，除逐年增加部署數量外，飛彈之性能與多樣性亦不斷提升，至此台海軍事「非對稱作戰(Asymmetric warfare)」型態已然成形。本文係主要探討當敵方多類導彈同時來襲時，若我方防禦能量不足情況下，決策者對防禦策略選擇問題之研析，並應用隨機馬可夫鏈建構一具有使用者操作介面之解算系統，提供決策者可能情境想定之應用，俾有效進行各種飛彈防禦之效能評比，以輔助其決策分析及兵力發展時之參考。

關鍵詞：戰術飛彈、防禦能量、飛彈防禦系統、多層防禦

前 言

我國為海島型國家，四面環海，一旦中共決意大規模武力進犯，在第一波軍事作戰中最可能藉由飛彈跨越台海進行空中攻擊，採多批次、多層次同一時間對我方之戰管雷達、飛彈基地、港口、機場、重要橋樑、設施、指揮中心等進行攻擊。面對中共的第二砲兵打擊能力，再加上其近期發展之無人飛行載具(Unmanned aerial vehicle，以下均簡稱UAV)與先進遠距精準武器，我方防禦時將會

面臨非常嚴峻之挑戰。

故如何在現代防空作戰中有效防衛台海空域是當前相當重要之國防議題。自美國於1993年正式提出戰區飛彈防禦計畫(Theater Missile Defense, TMD)後，飛彈防禦研究形成顯學且對國家安全維護有著重要意義。回顧歷年相關研究：Larson et al.(1994)¹在美國蘭德(RAND)公司針對飛彈防禦之研究報告中認為，多層防禦在成本效益上是優於單層防禦，並以數學期望值概念進行計算及驗證。Wilkening(1998)²認為要估算彈道飛彈

1 Larson, E. V., Kent, G. A., "A new methodology for assessing multilayer missile defense options". Rand Monograph Report (MR-390-AF). Santa Monica, California: Rand, 1994, pp.7-12.

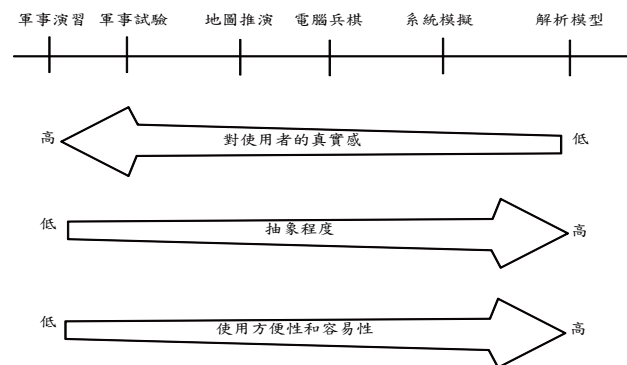
防禦系統之效能是相當困難的，如能將系統特徵發展成簡單參數模型，即可以柏努利試驗(Bernoulli Trial Problem)結果(成功或失敗)來看彈道飛彈防禦問題。Przemieniecki et al.(2000)³則提出了多層防禦最佳化之部署方法，以攻、防雙方「潛勢」(potential)的概念，將攻方潛勢定義為可用於攻擊的飛彈總數，防禦方潛勢則為有效攔截數之總期望值。Menq et al.(2007)⁴係以離散型馬可夫建立多層彈道飛彈防禦模型，考慮攻擊數量隨機性，以機率分配表示來襲飛彈和突穿飛彈之數量現象，從單純的期望值問題提升到機率分配的層次。Dhaifalla et al.(2011)⁵在比較各種彈道飛彈防禦系統後指出，使用隨機過程馬可夫建模較優於用解析法求期望值之方式，且期望值方法無法提供機率分配之訊息應用。

過去以解析模型探討多層飛彈防禦之研究中，大多以彈道飛彈當做為唯一來襲目標，用以評估防禦效能，鮮少論及多種(含二種以上)目標來襲；此外，以多種武器同時來襲做為防禦系統建模考量，亦較符合真實防空的交戰現象。本文即以多層飛彈防禦之交

戰觀點延伸建構多目標飛彈防禦模型；在建模上，依Taylor(1980)⁶對作戰模型的分類(如圖一)，適合用解析模型。雖然對使用者而言抽象程度較高，但使用方便性上確有其優點。同時，為補足此缺點，本文另設計了使用者操作介面之解算系統，透過電腦操作及運算即可快速獲得結果，亦讓使用者瞭解模型之應用方式。

飛彈與飛彈防禦系統

對於防空交戰之攻守雙方使用的飛彈武器系統，攻方定義為飛彈系統，守方則為飛



圖一 作戰模型的分類和範圍

資料來源：修改自Taylor所註Force-on-Force Attrition Modelling，頁7。

- 2 Wilkening, D. A., "A simple model for calculating ballistic missile defense effectiveness." *Journal of Science & Global Security*, Vol. 8, No. 2, 1999, pp.183-215.
- 3 Przemieniecki, J. S. (Ed.), "Mathematical methods in defense analyses" . (3rd ed.). Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. , 1999, pp. 146-149, 186-197.
- 4 Menq, J. Y., Tuan, P. C., & Liu, T. S. (2007). "Discrete Markov ballistic missile defense system modeling" . *Journal of EJOR*, Vol.178, 2007,pp. 560-578.
- 5 Dhaifalla K. Al-Mutairi, Asok K. Nanda, Richard M. Soland., "Monotonicity and comparability in ballistic missile defense systems" . *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol.141, 2011, pp.2191-2200.
- 6 Taylor., "Force-on-Force Attrition Modelling" , Monterey: California. , 1980, pp7.定義出作戰模型的分類與範圍，本文發展之作戰模型為解析模型。

彈防禦系統。

一、攻方之飛彈系統：

飛彈係本身具有動力、有導引能力且在空氣或是太空中移動之彈藥載體。有導引能力但沒有動力的彈藥稱作導引炸彈，有動力但是沒有導引能力的彈藥稱作火箭。飛彈在中共稱之為「導彈」，泛指具導引能力的飛彈。⁷

飛彈的分類有四種常用方式，⁸其一按發射點和目標位置分類、其二按射程分類、其三按作戰任務分類、其四按飛行方式分類。整理如表一所示。其中地對地飛彈係指攻擊敵方地面目標之陸基導引飛彈，有彈道與巡弋飛彈兩類：

(一)彈道飛彈：依賴本身火箭發動機推動，依循彈體與地球重力之力學拋物線原理所構成之一定軌道，並由其導引系統導引，控制其路徑至目標且攜有酬載的飛行兵器。

(二)巡弋飛彈：是一種用動力推進，以機翼產生升力之飛彈。大多數的動力來源為噴射發動機。可攜帶傳統彈頭或核彈頭，射程可達數百英里。具備自我導引能力，能以非彈道型態之飛行路徑來躲避雷達偵測。巡弋飛彈與無人飛行載具的不同之處，在於巡弋飛彈不擔任偵察任務，彈頭整合為系統的一部分，且最後會在攻擊中損失。

此兩類飛彈是共軍用以對付台灣的首選戰力，在政治上，它一直被當成是威懾台灣政府與人民的利器；在軍事上，也是中共解

表一 飛彈分類表

一、按發射點和目標位置分類	攻擊地面目標	地對地飛彈	地對地彈道飛彈
			地對地巡弋飛彈
		艦(潛)對地飛彈	艦(潛)對地彈道飛彈
			艦(潛)對地巡弋飛彈
		空對地飛彈	空對地彈道飛彈
			空對地巡弋飛彈
	攻擊空中目標	反坦克飛彈	
		反輻射飛彈	
		防空飛彈	地對空飛彈
			艦(潛)對空飛彈
			空對空飛彈
		反彈道飛彈	高空攔截飛彈
	低空攔截飛彈		
反衛星飛彈			
攻擊水面目標	反艦飛彈	岸對艦飛彈	
		艦(潛)對艦飛彈	
		空對艦飛彈	
	反潛飛彈	艦對潛飛彈	
		潛對潛飛彈	
		空對潛飛彈	
二、按射程分類	近程飛彈 (射程<1,000km)		
	中程飛彈 (射程1,000~5,000km)		
	遠程飛彈 (射程5,000~8,000km)		
	洲際飛彈 (射程>8,000km)		
三、按作戰任務分類	戰略飛彈		
	戰術飛彈		
四、按飛行方式分類	彈道飛彈		
	巡弋飛彈		

資料來源：參考總裝備部電子信息基礎部，「彈道飛彈武器與航天器裝備」，原子能出版社(2003)，頁10。

放軍犯台的第一擊主力。

二、守方之飛彈防禦系統

飛彈防禦中彈道飛彈是相當難以防禦的目標，其防禦過程可大致區分為三個階段，加力階段(Boost Phase)、中間階段(Midcourse

7 維基百科，<http://zh.wikipedia.org/wiki/飛彈>，(檢索日期：2014年4月20日)。

8 總裝備部電子信息基礎部，「彈道飛彈武器與航天器裝備」(原子能出版社，2003年)，頁10。

Phase)及終端階段(Terminal Phase)：⁹

(一)加力階段：此階段飛彈為剛發射，仍處於助推飛行或上升飛行的彈道飛彈，攔截主要有機載雷射武器等，在進入大氣層前進行攔截。

(二)中間階段：此階段飛彈為進入大氣層飛行，攔截主要有海基戰區飛彈防禦系統(Naval Theater Wide Defense System)等，發射的防空飛彈在大氣層外對彈道飛彈進行攔截。

(三)終端階段：此階段飛彈因多重酬載技術在進入大氣層前會釋出多彈頭(Warhead)及多誘標(Decoy)，攔截主要有低層防禦系統(Lower-Tier Defense System)與高層防禦系統(Upper-Tier Defense System)，所發射的防空飛彈在大氣層內對彈道飛彈進行攔截。

此外，飛彈防禦系統是以攔截空中目標為對象的飛彈武器系統總稱，通常亦可根據發射平台、運用空域及作戰使命進行分類，¹⁰如表二。

本文模型裡所稱的飛彈防禦系統，依發射平台區分可適用於地對空及艦對空防空之飛彈武器系統，在武器作戰空域及作戰使命區分則均可適用。飛彈防禦系統使用之攔截器¹¹可由陸地或海面(船艦)發射以擊毀來自空中的目標，空中目標則包括來襲飛彈與敵機，來襲飛彈包括彈道飛彈及巡弋飛彈。

研究架構與方法

一、研究架構：

本文應用馬可夫鏈在多層飛彈防禦的觀點下探討攻防交戰的隨機現象。以下區分理論基礎與實務應用兩部分說明：

(一)理論基礎：

延伸Menq et al. (2007)多層彈道飛彈防禦模型，在多層防禦觀點架構下探討多目標來襲的防空交戰隨機現象，除考慮來襲數量的隨機性及識別誤差的問題，並增加多類目標來襲同時接戰、防禦能量不足及防禦策略選擇等問題之探討。

表二 防空飛彈武器系統分類表

防空飛彈武器系統分類	按發射平台	地對空防空飛彈
		艦對空防空飛彈
		空對空防空飛彈
	按武器作戰空域	近程末端防禦與便攜式防空飛彈
		中近程防空飛彈
		中遠程防空飛彈
		反彈道飛彈防空飛彈
		反空間軌道目標武器
	按作戰使命	區域防空飛彈
		要點防禦防空飛彈

資料來源：參考趙少奎，《彈道飛彈與航天技術導論》，(中國北京：中國航宇出版社，2008)，頁270。

9 徐岩、李莉，「天盾：美國彈道飛彈防禦系統」(中國北京：解放軍文藝出版社，2003年)，頁105-107。

10 趙少奎，「彈道飛彈與航天技術導論」(中國北京：中國航宇出版社，2008年)，頁270。

11 飛彈防禦系統之攔截器係指可用於攔截來襲彈道飛彈之防空飛彈，攔截器亦為守方重要的防禦資源。

(二)實務應用：

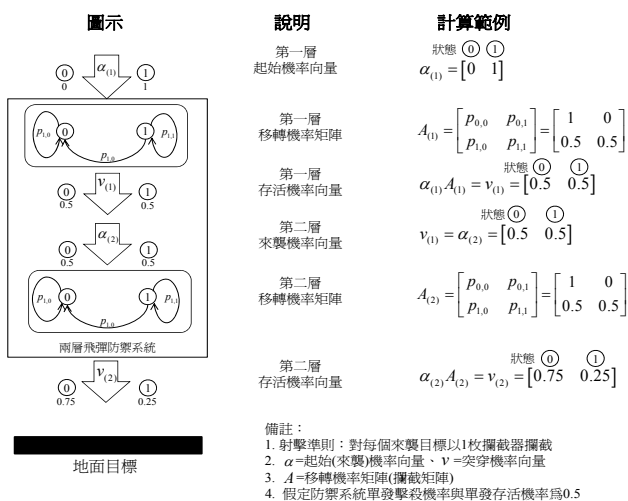
使用者操作軟體建構之解算系統，可依發展之想定輸入相關參數，用以進行飛彈防禦之效能評估用以解決管理實務問題。

二、研究方法：

在飛彈防禦交戰中有許多的隨機現象，而離散型的馬可夫鏈適合用描述這種隨機現象，在探討飛彈防禦模型中重要的議題就是「飛彈落地數量」，將狀態定義為「飛彈數量」後離散的隨機過程型態即形成，在馬可夫鏈防禦模型中所有來襲向量均為機率向量，用以表示某數量或狀態的機率分配，所以初始狀態在模型中是不可或缺的。

以圖二係以「兩層飛彈防禦系統攔截一枚飛彈，各層對一個來襲目標發射一枚攔截器(射擊準則為1)」為例，簡單說明馬可夫鏈在多層飛彈防禦問題之初步運用。

圖二中區分三個部分，分別為圖示、說



圖二 馬可夫鏈兩層飛彈防禦示意圖
(來源：本文自行繪製)

明、計算範例。

(一)「圖示」裡箭頭表示來襲或存活機率向量，以符號 α 及 v 表示；方框為移轉機率矩陣，以符號 A 表示；圓圈表示狀態，在最多可能來襲一枚飛彈情形下，狀態會有可能來襲1枚與可能來襲0枚兩個狀態，假定為來襲一枚飛彈，故來襲狀態1枚的機率為1。所有符號的下標表示所在飛彈防禦的層數。

(二)「說明」裡有起始機率向量、移轉機率矩陣、來襲機率向量及存活機率向量。起始機率向量可經由軍事情報單位的分析可以研判敵人可能發射飛彈的數量與機率，以飛彈來襲數量機率分配向量為 $\alpha_{(1)}$ ；當給定單次存活機率及單次擊殺機率時，並將狀態定義為存活數量，其攔截成功與攔截失敗的概念可以擴展並定義出移轉機率矩陣 A ；當第一層的起始機率向量經過第一層移轉機率矩陣後，可得出第一層的存活機率向量 $v_{(1)}$ ，第一層的存活機率向量亦可視為第二層的來襲機率向量；最後再經第二層移轉機率矩陣後，可得出第二層存活機率向量。

(三)「計算範例」裡將給定的參數轉換為計算結果，對於攔截飛彈這件事而言，視為機率向量的機率移轉過程，多層飛彈防禦之隨機模型因此形成。

將模型裡移轉機率矩陣定義為攔截矩陣(對目標攔截一次的移轉機率矩陣)，可由該層攔截器的單發擊殺機率、單發存活機率及射擊準則定義之，如方程式(1)。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{states} & 0 & 1 & 2 & \cdots & c & \cdots & m-1 & m \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ r \\ \vdots \\ m-1 \\ m \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ p_{1,0} & p_{1,1} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ p_{2,0} & p_{2,1} & p_{2,2} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & p_{r,c} & \vdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m-1,0} & p_{m-1,1} & p_{m-1,2} & \cdots & \cdots & \cdots & p_{m-1,m-1} & 0 \\ p_{m,0} & p_{m,1} & p_{m,2} & \cdots & \cdots & \cdots & p_{m,m-1} & p_{m,m} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中

$$\text{if } r \geq c, \text{ then } p_{r,c} = \binom{r}{c} (p_k^{fd})^{r-c} (p_s^{fd})^c$$

$$\text{if } r < c, \text{ then } p_{r,c} = 0$$

方程式(1)中假設對飛彈的攔截矩陣為 A ，飛彈來襲最大可能來襲數量為 m 枚，飛彈來襲數量為 r ， $r \in \{0, 1, \dots, m\}$ ，其經攔截後存活的數量為 c ， $c \in \{0, 1, \dots, m\}$ ，給定防禦系統對飛彈的單發擊殺機率 p_k 、單發存活機率 p_s 及射擊準則 fd 。在來襲 r 個飛彈中，將 r 個飛彈攔截後存活 c 個飛彈的機率為 $p_{r,c}$ ，其中 $p_{r,c}$ 表示來襲飛彈遭攔截後，突穿 c 枚的機率，服從二項分配，攔截矩陣為一個下三角型矩陣。

最後將存活機率向量定義為突穿機率向量，因存活之意涵在現實中可視為來襲飛彈之突穿數量。由馬可夫鏈兩層飛彈防禦概念可知起始機率向量經過攔截矩陣後產生突穿機率向量，此亦視為下層防禦之來襲機率向量。經此流程可延伸多層飛彈防禦的概念。

多目標飛彈防禦概念

因應飛彈防禦系統面臨多種目標來襲的狀況，需將狀態重新定義。透過運用辭典式順序(lexicographic order)運用將多種來襲目標「數量」定義為多維狀態，當狀態定義為多維後，可以用克洛內克乘積(Kronecker

product)表示。並將「個別」來襲目標之來襲向量和攔截矩陣合併為「多種」來襲目標之來襲向量和攔截矩陣。

為簡單與清楚了解在面對多種目標時應如何定義多維狀態，在此先介紹克洛內克乘積，並以攻方使用兩種武器攻擊，即狀態定義為2維，守方飛彈防禦系統以兩層防禦為例做建模發想之說明，發想範例如下：

一、想定：

假設攻方來襲武器有型一飛彈及型二飛彈兩種，情資顯示型一飛彈來襲數量不會超過2枚，型二飛彈不超過1架。守方飛彈防禦系統對於型一飛彈及型二飛彈的射擊準則均為1(一枚攔截器攔截一個來襲目標)，守方防禦策略為偵獲目標即發射，未有飛彈防禦系統攔截器不足之狀況。

二、定義來襲狀態：

依想定，型一飛彈來襲最多2枚，會有三個狀態，分別為狀態0、狀態1及狀態2等三個；型二飛彈來襲最多1枚，會有二個狀態，分別為狀態0及狀態1。令型一飛彈來襲機率分配向量為 α ， $\alpha = [\alpha_0 \quad \alpha_1 \quad \alpha_2]$ ；型二飛彈來襲機率分配向量為 β ， $\beta = [\beta_0 \quad \beta_1]$ 。以辭典式順序重新將來襲飛彈和型二飛彈的來襲數量定義為2維狀態，則 $\alpha \otimes \beta$ 如方程式(1)。

$$\begin{aligned} \alpha \otimes \beta &= [\alpha_0(\beta_0 \quad \beta_1) \quad \alpha_1(\beta_0 \quad \beta_1) \quad \alpha_2(\beta_0 \quad \beta_1)] \\ &= [\alpha_0\beta_0 \quad \alpha_0\beta_1 \quad \alpha_1\beta_0 \quad \alpha_1\beta_1 \quad \alpha_2\beta_0 \quad \alpha_2\beta_1] \end{aligned} \quad (1)$$

在方程式(4)中： $\alpha_0\beta_0$ 表示無型一飛彈且無型二飛彈來襲的機率， $\alpha_2\beta_1$ 表示兩枚型一飛彈且一枚型二飛彈來襲的機率。

三、定義攔截矩陣：

計算來襲型一飛彈及型二飛彈的攔截矩陣由其對各別的單發擊殺機率可求得，令型一飛彈的攔截矩陣為 A_α 、型二飛彈的攔截矩陣為 A_β ，定義來襲型一飛彈及型二飛彈的兩種來襲目標之攔截矩陣 $A_{\alpha\beta}$ 可由方程式(2)求得。

$$A_\alpha \otimes A_\beta = A_{\alpha\beta} \quad (2)$$

四、定義突穿機率向量：

當防禦方對兩種目標來襲機率向量實施攔截即為一次機率移轉，令機率移轉後之突穿機率向量為 $v_{\alpha\beta}$ ，可由方程式(3)求得。

$$(\alpha \otimes \beta)(A_\alpha \otimes A_\beta) = v_{\alpha\beta} \quad (3)$$

在方程式(3)中： $\alpha \otimes \beta$ 為重新定義後型一飛彈與型二飛彈的來襲機率向量 $A_\alpha \otimes A_\beta$ 、為重新定義後型一飛彈與型二飛彈的攔截矩陣、 $v_{\alpha\beta}$ 為重新定義後型一飛彈與型二飛彈的突穿機率向量。

系統設計與驗證

本文將建構之多目標飛彈防禦模型以 MathCad 軟體設計成一個具使用者操作介面的計算機輔助解算系統，將複雜的計算問題交由計算機處理，讓使用者可專注於決策分析作業，因系統主要功能為模型解算，在決策分析方面仍需決策者自行判斷，故僅可視為處理防空相關軍事決策支援系統之雛型系統。此系統已將數學模型程式化，亦可作為後續發展此類軍事決策支援系統之核心部分。系統設計步驟如圖三。

一、系統功能：

(一)使用者可就攻方之攻擊武器可能來襲數量與機率進行參數輸入。

(二)使用者可就守方之防禦系統性能、射擊準則、攔截器數量及防禦策略等進行選擇輸入，程式亦提供選擇說明。

(三)可依使用者輸入之參數進行流程計算，並輸出具有意義之機率分配向量。

二、使用介面說明：

(一)攻擊方輸入部分：

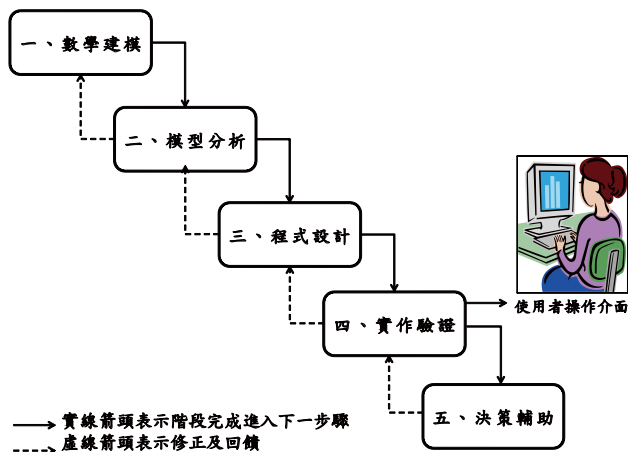
可以輸入兩種來襲目標的數量以及其來襲可能機率，如圖四。

(二)防禦方輸入部分：

可以輸入兩層防禦，輸入參數為單發擊殺機率、射擊準則、現有攔截器數量、防禦策略等四項，如圖五。

三、系統驗證：

以兩層兩目標飛彈防禦做為邏輯運算驗證之想定，想定情境為在防禦方無法評估飛



圖三 計算機輔助解算系統設計步驟
(來源：本文自行繪製)

計算機輔助解算系統
參數輸入畫面

攻擊方輸入部分
輸入可能來襲數量機率

型一飛彈：來襲數量：	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
來襲機率：	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
型二飛彈：來襲數量：	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
來襲機率：	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

圖四 攻擊方參數輸入主畫面(以兩種來襲目標為例)

彈與型二飛彈的威脅條件下，以所擁有的攔截器數量做為變數，觀察來襲目標的零突穿機率是否符合邏輯運算。

(一)驗證之想定：紅軍飛彈攻擊可能來襲數量及機率為：4枚，0.4、5枚，0.6；型二飛彈攻擊可能來襲數量及機率為：4枚，0.4、5枚，0.6。藍軍以兩層飛彈防禦為部署，第一層及第二層對於飛彈與型二飛彈的單發擊殺率均為0.9。

(二)驗證：在各層攔截器數量為變數且相同條件下，驗證兩個狀況，狀況一：防禦

防禦方輸入部分

防禦方防空武器系統參數

第一層：

1、擊殺率
型一飛彈 型二飛彈
0.7 0.8

2、射擊準則
型一飛彈 型二飛彈
1 1

3、現有攔截器數量
12

4、防禦策略
☒ 優先型一飛彈(彈頭)
☐ 優先型二飛彈
☐ 隨機防禦

第二層：

1、擊殺率
型一飛彈 型二飛彈
0.6 0.7

2、射擊準則
型一飛彈 型二飛彈
1 1

3、現有攔截器數量
10

4、防禦策略
☐ 優先型一飛彈(彈頭)
☒ 優先型二飛彈
☐ 隨機防禦

圖五 防禦方參數輸入主畫面

策略為第一層優先防禦飛彈、第二層優先防禦型二飛彈；狀況二：防禦策略為第一層優先防禦型二飛彈、第二層優先防禦飛彈。比較飛彈與型二飛彈經兩層攔截後其各別的零突穿機率是否合乎邏輯。經運算後多目標飛彈防禦驗證結果數據如表三。

(三)說明：

1.觀察各層攔截器數量為1至3枚時，因

表三 多目標飛彈防禦驗證結果數據表

攔截器數量(枚)		狀況一 ¹²		狀況二 ¹⁵	
第一層	第二層	型一飛彈 零突穿機率	型二飛彈 零突穿機率	型一飛彈 零突穿機率	型二飛彈 零突穿機率
1	1	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0
4	4	0.2624	0.2624	0.2624	0.2624
5	5	0.7979	0.6414	0.6414	0.7979
6	6	0.9507	0.7055	0.7055	0.9507
7	7	0.9548	0.7761	0.7761	0.9548
8	8	0.9548	0.8537	0.8537	0.9548
9	9	0.9548	0.9237	0.9237	0.9548
10	10	0.9548	0.9548	0.9548	0.9548
11	11	0.9548	0.9548	0.9548	0.9548

資料來源：整理自經解算系統計算產生之數據資料。

12 狀況一：第一層優先防禦飛彈，第二層優先防禦型二飛彈；狀況二：第一層優先防禦型二飛彈，第二層優先防禦飛彈。

攔截器數量均小於飛彈與型二飛彈可能來襲數量，故不可能會有零突穿機率，數據邏輯正確。

2.觀察各層攔截器數量為4枚時，攔截器數量等於飛彈最小可能來襲數量4枚與型二飛彈最小可能來襲數量4架，故在狀況一與狀況二的防禦策略下會有零突穿機率且會相同，數據邏輯正確。

3.觀察各層攔截器數量為5枚時，狀況一第一層優先防禦飛彈，因飛彈可能來襲4枚的機率為0.4，會有0.6的機率多一枚會去攔截型二飛彈，故型二飛彈經第一層攔截後的突穿機率為3枚0.144、4枚0.472、5枚0.384，第二層優先防禦型二飛彈，因型二飛彈可能來襲3枚的機率為0.144，4枚的機率為0.472，故會有0.856的機率多2枚會去攔截飛彈，0.528的機率多1枚去攔截飛彈。經邏輯判斷在經兩層攔截後，第一層優先防禦飛彈、第二層優先防禦型二飛彈的狀況下，飛彈的零突穿機率會大於型二飛彈，數據邏輯正確。另狀況二因其他條件均相同，只是將第一層及第二層優先防禦目標調換，故其數據會與狀況一數據調換，經運算後數據邏輯正確。

4.觀察各層攔截器數量為10枚時(含以上)，因攔截器數量等於(大於)全部可能來襲數量，以給定的來襲數量與機率、單發擊殺率相同的條件下，在狀況一與狀況二的防禦策略下飛彈與型二飛彈的零突穿機率均相同，數據邏輯正確。

想定發展及其應用

作戰模型中是以想定作為假設場景的

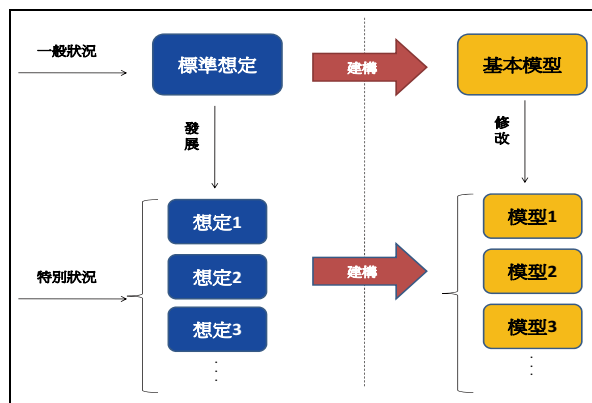
系統邊界，在此依據一般狀況將防空交戰的情況以標準想定做基礎，將系統的範圍、對象、背景做戰場描述，經由標準想定建構出基本模型。將所欲解決的問題依特別狀況分別由各想定去發展，依不同想定描述之狀況修改基本模型建構符合該想定之模型，最後藉由修改模型的運作將產出的資訊(機率、向量、矩陣、圖表)來分析所欲探討之問題，想定發展架構圖如圖六。

一、標準想定

(一)一般狀況：紅軍為攻擊方，擁有兩種攻擊武器可對藍軍發動攻擊：型一飛彈、型二飛彈。藍軍為防守方，擁有兩層飛彈防禦系統，可在終端階段對來襲目標實施攔截。戰爭爆發初期，紅軍已取得空優，藍軍所屬機場跑道均已無法供戰機起降，藍軍防空飛彈部隊已在中央指揮中心周邊完成飛彈防禦系統部署，可對紅軍來襲目標實施攔截。

(二)適用條件：

1.在藍軍攔截器數量充足狀況下，各層飛彈防禦系統可對每個來襲目標依射擊準則



圖六 想定發展架構圖
(資料來源：本文自行繪製)

實施攔截。

2.在藍軍攔截器數量不足狀況下，各層飛彈防禦系統對每個來襲目標均以一枚攔截器實施攔截，其射擊準則為1。

3.面對紅軍攻擊武器來襲時，藍軍不可保留攔截器不進行攔截。

4.藍軍識別系統對來襲目標均可偵測到，識別率為100%。

二、狀況想定：防禦能量不足下，防禦策略之比較

假定藍軍防禦系統部署為A型及B型防空武器系統的兩層防禦，基於已獲得情資顯示，紅軍攻擊藍軍指揮中心的型一飛彈不會超過14枚，可能攻擊的數量及機率分別為10枚，0.4、12枚，0.4、14枚，0.2；型二飛彈不會超過8枚，可能攻擊的數量及機率分別為4枚，0.4、5枚，0.4、6枚，0.2，且藍軍情報單位無法對兩種來襲武器評估其突穿後之威脅。因紅軍對藍軍之防空飛彈陣地實施特戰

攻擊，藍軍A型及B型攔截器遭受破壞，A型攔截器剩餘12枚、B型攔截器剩餘10枚，由於攻方最大可能來襲飛彈數為14+6枚，在攔截器數量不足下，兩層防禦中最佳的防禦策略組合為何：

(一)解算防禦策略組合：

將可能的防禦策略排列後有9種防禦策略的組合，其計算結果如表四。在想定條件下，最佳的防禦策略組合為編號2。

(二)最佳防禦策略組合之分析：

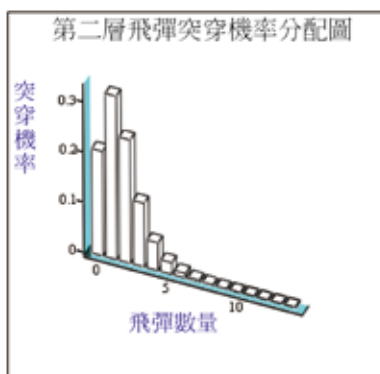
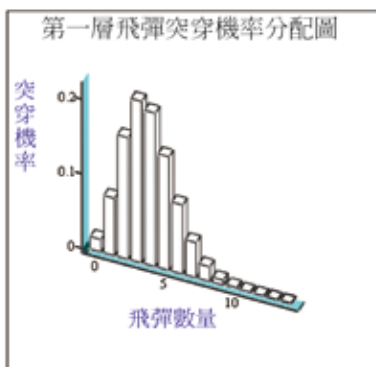
1.飛彈突穿機率分配趨勢之探討：

輸出經系統解算的各層飛彈突穿機率分配如圖七。因第一層優先防禦型一飛彈在A型防禦系統攔截器對型一飛彈單發擊殺率0.7且有12枚攔截器條件下，第一層型一飛彈的零突穿機率可達0.0168；第二層優先防禦型二飛彈，因B型防禦系統攔截器有10枚，雖優先防禦型二飛彈，但型二飛彈最多可能只會來襲6架，尚有攔截器足夠再對型一飛彈攔

表四 防禦策略組合計算結果

編號	防禦策略		型一飛彈 零突穿機率	型二飛彈 零突穿機率	無型一且無型二 飛彈之突穿機率
	第一層防禦	第二層防禦			
1	優先防禦型一飛彈	優先防禦型一飛彈	0.2132	0.2263	0.0483
2*	優先防禦型一飛彈	優先防禦型二飛彈	0.2087	0.2468	0.0515
3	優先防禦型一飛彈	隨機防禦	0.2121	0.1124	0.0238
4	優先防禦型二飛彈	優先防禦型一飛彈	0.0564	0.6987	0.0394
5	優先防禦型二飛彈	優先防禦型二飛彈	0.0558	0.7438	0.0415
6	優先防禦型二飛彈	隨機防禦	0.0513	0.7295	0.0374
7	隨機防禦	優先防禦型一飛彈	0.0920	0.4916	0.0452
8	隨機防禦	優先防禦型二飛彈	0.0901	0.5392	0.0486
9	隨機防禦	隨機防禦	0.0881	0.4856	0.0814

*為最佳防禦策略組合，最佳的防禦策略組合為編號2，即第一層優先防禦型一飛彈，第二層優先防禦型二飛彈，可獲致無型一且無型二飛彈之零突穿機率為.0515，為相對最高。



圖七 各層飛彈突穿機率分配

(資料來源：擷取自解算系統輸出畫面)

截，故第二層型一飛彈的零突穿機率可再提升，達到0.2087，其它資訊如突穿8枚型一飛彈之機率由0.1525降至0.0231；故可觀察到型一飛彈在兩層防禦後之突穿機率分配趨勢，明顯向左偏移，而且機率值在數量狀態少處

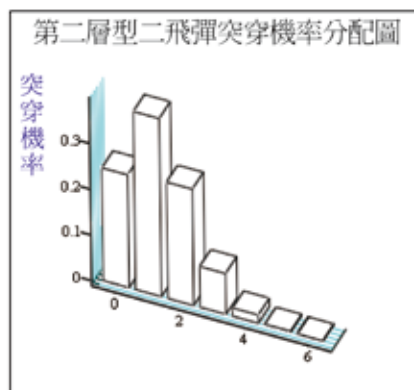
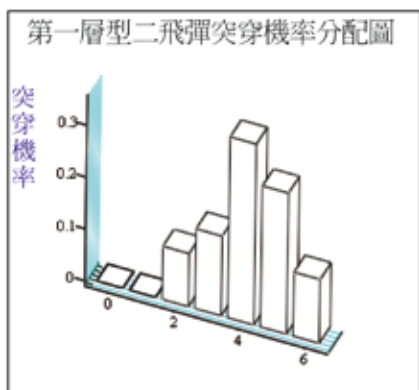
逐漸提升。

2.型二飛彈之突穿機率分配趨勢探討：

輸出經系統解算的各層型二飛彈的突穿機率分配，如圖八。因第一層優先防禦型一飛彈，在A型防禦系統攔截器有12枚且型一飛彈最少可能來襲10枚情況下，最多有剩餘2枚可攔截型二飛彈，故在型二飛彈最少可能來襲4枚情況下，第一層型二飛彈的突穿數量至少2枚(系統解算2枚突穿機率為0.1024)；另第二層優先防禦型二飛彈，在B型防禦系統攔截器有10枚，對型二飛彈的單發擊殺機0.7條件下，第二層型二飛彈的零突穿機率可達0.2468。故可觀察到型二飛彈在二層防禦後的突穿機率分配趨勢，明顯在此防禦策略組合中，第二層對型二飛彈的攔截效益較佳，且突穿機率分配向左偏，機率值在數量狀態少處逐漸提升。

3.飛彈突穿機率細部資訊之探討：

經兩層防禦後型一飛彈的突穿機率情況詳如圖九。以虛線表示型一飛彈突穿第一層防禦後之數量與機率情況，實線表示突穿第二層之數量與機率情況。由各種可能突穿之飛彈數與其對應機率，可得第一層防禦被



型二飛彈之突穿數量之機率分布(第一層突穿)							
數量	0	1	2	3	4	5	6
機率	0	0	0.1024	0.1536	0.3488	0.272	0.1232
型二飛彈之突穿數量之機率分布(第二層突穿)							
數量	0	1	2	3	4	5	6
機率	0.2468	0.3895	0.2544	0.0893	0.0179	1.9E-03	9.0E-05

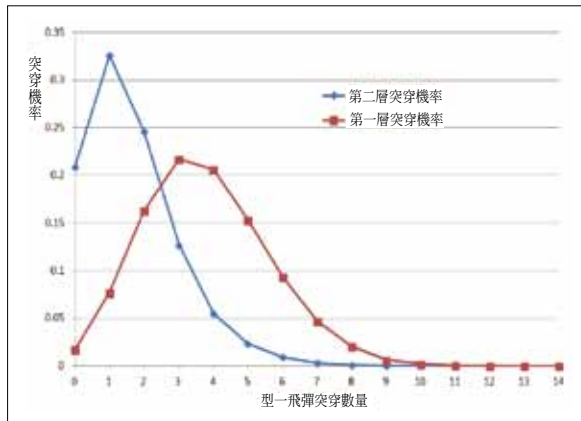
圖八 各層型二飛彈突穿機率分配 (資料來源：擷取自解算系統輸出畫面)

型一飛彈突穿的期望值為3.77枚，第二層防禦被突穿的期望值為1.62枚。若假定防禦目標為被兩枚(含以上)型一飛彈擊中即喪失指揮能力(假定突穿即代表擊中)，則單單以期望值做判斷依據而言，兩層防禦將可符合此防禦目標($1.62 \text{枚} < 2 \text{枚}$)。然而，由本例計算所得資訊可知，在兩層防禦過後，被兩枚(含以上)型一飛彈突穿之機率為($1 - 0.209 - 0.326 = 0.456$)，即表示仍有45.6%的機率防禦目標會被擊中而喪失指揮能力(相對地，有54.4%的機率防禦目標仍保有指揮能力)。故

對決策者而言，上述計算提供了更為細部及精確的資訊，對於下達決策才有實質之參考意義。

4. 型一飛彈與型二飛彈經兩層防禦後之突穿機率分配探討：

若將型一飛彈與型二飛彈的突穿機率分配同時列入考量，其突穿後的機率分配如圖十(利用克洛內克乘積運算)。可看出其突穿機率分配之分布趨勢。第一層因為優先防禦型一飛彈，故型二飛彈之數量突穿機率都很高；經過第二層防禦後，型二飛彈之突穿數量下降。最後，最高突穿機率情況，發生在型一飛彈突穿1枚且型二飛彈突穿也是1枚的情況下，有0.127的突穿機率。



型一飛彈之突穿數量之機率分布(第一層突穿)															
數量	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
機率	0.017	0.077	0.163	0.217	0.206	0.153	0.093	0.047	0.020	0.006	0.002	3.0E-04	3.8E-05	3.0E-06	1.1E-07
型一飛彈之突穿數量之機率分布(第二層突穿)															
數量	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
機率	0.209	0.326	0.246	0.127	0.055	0.023	9.0E-03	3.1E-03	8.9E-04	2.0E-04	3.7E-05	5.0E-06	4.8E-07	2.9E-08	8.2E-10

圖九 兩層防禦後型一飛彈之突穿機率圖

計算機輔助，將所發展的模型理論設計為具使用者操作介面的解算系統，解決使用者對解析模型實際應用的艱澀與排斥感。使用者可透過參數輸入對所想定之防空體系模型進行敏感度分析，經由系統輸出解算結果，供後續運用分析，以期解決防空交戰實務上面臨之管理及決策問題。

另當飛彈防禦系統之攔截器存量充足時，可藉由防禦層射擊準則組合來探討攔截器消耗成本之問題。若以成本考量，則可找出最佳化之射擊準則；若當防禦系統攔截器不足且面臨多類目標來襲時，便延伸出防禦選擇問題。透過本模型之運用，首先可藉由

優先防禦及隨機防禦模式之效益分析，解決多層防禦下面臨防禦能量不足之問題；另當給定攔截器數量與防禦策略時，亦可藉本系統找出最佳防禦策略，解決飛彈防禦系統同時接戰多類目標時之策略選擇問題。

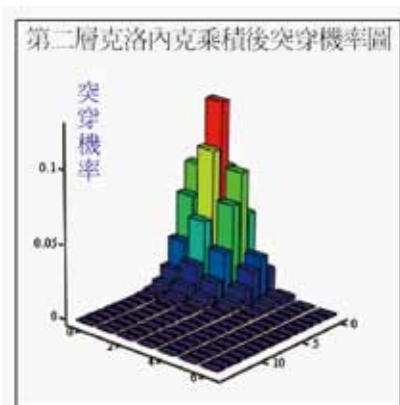
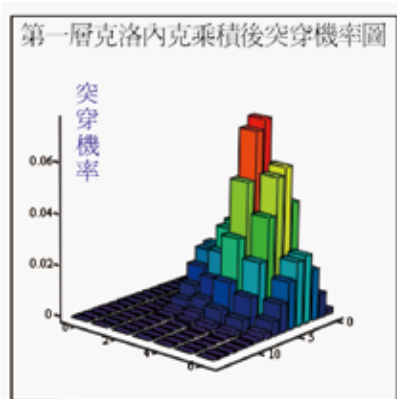
近年來國軍建軍備戰在飛彈防禦項目上多以外購飛彈防禦系統為主，隨著自身研發能力的提升，在國際軍品市場上談判籌碼亦隨之增加，外購成本因而降低，但自力研發亦有時程長及成本高之問題。故無論外購武器或自主研發，飛彈防禦系統之獲得均應以系統分析的觀念來評估其效能並帶入成本效益的觀點，故在初期規劃時可應用本文發展之系統作為輔助評估之工具，期能供國軍於建構防空相應戰力及兵力發展時之參考。

作者簡介

孟昭宇先生，國防大學理工學院64年班、國立政治大學企業管理碩士、國立台灣科技大學工業管理博士；曾任致理技術學院教授、開南大學資訊學院院長及國防大學資源管理及決策研究所所長；現任職國防大學資源管理及決策研究所專任教授。

張珈進先生，空軍備役中校，國防大學理工學院87年班、台灣大學機械研究所碩士、國立中央大學管理學博士；曾任修護官、管制官、教官；現任職國防大學資源管理及決策研究所專任助理教授。

鄧兆延先生，陸軍少校，國防大學管理學院89年班、管理資訊正規班11期；國防大學資源管理及決策研究所碩士，現任職國防部參謀本部飛彈指揮部。



圖十 兩層防禦後被飛彈突穿之機率分配
(資料來源：擷取自解算系統輸出畫面)