

多戰區、多波、多層

彈道飛彈防禦問題探討

孟昭宇* 劉達生** 段伴虬*** 劉基金**

* 致理技術學院企業管理系

** 國防大學管理學院資源管理及決策研究所

*** 南開技術學院福祉科技研究所

提 要

- 一、彈道飛彈防禦模式的過去多以期望值為基礎，雖然獲致了相當多的成果，但仍有若干問題必須藉由機率分配的獲得方能更深入的探討。
- 二、原Menq等所提出之馬可夫鍊彈道飛彈防禦模式，將此一問題的研究從期望值提升到以機率分配為基礎，豐富模式所能提供的資訊內涵。
- 三、本研究以前述模式為基礎，提出在防禦能力與攔截器存量構成限制的情況下，精進原有馬可夫鍊模式，使更接近彈道飛彈防禦實務。
- 四、改良後的防禦模式可計算多波攻擊各波各層的突穿數、攔截器需求數、消耗數、剩餘數之機率分配及無彈可用、攔截器耗盡之機率等。
- 五、以多戰區、多波、雙層防禦、防禦能量與攔截器數量有限想定說明模式運用的結果。

關鍵詞：彈道飛彈防禦、馬可夫鍊、多戰區、多波、多層

壹、前 言

彈道飛彈防禦議題的探討涉及了諸多的因素。從為整個防禦系統建立數理模式的角度來看，此一議題涉及了目標的探測（發現）、識別、追蹤、鎖定、指揮管制、通訊聯絡、彈著預測、目標分派、導引、攔截與

再攔截、攔截結果判斷、系統可靠度、支援系統的支援能力、防禦範圍大小等系統特性，再加上防禦設施的散佈、陣地的佈署等運用因素，形成一個龐大複雜的軍事系統。前述因素還不包含攻擊規模大小、攻擊方式、誘標或多重載具等掌握在敵對一方的客觀因素。

過去對彈道飛彈防禦系統模式的研究，以期望值為主要的研究方法^{註一、註二、註三}。將彈道飛彈防禦問題中的機率現象，以期望值為方法建立模型觀察系統，透過期望值來比較系統參數變化後的結果。固然期望值是一個很好而且簡單的系統指標，但是期望值所能提供資訊非常有限，許多隨機現象無法用單一的期望值來表現；如同射擊問題一樣，準度描述的是彈著平均散佈點與目標的差異；而精度則代表彈著散佈的集中程度。期望值就如同是前述的準度，不能表示隨機散佈範圍的大小。

此外，彈道飛彈防禦問題過去基本上被歸類在被動目標的防禦問題^{註四}，也就是彈道飛彈本身沒有主動的防禦能力，不考慮彈道飛彈對攔截器造成殺傷的可能性；如同派遣戰機攻擊地面上沒有防空能力的車輛或部隊一樣。然而，在多波攻擊的情況下，彈道飛彈可能針對飛彈防禦陣地進行攻擊，即使並未對攔截器本身造成威脅，但對飛彈防禦陣地的攻擊將對防禦方的飛彈防禦能力造成影響，進而提高後續攻擊波的突穿數量。

在本文中將簡單介紹以馬可夫鍊建構彈道飛彈防禦模式^{註五}，此種建模方式不僅可以得出期望值，更可以得到隨機現象的機率分配。將飛彈防禦問題從單純探討期望值的層次提高到同時探討期望值與機率分佈的層次。

此外，本文將運用前述馬可夫鍊建模的

基礎，加上一些模式處理方法，將該模式運用到較複雜的彈道飛彈防禦想定，以探討更複雜、更實際的飛彈防禦問題。此一接近真實的想定中考慮了防禦能量（每波最多可接戰數）限制、攔截器數量限制、多戰區、多波飽和攻擊，並將飛彈防禦陣地列為攻擊目標，使案例想定更接近實務。

貳、馬可夫鍊模式

在繼續討論多層彈道飛彈防禦模式之前，有些名詞必須先加以定義與說明。

攔截器(interceptor)：指用來攔截彈道飛彈的武器，一般是防禦的反彈道飛彈，也可能是雷射、高能粒子、或其他形式的武器。

層(layer)：是一個抽象的概念，對目標（彈道飛彈）一次的攔截循環(look-shoot)代表一層，若某系統只使用一種攔截器，但具有兩次的攔擊機會，則該系統視為兩層。

物體(object)：泛指試圖突穿防禦層的物體，包含了飛彈、彈頭及誘標(decoy)。

目標(target)：被判定(classified)具有威脅，且必須加以攔截的物體稱為目標，包含了被識別(identified)為彈頭的誘標或其他物體。

接戰(engagement)：一次接戰代表對一個目標發射一枚攔截器。

射擊準則(fire doctrine)：指對一個目標同時（或幾乎同時）發射幾枚攔截器的接戰規則，也就是對同一個目標要接戰幾次。

註一 Wilkening, Dean A. (1999), "A Simple Model for Calculating Ballistic Missile Defense Effectiveness," Science & Global Security (Philadelphia, PA: Taylor & Francis, Inc.), Vol. 8:2 (1999), p.183.

註二 Larson, Eric V., Kent, Glenn A. (1994), A New Methodology for Assessing Multilayer Missile Defense Options (Santa Monica, CA: RAND, 1994), p.2.

註三 Przemieniecki, John S., Mathematical Methods in Defense Analyses (Ed. 3)(Reston, Virginia: AIAA, 2000), pp.143~146.

註四 Gupta, Raj, Defense Positioning and Geometry: Rules for a World with Low Force Levels (Washington, D.C.: The Brookings Institution, 1992), pp. 123~169.

註五 Menq, Jau-yeu, Tuan, Pan-chio and Liu, Ta-sheng, "Discrete Markov Ballistic Missile Defense System Modeling," European Journal of Operational Research (Oxford, UK), Vol. 178, Issue 2 (2007), pp.560~578.

攔截(intercept)：依據射擊準則(fire doctrine)，一次攔截包含了一次或多次接戰。

狀態(state)：指所要探討物體(object)的數量。

攔截能量(capability)：彈道飛彈防禦系統可同時對來襲飛彈進行攔截的最大數量。

過去馬可夫鍊隨機過程曾被用來探討同時考慮機率與時間因素的軍事問題，如殺傷率(attrition rate，每個單位在單位時間內可擊毀對方的單位數)^{註六}、戰車交戰時擊毀對手所需時間的期望值^{註七}等較屬於戰鬥層次的模式探討。而本文所探究的問題則屬戰役層次，也就是想了解：整個彈道飛彈攻防作戰結束後會有多少枚彈道飛彈突穿防禦？因此，模式建立的過程略有不同。

Menq等^{註八}所提出的研究方法以離散馬可夫鍊過程建立多層彈道飛彈防禦模式，該模式考慮了來襲數量不確定（隨機分配）、多重載具、誘標、識別誤差、射擊準則（對每一彈道飛彈發射幾枚攔截器）、攔截與存量成本等因素，其研究結果具有相當高的實用性。首先將其研究成果概述如下。

該模式的馬可夫鍊的「狀態」定義為「數量」，屬於一種離散狀態，依所關心事件的不同，對狀態的定義略有不同。在描述識別過程的馬可夫鍊機率移轉矩陣（識別矩陣）的「行」(row)狀態定義為真實彈頭或誘標的數量，而「列」(column)狀態則定義為識別結果的數量。在描述攔截器攔截過程的行狀態定義為進入該防禦層的目標數量，列狀態則是通過該防禦層的存活數量。簡單的馬可夫鍊防禦過程如圖一所示。

將圖一以數學式表示則如第(1)式，以防

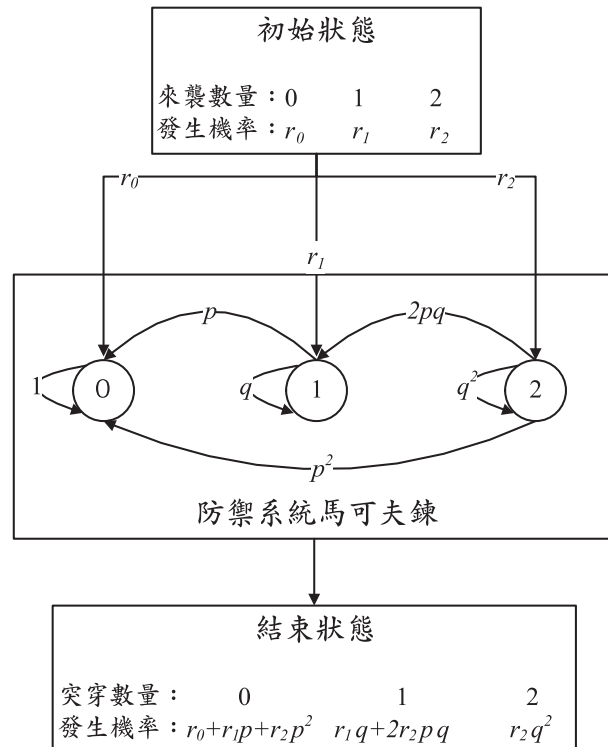
禦層的突穿向量作為下一層的初始狀態。依序遞延，則此一觀念即可擴充至多層防禦問題。此一概念貫穿其整個建模過程，加上類似的識別矩陣及識別結果，所獲得的最終模式不僅可以分析突穿數量的機率分配，還可以依據射擊準則，計算攔截器消耗數量的機率分配、攔截器浪費（因將誘標識別為彈頭）及攔截風險（將彈頭識別為誘標而沒有進行攔截）。較以往以期望值為基礎的方法提供更深入的飛彈防禦相關資訊。

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ p & q & 0 \\ p^2 & 2pq & q^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 + r_1p + r_2p^2 & r_1q + 2r_2pq & r_2q^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

來襲向量 × 防禦矩陣 = 突穿向量

然其研究之基本假設前提為：防禦能量沒有限制（彈道飛彈防禦系統可以攔截所有來襲飛彈）。這樣的情形使得該模式較適合

圖一 馬可夫鍊防禦示意



註六 同註三，p.77。

註七 劉達生、孟昭宇、管孟忠，「戰車反裝甲武器之比較研究——藍徹斯特方程式及馬可夫鍊之應用」，2003年整體後勤研討會論文集（臺灣，桃園），民國92年10月，pp.684-697。

註八 同註五。

於單波攻擊的狀況，若要探討超飽和攻擊（攻擊飛彈數量超過所能攔截的上限），及攔截器數量有限且低於防禦需求時，則該模式仍力有未逮。

參、問題描述、處理與假設

在實際防務中，超飽和攻擊的情況是非常可能發生的。飛彈防禦系統防禦能量的限制可能來自於：可追蹤目標數的上限、可導引攔截器數量的上限、單次可發射的攔截器最大數量等。當來襲數量遠大於防禦系統的攔截能量時，防禦能量所帶來的限制則必須加以考慮。

其次，當飛彈防禦系統陣地為彈道飛彈的攻擊目標，突穿防禦的彈道飛彈對防禦系統將構成危害，而使得原有的防禦能量降低；而突穿防禦的彈道飛彈數量又是隨機分布的。因此，模式也必須要能處理隨機分布的防禦能量問題。

除了防禦能量外，在多波攻擊的情況下，面對每一波攻擊時的可用攔截器數量是在遞減的。同樣的，攔截器數量不足時，會使得攔截效能降低；而攔截器數量也因為來襲數量的不確定（隨機分配），也形成一個機率分配，模式也必須要能處理隨機分配的可用攔截器數量的問題。

綜合前述，限制飛彈防禦系統防禦能力的因素有兩個，一個是防禦能量，一個是攔截器存量。而在作戰過程中，兩者都是隨機的。此外，當陣地遭受攻擊時，防禦能量也會因為突穿飛彈造成的損傷而遞減。

由於飛彈防禦陣地易損性的問題並不在本文的討論範圍內，因此以一個假設處理飛彈防禦陣地遭受攻擊下的防禦能量變化問題。假設：突穿且命中防禦陣地的飛彈數量累積到一定程度時，該陣地的防禦能力將會被完全瓦解；而在防禦能力完全被瓦解的過

程中，防禦能量與突穿飛彈數量成一函數關係。為利後續模式運作的方便，假設此一函數如第(2)式。

$$Cap_M = \text{round} \left\{ Cap_0 \times \left[1 - e^{\left(-\frac{M_0}{M} \right)} \right] \right\} \quad (2)$$

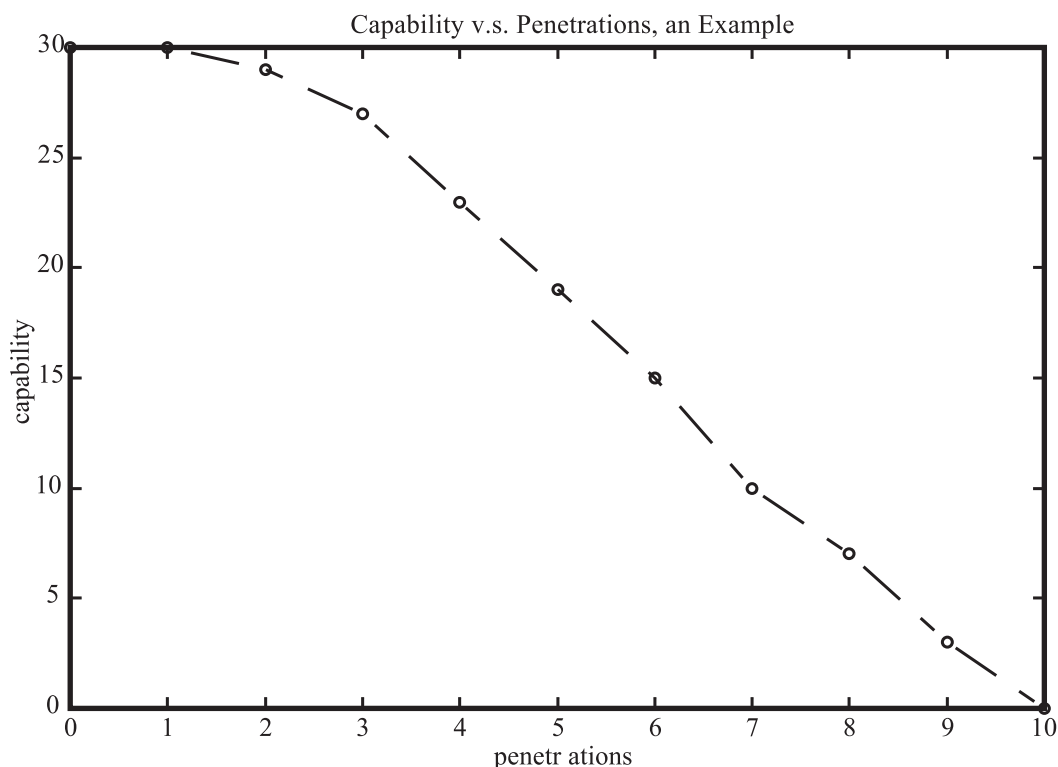
上式中 Cap_0 為該防禦陣地的初始防禦能量（單次可攔截飛彈的最大數量）； M_0 為使該陣地防禦能力完全瓦解（防禦能力為0）的最小突穿飛彈數（假設突穿即命中），本文中稱之彈道飛彈防禦陣地的「攻擊耐受度」； M 為累計命中陣地的飛彈數， Cap_M 為命中數量為 M 時的陣地防禦能量；由於模式對狀態的基本定義為數量，因此，以四捨五入取整數求得防禦能量 Cap_M 。第(2)式純粹為假設的函數關係，並非依據易損性分析所獲得的結果，此一假設無法準確描述飛彈防禦陣地的防禦能量與被命中數的關係；但卻能簡單描述出防禦能量隨命中數的增加而遞減的概念，如圖二所示。當更精確的防禦能量與命中數的函數關係獲得後，可以提高模式的精準程度，在此並不影響模式的基本架構。

在處理防禦能力的限制因素（目前考慮防禦能量與攔截器存量）時，其核心問題在於：限制因素產生時，對防禦矩陣有何影響？要解釋這個問題，先考慮一個簡單的狀況：某一彈道飛彈防禦系統的防禦能量為3，其射擊準則為1（對1枚來襲飛彈發射1枚攔截器），且攔截器存量充沛，若來襲的飛彈亦為3，則沒有任何限制因素存在，此時的防禦矩陣如下：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p & q & 0 & 0 \\ p^2 & 2pq & q^2 & 0 \\ p^3 & 3p^2q & 3pq^2 & q^3 \end{bmatrix}$$

若因為某種因素，該防禦系統防禦能量

圖二 防禦能量與命中數關係示意



限制，則限制因素是防禦能量；反之，限制因素是攔截器存量。要注意的是考慮攔截器存量時必須同是考慮射擊準則，因為存量除以射擊準則的結果才是真正造成限制的數值。經過這些假設與處理之後，馬可夫鍊的飛彈防禦模式便可以用來處理更接近真實狀況的作戰想定。

減為2，或攔截器存量僅剩2枚。此時將只有2枚飛彈會遭到攔截，剩餘1枚來襲飛彈不會遭到攔截。因此，防禦矩陣則必須修改。修改防禦矩陣首先考慮矩陣的維度，由於來襲數量為3，因此，防禦矩陣必須維持4×4的型態，但來襲數量超出防禦能力的數量有1枚不會被攔截，此時防禦能量不足的馬可夫鍊如圖三。

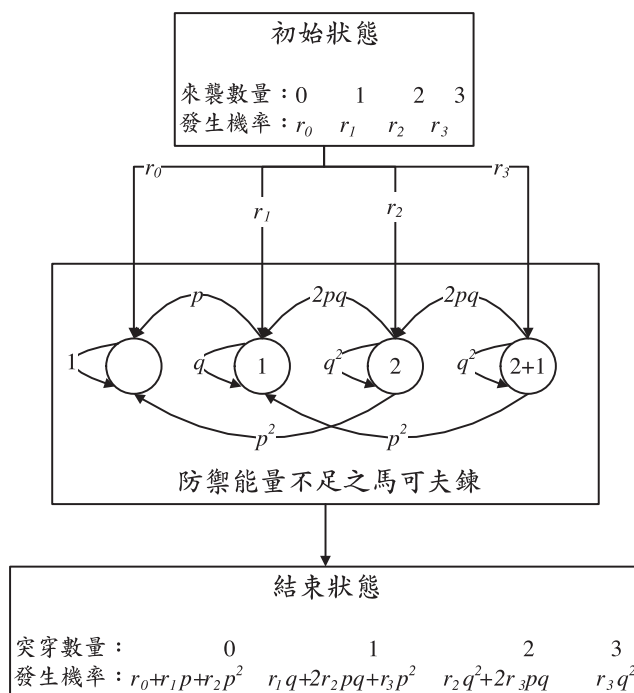
在圖三中，由於防禦能量不足，3枚來襲飛彈中僅有2枚被攔截，這2枚被攔截的飛彈其機率分配與來襲數量為2的情況一樣。若以數學式表達，則如第(3)式所示。

由第(3)式的防禦矩陣可以看出，第4行的機率分配恰為第3行非零值的機率分配向右位移一個元素位置。若來襲數量更多時，可以同樣的原則處理。

同前所述，限制因素不僅是防禦能量，也可能是攔截器存量不足，若有多重限制因素存在，則最終造成限制的因素自然是數值最小的一個。例如，防禦能量<攔截器存量

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p & q & 0 & 0 \\ p^2 & 2pq & q^2 & 0 \\ 0 & p^2 & 2pq & q^2 \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} r_0 + r_1 p + r_2 p^2 & r_1 q + 2r_2 p q + r_3 p^2 & r_2 q^2 + 2r_3 p q & r_3 q^2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (3)$$

圖三 防禦能量不足之馬可夫鍊



肆、彈道飛彈攻防想定

Menq等所提出的模式在對識別誤差與存在誘標的論述已相當完備，因此，在想定中不將識別誤差與誘標因素納入，只突顯改進後模式對多波攻擊與限制因素處理的能力。

攻擊想定：

彈道飛彈均為單一彈頭、無誘標、彈頭與彈體不分離，總數800枚。區分五波，重點為對方四個戰區內的戰略目標，但首波針對各戰區飛彈防禦(ATBM, Anti-Tactical Ballistic Missile)陣地攻擊，以降低其飛彈防禦能力，減少後續攻擊波次被攔截數量，有利整體攻擊效果。彈道飛彈分配如表一。

防禦想定：

四個戰區分別配屬相同的ATBM系統，配置方式及相關諸元如表二。

依據前述想定，想了解彈道飛彈攻防作戰結果如何？在第一波攻擊後，ATBM的防禦能量如何？攔截器是否足夠？等問題。

伍、計算結果與討論

由於問題解算過程涉及大量矩陣運算，因此，採用MATLAB數學語言為工具，編寫計算程式解算運算結果，並繪製相關圖形呈現。

首先整個攻防的結果如圖四。圖四a.為各戰區第一波攻擊的突穿數量機率分配，由於第二及第三戰區(zone 2及zone 3)各項條件均相同，因此，其機率分配一致。在第四戰區(zone 4)由於首波攻擊的最小可能突穿數量為10，也就是在第一波攻擊中，第四戰區所承受的彈道飛彈命中數量已超過該戰區

表一 彈道飛彈攻擊分配

戰區/波次	第一波	第二波	第三波	第四波	第五波	小計
第一戰區	60	60	60	60	60	300
第二戰區	30	30	30	30	30	150
第三戰區	30	30	30	30	30	150
第四戰區	40	40	40	40	40	200
小計	160	160	160	160	160	800
針對目標	ATBM 戰略目標					

表二 防禦方飛彈攔截能力與攔截器數量配置

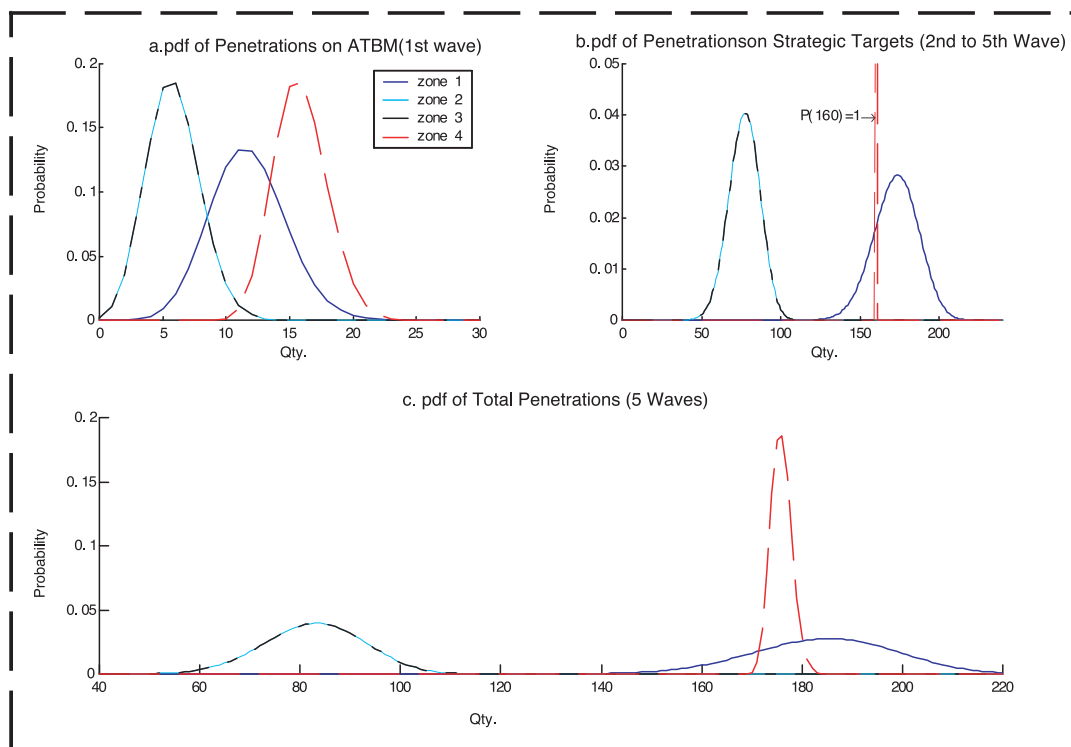
戰區\區分	單發擊殺率	構成層數	射擊準則	初始防禦能量 Cap ₀	攻擊耐受度 M ₀	攔截器量
第一戰區	0.7	2	(1, 2)	30	20	200
第二戰區	0.7	2	(1, 2)	15	10	125
第三戰區	0.7	2	(1, 2)	15	10	125
第四戰區	0.7	2	(1, 2)	15	10	150
說明與假設：						
1. 所採用ATBM系統可對來襲飛彈攔截兩次，亦即可構成兩層防禦。						
2. 射擊準則中兩個數值分別代表第一次及第二次的攔截器發射數量；即對來襲飛彈的第一次攔截發射1枚攔截器，第二次攔截則發射2枚。						
3. 假設突穿即命中。						

ATBM系統的攻擊耐受度，因此，其防禦能力將完全被瓦解，並導致後續四波攻擊的彈道飛彈（共160枚）在沒有遭到攔截的情況下全數落在戰略目標上（圖四b.）。而第一至第三戰區則可能保有部份的防禦能量，其突穿數量的分配呈近似常態分配。圖四c.為五波攻擊的總突穿數機率分配。由於攻擊數量與防禦能量的差異四個戰區呈現不同的機率分配（第二及第三戰區一致）。

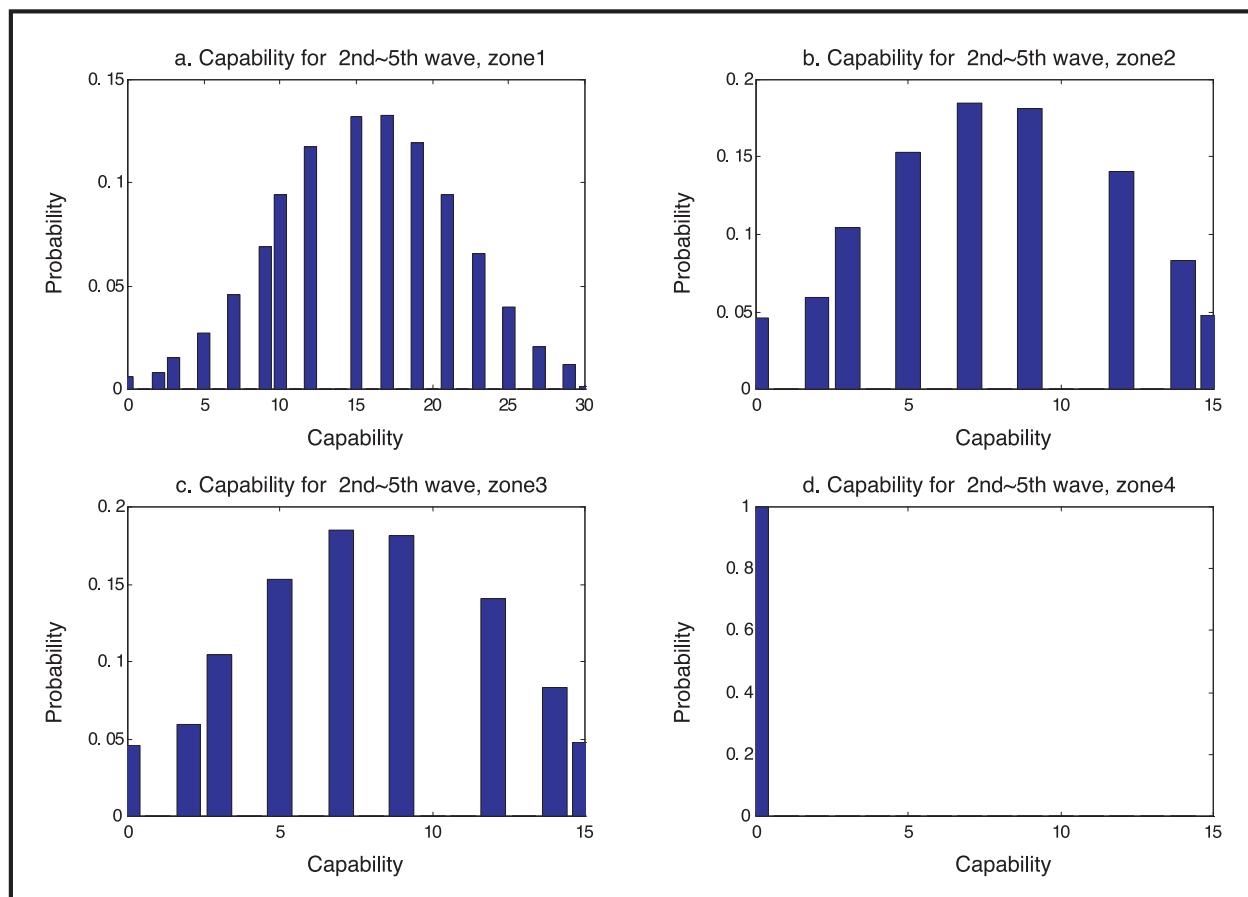
第一波攻擊後，各戰區的ATBM系統初始防禦能量不同，且毀損狀況（取決於突穿數量）不同，因此，防禦能量也有差異，如圖五所示。顯然第四戰區的防禦能力在首波攻擊後完全喪失，而第一至三戰區的防禦能量機率分配（圖五a.、b.及c.）則接近鐘形分配。

圖六之四個子圖表示出攔截器需求

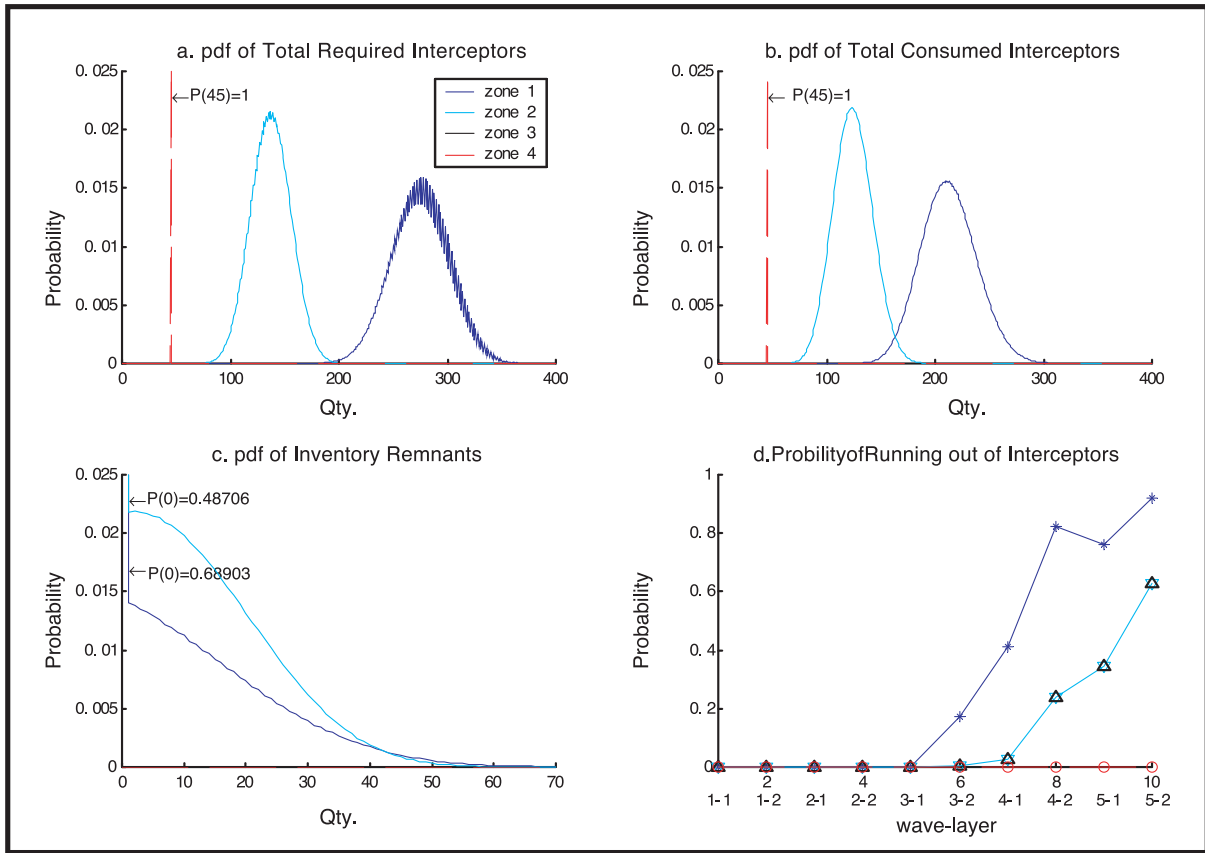
圖四 攻防作戰結果



圖五 遭受第一波攻擊後的防禦能量機率分配



圖六 攔截器需求、消耗、剩餘與無彈可用機率



(圖六a.)、攔截器消耗量 (圖六b.)、攔截器剩餘量 (圖六c.) (五波攻擊之後) 的機率分配與各波各層無彈可用機率 (圖六d.)。在攔截器需求部份，第四戰區由於ATMB在第一波攻擊後已被擊毀，防禦能量為0，因此，第二至五波不會有攔截器的需求，其總需求量為第一波的需求量 (45枚)。

第四戰區的攔截器消耗量為第一波消耗掉的確定值45，由於第一波攻擊後防禦能量完全喪失，因此，第二至第五波沒有任何攔截器需求與消耗，因此，剩餘數為確定值105 (並未在圖六c.中呈現)。圖六c.可以看出，第一戰區在五波攻擊後，所有攔截器全部耗盡的機率為68.9%；而第二與第三戰區則為48.7%。

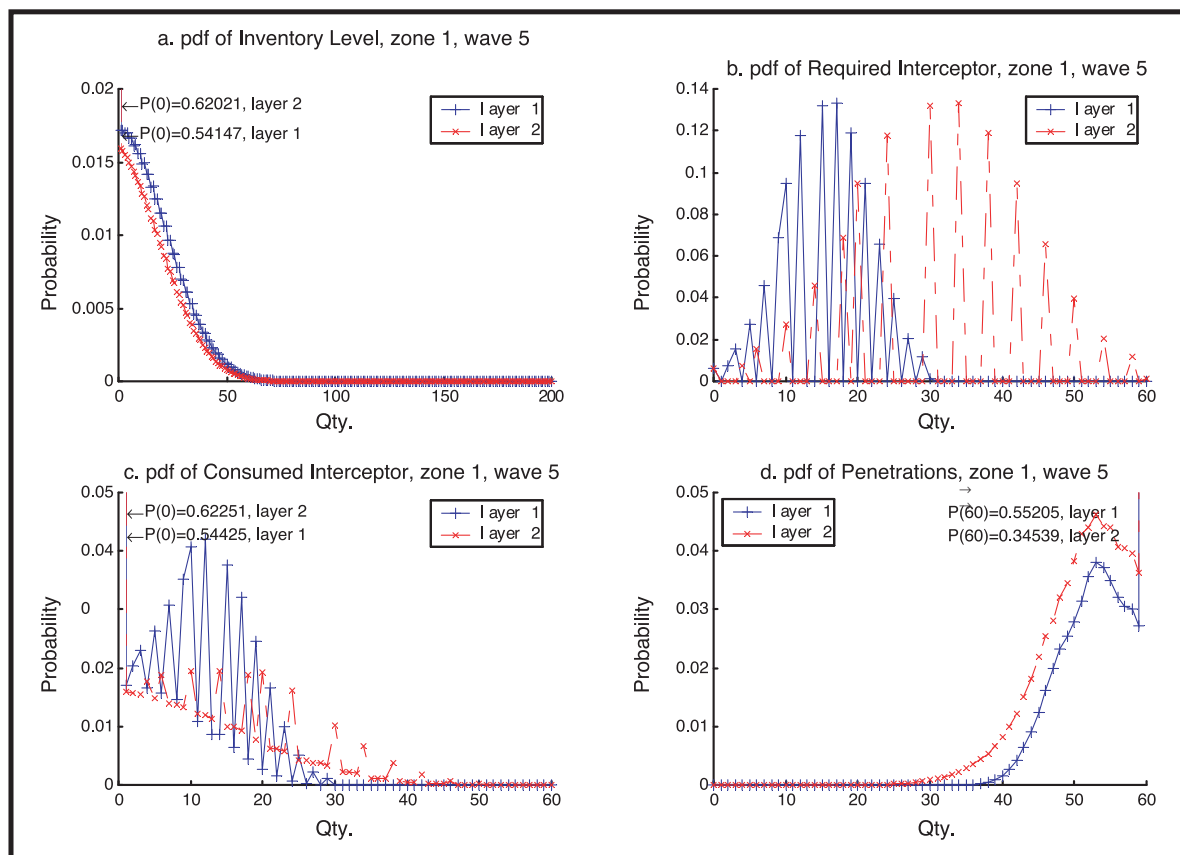
需注意的是，無彈可用機率與攔截器耗盡機率的定義不同。攔截器耗盡的機率單純指攔截器剩餘存量等於0的機率；而無彈可

用機率則比較複雜。所謂無彈可用是指需求量大於存量，而需求量或存量都是隨機分布的數量；例如圖七a.及b.表示第一戰區面臨每波攻擊時攔截器存量與需求量的機率分配。無彈可用則是將所有可能的存量與需求量兩兩比較後，將需求大於存量的機率累加起來得出無彈可用機率，表達如第(4)式。

$$P\{Inventory < Requirement\} = \sum_{inv=0}^{Inv} \sum_{req=0}^{Req} p\{inv < req\} \quad (4)$$

第(4)式中 Inv 與 Req 分別為最大可能存量及需求量。因此，雖然五波攻擊後第一戰區只有68.9%的機率會將所有的攔截器耗盡，但再在五波第二層時卻有高達91.8%的機率會發生攔截器不敷使用的狀況 (無彈可用，圖六d., 5-2)。伴隨而生的是第五波有高達34.5%的機率60枚來襲飛彈全部突穿 (圖七d.)。

圖七 第一戰區第五波第一及第二層
攔截器存量(a.)、需求量(b.)、消耗量(c.)與突穿向量(d.)



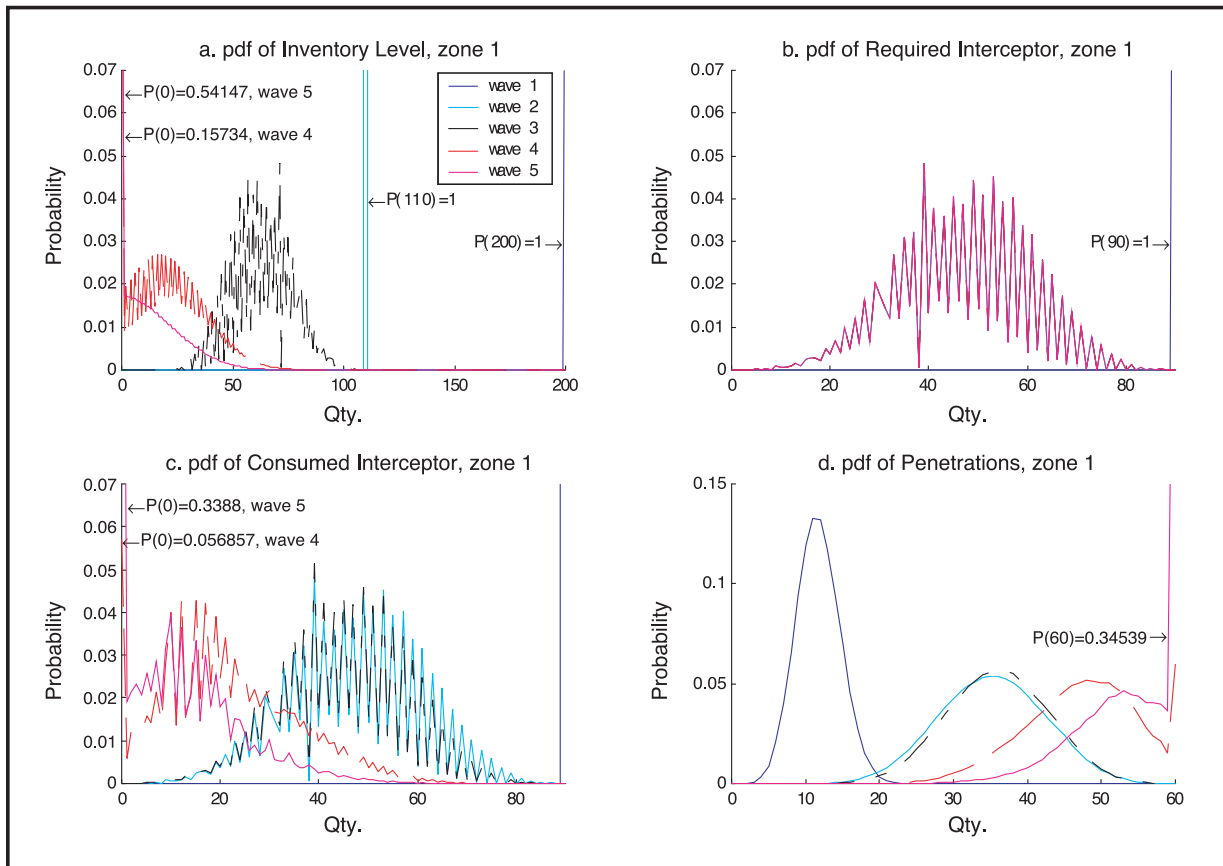
圖七顯示了各層攔截器存量、需求量、消耗量與突穿向量(以第一戰區第五波為例)。圖七a.顯示第五波攻擊時有54.147%的機率第一戰區攔截器存量為0(第一層);經過第一層的消耗,到了第二層則提高到62.021%。圖七b.顯示第一及第二層各別的需求向量。圖七c.則可以看出第一層有54.425%的機率沒有消耗任何攔截器(因為沒有攔截器,或沒有需求);第二層則為62.251%。

將兩個防禦層個別的攔截器存量、需求量、消耗量與突穿向量整理成該攻擊波總和的機率分配,則可得圖八(以第一戰區為例),第一波攻擊時的存量為確定值200,而消耗量為確定值90(因為來襲數量與防禦能量均為確定值,且來襲數量大於防禦能量,在第一層時耗用30枚攔截器攔截60枚中的30枚飛彈;進入第二層防禦得存活飛彈最小數

量仍大於或等於防禦能量,因此,在第二層耗用60枚攔截器攔截進襲飛彈中的30枚,共消耗90枚,如圖八b.)。因此,面臨第二波攻擊時的存量剩下確定值110。

由於第一波攻擊後彈道防禦能量已成隨機分佈(如圖五a.),而此一防禦能量機率分配持續到第五波攻擊完畢(第二至五波並不攻擊防禦陣地),因此,二至五波攔截器需求量的機率也成固定的分配(圖八b.)。圖八c.為實際攔截器的消耗量,顯然受到攔截器存量的限制,致使第四及第五波攔截器消耗量機率分配遞減(機率曲線向左移)。由於第五波的初始攔截器存量(第五波第一層的存量)有54.147%的機率為0,第二層則有62.021%的機率存量為0;而使第五波兩層防禦的總消耗量有33.88%的機率沒有消耗任何攔截器。圖八d.則顯示各波的突穿向量,第

圖八 第一戰區各波攔截器存量
(a.)、需求量(b.)、消耗量(c.)與突穿向量(d.)



五波中所有來襲的60枚飛彈全部突穿的機率為34.539%（與突穿第二層的機率分配相同，圖七d.）。

將各戰區、各波、各層的攔截器存量、需求量、消耗量與突穿向量的期望值整理成圖九。橫軸有兩組座標標示，其一為序號，其二則標示出波次——層次。圖九a.的第11個資料點顯示五波攻擊結束後，攔截器剩餘數量期望值，顯示除第四戰區外，其餘三個戰區在五波攻擊後，耗盡所有攔截器。圖九b.可以看出除了第一波攻擊外，各戰區二至五波的需求數量是一至的（攻擊量及防禦能量機率分配均固定）。圖九c.可以看出，受限於攔截器存量因消耗而遞減，使得攔截器的消耗量也隨之遞減。而突穿數量期望值則呈遞增趨勢（圖九d.）。

綜合前述說明，將此案例攻防結果整理

如下：

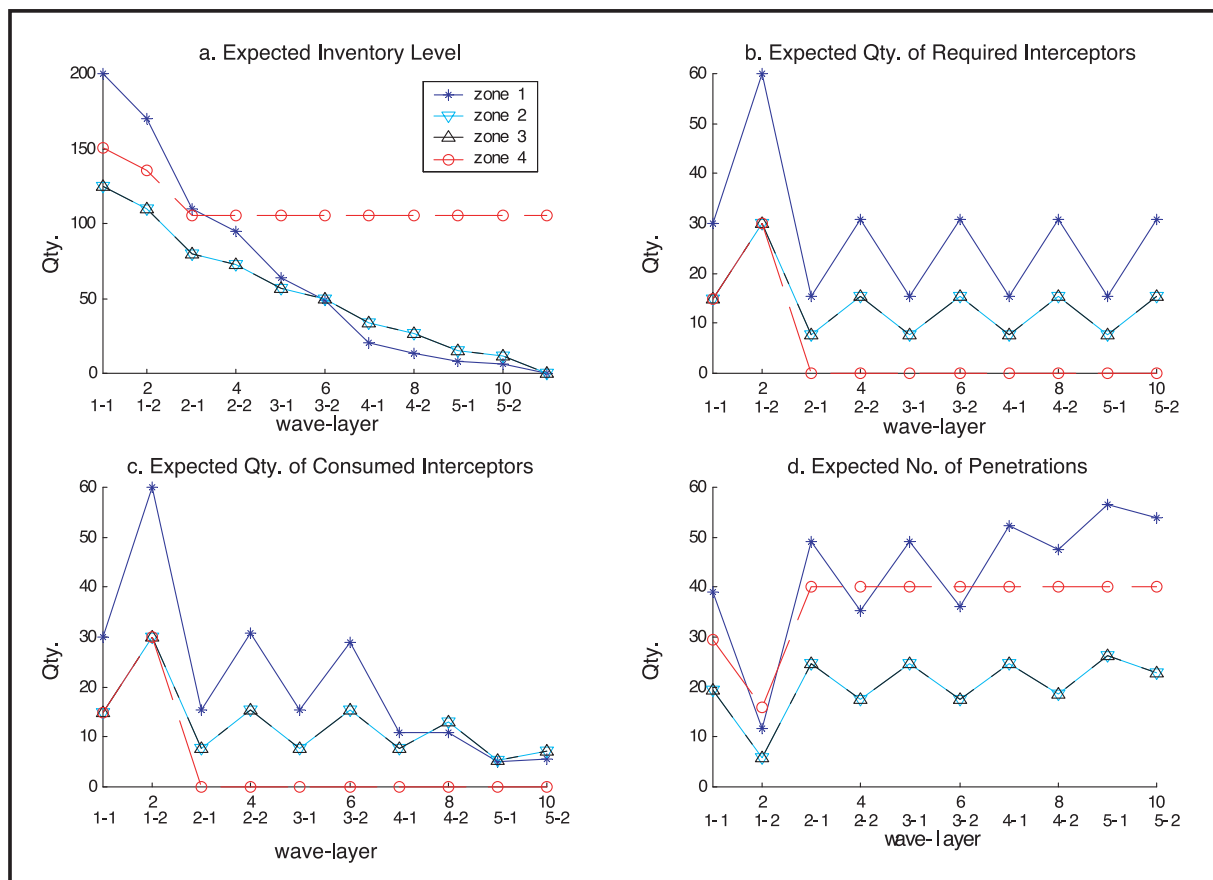
一、攻擊方首波對彈道飛彈防禦陣地的攻擊完全瓦解了第四戰區的防禦能力，第一至第三戰區防禦能量則僅存約50%，如表三；攔截器耗盡的機率如表四。

二、依據攻防雙方的配置，除了防禦能量形成限制之外，從第三波第二層開始，攔截器存量形成限制，如表五。第四戰區由於第二波開始已不具防禦能力，其限制因素是防禦能量（等於0），而非攔截器存量（存量尚有105枚）。

三、第一、二及三戰區的攔截器全部耗盡，第四戰區剩餘105枚攔截器，攔截器使用率約82.5%，攔截器初始存量與剩餘量如表六。

四、各戰區突穿飛彈數量機率分配如圖四c.，各戰區各波來襲數量與突穿數量期望

圖九 各戰區各波、各層的攔截器存量、需求量、消耗量與突穿數量期望值



表三 第一波攻擊前後防禦能量期望值

戰區	第一戰區	第二戰區	第三戰區	第四戰區
初始防禦能量	30	15	15	15
第一波攻擊後	15.40	7.69	7.69	0

表四 五波攻擊後各戰區攔截器耗盡的機率%

戰區	第一戰區	第二戰區	第三戰區	第四戰區
機率	68.90	48.71	48.71	0

表五 各戰區、各波、各層無彈可用機率%

戰區\波\層	第一波		第二波		第三波		第四波		第五波	
	層一	層二	層一	層二	層一	層二	層一	層二	層一	層二
第一戰區	0	0	0	0	0	17.04	41.30	82.29	75.96	91.82
第二戰區	0	0	0	0	0	0.25	2.51	23.94	34.69	63.03
第三戰區	0	0	0	0	0	0.25	2.51	23.94	34.69	63.03
第四戰區	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表六 攔截器使用狀況

區分\戰區	第一戰區	第二戰區	第三戰區	第四戰區	合	計
初始存量	200	125	125	150	600	
剩餘量	0	0	0	105	105	
使用率	100%	100%	100%	30%	82.5%	

值如表七，突穿機率約65.69%。

陸、結 語

本文於第二節中簡要說明彈道飛彈防禦的馬可夫鍊模式；於第三節中介紹了如何處理防禦能量與攔截器存量限制的方法，使馬可夫鍊彈道飛彈防禦模式更趨完整，而具備了探討限制因素存在時，多戰區、多波彈道飛彈防禦問題的能力。並於第五節中依據第四節所提出的攻防想定進行分析，展現了模式對探討此類問

表七 各戰區各波總突穿數期望值

戰區 \ 波		第一波	第二波	第三波	第四波	第五波	小計	突穿 %	合計	突穿 %
第一戰區	來襲	60	60	60	60	60	300	61.41	來襲 800 突穿 525.51	65.69
	突穿	11.70	35.21	35.99	47.40	53.95	184.24			
第二戰區	來襲	30	30	30	30	30	150	55.14		
	突穿	5.83	17.62	17.62	18.68	22.96	82.71			
第三戰區	來襲	30	30	30	30	30	150	55.14		
	突穿	5.83	17.62	17.62	18.68	22.96	82.71			
第四戰區	來襲	40	40	40	40	40	200	87.93		
	突穿	15.85	40	40	40	40	175.85			

題詳盡而豐富的內涵。

所提出來的想定為固定的攻防方案，若要探討不同的攻防配置與方式，譬如攻方增加第一波對第一至第三戰區的攻擊量，則有可能將四個戰區的防禦能量全部瓦解，而使後續攻擊波能在沒有防禦的情況下攻擊戰略目標；反之，防禦方也可能改變防禦資源的配置，以加強部份戰區的防禦。或者，防禦方也可以估計面對已知總攻擊量的情況下，如何配置或部署防禦設施，必要時增加攔截器數量或提升防禦能量。而這些問題不僅可以適用在如第四節所提出的兩層防禦問題，更可以擴充到三層以上的多層防禦問題。

彈道飛彈防禦問題的另一個可能的限制因素在於防禦系統所能提供防禦面積的大小。例如，防禦系統對接近防禦面中心的某些設施可以提供二層防禦，但對某些位於較外圍的設施則可能僅能提供單層防禦，甚至無法提供防禦。

最後，防禦陣地與重要戰略設施的易損性研究也是本議題另一個要解決的問題，若能精確描述特定彈道飛彈對特定目標造成損傷的函數，則第(2)式的假設將被真實的函數所取代，提高本模式的精準程度。

收件：96年06月04日
修正：96年07月10日
接受：96年07月23日

作者簡介

劉達生陸軍中校，國防大學理工學院國防科學研究所博士；曾任陸軍司令部督察室督察官、陸軍飛彈光電基地勤務處野戰防空所所長、技術室主任、陸軍後勤司令部保修署主件補給官；現任助理教授。

孟昭宇，國立臺灣科技大學工程技術研究所博士；曾任開南大學資訊學院教授兼院長、國防大學國防管理學院資源管理研究所教授兼所長；現任致理技術學院企業管理系教授。

段伴虬，美國北卡羅萊納州立大學航太及機械系機械工程博士；曾任國防大學中正理工學院兵器系統工程系教授；現任南開技術學院福祉科技與服務管理研究所教授兼所長。

劉基金，臺灣大學商學研究所博士；現任國防大學管理學院資源管理及決策研究所助理教授。