

建構電子戰場圖層模式之研究 -以衰落通道統計模式為例

作者/張振寧 上校

提要

二十一世紀的戰爭是以電子戰為主軸的戰爭，其戰場包括陸、海、空及水面下之三維作戰空間，電子戰場是縱橫連貫此三維作戰空間的第四維作戰空間。電子戰場中電磁波是否能順利傳遞，須有賴如地圖般之電子戰場圖，方可得知電磁訊號之傳輸路徑順暢與否，進而可依據已知之電子戰場圖，運用通道特性，可有效發揮通信裝備之能力，並作為通信系統先期籌建與規劃之基礎。

本文運用地理資訊系統之圖層概念，希建構適用於模式模擬之網格式通信通道圖層，以提供網格區域之通信品質狀況，作為模式模擬系統參數運用。本文首先簡介電子戰場中通信通道，並藉由數學模式，探討電磁訊號特性。同時提出通道參數估測演算法，提供量測數據的參考，以掌握電子戰場之相關特性。

壹、前言

「戰場狀況、瞬息萬變」，「知己知彼、百戰不殆」，在戰爭中，勝利者總是能即時地廣集情資並精析研判，洞悉戰場上的微妙變化。二十一世紀的戰爭是以電子戰為主軸的戰爭，其戰場包括陸、海、空及水面下之三維作戰空間，電子戰場是縱橫連貫此三維作戰空間的第四維作戰空間。然而電子戰場是看不見的，由負責傳遞電磁波的無形通道(Channel)所組成，電磁波在電子戰場中行進，猶如在地面上之汽車、火車，必須經由各種公路、鐵路所組成的交通網，方能到達目的地。地面上交通網之構連，僅須利用各種已知的地形、地勢圖即可規劃達成，但電子戰場中電磁波是否能順利傳遞，則有賴如地圖般之電子戰場圖，方可得知電磁訊號之傳輸路徑順暢與否，進而可依據已知之電子戰場圖，運用通道特性，有效發揮電戰裝備之能力，同時可建構有利我方之電子戰網路，作為電子戰先期規劃之基礎。

電子戰場是所有指管通資情監偵(Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, C4ISR)作為的平台，在「有效嚇阻、防衛固守」之戰略指導下，就電子戰而言，「防衛固守」的基本工作即是量測電子戰場的特性，以瞭解台、澎、金、馬等不同區域其電磁環境的性質。台灣南部多平原，北部多丘陵，中央山脈阻隔東、西，又大都會如北、高

二市建築物高聳密集，這些不同地形造成對電磁環境不同的影響。當我們能掌握不同地形的各種通道特性後，表示我們在通訊品質掌控上，能以最小的成本獲得最大的效益，在裝備使用、人員數量上朝「量少、質精」、「以寡擊眾」的方向，達到「有效嚇阻」之目的。

過去的戰場經驗，從波灣戰爭至反恐怖戰爭其共同的特色是裝備電子精密導引系統的飛彈大量被使用，但是仍無法確保可以命中目標。就算裝置全球定位系統(Global Position System, GPS)導引的聯合直接攻擊彈(Joint Direct Attack Munition, JDAM)，因標榜其投射精準又稱為「精靈炸彈」(smart bomb)，也發生數起「誤炸事件」。就理論而言，只須在空中利用氣球，放置數枚干擾器以干擾 GPS 訊號，便可以使精靈炸彈不精靈而達到「誤炸」的效果。因此電子戰場特性量測，除了有利我方無線通訊網建立外，更可規劃干擾裝置使其能互補遺漏，有效降低電子導引武器之威脅。

「作戰靠指揮，指揮靠通信」一語突顯出通信在戰爭中所扮演角色之重要性。而通信之成敗，除端視新式裝備與新世代技術的掌控外，環境因素更主宰了通信品質之良窳。在中華民國 95 年國防報告書指出，C4ISR 為未來軍事投資的重點項目之一。而通信是 C4ISR 中之神經骨幹，通信品質受影響，則 C4ISR 在戰場中之整體效益無法發揮完全發揮，致使戰力受損。

美空軍中將洛克在「戰場知識優勢」序文道：「在未來多維戰場上，隨著偵測感應器及各種資訊裝置的密集度、靈敏度和鏈結能力的增加，可使部隊『即時』看到任何有價值的資訊。這種掌握作戰空間資訊能力的提昇，無疑是作戰時的一項重大有利條件，但同時產生另一個問題：我們要如何獲得『戰場知識優勢』的能力呢？」¹本文希藉由數學模式推導，探討電磁訊號在通道中之特性及其對通信系統性能的影響，同時提出通道參數估測演算法，提供電子戰場圖量測的參考，以掌握電子戰場之相關特性，提供指揮官創造出「戰場知識優勢」，達「有效嚇阻、防衛固守」之戰略目的。最終，提出建構模式模擬電子戰場圖層之構想，作為模式模擬與兵棋推演之運用參考，期提供更精準之決策參考。

貳、本文

一、研究動機與背景

運用兵棋系統，設想可能狀況並進行推演，是現代戰爭必採之手段；然而在現有兵棋系統(包含推演式與分析式)所運用的參數中，通信品質這項因素往往

¹ 陳克仁譯，戰場知識優勢，台北：空軍總司令部，1990。

因不易模式化，且難以證明其為戰爭決勝之關鍵要素，故而兵棋系統往往未就通信品質與戰力及戰損評估之關係進行模擬分析。然通信在戰爭中的重要性無庸置疑，但如何與現有的兵棋整合運用，達到簡化模擬流程，是值得研究的課題。

二、研究目的及範圍

本文希就通信運用的角度，建構模式模擬與電腦兵棋中可呈現通信狀況的通道圖層，提供兵棋推演時，呈現地理圖資中之通道環境，以更接近真實狀況，合理擬訂通資裝備部署策略。

如何使無形的電子戰場有形化？首先依地面作戰需求建立符合地面的電子戰場圖。在各區域裝設電磁能量接收器，針對各種不同型態的訊號在不同的區域作量測，再依晝夜、潮汐、晴雨、太陽黑子活動…等不同環境狀況，將紀錄製成資料庫。此資料庫和各種電戰、通信裝備連線後，便可隨目前所在位置的移動及天候變化，結合地理資訊系統、全球定位系統交互確認位置座標，便可同步調整裝備參數的設定，以達最佳通信、偵防效果。

影響通信品質的因素很多，本文聚焦於在蜂巢式通信環境之探討，期以統計模式描述通道特性，提出建構模式模擬與電腦兵棋中可用通信圖層之方法，提供模式模擬作業之參考，作為推演時有關通信裁判之參據。

最後，提出量測通信通道後之參數估計演算法，據以建構可應用於模式模擬系統之圖層。

參、文獻探討

一、模式模擬與電子戰場

模式模擬(Modeling and Simulation, M&S)就字義上可區分為模式(Model)、建模(Modeling)與模擬(Simulation)。美國防部模式模擬彙編²明確定義模式模擬為運用模式，靜態或動態地發展用以決策之數據。換言之，模式模擬其過程區分建模與模擬兩階段，首先建模就是將某一系統以模式來表示，再經過模擬程序以呈現系統行為，同時產生所有可能的數據，再蒐集這些數據進行分析，萃取其中有用資訊，依目的以不同的方式呈現，提供決策參考³。

透過模式模擬技術以探究並解決潛在的各式問題，是目前在各種不同領域

² U.S. Department of Defense, *DoD Modeling and Simulation (M&S) Glossary*, DOD 5000.59-M, 1998.

³ 國防大學軍事學院，2004，國軍軍語辭典，中華民國國防部。

中常用的方法。利用模式模擬工具取代真實系統，對各類問題尋求解決方案，其應用優點可以是^{4,5}：降低武器設計和生產成本及風險、改進部隊訓練方式、尋求新式作戰型態、精進準則研發、輔助決策研究等。

模式模擬依其類型簡單可區分為實兵模擬、虛擬模擬與建構式模擬等三類⁶。其中建構式模擬在實務上，主要分為電腦兵棋與分析性模式。電腦兵棋用於訓練指參程序與作業，提供指揮官決策經驗，如陸勝二號與聯合戰區模擬系統(Joint Theater Level Simulation, JTLS)；分析模式用於分析作戰可行性方案，提供指揮官決策建議，如整合戰區交戰模式(Integrated Theater Engagement Model, ITEM)與延伸式防空模擬模式(Extended Air Defense Simulation, EADSIM)。

任何複雜的模式模擬系統均由不同的次系統組成，每一個次系統均直接影響整體模擬的結果，而任何次系統所對全系統之影響均不容輕忽。這些次系統或許是武器系統、飛彈系統、C4ISR 系統、後勤系統、防空系統等，是其中之一或數種組合而成。一般模式模擬系統，因其運用的目的與解析度的不同，同時也必須要考量簡少其計算量，因此對於這些複雜系統的描述，均簡化而由少數關鍵參數來表示，忽略了其它次要參數對系統所造成的影響。對於難以量化的因素，如官兵心理、精神戰力、人員素質、裝備操作能力等因素，更無法納入模式模擬系統進行模擬。同樣地，通信對戰爭的影響亦是難以量化。因此，通常在模式模擬與兵棋中探討此一問題時，均假設通信狀況暢通、通信品質良好的情況，但實況往往並非如此。

徐建樑研究運用網格式地理資訊系統，探討如何部署行動電話基地台系統，在最少設置數量要求下，以達良好通信品質研究⁷。何旭智提出結合地理資訊系統之電子戰模式模擬系統，此系統可藉由地理資訊系統載入軍方戰略地圖，並選擇適當通信通道，結合電子戰想定，部署通訊機及干擾機模式，可進行各式電子戰之作戰效益評估⁸。

二、地理資訊系統與空間資料圖層

地理資訊系統可提供地形資訊，地形和作戰息息相關，克勞塞維茲認為：

⁴ 陸軍總部準則會，作戰模擬學，龍潭，陸軍總司令部，2002。

⁵ 王貴民，徐秀禎，國軍模式模擬與兵棋政策之展望，第一屆國軍軍事作業研究與模式模擬論壇論文集，2004。

⁶ U.S. Department of Defense, DoD Modeling and Simulation (M&S) Glossary, DOD 5000.59-M, 1998.

⁷ 徐建樑，網格式地理資訊系統應用於區位選址之研究-以行動電話基地台為例，朝陽科技大學建築及都市設計研究所碩士論文，2005。

⁸ 何旭智，陸軍野戰無線電通信模擬訓練之研究，通信兵 92 年度戰法研討會論文集，2003。

「地形對於軍事行動的影響，都發源于三大性質：一、妨礙運動；二、妨礙視力又限制視力；三、妨礙火力又消滅火力。」⁹也因此，一般模式模擬與兵棋系統，均考量地形因素，並納入作為交戰規則的修正參數。這部分在實務上，也有大量文獻，探討此一問題，並運用地理資訊系統，希可提供更精準、快速的運算結果。

模式模擬與電腦兵棋所用的地理圖資為地理資訊系統(Geography Information System, GIS)之一環。一般而言，地理資訊系統是蒐集、儲存、處理、分析與展示地面資料的整合系統，進行空間的建立、存取、管理、分析與展示。

地理資訊系統資料格式及儲存方式與應用效率有極大的關係。地理資訊系統之資料結構可區分為網格式(raster)與向量式(vector)二種。網格式資料結構是由一組數值所構成的矩陣，在處理功能上主要在於強調空間統計與地圖模式之分析，更易表現地型特徵，且處理速度快；向量式資料結構是由點、線、面構成，在處理功能上強調繪圖與資料庫管理¹⁰。此外，選用適合之資料結構以呈現地理資料的特性亦是重要考量因素，例如，地表高度、海面溫度、大氣壓力的變化是平滑而連續變化，不易以點、線、面表示，故適以網格式資料結構為宜。而管線系統，工程繪圖具明確界線，適合用向量式資料結構來儲存。

圖層(layer)指包含一組在邏輯上彼此相關的地理圖徵及屬性之組合。例如，國道、省道、縣道等道路，適合放在同一個「道路」的圖層，而湖泊、水塘、河流等適宜放在一個「水系」的圖層中。圖層同時也是地理資訊系統進行分析與處理的基本單位，例如一個社區規劃工作，所須用到的圖層可能包含地籍圖、街道圖、公共管線圖、行政區域圖、地形圖、建物分布圖等¹¹。

電子戰場圖層是上述所謂的圖層之一，正是本文所探討的主題。原則上，它應該包含所有電磁波和其所處環境與自然界的干擾之所有資料，例如，水文環境、太陽黑子活動、火山活動等和不同信號的交互關係，如雷達信號、展頻信號、紅外線等，這些或許都是電子戰場圖層的一部分，也可單獨成為深入研究的主题。

肆、電子戰場中之通道特性與模式

電磁波傳遞的路徑統稱通道，電子戰場是由通道所組成。通道又依媒介不

⁹ 趙朝瑞，運用資訊系統分析戰場空間之研究－以林口守備地區為例，國防大學 93 年陸院畢業論文，2004。

¹⁰ 施保旭，地理資訊系統，台北，儒林圖書公司，1997。

¹¹ 周天穎，地理資訊系統理論與實務，台北，儒林圖書公司，2001。

同而有各種特性，電磁波傳遞媒介有水、大氣、電線、光纖…等。一般無線電使用的頻率可區分為 3-30MHz 稱高頻(High Frequency, HF)、30-300MHz 稱特高頻(Very High Frequency, VHF)、300MHz-3GHz 稱超高頻(Ultra High Frequency, UHF)、3-30GHz 稱極高頻(Super High Frequency, SHF)¹²。這些頻率所使用的通道有一個共通的性質是其特性隨著時間而變化的，在大氣層空氣中離子的密度、水氣含量、氣壓高低、空氣移動的速度…等，均是改變通道特性的要素。

一、衰落通道

在電磁環境中，電波在通道中傳遞時強度的損耗(loss)及雜訊是無法避免的。當發射端和接收端間的距離增加時，接收功率隨之成一定比例的減少，這種損耗稱路徑損耗(path loss)或大尺度衰落(large scale fading)。另一種損耗是由多重路徑(multipath)現象所引起的，此損耗在 1/2 波長的尺度中衰落值變化可能極大，稱為小尺度衰落(small scale fading)，具有這種特性的通道一般稱為衰落通道(fading channel)¹³。因為此衰落現象隨環境不同而各有不同，且具時變而無法定量描述的特性，所以此衰落一般是以機率分布來描述。

通道的衰落現象是由多重路徑所引起的，多重路徑是指訊號從發射機至接收機所經過的路徑不只一條，有直視路徑及經地面、建築物、高山、大氣折射或反射的路徑，因為不同的路徑其距離不同，使得各路徑的訊號到達接收機時產生不同的時間延遲，加總這些路徑的延遲訊號，如果剛好和直視路徑訊號產生 180 度的相移，則此訊號剛好對消，造成嚴重的衰落，甚至此延遲時間可能超過一個字符，造成符際干擾(Inter-Symbol Interfere, ISI)。

(一)大尺度衰落

在電磁環境中，電波在通道中傳遞時強度的損耗及雜訊干擾是無法避免的。當發射端和接收端間的距離增加時，接收功率隨之成一定比例的減少，這種損耗稱路徑損耗或大尺度衰落。自由空間(free space)的大尺度衰落，定義如方程式(1)所示¹⁴：

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (1)$$

其中 G_t 和 G_r 分別是發射天線和接收天線的增益、 λ 為信號波長、 d 為發射天線和接收天線間的距離。

大尺度衰落除了上述方程式外，如另考量電磁波反射、折射、繞射、散射、

¹² 交通部電信總局，中華民國無線頻率分配表，1999。

¹³ Sklar, B., Digital Communications: Fundamentals and Application, Prentice Hall, 1988.

¹⁴ Rappaport, T. S., Wireless Communications, Prentice Hall, 1999.

遮蔽等效應的通道模式，計有實際工程鏈路計算所採之模式如距離對數路徑損失(Log-distance Path Loss)模式、常態對數陰影(Log-normal Shadowing)模式等。另適用於電腦進行模擬所採之模式計有 Longley-Rice 模式、適用於都會區的 Okumura 模式、經由實際通道量測而得到的 Hata 模式。

(二)小尺度衰落

小尺度衰落係指信號傳遞在 $1/2$ 波長的距離變化時，其振幅可能波動極大，具有這種特性的通道一般稱為衰落通道。簡單地說，引發衰落現象的物理機制有多重路徑和杜普勒效應。一般描述多重路徑通道的主要參數有二，在時域上稱多重路徑時滯 T_m (Multipath Delay Spread)，在頻域上稱同調頻寬 B_c (Coherence Bandwidth)，其近似關係如下¹⁵：

$$B_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (2)$$

一般而言，頻率間隔小於同調頻寬的二信號，其衰落可視為一致。所以當通道之同調頻寬小於信號頻寬時，則稱此通道為頻率選擇性(Frequency-Selective)衰落通道，此時信號將受通道影響而嚴重失真。反之通道之同調頻寬大於信號頻寬時，通道稱為頻率非選擇性(Frequency-Nonselective)衰落通道或平坦(Flat)衰落通道。常見的寬頻系統，如展頻(Spread Spectrum)或多載波(Multi Carrier)系統中傳遞訊息的信號其頻寬較寬，因此其所使用的通道可假設為頻率選擇性衰落通道，常以 Tapped Delay Line 模式來描述。

除了多重路徑影響通道的時變特性外，杜普勒頻展 B_d (Doppler Spread)現象也和通道特性相關。杜普勒頻展是指發射端及接收端間具有相對速度而造成載波頻率的漂移，此參數可描述通道衰落的變化率。同調時間 T_c (Coherence Time) 定義為：

$$T_c \approx \frac{1}{B_d} \quad (3)$$

分別以多重路徑時滯與杜普勒頻展比較信號之字符時間寬度與基頻頻寬，可區分不同通道衰落特性。

所以，衰落變化程度慢的通道其杜普勒頻展較小而同調時間較大。當信號寬度小於通道的同調時間時，稱此通道稱為慢速衰落(Slowly Fading)通道，反之稱為快速衰落(Fast Fading)通道。常用以描述此類通道的模式有 Jakes 模式和 Clarke 模式。表一說明各種通道之 T_m 及 B_d 參考值。

¹⁵ Proakis, J. G., Digital Communications, 4th ed., McGraw Hill, 2001.

表一 多重路徑時滯與杜普勒頻展比較

通道種類	多重路徑時滯(Second)	杜普勒頻展(Hz)
HF 短波離子層	1ms-10ms	0.01-1
HF 極地離子層	1ms-10ms	10-100
VHF 傳輸層	0.1ms	10
SHF 傳輸層	1us	10

二、小尺度衰落統計模式

衰落現象隨環境不同而各有不同，且具有時變而無法定量描述的特性，所以這此衰落一般是利用統計方法以機率分布來描述。一般常用來描述衰落通道所採用的統計模式，計有對數常態(Lognormal)分布、瑞理(Rayleigh)分布、萊斯(Rician)分布、鈴木(Suzuki)分布及中上(Nakagami)分布等，如表二所示。

表二 通道的統計模式(作者繪製)

通道統計模式	通 道 特 性
對數常態分布	信號發射後受到地形及建築物等造成的陰影遮蔽效應，描述接收信號的振幅所呈現分布
瑞 理 分 布	信號經由多重路徑傳播後，描述接收信號的振幅分布
萊 斯 分 布	信號經由多重路徑傳播後，描述接收信號含有直視項及散射項成分
鈴 木 分 布	對數常態及瑞理兩種分布的合成
中 上 分 布	描述都會區的通信環境，可描述較瑞理分布更惡劣的環境

(一)瑞雷分布

如果不含直視路徑(Line of Sight, LOS)之多重路徑訊號，其振幅統計特性，通常以瑞雷分布描述。一般在大樓林立的都會區，訊號傳遞經過建築物作多次反射、折射後，此時訊號振幅 α 的統計特性是瑞雷分布，可表示如下：

$$p_{ray}(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} e^{-\alpha^2/\Omega}, \quad \alpha \geq 0 \quad (4)$$

其中 $\Omega = E[\alpha^2]$ 。

(二)萊斯分布

萊斯衰落通道模式常用於描述在多重路徑中，同時包含直視項及散射項成

分的環境，如衛星通訊鏈路、飛行器及地面間構成的鏈路、及微波通訊鏈路等。萊斯分布中相當重要的參數是萊斯因子 K ，它表示直視項功率與散射項功率的比值，此分布同時也最佳擬合在不同環境中量測數據¹⁶。

在多重路徑通道下，接收的訊號中如果包含某一固定振幅之直視訊號及隨機振幅衰落成分，則通過此通道的訊號之振幅 α 其分布稱為萊斯分布。如果此直視訊號變得非常微弱時，則萊斯分布則化為瑞雷分布。萊斯分布表示如下：

$$p(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{\alpha^2 + s^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{\alpha s}{\sigma^2}\right), \alpha \geq 0 \quad (5)$$

其中 s 表示直視訊號的振幅、 σ^2 表示隨機分項的平均功率、 $I_0(\cdot)$ 表示第一類零階修正貝索函數。

定義 K 為衰落因子，為直視訊號與多重路徑訊號平均功率的比值：

$$K = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

則(5)式可表示為：

$$p(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\Omega} e^{-\frac{(1+K)\alpha^2 + K\Omega}{\Omega}} I_0\left(2\alpha\sqrt{\frac{(1+K)K}{\Omega}}\right), \alpha \geq 0, K \geq 0 \quad (7)$$

其中 $\Omega = E[\alpha^2]$ 。

其值的大小表示多重路徑散射對訊號的影響。 K 值愈大，表示直視訊號主導整個通道的特性。反之，則由多重路徑訊號所主導。萊斯通道對通信品質的影響有兩點：一、當衰落因子 K 為無限大時，此時僅有直視分項而無散射分項，表示訊號沒有受到衰落的影響。二、當衰落因子 K 為零時：此時僅有散射分項而無直視分項，表示訊號受到嚴重的衰落，其振幅呈現瑞雷分布。由(5)式中亦可看出，當 $s=0$ 時，訊號封包呈現瑞雷分布。由此可知瑞雷分布為萊斯通道的特例，表示通信品質最差的情形。

(三)中上分布

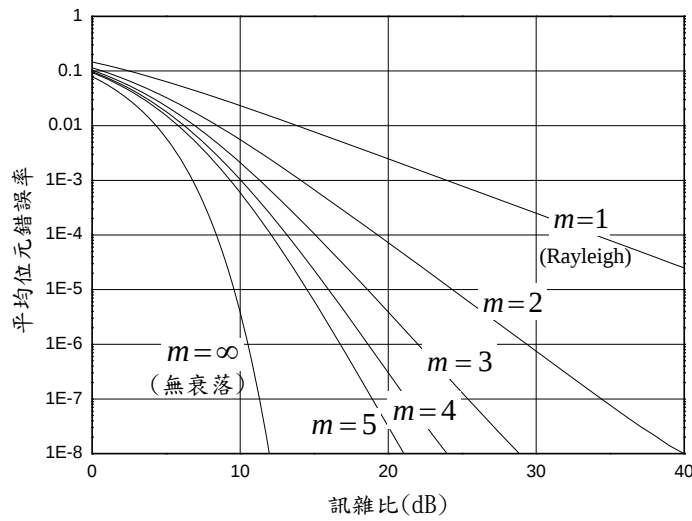
當衰落通道具有直視項成分時適合以萊斯分布來描述，而通道不具直視項成分時，如都會區的行動通信環境，則以中上分布來描述最為適合，另此分布尚可描述較瑞理分布更惡劣的環境。中上分布是另一種常用於描述多重路徑衰落現象的統計分布，令 α 為訊號之振幅，中上分布定義為：

¹⁶ Parsons, J. D., The Mobile Radio Propagation Channel, New York: John Wiley & Sons, 1992.

$$p_n(\alpha) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega} \right)^m \alpha^{2m-1} e^{-m\alpha^2/\Omega}, \quad \alpha \geq 0, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (8)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 為 Gamma 函數、 $\Omega = E[\alpha^2]$ 、 $m = \Omega^2 / E[(\alpha^2 - \Omega)^2]$ 稱為衰落指數(Fading Figure)，其值由 0.5 至 ∞ 。瑞理分布為中上分布在衰落指數 $m=1$ 時的特例。

在中上衰落通道中以 BPSK 調變訊號的位元錯誤率可計算獲得，如圖一所示：



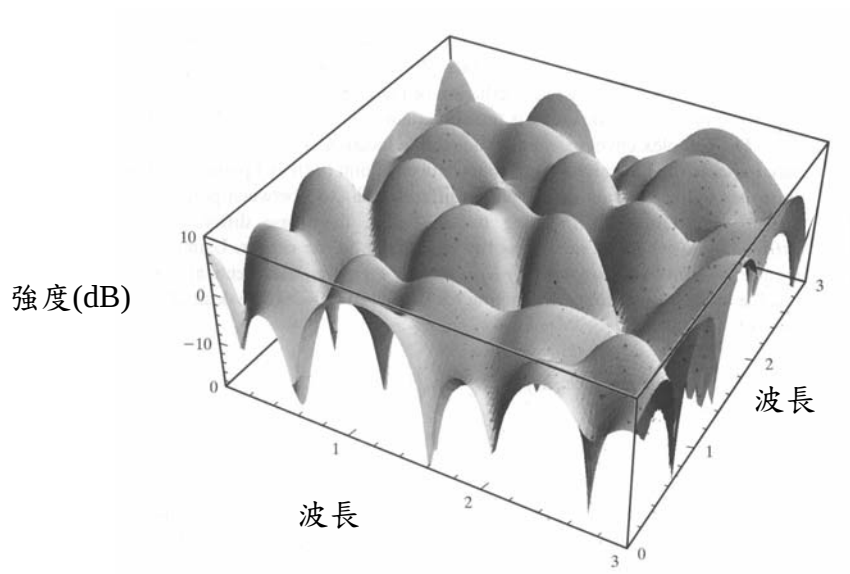
圖一 BPSK 調變訊號在不同 m 值的中上衰落通道之位元錯誤率圖(作者繪製)

從圖一中可得知以中上分布來描述通道特性，其中當 $m=1$ 時相當於瑞雷衰落，當 $m \rightarrow \infty$ 時表示無多重路徑衰落，為 AWGN 通道。我們比較圖一中不同的 m 值其平均位元錯誤率，在平均位元錯誤率為 10^{-4} 時， $m=1$ 較 $m \rightarrow \infty$ 時，其訊雜比多了 25dB 左右。意即在 $m=1$ 的環境想要達到 $m \rightarrow \infty$ 的環境之錯誤率為 10^{-4} 之通信品質的話，所需功率必須增加 300 多倍才行。所以在不同的環境下，構建通訊鏈路時，最好能對中上衰落波道模式中的 m 值作合理的估測，如此可使用較適合之功率傳送訊號，一方面可避免因發射功率不足而導致錯誤率增加，造成通連速率降低；另一方面可避免因不知環境參數而施以較大的發射功率，不僅浪費功率外，更可能干擾使用相同波段之通訊裝備，另限制發射功率在電子戰作為上可以減少被敵方偵測的機率，以避免敵方干擾我方通訊。

伍、電子戰場特性量測

聯合作戰最重要的是情資交換，大量的情資透過各種的通訊網路、數據鏈路傳送到處理中心，再分門別類將這些處理後的情報利用網路送往不同的部門。戰時電子戰場中充斥不同的雷達、射控、衛星、通訊、導航、干擾等電子訊號，這些電子訊號本身具有不同的特性。例如，雷達訊號多為脈波形式，脈波寬度取決於雷達的功能，其訊號的頻寬和脈波寬度成反比。描述通道特性的參數是固定的，故不同寬度的雷達脈波訊號會使通道顯現出不同的特性。

一般訊號傳遞因多重路徑的影響，訊號強度會因波長尺度而有劇烈的變化，模擬示意如圖二所示¹⁷。從圖二可觀察出，少量的距離改變，在訊號強度上則有明顯的變化，因此稱為小尺度衰落。而這些衰落變化如前所述，其特性不是決定性的(deterministic)而是時變的，在不同地區其變化程度也不同，所以這些變化程度是以統計模式中的參數來描述，如萊斯分布的 K 值或中上分布的 m 值，須視所採用之模式而定。



圖二 多重路徑訊號強度圖

(資料來源: Ziemer, R. G., Peterson, R. L., *Introduction to Digital Communication*, Prentice Hall, 2001.)

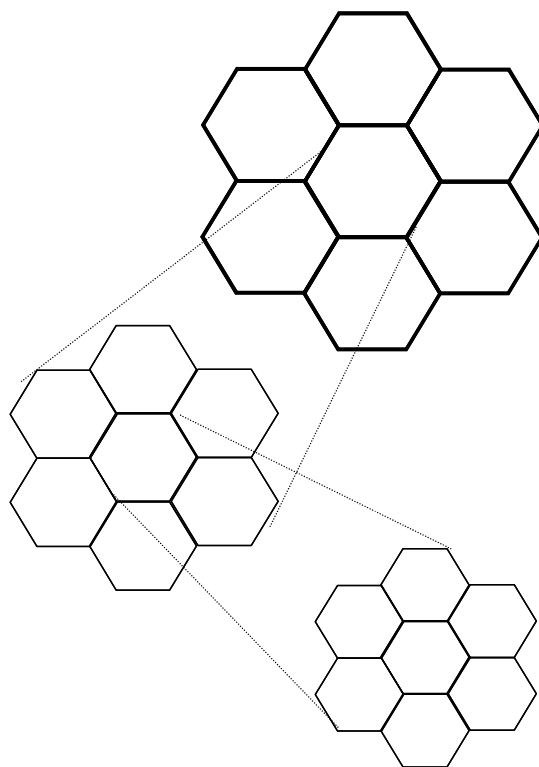
電子戰場是由通道所組成的，在傳統上，通道是訊號傳輸路徑總合的統稱，其統計特性的定義多限於某個區域內。例如在高樓林立的都會區，當我們以中上分布來描述此都會區的通道模式，其衰落指數值可能為 0.9。這值是這一區域的平均值，而通常這是指地面上的量測結果所作的統計，不包含三維空間的。

一、蜂巢式網格地域分割

在行動通信領域的研究中，為了有效運用頻率，而將的大區域分割為較小的區域，相鄰的小區域使用不同的頻段，而達到避免頻率干擾的目的。不同環

¹⁷ Ziemer, R. G., Peterson, R. L., *Introduction to Digital Communication*, Prentice Hall, 2001.

境有不同的分割方式，其中最常用的分割方式，以幾何中之正六角形為主，狀似蜂巢，示意如圖三。因此行動通訊系統，往往又稱為蜂巢式行動通信系統。有關這方面的研究，在 Rappaport 的著作中均有詳細的介紹¹⁸。



圖三 蜂巢式網格分割示意圖(作者繪製)

如果我們依地起伏將台灣分割成蜂巢狀的平面區域，地形平緩則區域可以廣大，如平原，此區域蜂巢狀半徑可以是 10 公里；如果地形變化劇烈則區域小，如都會區，此區域的半徑可以是 1 公里至 500 公尺。則每個區域的衰落指數值可能不同，而不同區域其的衰落指數值的變化，有如地圖中之地勢有高低起伏般，所以這不同區域之衰落指數紀錄，我們可稱此紀錄為衰落指數圖，亦即本研究所欲建構之電子戰場圖層中的一部分。

二、衰落特性量測

在這衰落指數圖中的任一區域，對映其它區域之衰落指數值依各區域座標的變化將如同曲面一般，而衰落指數圖正是這些曲面的集合。基本上衰落指數圖，至少應記錄各區域的座標、各區域間之衰落指數，如果在衰落指數圖中之紀錄包含了各類電子戰裝備之參數以及與衰落指數與相關環境變化參數的關係，則此衰落指數圖稱為電子戰場圖。電子戰場圖實際上是一個資料庫，而建立此資料庫，最基本的工作就量測。為什麼要作量測，因為量測是最好的證明。

¹⁸ Rappaport, T. S., Wireless Communications, Prentice Hall, 1999.

例如有一篇探討地震的文章，在 91 年 3 月 31 日下午，一個芮氏規模 6.8，震源深度為 9.6 公里的地震，發生在花蓮外海約四十公里處，靠近震央的蘇澳和花蓮地區其強度卻小於距離較遠的台北地區。這現象若純粹由地震波隨距離的衰減特性來解釋是不合理的，理論上震波傳遞愈遠，因為能量的耗損，其振幅會隨之愈小。這種現象被記錄觀察後，進而分析數據及地質資料後，才發現是台北盆地的聚焦現象，並得到重要結果：地下構造的形貌是決定震波傳播路徑，以及是否在某地區形成聚焦效應的重要因素¹⁹。

電磁波和震波一樣，傳遞愈遠其振幅愈小，是否有如上例般的例外情形，就必須透過量測資料來確認。雖然電磁波和震波的傳遞媒介不同，但仍可以推論，在傳遞電波的無形通道中，有無類似之聚焦現象，依然必須在量測後才能得知。所以要了解由通道組成的電子戰場，最直接的方法就是在通道中量測各種電磁波訊號在不同狀況的變化情形。

量測通道特性，一般作法是在各區域點同時或分別安置電磁波能量接收器，利用 GPS 來標定接收器位置，此接收器間隔和訊號的波長相關，約為波長的數倍，然後在其中一個區域點發射瞬時高能量之短脈波，此短脈波具有非常寬的頻寬，包含所有可能的頻率，相當於同時使用不同頻帶的發射機發射訊號，或以單頻發射機改變頻率亦可達成。再同步記錄寬頻接收器接收到的能量變化，接著改變發射機的位置，重複量測記錄工作，直到所有區域點均完成訊號發射及量測。量測尚很有多技術以及考量因素，在 Hoffman 的著作中²⁰，可得到更深入的說明。從這些量測資料，就可計算出前述中的多重路徑時滯及杜普勒頻展這二項參數。

再則亦可將多筆資料，歸納出統計模式，再配合訊雜比及位元錯誤率的量測就可掌握各區域及其彼此間通道的特性，如果欲將這些資料簡化成模式，則須利用電腦高速運算能力，計算各區域的通道參數間彼此之關聯性，使電子戰場圖更能有效運用。電子戰場圖的建構，須結合航空、通訊、電波、數理、物理、氣象…等人才，非一朝一夕可成，在量測的過程中須花費大量的人力、物力與時間。在民間，行動通訊業者會針對其手機、大哥大所使用之頻率及移動速度，在不同位置量測其通連狀況，其意義在於事先了解環境，以便於系統規劃，只不過其規模遠小於電子戰場圖的建構。

¹⁹ 葉義雄，地震波在台北盆地的聚焦效應，2002，<http://www.earth.sinica.edu.tw/910331/focus.htm>。

²⁰ Hoffman, W. C., Statistical Methods in Radio Wave Propagation, PERGAMON PRESS, 1960.

三、衰落參數估測

衰落通道數據量測後，必須進行估測。如何選擇合適的衰落模式來進行數據擬合(fitting)，以有效估測得到較為正確的參數，在前述三種衰落模式中，接著以萊斯衰落通道模式為例，進行深入介紹。

衰落通道中的相位分布，一般均簡化而假設為均勻分布，因此難以從中取得有效的資訊，然在實際的狀況並非完全如此。因此在推導過程中導入的相位資訊，以期能夠提高估計的精確度。在過去的文獻中提出數種方法以估計 K ，Sumanadsena 等人，利用量測資料的統計圖以最小平方法比對資料庫中的機率分布，此方法的缺點為統計圖運算煩瑣費時²¹。Talukdar 等人，證明基於最大概似法和動差法具有相近的偏差量，但動差法較簡單²²。然而在上述文獻中，估測所需的特徵均基於接收信號的振幅，如統計圖、機率分布及高階動差等。

在大多數的行動通訊環境中，接收信號的相位分布均設為均勻分布 $[-\pi, \pi]$ ，因此相位分布並未利用於 K 值估計上。然而，Patzold 證明接收信號的相位分布為一時間函數，在特定時間區間內其分布並非均勻分布，所以仍能提供有用的資訊，因此可以利用它來估計 K 值，以期得到更精確的估計結果²³。

萊斯分布振幅相位聯合機率密度函數可表示成：

$$p(\alpha, \psi; t) = \frac{\alpha(K+1)}{\pi\Omega} e^{-\left[\frac{\alpha^2(K+1)-2\alpha\sqrt{\Omega K(K+1)}\cos(2\pi f_d t + \theta - \psi) + K\Omega}{\Omega}\right]} \quad (9)$$

式(9)對 ψ 積分後得到 $p(\alpha)$ ，如式(7)稱為萊斯分布。相位分佈 $p(\psi; t)$ 可由方程式(9)推導而得到：

$$\begin{aligned} p(\psi; t) &= \int_0^\infty p(z, \psi; t) dz \\ &= \frac{e^{-K}}{2\pi} + \frac{\sqrt{K} \cos(2\pi f_d t + \theta - \psi) e^{-K \sin^2(2\pi f_d t + \theta - \psi)}}{\sqrt{\pi}} \\ &\quad \cdot Q\left[-\sqrt{2K} \cos(2\pi f_d t + \theta - \psi)\right], -\pi < \psi \leq \pi \end{aligned} \quad (10)$$

(一)最大概似估計法則

假設觀測向量 $\mathbf{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N]$ ，其中 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ 為 N 個獨立觀測樣本。聯合機率密度函數 $p(\mathbf{\beta}; \mathbf{\theta})$ 為 $\mathbf{\beta}$ 中 N 個各別樣本機率密度度數的乘積，表示如下

²¹ Greenstein, L. J., Michelson, D. G., and Erceg, V., "Moment-Method Estimation of the Ricean K-Factor," IEEE Commun. Lett., Vol. 3, No. 6, 1999, pp. 175-176.

²² Talukdar, K. K., and Lawing, W. D., "Estimation of the Parameters of the Rice Distribution," Journal of Acoust. Soc. Amer., Vol. 89, 1991, pp. 1193-1197.

²³ Patzold, M., Mobile Fading Channel, New York: John Wiley & Sons, 2002.

$$p(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\theta}) = p(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N; \boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^N p(\beta_i; \boldsymbol{\theta}) \quad (11)$$

其中 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]$ 為待估計的參數。方程式(11)稱為概似函數。

最大概似估計法則就是求 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]$ ，使得概似函數為最大。為簡化計算，對 $p(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\theta})$ 取自然對數函數 $\ln(x)$ ，因此最大概似估計法則須滿足

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} \ln p(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \theta_1} \ln p(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\theta}) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \theta_M} \ln p(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

故解方程式(12)可得到最大概似估計 $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_M]$ 。

(二)模擬結果與討論

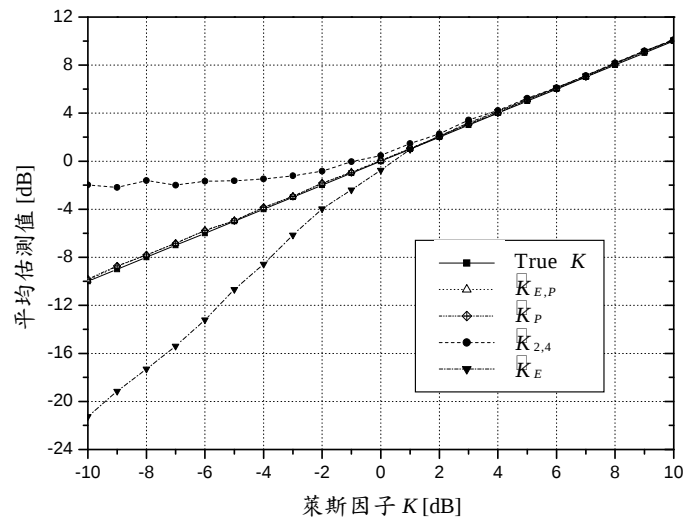
蒙地卡羅(Monte Carlo)模擬可用來驗證和比較這些估計法則的均方誤差(Mean Square Error, MSE)，它常用來評估一估測器的良窳。MSE 定義如

$$MSE[\hat{K}] = E[(\hat{K} - K)^2] \quad (13)$$

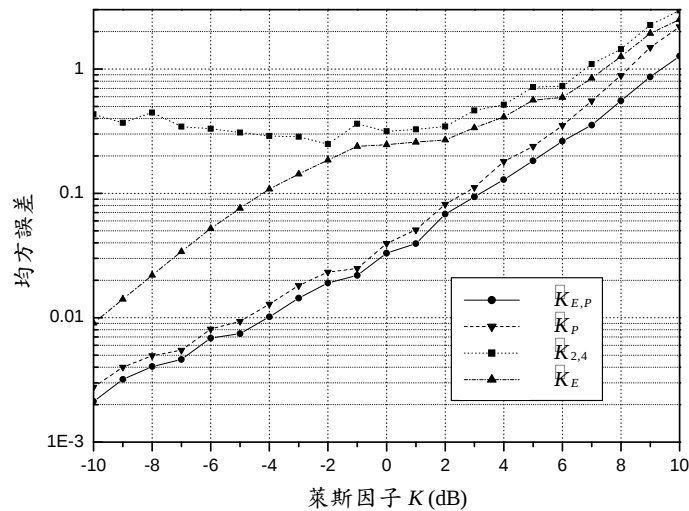
利用電腦模擬來比較四種估計器，基於振幅與相位分佈、振幅分佈、相位分佈及振幅動差分別表示為 $\hat{K}_{E,P}$ 、 $\hat{K}_E$ 、 $\hat{K}_P$ 和 $\hat{K}_{2,4}$ ²⁴。圖五說明 $\hat{K}_{E,P}$ 和 $\hat{K}_P$ 的均方誤差小於 $\hat{K}_E$ 和 $\hat{K}_{2,4}$ ，因為 $\hat{K}_E$ 和 $\hat{K}_{2,4}$ 僅基於振幅資訊。由圖四和圖五結果，明顯指出，相位對 K 值估計，提供相當有用的資訊。

在大多數的地形環境中，應用萊斯分佈以擬合在這些地形的量測的結果，其 K 值變化可從 -14dB 到 2.1dB，因此在模擬時設定 K 值的範圍設定由 -10dB 到 10dB，因此可以涵蓋大多數的地形，接著以 1dB 為間隔，總共估計 500 次，每次估計時，樣本數 N 設為 100。圖四顯示四種估計器的平均值 $E[\hat{K}]$ ，此平均值和實際值的差異 $E[\hat{K}] - K$ 稱為偏移(Bias)。結果顯示當 $K > 1$ dB 時，四種估測器其偏移均相當小，當 K 值減小時， $\hat{K}_{E,P}$ 和 $\hat{K}_P$ 的偏移量仍相當小，但 $\hat{K}_{2,4}$ 和 $\hat{K}_E$ 的偏移變得愈來愈大，即使在 $K = -10$ dB 時， $\hat{K}_{E,P}$ 和 $\hat{K}_P$ 性能仍表現相當優異。

²⁴ Abdi, A., Tepedelenlioglu, C., Kaveh, M., and Giannakis, G., On the Estimation of the K Parameter for the Rice Fading Distribution, IEEE Commun. Lett., Vol. 5, No. 3, 2001, pp. 92-94.



圖四 不同估測器的平均估計值比較圖(作者繪製)



圖五 不同估測器的均方誤差比較圖(作者繪製)

陸、結論

一、總結

「工欲善其事，必先利其器」，有了優質電子戰裝備後，須對裝備性能充分瞭解，並熟悉使用這些裝備的電子戰環境，方能發揮其應有的能力。三軍聯合作戰，結合陸、海、空之三維戰場，強化「制陸、制海、制空」的能力。本文在電子戰場環境分析中，提出利用電子戰場的原生特性，達到「制電子戰」的應用構想。首先描述組成電子戰場的無線衰落通道之特性，輔以數學模式性

能分析再加上電腦軟體模擬結果，使我們明瞭電磁波在不同通道傳遞的基本限制。接著量測實際的通道參數值，並運用估測演算法，成功估測所量測的資料，並建立資料庫，以蜂巢式地形分割，進而建構台、澎、金、馬的電子戰場圖層，提供模式模擬及電腦兵棋運用，並作為日後國軍在電子戰攻、防作為的能力。

二、未來研究發展

本研究探討建構電子戰場圖層，運用於模式模擬與電腦兵棋，導入通信品質因素對戰爭的影響之概念，期提高模擬準確度。其中涉及技術層面廣泛，以下課題在未來均有深入探討的空間：

(一)在交戰模式中戰損之計算，主要以武器的攻擊力、載台的防護力與武器的命中機率為主要因素，通信品質與通連狀況對戰損計算的影響及其量化關係之研究。

(二)在蜂巢式地形分割演算上，如何因應實際地形，有效分割，最利衰落通道參數之量測。另模式模擬系統所採網格或許非蜂巢式，這二者間如何轉換？

(三)除了大尺度衰落圖層及小尺度衰落圖層外，通信品質計算的模式還有許多，不同地理環境的適用模式，例如衛星鏈路模式、水中聲學模式等，均可深入研究如何建立圖層，以利整合運用。

(四)本文探討地面上，二維地形的衰落通道圖層；實際上，電子戰場是三維空間，如何量測並建構三維空間的模式，是值得探討的課題。