

毫米波目標輻射環境特性之研究

侯昭平¹ 蔡世樵¹ 陳萬金²
國防大學理工學院環境與資訊工程學系¹
大華科技大學電子工程學系²

摘要

臺灣四面環海，水氣常會隨天氣系統、熱力直接環流的平流過程及土壤和植被的擴散和蒸散作用出現在各地區，進而影響各類武器系統的效能，特別是臺灣地區天氣複雜多變，各類降水的過程，更是影響了多數波段的電磁傳遞強度，這使得新一代需電磁導引的武器系統受到很大的挑戰，雖然武器系統設計時，亦瞭解大氣對電磁波衰減的重要性，因而刻意挑選大氣窗區波段，如毫米波導引武器，但劇烈降水仍然會對其導引的效能產生較大的影響。本文利用不同物體皆有其熱輻射物理特性（亮度溫度）之原理，並藉雙偏極化輻射儀之毫米波段（36.5GHz），在多達98天（2014年5月3日至8月8日），不同季度之大氣環境下，實施目標及背景大氣輻射的量測，結果顯示目標區（含坦克、草地與樹林）與非目標區環境大氣之亮度溫度約存在100K左右之差異，當環境大氣氣溫相同時，相同目標區之亮度溫度亦可能不相同，但具有15K左右之日夜變化；而在降雨強度增大時，目標區之亮度溫度將逐漸增大與非目標區之環境大氣一致，使目標物無法藉由毫米波目標輻射特性實施分辨。

關鍵字：毫米波、亮度溫度、雙偏極化輻射儀、降雨強度

一、前言

依據華夏經緯網 2012 年 2 月 14 日登載俄羅斯「紐帶」網 2 月 13 日報導，當日在中國網站上首次出現了一張改進型武直-19 攻擊直升機的照片。與此前出現的武直-19 不同的是，這架新出現的直升機的旋翼頂端安裝了一部毫米波探測雷達。毫米波因其部分波段在大氣中，有著不易衰減的特性，因此對於軍事上的應用有其重要性和多元性。如部分短程飛彈，亦應用其作為導引及追尋目標的利器。由於自然界任何高於絕對零度的物質均會輻射出電磁波，但該電磁波的輻射量會隨著物質的特性而有所不同，因此只要選擇觀測特定波長的電磁波，並接收該物與周圍環境所發出的輻射能量差異，就可計算出物體的亮度溫度 (Brightness Temperature, Tb)。毫米波頻率一般定義為 30~300 GHz (波長 1~10 毫米)。部份毫米波段對於水汽的穿透性高，在大氣中能量衰減小，但缺點是，當大氣中水汽含量過高時，或降雨強度增加時，仍會使其能量明顯的衰減。

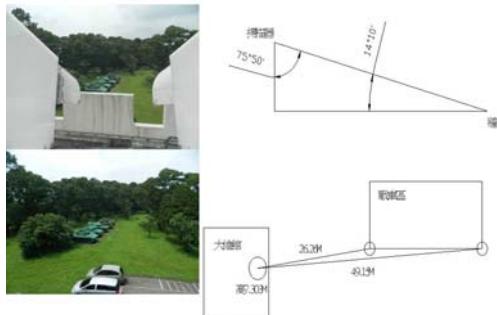
隨著被動式毫米波探測技術的發展，研究指出毫米波目標區輻射特性將取決於目標物之特徵。對於不同的目標物而言，其對毫米波段電磁波之吸收、放射及散射效應皆不同，因此，學者指出可藉由高靈敏度之毫米波輻射計，接收來自於目標物的

熱輻射，並計算出物體的 Tb 值，以獲得毫米波目標物之輻射特性 (Hu et al., 2011、Chen et al., 2013)[1、2]。過去許多研究指出，毫米波目標物輻射特性可被應用於武器系統的研發、戰場偵察、目標物測距及隱形技術等 (Guo et al., 2011、Li et al., 2012、Demirci et al., 2012、Zhang et al., 2012)[3-6]。但對於潮濕的戰場環境，毫米波目標偵測系統可能出現許多大氣環境造成的限制，本土大氣參數對毫米波段的影響為何，實應列為各類武器開發的重要參考因子。

對臺灣而言，由於位於副熱帶地區又為海陸交接帶，天氣變化多樣化，低層大氣又深受周邊海洋影響，水氣常會隨天氣系統、熱力直接環流的平流過程及土壤和植被的擴散和蒸散作用出現在各地區，進而影響各類電磁導引武器系統的效能。本研究藉位於國防大學理工學院之雙偏極化輻射儀，利用其 36.5 GHz 之毫米波接收頻段，針對不同大氣環境條件、日夜溫差及季節變化，實施特定目標物（坦克）及背景大氣輻射的量測，計算目標 Tb、背景 Tb 及目標與背景亮度對比度，期能掌握特定物體之熱輻射物理特性，以利進一步發展應用。

二、研究方法

本研究是應用RPG-4CH-DP 18.7、36.5 GHz雙極化輻射儀（以 36.5 GHz為觀測主體），針對特定物體(坦克群)置於真實大氣中之特定位置（草地），以長時間接收其目標和背景大氣輻射差異方式，建立其亮溫基本資料，此時因自動記錄之氣象觀測站亦放置於鄰近地點，因此可採同步觀測大氣變化方式執行，藉以瞭解大氣環境變化對特定目標亮度溫度之影響；研究過程中，為順利執行本研究之觀測實驗，特將本儀器自原址搬遷至特定位置，並自約三層樓之高度(7.303 公尺)朝位於地面之特定目標物（坦克）進行觀測，以期能量測坦克材質之輻射特性和不同背景之輻射亮度對比；另外，儀器搬遷後，亦使用以液態氮為冷背景的絕對零度來實施校正，確保資料可信度（觀測地點相關方位高度及配置如圖一）。為有效量測大氣環境對毫米波段之影響，另挑選 2014 年 5 至 8 月台灣地區天氣變化最大的月份進行觀測，觀測期間氣溫涵蓋 12 至 36 度，並出現多次降水情形，其他大氣環境包含風向風速、溫濕度、氣壓、雨量、降雨率、日輻射量等皆已一併納入計算，期能瞭解各類大氣環境產生的影響。以下分別介紹運用於本研究之兩種觀測儀器及參數設定。



圖一 輻射儀觀測地點方位、高度及配置示意圖

(一) 雙偏極化輻射計

本研究使用之雙偏極化輻射計，位於國防大學理工學院，自 2009 年 2 月 24 日啟用，可觀測仰角範圍由 -90° 至 $+90^\circ$ ，可觀測方位角由 0° 至 360° ，資料時間解析度最佳為每秒 1 筆。輻射計的二個波段頻率分別為 18.7 GHz 與 36.5 GHz，本研究使用之資料為 36.5 GHz 頻段（毫米波），其兩頻道的頻寬皆為 400 MHz，均包含垂直與水平線性極化頻道，可觀測兩頻率之偏極化亮度溫度，輻射計相關規格及諸元如表一。儀器會進行例行性的校正，包含 Dicke 開關校正、以液態氮為冷背景的絕對零度校正及天空輻射校正(sky tipping)，資料品質可信度高。

表一 雙偏極化輻射計性能參數表

參數	說明
系統雜訊溫度	$< 500\text{K}$
輻射解析 (radiometric resolution)	均方根為 0.2(設定為 1.0 秒時)
頻道頻寬	400 MHz
系統絕對穩定度	1.0 K
測量範圍	0-350 K
絕對校正	內部 Dicke 開關及外部冷目標(液態氮)
接收器和天線的熱穩定	準確度 $< 0.05\text{ K}$
亮度溫度的計算	普朗克輻射傳遞定律
積分(測量)時間	≥ 1 秒
資料介面及傳輸速度	RS-232 接頭、9.5 kByte/秒
內部管理(housekeeping)	記錄所有系統各項參數
波束一半能量位置(HPBW)	10.25°
旁瓣位準(Sidelobe level)	$< -30\text{ dBc}$
標點移動	仰角：3°/秒、方位角：5°/秒
儀器作業溫度	$-30^\circ\text{C} \sim +45^\circ\text{C}$
消耗功率	平均小於 350 瓦特，最大 500 瓦特
輸入電壓	90 至 230 伏特，50 至 60 赫茲
重量	接收模組 105 公斤，基座 300 公斤

(二) Davis 6152 全自動氣象觀測站

本研究設置之全自動氣象觀測站 (Davis 6152) 位於觀測現地室外，其由基本的三件式主件組成：室內主控台，用以顯示各項氣象數值；室外部份則是一個風向與風速整合的元件，跟一個配備著太陽能與鋰電池備援的雨量筒；溫濕度與資料整合傳送機板合而為一的單元，這個整合單元簡稱為 ISS 單元，其外觀及設置地點如圖二。此儀器具備傳送距離長、取樣密度高、室外傳感器以太陽能及鋰電池供電、安裝方便及擴充性強等優點，本實驗設定以 5 秒鐘之自動觀測週期，進行全天候 24 小時全自動記錄觀測目標所在位置的各項大氣資訊（溫濕度、氣壓、風向風速、降雨量及降雨強度、日照強度等），並定期實施大氣和被動輻射值同步分析，期能依日、夜、季節、不同降水強度實施輻射探測，以記錄並分析目標及背景輻射可能之差異，深入探討大氣環境對目標之被動輻射值影響程度。



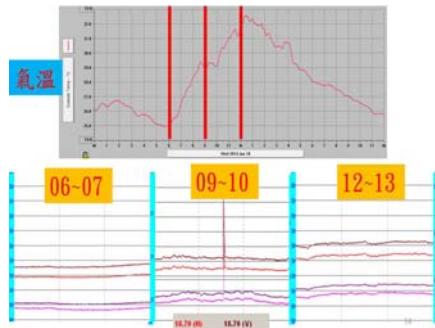
圖二 Davis 6152 全自動氣象觀測站外觀及架設地

三、結果與討論

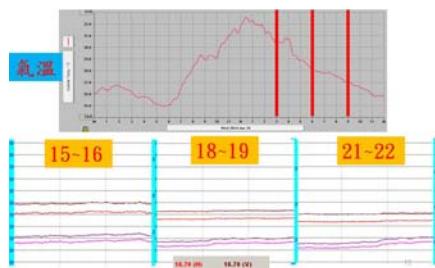
(一) 目標區熱平衡探測

為瞭解坦克與背景輻射值之日夜變化，本研究選定 2014 年 6 月 18 日之大氣觀測資料與輻射值進行比對分析，因當天觀測資料顯示無降雨，且最高最低溫差達 7.5°C 。當日溫度自凌晨 6 時起開始逐漸

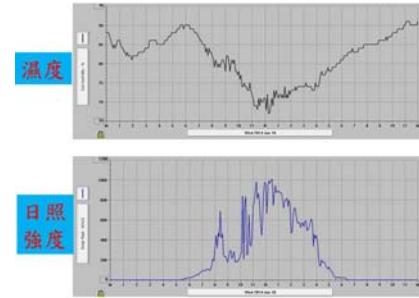
上升，並於中午 12 時 30 分左右達到最高溫，因此吾人選取 6~7 時、9~10 時及 12~13 時三個時段的輻射計觀測值，並畫出 Tb 變化分布圖（圖三）。由圖中可以發現，6~7 時 36.5 GHz 頻段亮度溫度約在 200 K 左右變動，但到了 12~13 時其亮度溫度增大至 215 K 左右，且在溫度主升段呈現逐漸上升之趨勢；而當日氣溫自 12 時 30 分起隨時間逐漸下降，因此吾人選取 15~16 時、18~19 時及 21~22 時三個時段的輻射計觀測值，並畫出 Tb 變化分布圖（圖四）。由圖中可以發現，在溫度主降段 36.5 GHz 頻段亮度溫度同樣呈現隨時間降低的趨勢，因此可研判坦克與背景輻射值與氣溫呈現正相關，且其 Tb 約有 15 K (200~215 K) 之日夜變化。若將當日觀測資料之濕度與日照強度擷取出來做比較（圖五），可發現坦克與背景輻射值與濕度反而成負相關，而與日照強度亦大致呈現正相關。其餘各日類似的天候狀態，均呈現同樣的趨勢（圖略）。



圖三 上圖為 6 月 18 日氣溫日變化圖，紅色粗實線分別為 06 時、09 時及 12 時氣溫；下圖為同日 06 時至 13 時 Tb 變化分布圖，紅色、咖啡色實線分別代表 18.7 GHz 水平和垂直極化 Tb、粉紅色、紫色實線分別代表 36.5 GHz 水平和垂直極化 Tb



圖四 同圖三，但上圖紅色粗實線分別為 15 時、18 時及 21 時氣溫；下圖為同日 15 時至 22 時 Tb 變化分布圖



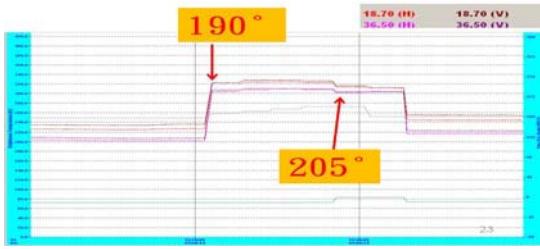
圖五 6 月 18 日相對濕度 (%) 及日照強度 (W m^{-2})

為了瞭解目標（坦克本體）亮溫和環境（草地）亮溫，受大氣影響產生變異的主要原因，使用接觸型溫度計，分別對坦克受太陽照射位置及未受太陽照射位置，草地受太陽照射位置及未受太陽照射位置同步實施溫度量測，結果發現，坦克受太陽照射位置，隨太陽輻射的增加，溫度上升，且較環境氣溫上升快，最高溫差可達 15°C，坦克未受太陽照射位置，氣溫僅略微上升，草地受太陽照射位置溫度略高於氣溫，其未受太陽照射位置，地溫略低於氣溫。（圖略），由此推論，目標區熱平衡探測中，日間時段，坦克與背景輻射值與氣溫呈現正相關的直接原因，應來自坦克群的溫度受太陽輻射影響，坦克金屬溫度快速上升所致。

（二）目標區環境氣溫輻射特性

為瞭解坦克材質之輻射特性和不同大氣背景之輻射亮度對比，本研究於 8 月 5 日 1500 時、8 月 7 日 2030 時及 8 月 8 日 0500 時三個時段，進行坦克與背景之亮度溫度量測，分別代表下午、夜晚及清晨三種不同之大氣背景，同時藉由改變輻射計方位角觀測環境背景（草地、樹木）輻射並與坦克之目標輻射比對。8 月 5 日 1500 時觀測資料顯示，溫度 27.8°C，濕度 87%，日照強度為 204 W/m²。實驗進行時依序將輻射計之方位角調整為 190°、195°、200° 及 205°，每個方位角分別觀測約 3 分鐘，觀測之結果如圖六所示。由圖中可知，當輻射計方位角未變動時目標區 Tb（含坦克）(36.5 GHz) 約在 202~210 K 之間，但當輻射計方位角調整為 190° 時，目標區（以草地為主）Tb 大幅增加至 304~310 K 之間（如圖七 a），顯示坦克與草地之輻射強度相差約 100 K 左右；而當輻射計方位角調整為 195° 至 200° 時，觀測到之 Tb 變化不大，應是目標區觀測範圍仍以草地為主所致；當輻射計方位角調整為 205° 時，目標區改以樹木為主（如圖七 b），觀測到之 Tb 略微下降至 302~305 K 之間，顯示背景以草地為主之輻射強度稍大於以樹木為主之輻射強度，上述坦克與背景輻射強度比對整理如表二 a。接下來在 8 月 7 日 2030 時及

8月8日0500時，以同樣的觀測掃瞄策略，進行坦克與草地背景、數目背景之輻射強度比對，比對結果整理如表二 b及表二 c。由此三個觀測個案結果顯示，清晨時草地和樹木之背景輻射強度最低，約與下午及夜晚時相差3~5K左右，應與凌晨太陽尚未升起時溫度最低有關；而無論在哪一種大氣環境下，坦克之輻射強度與草地、樹木等背景之輻射強度差值可達100K以上，很容易便可將其自背景中分辨出來；值得注意的是，理論上清晨因輻射冷卻效應，坦克之溫度應較下午及夜晚為低，但在本實驗中清晨觀測到之坦克輻射強度卻與下午及夜晚時相差無幾，推測原因可能是坦克上有露水，導致輻射計接收到水滴的輻射，彌補了因坦克溫度降低而減少的輻射強度，惟此推論尚須進一步驗證。



圖六 固定俯角，不同觀測方位角之Tb分布圖



圖七 輻射計方位角觀測範圍實景拍攝，(a)為190°
(b)為205°

表二 坦克與背景輻射強度量測值，(a)為8月5日1500時、(b)為8月7日2030時、(c)為8月8日0500時

(a)		Date 8/5	Tanks BT(K)	Trees BT(K)	Grass BT(K)
36.5(h)	202~203		303~305	304~309	
36.5(v)	208~210		302~304	307~311	

(b)		Date 8/7	Tanks BT(K)	Trees BT(K)	Grass BT(K)
36.5(h)	203~204		298~302	299~304	
36.5(v)	210~211		300~304	301~304	

(c)		Date 8/8	Tanks BT(K)	Trees BT(K)	Grass BT(K)
36.5(h)	203~204		304~305	302~308	
36.5(v)	210~211		303~304	303~306	

由黑體輻射理論可知，不論是目標物（坦克）或背景（樹木、草地），其輻射強度應與本體溫度有絕對之正相關性，為了驗證此一特性，本研究將觀測資料中不同溫度區間（22~24度、28~30度、34~36度）的部分挑出，並比對其中溫度相同但日期及時段不同之輻射強度觀測資料，以瞭解相同溫度是否具有相似之輻射強度特性，結果發現（如表三），在溫度22至24度的區間，項次2、3兩天之亮度溫度差異約有15~18K左右，顯然有受非溫度因素之其他大氣環境參數影響。比較此兩日之降雨量及相對濕度後發現，雖皆無降雨情形，但項次3相對濕度達100%，而項次2僅有90%，因此推測可能是項次3坦克上有露水產生導致亮度溫度較高所致。接下來比對不同時段且不同日期之輻射強度觀測值，項次1之36.5GHz頻段水平亮度溫度約在203~204K，垂直亮度溫度約在209~210K；而項次4由於有降雨發生，亮度溫度均在220K以上，無法用來比對。項次1與項次3之Tb差異不大，而項次1相對濕度約為98%，亦接近項次3之100%。由此溫度區間比對結果顯示溫度相同情況下，若相對濕度接近100%，則輻射強度受水氣影響會有偏高情況發生。

表三 不同日期與天氣之熱平衡輻射測試表

項 次	1°	2°	3°	4°
日期時間	6月30日(RH98%)	7月16日(RH90%)	7月19日(RH100%)	7月25日(降水)
氣溫°	2045時至2100時	0100時至0200時	0100時至0200時	1900時至2000時
22°C至24°C	36.5(H)203~204K	36.5(H)189~190K	36.5(H)203~205K	36.5(H)220~300K
	36.5(V)209~210K	36.5(V)192~193K	36.5(V)209~211K	36.5(V)230~300K
項 次	5°	6°	7°	8°
日期時間	6月21日(降水)	6月24日(RH75%)	7月7日(RH75%)	NA°
氣溫°	1415時至1500時	0900時至0925時	1900時至1925時	
28°C至30°C	36.5(H)>230K	36.5(H)201~206K	36.5(H)192~194K	NA°
	36.5(V)>230K	36.5(V)208~211K	36.5(V)197~198K	
項 次	9°	10°	11°	12°
日期時間	7月6日(RH70%)	7月7日(RH70%)	8月2日(RH70%)	8月3日(RH70%)
氣溫°	1100時至1200時	1100時至1200時	1100時至1200時	1400時至1410時
34°C至36°C	36.5(H)199~200K	36.5(H)201~203K	36.5(H)201~203K	36.5(H)208~209K
	36.5(V)205~206K	36.5(V)208~209K	36.5(V)206~208K	36.5(V)214~215K

在溫度28至30度的區間，挑選三筆觀測資料（項次5~項次7）來實施說明，項次6之36.5GHz頻段水平亮度溫度約在201~206K，垂直亮度溫度約在208~211K，項次6、7兩天之亮度溫度差異約12~13K，但此兩日相對濕度皆在75%左右，顯然非溫度及濕度所影響。比較此兩日之太陽輻射強度後發現，項次6太陽輻射強度約為200W/m²，且正逐漸上升中；而項次7由於已日落太陽輻射強度降為0W/m²。因此推測可能因太陽照射坦克金屬導致其本體溫度高於大氣溫度，導致輻射強度較強。項次5因有降水，因此雖然環境氣溫相同，但亮溫均偏高。

在溫度34至36度的區間，項次9之36.5GHz頻段水平亮度溫度約在199~200K，垂直亮度溫度

約在 205~206 K；而項次 10 之 36.5 GHz 頻段水平亮度溫度約在 201~203 K，垂直亮度溫度約在 208~209 K，兩天相差不大，顯示高溫時輻射強度主要受溫度參數影響。項次 11 之 36.5 GHz 頻段水平亮度溫度約在 201~203 K，垂直亮度溫度約在 206~208 K，與之前兩日的結果相差不大；而項次 12 之 36.5 GHz 頻段水平亮度溫度約在 208~209 K，垂直亮度溫度約在 214~215 K，比之前要高出約 7~8 K 左右，推測為坦克金屬吸收太陽輻射導致本體溫度上升，在下午時段達到最高值所致。

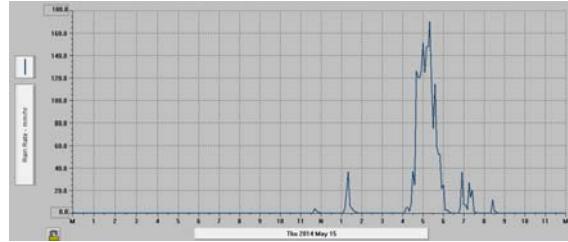
近期相關研究結果顯示，若設定以毫米波波長為 8 mm 之輻射溫度分佈場景模型，假設坦克車體溫度為 35°C (或 308 K)，且輻射率 ϵ 為 0.1，環境溫度為 25°C (或 298 K)，且地表輻射率為 0.9，則可推導出背景的亮度溫度為 278.5 K (陳等, 2014) [7]，與本實驗觀測到之亮度溫度相差不遠，差異值可能來自於背景與坦克之輻射率誤差，證明本實驗觀測數據之可信度高。

(三) 目標區環境降雨輻射特性

由過去研究結果顯示，本研究所使用之雙偏極化輻射計可用來估算降雨強度及區分大氣中的雲水及雨水 (葉等, 2011) [8]，主要是利用雨滴放射率 (約 0.9) 遠高於晴空大氣分子的放射率之原理，因此，其觀測值反映的是整個氣柱的液態水含量，甚至在雲滴落下造成降雨前即可反映出潛在降雨機率。本研究為了瞭解在不同降雨強度下，雨滴對坦克及背景輻射所造成之影響，挑選 2014 年 5 月至 7 月共 40 個有降雨之個案進行分析，另外，為了進一步分析不同降雨率對毫米波輻射強度所造成之擾動變化，統計方式為將降雨發生時間點之輻射計亮度溫度記錄下來，同時亦記錄該次降雨事件所造成輻射計亮度溫度之最大值，作為輻射強度之擾動區間，而其平均值則為該次降雨事件之平均輻射強度，統計分析結果分述如後。

首先以 5 月 15 日之觀測資料進行分析，因根據當日之降雨強度觀測資料顯示，有出現降雨強度為 4.3 及 11.9 mm/hr 之小降雨，亦有出現降雨強度為 36.8 及 170.2 mm/hr 之強降雨 (如圖八)，可用來比對在不同降雨強度下坦克及背景輻射值之變化，統計結果如表四所示。由表中可以發現，當降雨強度由 0 增加至 11.9 mm/hr 時，坦克及背景輻射值亦逐漸增加，且增幅達 33 K 左右，但當降雨強度持續增大為 36.8 mm/hr 甚至達 170.2 mm/hr 超強豪大雨等級時，坦克及背景輻射值雖亦隨著增加，但增幅僅有 23~30 K 左右，顯然已達到該頻段所能觀測降雨之門檻值。值得注意的是，一旦降雨發生後，坦克之輻射強度將逐漸增大至與環境背景輻射一致，

即使只是 4.3 mm/hr 之小降雨，亦會導致目標物坦克無法從環境中辨識出來，原因為輻射計所接收之輻射主要皆來自於降雨粒子所致。



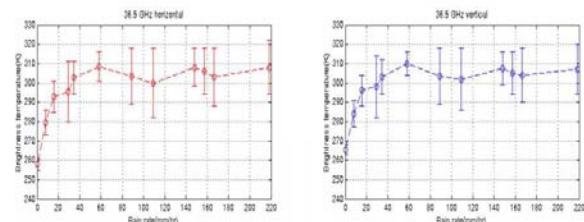
圖八 5 月 15 日降雨強度日變化分布圖

表四 5 月 15 日不同降雨強度下坦克及背景輻射值之變化統計

Rain rate(mm/hr)	Brightness temperature(K)
0	257~274
4.3	288~306
11.9	290~307
36.8	313~322
170.2	313~338

(四) 降雨事件之篩選及統計分析

在 40 個有降雨之個案中，雖然輻射強度與降雨率大致呈現正相關，但其中仍有幾個降雨事件輻射強度並未隨著降雨率增加。仔細分析降雨觀測資料後，歸納出兩個可能原因，一為單日出現多個不同降雨率之降雨事件，這樣一來可能土壤或草地會因前幾波的降雨導致含水量增加，進而影響到輻射計觀測之輻射強度，因此若遇到這樣的事件則只保留第一波降雨的觀測資料來進行分析；二為雖觀測到較大降雨率但降雨量卻明顯偏少，代表降雨持續時間短且水氣含量不足，因此也將這樣類似的降雨事件篩選掉，不納入統計分析的結果中。藉由以上兩點將降雨事件篩選過後，得到之降雨率與輻射計亮度溫度對應圖，如圖九。



圖九 經過篩選後之降雨率與輻射計亮度溫度對應圖，(圖左)為水平極化 (圖右)為垂直極化

由圖九可以看出，經過降雨事件篩選後，降雨率與輻射計亮度溫度幾乎呈現非常好的正相關，在0至20 mm/hr降雨率區間，輻射計亮度溫度約在255 K至295 K之間，而在20至60 mm hr降雨率區間，輻射計亮度溫度約在295 K至310 K之間，當降雨率大於60 mm hr時，輻射計亮度溫度皆在300 K至310 K之間；由此可見，當降雨率小於20 mm hr時，其輻射強度增加幅度最大，而當降雨率逐漸增加至60 mm hr時，輻射強度增加幅度逐漸減小，應為水氣含量達到該頻段所能觀測之飽和值所致。根據之前背景輻射量測的結果，草地及樹等背景輻射值約在298 K至310 K之間，因此統計結果顯示當降雨率大於20 mm hr時，目標物之輻射強度即接近背景輻射強度，將導致目標物無法自背景中被有效區別出來。

五、結論

由上述分析結果可知，各種不同大氣環境確實會對被動式毫米波輻射偵測造成影響，例如溫度之日夜變化若為7.5°C，約可造成輻射值15 K之變動；溫度參數仍為影響輻射強度之主要指標，溫度越高，輻射強度越強之趨勢是可以確定的，惟在溫度相同之情況下，輻射強度仍會受環境相對濕度及太陽輻射強度之影響而有所變化，統計結果顯示同樣溫度條件相對濕度在接近100%的情況下，亮度溫度將提高約15~18 K左右，而太陽輻射亦會造成12~13 K左右之亮溫提升，其中又以14時左右將達到峰值。

目標物坦克之輻射值與背景輻射值（草地及樹木）約存在100 K左右之差異，顯示坦克即使躲藏在此地區，仍能藉由被動式毫米波探測技術將之分辨出來；但若有降雨現象發生，目標區Tb值會和降雨強度呈現正相關，降雨率越大，輻射強度越強，但有其上限閾值，約在311~319 K之間，視其當時環境溫度條件而定，由觀測資料可發現12時至14時發生之降雨可使亮溫增加到319 K，但清晨及傍晚之降雨則僅能使亮溫增加到313 K左右，而降雨率只要大於20 mm hr亮溫即接近閾值，增加的幅度將緩慢許多，且逐漸接近背景輻射亮溫，導致坦克與背景輻射趨於一致，而不易利用被動式毫米波探測技術將之分辨出來，當降雨強度達到58.2 mm hr時，則目標與背景完成無法分辨，此降雨強度亦為本次研究中，36.5 GHz分辨目標的閾值。

六、參考文獻

- [1] Hu, T. Y., Z. L. Xiao, J. Z. Xu, and L. Wu, "Effects of reverse radiation noise on millimeter-wave radiometric imaging at short range," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 21, 177-188, 2011.
- [2] Chen, X. and J.-Z. Xu, "A novel method for waveform jamming based on millimeter-wave alternating current radiometer," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 27, No. 1, 1-11, 2013.
- [3] Guo, R., R. Z. Liu, J. Zhang, and G. Li, "Study on damage assessment of terminal-sensitive projectile firing at armored targets," 2011 Fourth International Conference on Information and Computing, 302-305, 2011.
- [4] Li, X., Z. M. Dong, H. Wang, Q. C. Meng, Z. T. Wang, and Y. W. Zhang, "A novel approach to selecting contractor in agent-based multi-sensor battlefield reconnaissance simulation," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Vol. 5, No. 6, 985-995, 2012.
- [5] Demirci, S., H. Cetinkaya, E. Yigit, C. Ozdemir, and A. A. Vertiy, "A study on millimeter-wave imaging of concealed objects: Application using back-projection algorithm," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 128, 457-477, 2012.
- [6] Zhang, G. F., G. W. Lou, and X. G. Li, "Experimental research on passive millimeter wave radiometric stealth technology of metal objects," *J. Infrared Millim. Terahz Waves*, Vol. 33, No. 12, 1239-1249, 2012.
- [7] 陳永茂、陳德徽、邱順興，"被動式毫米波目標偵測系統設計分析"，新新季刊，第四十二卷，第三期，第50-56頁，2014。
- [8] 葉南慶、汪建良、陳萬金、胡仁基、蔡明達，"利用地基雙偏極化微波輻射計估算降雨"，大氣科學，第三十九期，第三號，第215-242頁，2011。
- [9] Chen, X. and J.-Z. Xu, "Research on millimeter-wave radiation characteristics of solid target," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 29, 151-164, 2013.