

Ka波段之電波傳播特性 及雨衰減之影響

Characteristic of Wave Propagation on Ka-Band
and Affects of Rain Attenuation

張緒萍、施順鵬 Shu-Ping Chang and、hun-Peng Shih

提 要

近年來衛星通訊業務種類日益繁多，使得世界各國普遍使用的C頻段及Ku頻段頻道愈來愈擁擠而日漸飽和。因此Ka波段衛星通訊系統將成為衛星通訊的明日之星。Ka波段較C、Ku頻段受降雨及大氣氣體吸收的衰減較為嚴重。本文將探討ka波段之電波傳播特性及雨衰減之影響。另外，目前海軍是國軍中擁有衛星通信站台數量最多，且使用衛星通信最頻繁的專業軍種。本文提供實際操作衛星通信裝備之海軍官兵，當降雨或濃霧等氣候不良狀況衛星通信鏈路斷訊時，雨衰減與電波傳播特性也可以列入故障排除時之重要考量因素。

關鍵詞：雨衰減、邁散射、中華衛星一號通訊實驗籌載、降水粒子、偏極化的損失、閃爍效應、大氣折射指數、大氣背景雜訊、自由空間衰減

Abstract

There is a wide range on satellite communications business type in recent years, it make increasingly crowded and increasingly saturated for use of channel of C-band and Ku-band. Ka-band satellite communications systems will become a rising star. However, the absorption of rainfall and atmospheric gases attenuation for Ka-band are more serious than C, Ku-band. This article will discuss the feature of wave propagation on Ka-Band and affect of rain attenuation. In addition, the Navy currently has the largest number of satellite communication station in the military, and is the professional armed services of most frequent use of satellite communications. This article provides to the sailors who are practical operation of satellite communication equipment,

When satellite communications link is interruption caused by rain or fog and other bad weather condition, rain attenuation and wave propagation properties can also be included in the troubleshooting of the important considerations.

Keywords: rain attenuation, mie scattering, FORMASAT-1 communication experiment payload, precipitation particle, loss of polarization, scintillation effect, atmospheric refraction index , atmospheric background noise, free space loss

壹、前言

近年來衛星通訊業務種類日益繁多，使得世界各國普通使用的C頻段及Ku頻段頻道愈來愈擁擠而日漸飽和。新系統的頻道(Cmmunication Cannel)協調困難，頻道之取得非常不易，因此Ka波段衛星通訊系統成為寬頻衛星通訊(Wde Bnd Stellite Cmmunication)的新希望，亦將成為衛星通訊的明日之星。我國的中華衛星一號乃將Ka波段通訊實驗做為衛星酬載(Stellite Pyload)之一。國外Ka波段通訊實驗衛星，如美國航空及太空總署(NASA)的ACTS、歐洲ESA(European Space Agency)的Olympus、法國的SENTOR、義大利的ITALSAT衛星，皆進行許多實驗，以提供Ka波段衛星通訊技術可行性的評估，並得到良好的結果¹。

衛星通信採用Ka波段大致有以下優點：

一、Ka波段可使用之衛星頻寬較C、Ku頻段大，(一般C、Ku頻段頻寬為500MHz，Ka波段頻寬為2500MHz)。

二、衛星天線波束窄、頻段高，抗干擾能力強。

三、衛星通信站台的機動性高；天線及收發機之體積小、重量輕。

四、軌道停置位置及頻率使用權爭論問題較少。

五、滿足多媒體運用之市場前瞻性，未來之經濟效益及發展潛力無窮。

但是，Ka波段較C、Ku頻段受降雨(Rainfall)及大氣氣體吸收的衰減(Atmospheric Gases Attenuation)較為嚴重。因為，當無線電波通過地球表面大氣層(Atmospheric Layer)時，會受到大氣環境的影響，使得無線電波訊號強度上有衰減或改變；當我們選擇Ka波段，做為衛星與地面間的通信頻率時，會受到許多因素的影響，使得衛星訊號受到干擾²。

由於無線通信的頻寬很寬廣，為了容易標示所使用的頻率範圍，電氣及電子工程師學會(IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers)在1984年對每個頻

註1：D.Chakraborty ,F.Davarian ,and W.L.Stutzman , "The Ka-band Propagation Measurements Campaign at JPL " ,IEEE Antennas and Propagation Magazine ,VOL.35 ,NO.1 ,February 1993.

註2：Robert K.Crane , " Estimating Risk for Earth-Satellite Attenuation Prediction " ,Proceedings of The IEEE ,VOL 81 ,NO.6 ,June 1993.

附表 頻段簡稱對照表

頻段簡稱	頻率範圍	頻段簡稱	頻率範圍
HF	3-30MHz	X	8-12GHz
VHF	30-300MHz	Ku	12-18GHz
UHF	300-1000MHz	K	18-27GHz
L	1-2GHz	Ka	27-40GHz
S	2-4GHz	V	40-75GHz
C	4-8GHz	W	75-110GHz

資料來源：《新新季刊》第33卷，第2期，民國94年4月。

段設定簡稱，附表顯示頻段簡稱和其對應的頻率範圍³。

附表中，Ku頻段是因為位於K頻段之下(Under)而得名，同理可推知位於K頻段之上(Above)的為Ka波段。國軍衛星通信系統目前使用中新二號衛星，運作在Ku波段；衛星高清晰度電視(HDTV, High Definition Television)規範則運用在Ka波段。各個頻段使用到的服務內容和規範可以參考國際電信聯盟(ITU, The International Telecommunication Union)的電訊規範。

目前海軍是國軍中擁有衛星通信站台數量最多，且使用衛星通信頻率最頻繁的專業軍種。當我海軍軍艦出海巡航執行任務時，因任務特性需求與航程軌跡之通信死角問題，一般的民用通信裝備是無法使用；LF、HF、VHF等頻段的通信鏈路無法通聯。此時，衛星通信就成為唯一且不可或缺的通聯工具。但是，衛星通信裝備在遇到惡劣環境及天候時，又會發生通信品質不良甚至斷訊的狀況，此嚴重問題，除了裝備妥善率及船

艦的俯仰角(Pitch)及滾轉角(Roll)過大或變化太急劇，導致衛星追蹤天線(Tracking Antenna)脫鎖(Loss Tracking)，或是船艦所在位置已超出衛星涵蓋範圍(Coverage Area)。另外，本文將探討的雨衰減及電波傳播特性也是關鍵因素之一。

貳、Ka波段電波傳播特性

一、大氣層中氣體的吸收作用

電磁波在大氣環境下傳播時，由於氣體的吸收(Absorption)作用，會對電波造成衰減；且隨著電波頻率的增大，其訊號振幅衰減愈多。在大氣層中，由氣體吸收作用造成電磁波衰減的主要氣體有二；氧及水汽，二者的吸收特性是和電磁波之間的共振作用所造成。水分子的吸收帶，在電磁波頻率為22.2GHz和183.3GHz附近較為顯著；而氧分子的吸收帶則在60GHz及118.8GHz附近較明顯⁴。當電磁波波長接近厘米甚至毫米時，氧及水汽由於吸收作用對電磁波訊號所造成的衰減，會比雨滴所造成的衰減小很多。以中華衛星一號通訊實驗籌載標誌訊號19.5GHz為例，由ITU所推薦的趨近方程式可用來估計氧及水汽的衰減量；氧及水汽所造成電波訊號的比衰減分別為0.009(dB/km)及0.1769(dB/km)，其中所使用的水汽濃度為17.5g/m³；而由邁散射(Mie Scattering)理論所估計，雨滴所造成的比衰減在地面降雨率為10(mm/hr)時約為0.8147(dB/km)，而當

註3：Asoka Dissanayake, Jeremy Allnutt, Fatim Haidara, "A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and Other Propagation Impairments Along Earth-Satellite Paths", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL.45, NO.10 OCTOBER 1997.

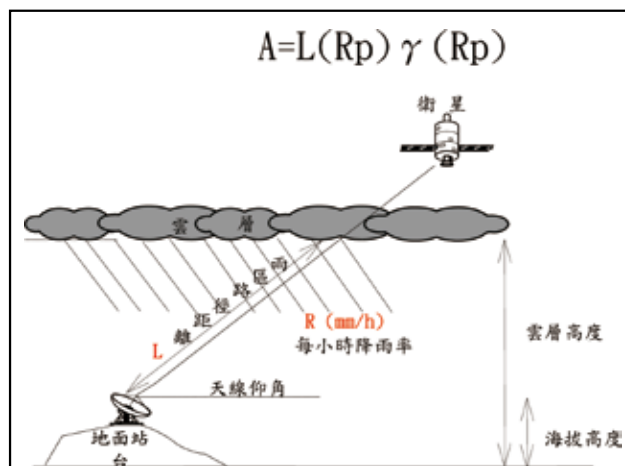
註4：Emilio Matricciani, "Prediction of fade durations due to rain in satellite communication systems", Radio Science, Volume 32, Number 3, Pages 935-941, May-June 1997.

降雨率為30(mm/hr)時，比衰減為2.7613(dB/km)；遠大於氧及水汽所造成的衰減⁵。

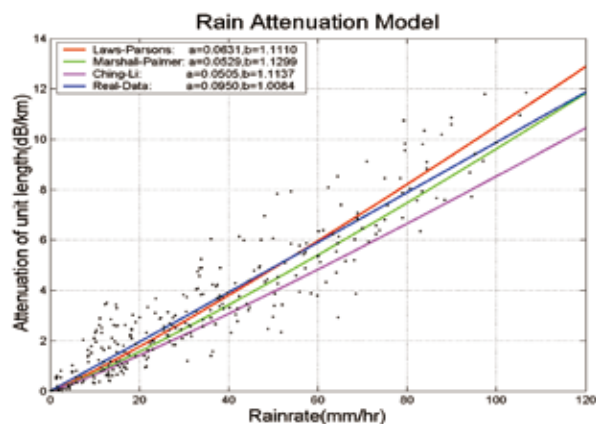
二、降水粒子所造成的衰減

大氣中的降水粒子(Precipitation Particle)包括液態的雨滴及固態的雪、冰、雹等，降水粒子會對電磁波產生吸收與散射作用，而造成電波的衰減。但固態的降水粒子對電磁波的衰減很小，因此可以忽略。不過在溶解層(Melting layer)附近，接近0°C等溫線(Isotherm)，固態降水粒子表面開始溶解成液態，形成了水包冰的狀況，造成在此區域中的固態降水粒子有很高的背向散射截面積(Back-Ground Scattering Cross-Section)，因此對電磁波造成較大的衰減。但此種降水粒子僅發生在溶解層附近，所以造成電波衰減量較小；相對的，雨滴在大氣層中對於電波傳播的有效路徑長(Effective Path)較長，所以會造成較大的衰減。使用Ka波段的電磁波在雨中傳播時，由於絕大部分的雨滴粒徑(Rain-Drop Diameter)都小於0.5公分以內，與此波段對應之波長大小相當，因此滿足邁散射理論⁶。

地表和衛星通訊鏈路(Satellite Communication Link)上所產生的雨衰量A，可以從地表點降雨率(Point Rain Rate)值Rp求得，如下：示意圖(如圖一)。



圖一 衛星通訊鏈路之雨衰減示意圖



圖二 臺灣地區比衰減量與地面降雨率的關係

其中L(Rp)為電波在雨中傳播的有效路徑長， $\gamma(Rp)$ 為雨的比衰減(dB/km)。其中 $\gamma(Rp)$ 與Rp間的關係可由經驗及理論上推得^{7,8}，如下：

$$\gamma(Rp)=a(Rp)^b$$

註5：W.L.Stutzman, et al., "Communications and Propagation Experiments using the Olympus Spacecraft-Report on the First Year of Data Collection," Virginia Tech Report EESATCOM 9 1 -4, submitted to JPL, October 1991 .

註6：Smith,E.K.,Centimeter and millimeter wave attenuation and brightness temperature due to atmospheric oxygen and water vapor,R S,vol.17,no.6,Nov~Dec 1982.

註7：Crane, R. K., "Electromagnetic Wave Propagation Through Rain," Wiley, 1996.

註8：Crane, R. K., " Evaluation of Global Model and CCIR Models for Estimation of Rain Rate Statistics," Radio Sci., 20(4),865-879,1985.

其中， a 和 b 值為電波頻率、雨滴粒徑分布和雨溫度等等的函數，一些學者已經分別求出 a 和 b 的經驗值；以頻率為19.5GHz的電波來說，在Laws與Parsons雨滴粒徑分布及雨溫度為20°C的情況下，其 a 和 b 值分別為0.0631及1.1110。由此可知當降雨愈大時，電波衰減也愈大；尤其當電波頻率進入微波波段更為顯著⁹。

臺灣地區的雨衰模型，由比衰減量與地面降雨率的關係(如圖二)，使用不同的雨滴粒徑分布所估算的雨衰理論值，與實際觀測資料建立的雨衰減模型作比較。其中紅色線(Laws-Parsons)¹⁰、綠色線(Marshall-Palmer)⁸、紫色線(Chung-Li)分別代表由三種不同的雨滴粒徑分布所估算的雨衰減理論值，藍色線則代表實際觀測資料所建立的雨衰減模型¹¹。其中：由觀測值所計算的模型， a 為0.0950， b 為1.0084。由圖中可以看出，觀測值所估計的比衰減量較大於理論值，以地面降雨率為50為例，實驗模型估計的比衰減量，比理論模型大了約0.9；推測原因，由邁散射理論得知，散射體是正圓形的球體，當電磁波通過時，並不會改變極化(Polarization)特性，但實際上降雨粒子在掉落的過程中是扁平狀的，並不是正圓球體，因此當電磁波通過時，因為極化特性改變，產生偏極化影響，造成訊號衰減，使得雨衰減的觀測比值理論值大。也就是說，由理論所估算的臺灣地區雨之比衰減量有被低估的

現象¹²。

由研究結果可以知道，若要在雨中使用Ka波段進行長距離的通訊(Long-Term Communication)，則訊號會被衰減的很嚴重，勢必要加強發射功率才能克服，在使用高頻以增加頻寬(Bandwidth)與資料傳輸速度的同時，必須與成本達成妥協，不過在下大雨時，對於使用Ka波段做長距離的通訊必須非常謹慎小心。

三、偏極化的損失

當電磁波在大氣層中傳播時，有兩種因素會造成電磁波極化特性的改變；一為降水粒子，包含雨滴、或溶解層的影響等；因為降水粒子為非圓形結構，導致由散射作用造成的電磁波，其原本極化特性的改變。二為多重路徑(Multiple-Path)傳播效應；當電磁波傳播時，碰到地面建築物等反射，或是因為大氣折射指數(Atmospheric Refraction Index)隨高度呈層狀分布的影響，使電波彎折，此部分反射或彎折的電磁波和直接波同時到達天線後，會造成接收訊號相位與振幅的改變，而影響了接收訊號的品質¹⁰。

四、對流層閃爍效應

對流層的閃爍效應(Scintillation Effect)，當離地數公里的高度，有大氣折射指數變動，會對入射之電磁波產生繞射及散射現象，因而造成電磁波有快速變動的現象。根據對閃爍效應現象的觀測，可以發現每天的閃爍形態都不一樣，其跟當地的氣候變

註9：Olsen et al., "The aRb Relation in the Calculation of Rain Attenuation," IEEE Trans. Antenna and Propagation, vol. AP-26, NO.2 March 1987.

註10：Shih, S.P., and Y.H.Chu, Ka band propagation experiments of experimental communication payload (ECP) on ROCSAT-1-Preliminary results, TAO, Supplementary Issue, 145-164, 1999.

註11：IEEE, "IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands", Jan. 2003.

化亦有關係。例如當大氣中有降雨、或對流雲的產生，或者是晴空亂流(Turbulence)存在於傳播通道上時，便會發生對流層(Troposphere)閃爍的現象。對頻率為20-30GHz的衛星系統而言，在20-30°仰角時所測量到的閃爍，有雲的情況下為2-6dB，夏天晴空(Clear Sky)時為1dB，冬天晴空時為0.2-0.3 dB¹⁰。

五、大氣背景雜訊

在衛星通訊的傳播通道上，存在著些由大氣本身或是人為造成多餘的訊號，與衛星訊號互相作用時，會使得接收的訊號雜訊比S/N(Signal to Noise Ratio)降低，而影響到接收訊號的品質。此外，由於儀器本身溫度升高的緣故，即會產生熱噪音(Noise Temperature)，也會使得接收機與其系統的雜訊(Noise)都有上升的現象，而降低了接收訊號S/N值¹⁰。

六、自由空間衰減

自由空間傳播(Free Space Propagation)，就是在發射及接收天線間沒有任何介質存在，即為真空狀態，也就是說當電磁波在自由空間中傳播時，不受任何環境的影響，亦沒有反射、折射、繞射、散射、吸收或衰減等現象。

在自由空間傳播的前提下，假設有一等向天線，置於一半徑為d之球中央，其天線增益(Antenna Gain)為G其輸入功率為Pt，則球面上任一單位面積之功率密度(Power Flux Density)Po為：

$$P_o = \frac{P_t \cdot G}{4\pi d^2} \quad w/m^2$$

其中：等向天線的有效天線面積為

$$A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G$$

若在以有效面積為Ar的天線接收時，其接收功率Pr為：

$$P_r = \frac{P_t \cdot G}{4\pi d^2} \cdot A_r \quad watt$$

如把等向發射天線，換為有效面積為At的實用發射天線，則接收功率變為：

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi d^2} \cdot \left(\frac{A_t}{\lambda^2/4\pi} \right) A_r$$

$$= \frac{P_t \cdot A_r \cdot A_t}{d^2 \cdot \lambda^2} \quad watt$$

其中：

Pr：接收功率，Pt：發射功率，At：發射天線之有效面積，d：傳播距離，λ：電磁波波長，Ar：接收天線之有效面積

假使上式的發射天線與接收天線皆為等向天線(G=1)，則：

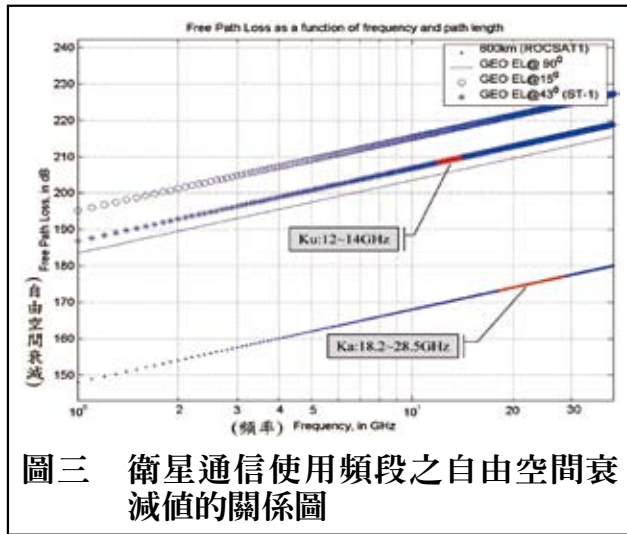
$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{d^2 \cdot \lambda^2}{A_t \cdot A_r} = \frac{d^2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2/4\pi \cdot \lambda^2/4\pi}$$

上式代表之意義為：自由空間內放置兩等向天線，其發射與接收功率之比。所以 $\frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}$ 即代表在傳播路徑內的損失，以L表示：

$$= \frac{d^2 \cdot \lambda^2}{\lambda^4 / (4\pi)^2} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}$$

假設工作頻率為f_{GHz}，兩天線距離為d_{km}，則自由空間衰減L則為：

$$L = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = 157.75 \frac{d^2}{\lambda^2} = 157.75 \cdot \frac{d^2 \cdot f^2}{v^2}$$



圖三 衛星通信使用頻段之自由空間衰減值的關係圖

$$= \frac{157.75 \cdot (10^9)^2}{(3 \cdot 10^5)^2} \cdot f^2 \cdot d^2 = 1752777760 f^2 d^2$$

若改用以分貝(dB)表示，則變為：

$$L_{dB} = 92.4 + 20 \cdot \text{Log} f_{\text{GHz}} + 20 \cdot \text{Log} d_{\text{km}}$$

上式即代表電磁波從發射天線出發，經過自由空間後，到達接收天線所損失的功率¹⁰。

如圖三即顯示衛星通信Ku及Ka波段在不同軌道高度自由空間衰減值的關係圖。其中ROCSAT1為中華衛星一號為低軌道衛星，運轉軌道高度約為600km，ka波段的自由空間衰減為約175dB。

GE0為同步衛星軌道(GE0:Geostationary Orbit)位於赤道上空，高度約為35,800km，目前國軍使用的通信衛星運行在東經88度的地球同步軌道，由臺灣所在位置的經度與緯度，經數學三角運算可獲得衛星通訊地面站的天線仰角約為43度時對準衛

星，電波傳播路徑長度約為32,650km，所以，此時ka波段的自由空間衰減則增加為約210dB。所以，在臺灣使用衛星通信系統，同步軌道衛星的路徑衰減較低軌道衛星(以600km為例)多出約35dB。

參、臺灣南北地區降雨之特性

臺灣雖小，但因其海島氣候特性及中央山脈影響，造成南北地區有相當不同的降雨特性。由中央氣象局1988到1995年分布在全島超過70個觀測站的雨量資料分析，年時間百分比0.01%、0.1%及1.0%時之降雨率值的空間分布等值圖可得，詳如圖四¹³：

一、較大降雨率(1%)：南部>北部。
較小降雨率(0.01%)：南部小於北部。

二、因臺灣冬季吹東北風，山岳阻擋使得大部分的小雨都在東北部。同樣地，夏季受西南風的影響，使得大雨都下在西南部。

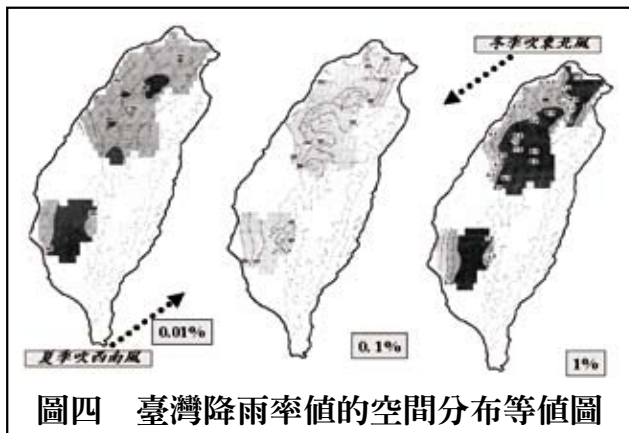
三、因臺灣冬季吹東北風，山岳阻擋使得大部分的小雨都在東北部。同樣地，夏季受西南風的影響，使得大雨都下在西南部。

四、雨衰會受到降雨大小的直接影響，故臺灣南部衛星通訊鏈路(Satellite Communication Link)的可靠度較北部差。

所以，為滿足相同的高鏈路通達率(99.9%)，架設在南部地區之衛星通信地面站台，系統功率餘裕(System Power Margin)需較北部地區高，故設備的成本也相對較高，包括高增益天線(High Gain Antenna)，高功率放大器(High Power Am-

註12：施順鵬，〈臺灣地區Ka波段大氣傳播通道之研究〉，博士論文，國立中央大學，2001年。

註13：賴仲振，〈下一代寬頻衛星通信系統發展與運用〉，《新新季刊》，第33卷，第2期，民國94年4月，頁109-121。



plifier)，高靈敏度(High Sensitivity)的低雜訊接收放大器(LNA:Low Noise Amplifier)等射頻裝備。

肆、結語

Ka波段較C、Ku頻段受降雨及大氣氣體吸收的衰減較為嚴重。因為，當無線電波通過地球表面大氣層時，會受到大氣環境的影響，使得無線電波訊號強度上有衰減或改變；經國內外學者研究，大致可區分為：大氣層中氣體的吸收作用、降水粒子所造成的衰減、偏極化的損失、對流層閃爍效應、大氣背景雜訊及自由空間衰減等因素影響，使得衛星訊號受到干擾。

臺灣因其海島氣候特性及中央山脈影響，造成南北地區有相當不同的降雨特性。要滿足相同的高鏈路通達率，架設在南部地區之地面站台，系統功率餘裕需較北部地區高，故成本也相對較高。

目前我國海軍為國軍中使用衛星通信最頻繁且衛星通信站台最多的現代化科技部隊。國軍衛星通信主要提供語音、數據與傳真等通信服務。指管通情的系統(Command,

Control, Communication, Computer, Intelligence, C⁴I)亦可以透過衛星通信鏈路，進行廣播及收發信文。當我軍船艦出海巡航執行任務時，衛星通信是最重要的通信鏈路，尤其在近期爆發爭端的南海海域，以及敦睦艦隊在中南美洲與非洲的遠航訓練，衛星通信更是與戰管指揮單位通聯的唯一通信工具，必須隨時保持暢通，方能確保演訓任務順利完成。

故在衛星通信站台的系統功率餘裕，必須考量電波傳播特性及雨衰之影響，以確保鏈路通達率99.9%以上的通信要求。另外，本文提供實際操作衛星通信裝備之海軍專業人員，當降雨或濃霧等氣候不良狀況，衛星通信鏈路斷訊時，雨衰減與電波傳播特性也可以列入故障排除時之重要考量因素。

國軍衛星通信系統目前使用中新二號衛星，因為衛星轉頻器關係，地面站台均為Ku波段裝備，中新二號衛星預計運作至112年底。Ka頻段寬頻通信衛星以其頻帶寬、天線口徑小、通信容量大、無地面微波干擾問題，且具波束寬小、方向性強及易於保密等優點，已成為軍事衛星通信的發展走向。本文探討之雨衰減及電波傳播特性設計考量研究期能掌握ka波段衛星通信之技術重點，對我國軍進行Ka寬頻衛星通信系統規劃、設計與運用有所助益。

<參考資料>

1. D. Chakraborty , F. Davarian , and W. L. Stutzman , “The Ka-band Propagation Measurements Campaign at JPL ” , IEEE Antennas and Propagation Mangan-

zine ,VOL.35 ,NO.1 ,February 1993

2. 賴仲振，〈下一代寬頻衛星通信系統發展與運用〉，《新新季刊》，第33卷，第2期，民國94年4月，頁109-121。

3. IEEE, "IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands", Jan. 2003.

4. Robert K. Crane , " Estimating Risk for Earth-Satellite Attenuation Prediction " ,Proceedings of The IEEE ,VOL 81 ,NO. 6 ,June 1993

5. Asoka Dissanayake, Jeremy Allnutt, Fatim Haidara, " A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and Other Propagation Impairments Along Earth-Satellite Paths " , IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 45, NO.1 0 OCTBER 1997

6. Emilio Matricciani, "Prediction of fade durations due to rain in satellite communication systems" , Radio Science, Volume 32, Number 3, Pages 935-941 , May-June 1997

7. W.L. Stutzman, et al., "Communications and Propagation Experiments using the Olympus Spacecraft-Report on the First Year of Data Collection," Virginia Tech Report EESATCOM 9 1-4, submitted to JPL, October 1991 .

8. Olsen et al., "The aRb Relation

in the Calculation of Rain Attenuation," IEEE Trans. Antenna and Propagation, vol. AP-26,NO.2 March 1987.

9. Smith, E. K., Centimeter and millimeter wave attenuation and brightness temperature due to atmospheric oxygen and water vapor, RS, vol. 17, no. 6, Nov-Dec 1982.

10. Crane, R. K., "Electromagnetic Wave Propagation Through Rain," Wiley, 1996.

11. Shih, S. P., and Y. H. Chu, Ka band propagation experiments of experimental communication payload (ECP) on ROCSAT-1 - Preliminary results, TAO, Supplementary Issue, 145-164, 1999.

12. Crane, R. K., " Evaluation of Global Model and CCIR Models for Estimation of Rain Rate Statistics," Radio Sci., 20(4), 865-879, 1985.

13. 施順鵬，〈臺灣地區Ka 波段大氣傳播通道之研究〉，博士論文，國立中央大學，2001年。



作者簡介：

張緒萍中校，中正理工學院電機系81年班，中央大學太空科學研究所碩士，現服務於國家中山科學研究院。

施順鵬博士，中央大學大氣系，中央大學太空科學研究所碩、博士，現服務於樹德科技大學專任助理教授。

