

福衛五號電磁自我相容測試

陳秀莉^{1*} 陳永盛² 余思嫻³ 李清宏⁴

摘要

福爾摩沙衛星五號(以下簡稱福衛五號)是我國第一顆完全自主發展的高解析度遙測衛星,福衛五號搭載之主要酬載為遙測影像儀(Remote Sensing Instrument, RSI)。本篇所討論的 EMI / EMC 測試主要驗證福衛五號衛星本體在任何一種任務操作模式下,當微波通訊系統運作時,如 X 頻段發射器(X-band transmitter)以及 S 頻段微波通訊設備(Radio Frequency Equipment Assembly, RFEA),上傳指令與下載衛星資料與影像資料時,衛星系統都不會發生性能下降或者任何功能故障的情況,確保衛星上的酬載系統與微波通訊系統在衛星上的電磁相容性。

關鍵字：電磁相容、自我相容、微波通訊

1. 前言

福爾摩沙衛星五號(以下簡稱福衛五號)電磁相容(EMI/EMC)測試主要分成三個部分,分別為衛星元件層級(spacecraft component level)、酬載設備層級(Payload instrument level)以及衛星系統層級(Satellite system level)測試。電磁相容測試目的在於建立對應相關的測試技術與方法以實現各層級在 EMC 的性能要求,並建立衛星系統層級的分析、設計與測試方法,滿足 6dB 的 EMC 安全裕度,以確保在任務軌道上、發射場以及運載火箭的環境都能使功能正常運作 (Lee, 2013)。

大部分的太空機構如我國國家太空計畫室(NSPO)、美國國家航空暨太空總署(NASA),歐洲太空總署(ESA),加拿大太空總署(CSA)……等均採用美軍標準規範係依據美軍標準規範 MIL-STD-461 (MIL-STD-461C, 1986) / MIL-STD-462 (MIL-STD-462, 1970)。MIL-STD-461 主要設定陸海空三軍軍事儀器及設備之電磁干擾暨相容測試需求及測試極限範圍,而 MIL-STD-462 則規範測試方法。1999 年 8 月,此兩份美軍標準

MIL-STD-461D/462D 合併成一份標準 MIL-STD-461E (MIL-STD-461E, 1999)。福衛五號所使用的元件、儀器以及次系統之電磁干擾暨相容測試需求及方法,係依據標準作為電磁相容設計與測試的需求。

一般衛星系統的電磁相容測試分為三大項測試程序:1.電磁傳導干擾測試(Conducted EMC)、2.電磁輻射干擾測試(Radiated EMC)、3.電磁干擾自我相容測試(Self-Compatibility)。本文係針對電磁干擾自我相容測試及結果進行介紹說明。

2. 自我相容測試

2.1 測試目的及測試時程

衛星電磁干擾自我相容的測試目的是要驗證衛星在運轉軌道上、發射場和發射載具的電磁環境等地方,對於在衛星本體上 RF 的發射與接收系統,在自由空間鏈路及到地面站進行通信時,其功能都能正常運作。在測試過程中,進行酬載(Payload)影像資料的下傳(Downlink),衛星本體所有的次系統功能操作應能正常,沒有因為遭受干擾而產生異

¹ 國家實驗研究院國家太空中心 副研究員

² 國家實驗研究院國家太空中心 助理技術師

³ 國家實驗研究院國家太空中心 佐理研究員

⁴ 國家實驗研究院國家太空中心 正工程師

* 通訊作者, 電話: (03) 5784208 轉 9553, E-mail: celiachen@nspo.narl.org.tw

收到日期: 民國 104 年 12 月 15 日

修改日期: 民國 105 年 05 月 04 日

接受日期: 民國 105 年 05 月 18 日



常或影響影像資料的正確性。福衛五號衛星系統層級的自我相容測試工作，於民國 104 年 10 月 15 日至 10 月 20 日，在國家太空中心整測廠房挑高區電磁相容電波暗室中執行完成。

2.2 測試方法

本文之電磁自我相容測試是依據福衛五號各次系統的設計、本體型態以及任務操作需求而制定的測試方法 (Lee, 2015)。此電磁自我相容測試是以自由空間無線電波傳播方式進行量測，模擬任務操作，並驗證酬載影像資料經由微波傳送之正確性。

衛星發射無線電波藉由微波天線與地面接收站通訊，將衛星健康狀態資訊以及科學酬載資料藉由 S-頻段天線傳回地面站，而光學遙測酬載的研究數據資料，也是藉由調變後的電波信號，則經由 X 頻段的天線傳遞至地面接收站，因此不同 RF 系統之間必須要有好的抗干擾能力，才能確保衛星正確的軌道運作。

2.2.1 輻射近場

一般而言，天線的電磁輻射特性可經由遠場 (far-field)量測方式得到驗證，遠場條件下，電場、磁場各隨距離一次方衰減，符合能量不減原則，是為輻射的電磁能量(Kraus and Fleisch, 1999)，這也是 EMC 法規想要測的場強。但在衛星量測觀點上，以定義遠場的條件下，需要相當大且建構於室內操控廠房的電波無反射暗室，此需求往往需耗費較多資源費用與時間。因此，一個可替代的量測近似方式，利用輻射近場量測法 (Radiative near-field measurement)，輻射近場又稱作菲涅爾帶 (Fresnel zone)，是依據頻率與天線的特性不同而有所差異，該距離為 (Balanis, 2005)

$$R \geq 2D^2/\lambda \dots\dots\dots(1)$$

D 為輻射體的最大尺寸，λ為波長。電磁波能量在此區域幾乎都能傳遞，而不同於感應近場 (Reactive near field)的電磁能量儲存，雖然與實際

遠場所傳遞的平面波仍有差別，但若是測試通訊鏈路的性能仍可利用此特性來測試驗證衛星訊號藉由天線傳播至地面站的性能。對於福衛五號的電磁自我相容測試，我們設計一套適合 NSPO 廠房中 EMC 電波暗室的量測方式，將福衛五號衛星本體設置於輻射近場的條件下進行測試，利用公式(1)計算出測試距離，D 為參考衛星本體面板的最大尺寸，波長則採 S 頻段與 X 頻段的波長分別計算出 S 頻段與 X 頻段的輻射近場距離為 2 米與 3 米。

2.2.2 路徑損失與極化損失估算

為了計算整個衛星通訊鏈路的功率餘裕(Link / Power Budget)，除了衛星測試距離的定義，也針對此近場輻射的距離估算出自由空間路徑損失 (Free Space Path Loss, FSPL)以及圓極化波的極化損失(Polarization Loss)。在自由空間傳播模型中，最常用的是弗林斯自由空間模型(Friis Free Space Model) (Sklar, 2005)，在一給定傳送端和接收端的距離時，此模型提供了接收端的平均接收功率。由弗林斯自由空間方程式(Friis Free Space Equation)，可以得到自由空間傳播損失的計算公式如下：

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$FSPL(dB) = 10\log\left(\left(\frac{4\pi}{Cdf}\right)^2\right) \dots\dots\dots(3)$$

此公式以分貝(dB)單位表示。f 為測試頻率，d 為接收天線距離發射天線之距離，C 為光速 3x10⁸ m/s。因此根據公式(3)計算，S 頻段與 X 頻段的路徑損失分別為 45.4 dB 以及 60.3 dB。

對於極化損失的評估，一般在遠場條件下，發射端使用圓極化天線而接收端利用線性極化接收，若不考慮 pointing loss，理論值會有 3 dB 功率損耗，但福衛五號衛星規劃將以輻射近場的條件來進行測試，電波的極化分布形態較為複雜，且會與個別天線之圓極化特性相關，因此希望整體損失的部分能夠低於 5 dB，以維持足夠的鏈路餘裕。



2.2 測試架構

2.3.1 衛星本體配置

衛星本體安裝在整合移動平台固定裝置上，以銅金屬搭接帶接地。科學酬載系統皆安裝在衛星本體上，其直流接合電阻值小於 $2.5\text{ m}\Omega$ 。相關之衛星及酬載儀器之電機地面支援設備(EGSE 及 IGSE)透過測試電纜線連接在衛星上，並於移動平台周邊

覆蓋微波吸收體。衛星用電池，須於測試前完成充電，以確保測試期間提供足夠電力給衛星，不會發生電力不足而有充放電情形。衛星本體以及測試天線採直線視角對準方式架設，以量測最大的信號功率。詳細之測試配置示意圖見圖 1，衛星在電波暗室之實體型態進行系統層次電磁自我相容測試照片見圖 2。

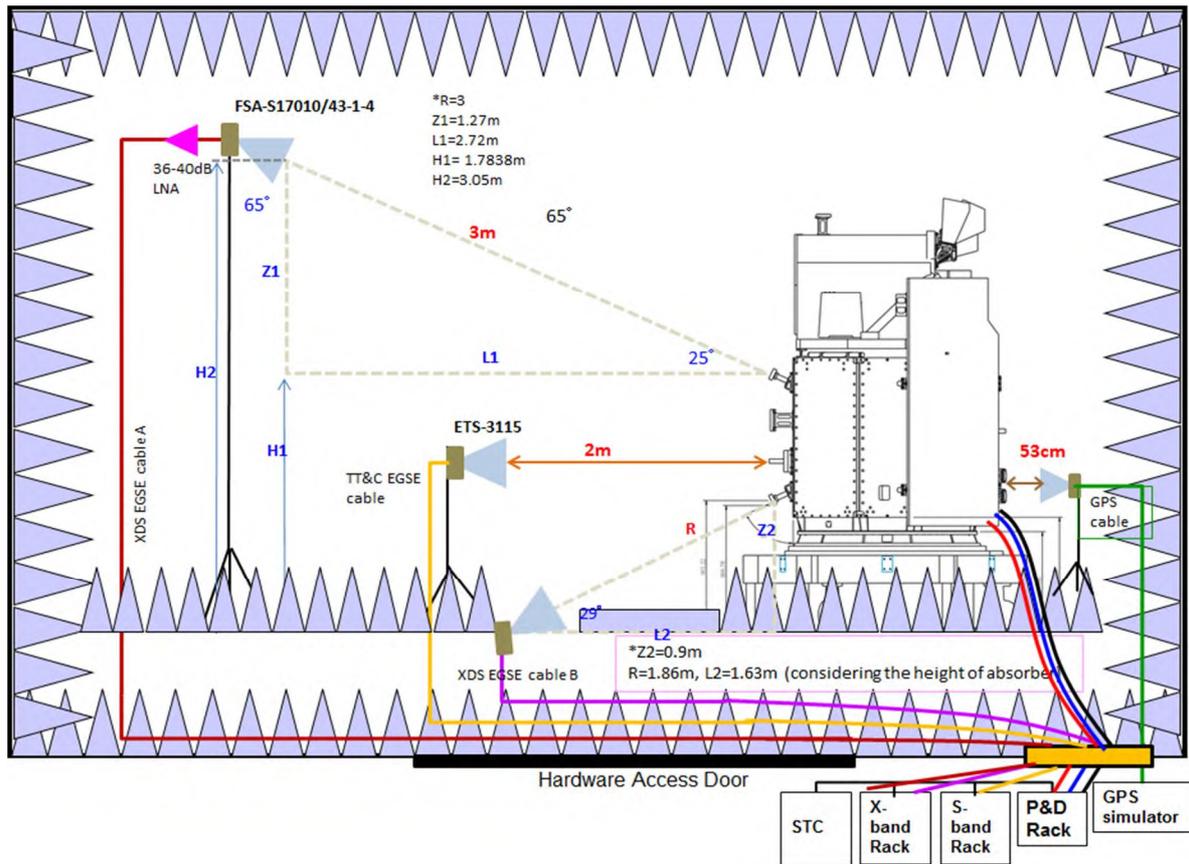


圖 1 衛星測試配置圖

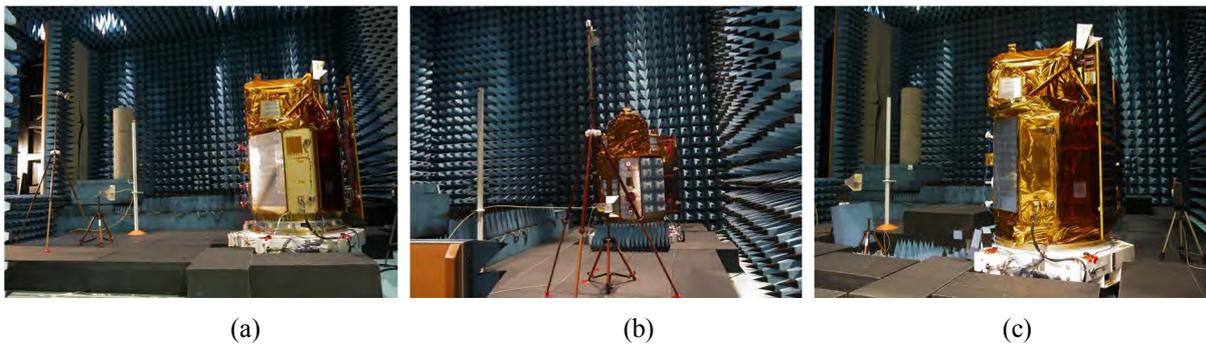


圖 2 電波暗室內電磁自我相容測試



2.3.2 測試儀器配置

相關之衛星及酬載儀器之電機地面支援設備(EGSE 及 IGSE)透過測試電纜線連接在衛星上。電磁相容測試儀器必須盡量接近衛星，須注入衛星訊號之測試儀器均串聯接上 6.25 安培緩慢燒斷之保險絲，以確保避免過度測試產生傷害到衛星。執行電磁自我相容測試時，所有地面電機支援設備為全部開機“ON”狀態下進行量測。

表 1 背景雜訊測試之儀器設備

Nomenclature/Title	Supplier	Model	SerialNumber	Cal. Req. Date
Measurement receiver	R&S	ESU26	100410	2016/5/11
Antenna	EMCO	3115	4792	2016/7/15

表 2 電磁自我相容測試之儀器設備

Nomenclature/Title	Supplier	Model	Serial Number	Cal. Req. Date
S-Band antenna	EMCO	3115	00052314	NA
X-Band antenna	FSA	S17010/43-1-4	2514-4	NA
GPS antenna	Antcom	3G1215P-XS-1-5	410102	NA
GPS Simulator	Spirent	GSS6700	01201140	NA

2.3.3 衛星操作模式

執行測試時，衛星本體處於開機“ON”狀態，並切換所有衛星上的次系統操作構型於“Primary side”其測試流程圖如圖 3 所示。

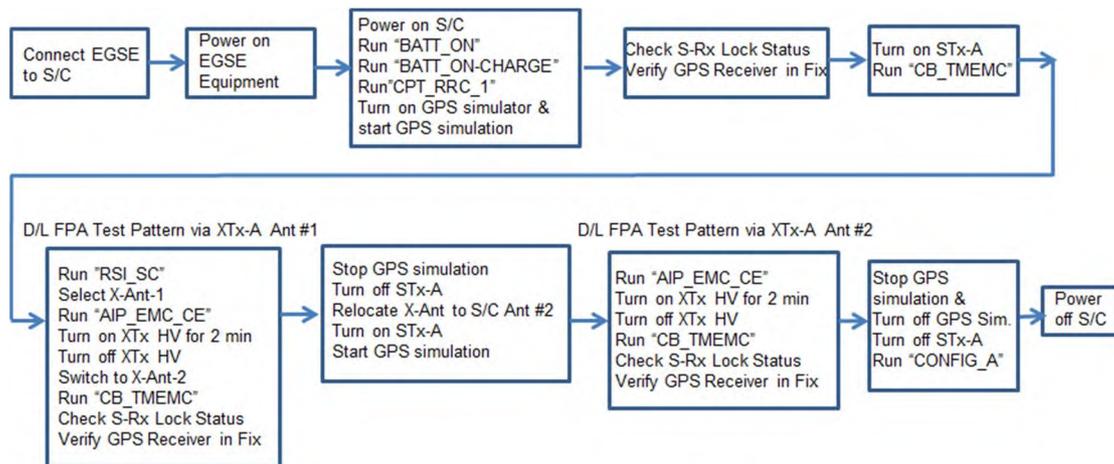


圖 3 衛星測試流程圖

2.3.4 電磁相容通過/失敗認定標準

在電磁自我相容測試項目之測試通過/失敗標準認定如下：

1. GPS 接收機信號接收機，測試期間需固定保持在“Locked”狀態。
2. 光學遙測酬載 RSI 的 dark current 資料，必須經由衛星上的 X 頻段發射天線成功下傳至測



試用 X 頻段接收設備，並且資料正確。

3. AIP 測試資料必須經由 S 頻段天線正確下傳至地面測試接收設備，並且資料正確。
4. 測試期間，持續觀察確認衛星所下傳的健康狀態 Telemetry 資料，不能有任何異常狀態發生。

2.4 電磁量測環境與校正

2.4.1 背景雜訊測試驗證

在執行電磁自我相容測試前，須完成電波暗室

之背景雜訊的測試驗證，此測試驗證與衛星無關，目的為確保電波暗室內的架設並無其他外部干擾源信號洩漏至電波暗室中，而影響測試結果。測試架構如圖 1 所示，衛星狀態為“OFF”狀態，而標準測試用號角天線置放衛星前方，架設天線極化方向分別為水平與垂直極化，量測 1 GHz 到 10 GHz/ 1565 MHz 到 1585 MHz/ 2039 MHz 到 2041 MHz 頻段內之背景雜訊，測試環境之周遭電磁場強度需為測試規範以下 6 dB，方可執行電磁自我相容測試。背景測試流程如圖 4 說明。



圖 4 背景雜訊測試流程說明

測試的背景雜訊量測結果，如圖 5~圖 10 所示。

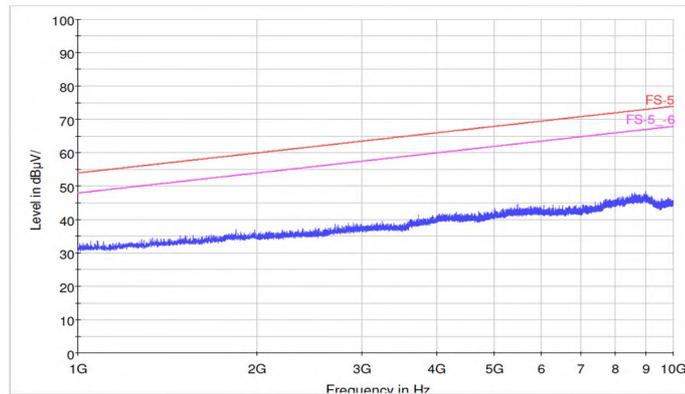


圖 5 量測 1 GHz~ 10 GHz 水平極化背景雜訊

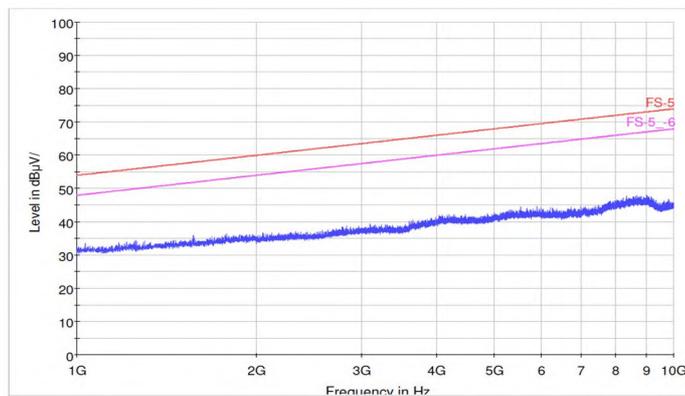


圖 6 量測 1 GHz~ 10 GHz 垂直極化背景雜訊



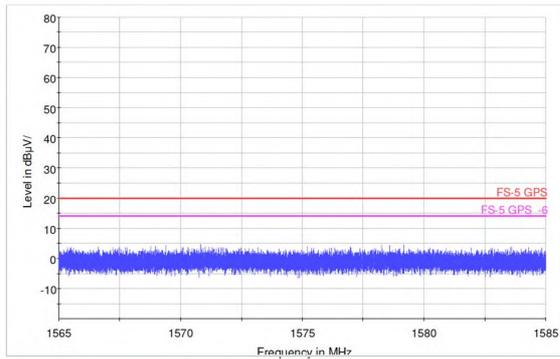


圖 7 量測 1565 MHz~ 1585 MHz 水平極化背景雜訊

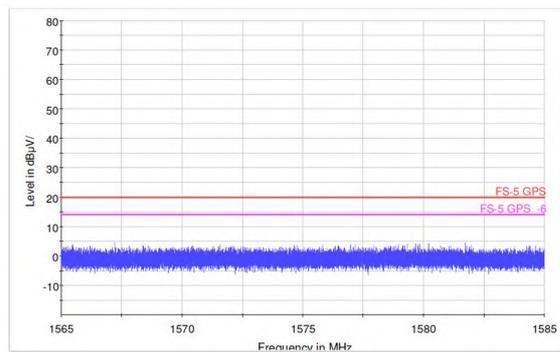


圖 8 量測 1565 MHz~ 1585 MHz 垂直極化背景雜訊

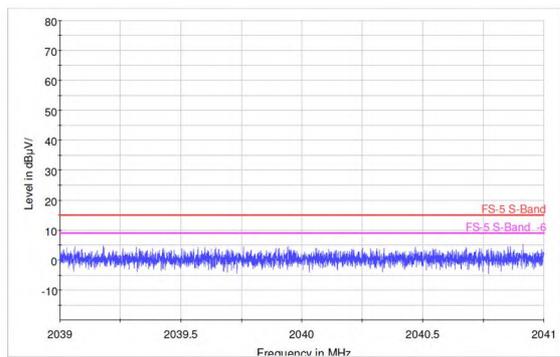


圖 9 量測 2039 MHz~2041 MHz 水平極化背景雜訊

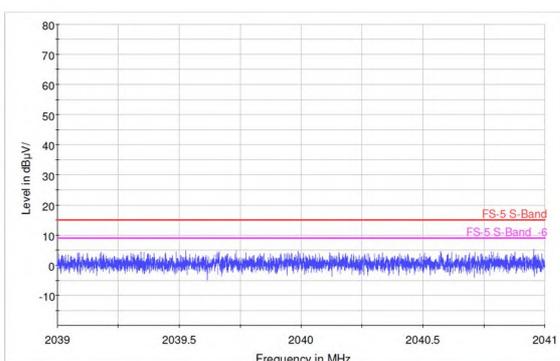


圖 10 量測 2039 MHz~ 2041 MHz 垂直極化背景雜訊

由測試結果可得，量測到的背景雜訊強度皆低於標準規範值的 6dB 以下，故電波暗室環境符合測試標準，故可進行後續的量測項目。

2.4.2 路徑損失量測驗證

為計算測試時所需要的通訊鏈路功率餘裕，故須驗證架設環境的路徑損失，以確保測試進行時，通訊系統有足夠的傳輸功率，能達成資料上傳與指令上傳的動作，若有功率不足之處能在測試前並加以補償。考量實際 EMC chamber 場地大小與衛星架設的限制，將以 Near-field/ Fresnel region 為參考來作為量測的接收距離 (TT&C:2m, XDs:3m)。GPS 因該系統考量 sensitivity 以及系統測試設定，故以 53cm 為接收距離。利用兩組已校正過的 standard gain horn 作為發射與接收天線，此標準天線為寬頻線性極化天線，分別相距 1m, 2m 與 3m 的距離來量測，驗證路徑損失的計算值與量測值誤差，電波暗室內的架設說明請參考圖 11。

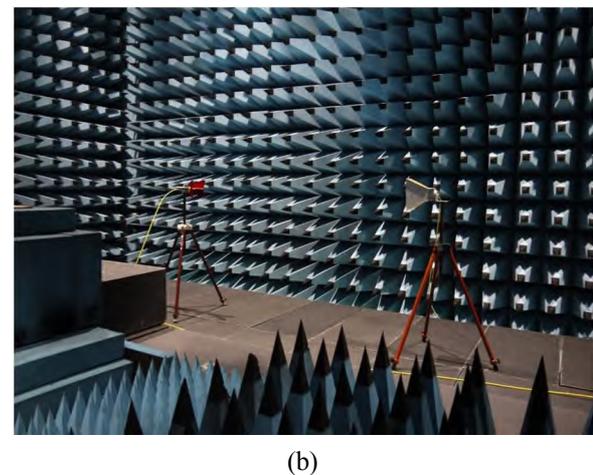
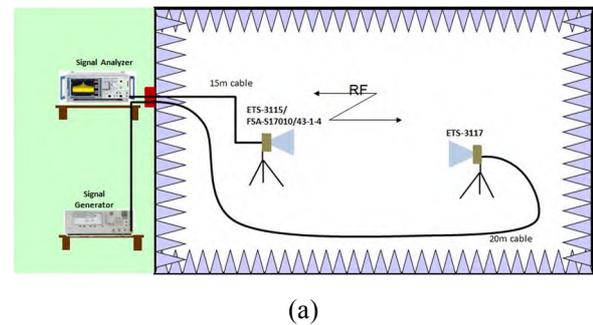


圖 11 電波暗室內的路徑損失量測



根據公式(1)計算所得的輻射近場距離，架設接收天線以及相關測試設備電纜線，設定在輻射近場範圍內所量測的路徑損耗，如下表 3 所示：

表 3 路徑損失量測結果

Frequency Band	Distance (m)	Calculated Path Loss (dB)	Measured Path Loss(B)
S-BandTx (2215MHz)	2	49.87	49.7
S-Band Rx (2039.645833 MHz)	2	48.65	48.9
X-Band	3	58.35	58.2

由量測結果驗證公式(1)所計算的路徑損失值大小，不論是 S-band 或 X-band，若能越接近 Near-field/ Fresnel region 條件，量測值與計算值幾乎是 0.2 dB 以下的誤差。此測試驗證所有的測試設備架設與接線的損耗估算正確性，提供給系統較準確的鏈路餘裕計算之用。

2.4.3 極化損失量測驗證

利用標準的寬頻線性極化號角天線作為衛星通訊信號之接收天線，由於衛星上的天線皆為右旋圓極化天線，故實際上在輻射近場條件，需確認極化損失的數值為何，此驗證目的除了計算實際損耗數值，更重要可藉由測試結果與理論值相互比較，可確認接收天線與衛星之間的架設精準度。此驗證測試利用兩組已知特性的發射接收天線進行測試，分別為發射與接收標準號角天線以及發射為已知特性圓極化平板天線，接收為標準號角天線，如圖 12 說明，比較在輻射近場的條件下，同極化與不同極化天線之間的接收功率差異來估算極化損失大小。

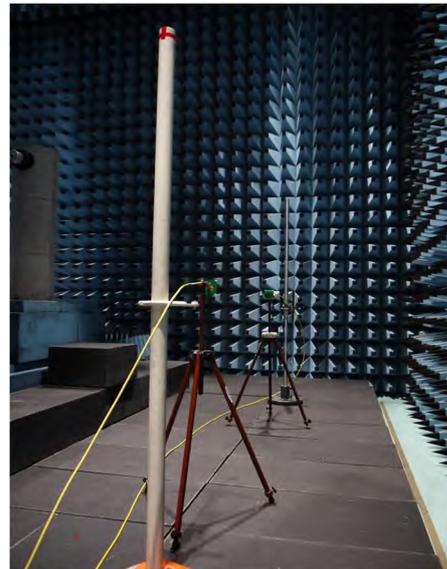
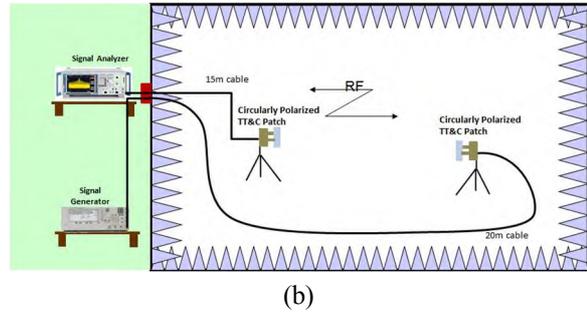
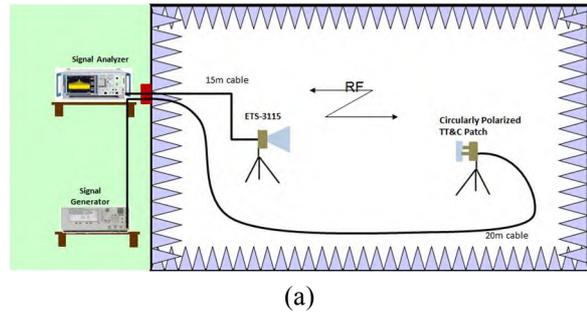


圖 12 極化損失量測 (a) 線性極化天線發射與接收 (b) 右旋極化天線發射與線性極化接收 (c) 電波暗室內測試說明

在輻射近場範圍內所量測的極化損耗，如下表 4 與表 5 所示：

表 4 極化損失量測結果(Tx:CP ant, Rx: LP ant)

Frequency Band	Distance (m)	Expected Pol. Loss (dB)	Measured Pol. Loss(B)
S-BandTx (2215MHz)	2	< 5	4.48
S-Band Rx (2039.645833MHz)	2	< 5	5.52



表 5 極化損失量測結果(Tx:CP ant, Rx: CP ant)

Frequency Band	Distance (m)	Calculated Pol. Loss (dB)	Measured Pol. Loss(B)
S-BandTx (2215MHz)	2	0	0.06
S-Band Rx (2039.645833MHz)	2	0	0.22

由測試驗證結果可得，在輻射近場 2m 的距離條件下，利用標準線性極化喇叭天線發射且圓形極化平板天線接收，實際的量測結果，極化損失約可控制在 5dB 以下，若用改圓形極化平板天線發射接收，實測結果極化損失約可控制在 0.3dB 以下，此結果除了部分架設時造成的誤差，也驗證用相同的極化的天線作接收發射，可以達到最小的極化損耗，若是用了不同極化的天線接收發射，理論值至少會有 3dB 極化損失，場地的條件使得 S-band 的測試距離需限制在 2m (稍小於近場條件)，此測試用平板天線在圓極化特性上也有頻率響應，非完美理想的圓極化天線，故造成量測上 S-Band Rx 約 4-6dB 極化損失比理論值稍高，故僅參考此 2m 距離量測到的較大損耗作為 EMC 量測架設調整時的參考數值，後續則改採用衛星上的圓極化天線以及標準線性極化喇叭天線進行 EMC 量測。總結在 S 頻段與 X 頻段下，路徑損失加上天線極化損失，大約分別為-53.7dB 以及-61dB，當發射信號分別加上此兩頻段的總損耗，其功率大小位準仍能滿足 S 頻段與 X 頻段測試設備的接收靈敏度，此計算分析可以避免測試中因信號過小導致測試結果失敗的發生。

2.5 測試結果

下表 6 為實際量測由衛星端 S-Band Tx 與 X-Band Tx 所傳送之信號，且在地面測試設備接收端所接收到的功率大小：

表 6 實際量測接收功率

	S-Band Tx	X-Band TxA/ANT2	X-Band TxB/ANT2	X-Band TxA/ANT1	X-Band TxB/ANT1
頻率 (GHz)	2.215	8.19	8.19	8.19	8.19
距離 (m)	2	1.96	1.96	3	3
預期接收功率 (dBm)	-36.19	-6.05	-6.05	-9.75	-9.75
實際接收功率 (dBm)	-34.80	-6.27	-6.17	-9.44	-9.52

由量測結果確認，實際測試鏈路上的信號功率值，在 X-band 功率位準誤差低於 0.5 dB，S-band 的誤差低於 1.5 dB，屬於地面接收系統可接受的範圍，確保了測試時的衛星與地面設備通訊成功。

在電磁自我相容測試項目之測試結果如下：

1. GPS 接收機信號接收機，測試期間皆固定保持在“Locked”狀態。
2. 光學遙測酬載 RSI 的 dark current 資料，成功經由衛星上的 X 頻段發射天線下傳至測試用

X 頻段接收設備及儲存，並且資料正確。

3. AIP 測試資料成功經由 S 頻段天線下傳至地面測試接收設備及儲存，並且資料正確。
4. 測試期間，持續觀察衛星所下傳的健康狀態 Telemetry 資料的測試頁面狀態，無任何異常狀態發生。

3. 結論

福衛五號電磁自我相容測試，期間經過多次的



討論與事前的治具準備及測試方法的探討，EMC 團隊在國家太空中心測試廠房電波暗室建立起一套衛星系統電磁自我相容(Self-Compatibility) 測試的模式，測試前的準備從理論基礎的數值計算，並且從設計的測試架構得到驗證，最後成功地驗證福衛五號無互相干擾的情形發生，可以正常運作在軌道上。

致謝

本測試順利完成要感謝 NSPO 參與福衛五號整合測試之電機相關同仁林志隆、葉嘉靖、林信嘉、黃哲政；飛控組相關同仁葉明宇、魏瑋廷；設備操作相關同仁黃文輝、曾建凱、陳麗美、李思源；機械相關同仁張展鵬、陳宗耀以及品保同仁徐玉華，全力協助支援 EMC 電磁自我相容測試之前置準備與測試驗證工作，以及科學酬載的中央大學團隊，還有影像組長劉小菁對影像資料的比對與確認。期間得到測試協調官陳維均以及蔡東宏協助幫忙安排設備與人員調度，使得測試得以順利進行，以及電機組徐銘煌組長與飛控組林辰宗組長提供技術上的諮詢，最後也謝謝福衛五號計畫室以及整測工作團隊之幕後同仁及長官們。

參考文獻

- Balanis, C.A., 2005. Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons, California.
- Kraus, J.D., and Fleisch, D.A., 1999. Electromagnetics, 5th Ed., McGraw-Hill.
- Lee, C.H., 2013. FORMOSAT-5 satellite EMC test plan, National Space Organization, Hsinchu.
- Lee, C.H., 2015. FORMOSAT-5 self-compatibility test procedure, National Space Organization, Hsinchu.
- MIL-STD-461C, 1986. Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements for the Control of Electromagnetic Interference, Part-3, 4. August.
- MIL-STD-461E, 1999. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, August.
- MIL-STD-462, 1970, Electromagnetic Interference Characteristics, Measurement of Notice-2, 1. May.
- Sklar, B., 2005. Digital Communications: Fundamentals and Applications, Second Edition, Prentice Hall, N. J. December.



Formosat-5 Self-Compatibility Test

Shiou-Li Chen¹ Yung-Sheng Chen² Szu-Hsien Yu³ Ching-Horng Lee⁴

Abstract

The purpose of the self-compatibility is to verify that the satellite, configured in operational modes, do not occur any malfunction or degradation of performances when operated in nominal TM/TC and X-band downlink system by radio frequency interface.

Keywords: EMC, Self-compatibility, Radio Frequency

¹ Associate Researcher Fellow, National Applied Research Laboratories, National Space Organization.

² Assistant Technologist, National Applied Research Laboratories, National Space Organization.

³ Research Assistant, National Applied Research Laboratories, National Space Organization.

⁴ Principal Engineer, National Applied Research Laboratories, National Space Organization.

* Corresponding Author, Tel : 886-3-5784208 ext. 9553, E-mail: celiachen@nspo.narl.org.tw

Received Date: Dec. 15, 2015

Revised Date: May. 04, 2016

Accepted Date: May. 18, 2016

