



行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書  
(出國類別：其他)

**參加 2016 IEEE International  
Symposium on Electromagnetic  
Compatibility**

**國際研討會心得報告**

服務機關：經濟部標準檢驗局

姓名職稱：張彥堂技士

派赴國家：加拿大

出國期間：中華民國 105 年 7 月 24 日至 7 月 31 日

報告日期：中華民國 105 年 10 月 17 日

行政院研考會 / 省 (市) 研考會 編號欄

## 摘要

由電機電子工程師學會電磁相容分會(IEEE EMC Society)所舉辦的國際電磁相容研討會，是目前世界上最大的電磁相容標準、量測技術、學術整合、以及產業交流的國際性舞台，除常年於美國舉辦外，今年特別移師到加拿大首都渥太華舉行。本次會議共蒐集了 200 多篇頂尖論文、數個不同主題的研討會及課程、以及電磁相容技術的現場示範與解說。此外，因過去幾次研討會融入信號與電源完整性等主題，深獲好評，會議也開闢相關的專題研討會，供與會的專家學者經驗分享及技術交流，因此，藉由參與研討會的第一手資訊蒐集，可為本局未來在智慧化產業中電磁相容標準、檢測與驗證技術上重要之參考。

## 目 錄

## 頁次

---

壹、	背景說明.....	5
貳、	活動行程簡述.....	5
參、	會議記要.....	5
一、	專題研討會(Workshop).....	6
二、	專題演講(Keynote Presentation).....	12
三、	進入大會決選之論文.....	13
肆、	心得及建議.....	28

圖 1：Scully 博士演講.....	13
圖 2：(a)測試治具；(b)單極天線量測配置；(c)吸收材料的有無對於降低遠場的效果比較 .....	14
圖 3：(a)纜線在具開口腔體的量測位置；(b)不同位置(2 與 7)上之模型與實測比較(下).....	15
圖 4：(a)共 Pad 之 PMSR 模型；(b)及其電路圖 .....	16
圖 5：用 PC 法及 DoE 法所驗證之差動導孔電路板設計(a)單顆接地導孔；(b)雙顆接地導孔；(c)剖面圖 .....	18
圖 6：矽穿孔耦合電容之遲滯現象模擬與量測比較 .....	19
圖 7：經過 Delta-L 法處理之散射參數 .....	20
圖 8：(a)SNEM 法概念架構；(b)終端錯誤修正演算法 .....	21
圖 9：(a)向下雷擊波型；(b) 向上雷擊波型 .....	22
圖 10：SROM 法與 MC 法之近端串音分析之收斂速度比較 .....	23
圖 11：全 N 通道金氧半場效電晶體之電源參考電路 .....	24
圖 12：GTEM 內部之架設示意圖 .....	25
圖 13：經過 Helmholtz 運算子所得到的特徵函數電場分布(山谷型範例) .....	25
圖 14：測試電路版與量測架設 .....	26
圖 15：由 Poynting 向量找出相位中心 .....	27
圖 16：(a)遠場轉接設計(上方)，近場轉接設計(下方)；(b)遠場轉接實照(上方)，近場轉接實照(下方).....	28

參加 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility  
國際研討會

## 壹、背景說明

近年來國際上出現許多熱門議題，舉凡物聯網、智慧電網、工業 4.0，這些未來可能的明星產業，無不脫離「智慧」兩字，而產業智慧化一般需要靠前端的感測器將物理現象轉換成電子信號，再由電子處理器進行運算、判斷及控制，進而實現智慧化的目的，因此未來對於電子控制系統的依賴性將越來越高。當中，電子系統或複合式系統之間的互通性(interoperability)與網路安全(cybersecurity)等因素影響著智慧產業的發展，是近年電機電子工程師學會(IEEE)舉辦研討會的重要討論項目與主題，也同時是國際電工委員會(IEC)在制定國際標準上的主要方向之一。

電磁相容(EMC)以減低產品電磁干擾和增加抗擾度為目標，確保電子元件與系統之間能彼此共存、提升穩定度及安全性，故在智慧產業上佔有舉足輕重的角色。本次參加的電機電子工程師學會電磁相容分會(EMC Society)所舉辦的國際電磁相容研討會，旨在協助工程師、專家學者最新技術之分享及討論電磁環境效應及電磁相容等議題，該分會是目前世界上最大的電磁相容標準、量測技術、學術整合、以及產業交流的組織，藉由參與研討會第一手的資訊蒐集，可為本局在智慧化產業中電磁相容標準、檢測與驗證技術上重要之參考。

## 貳、活動行程簡述

- 7月24日(星期日)：臺灣搭機赴加拿大。
- 7月25日(星期一)：辦理報到手續及參加專業技術研討會及課程。
- 7月26日(星期二)：參與專業技術研討會、專題演講以及現場展示。
- 7月27日(星期三)：參與專業技術研討會、海報展示以及現場展示。
- 7月28日(星期四)：參與專業技術研討會、頒獎以及現場展示。
- 7月29-31日(星期五-星期日)：參加專業技術研討會及課程、返國。

## 參、會議記要

電機電子工程師學會國際電磁相容研討會除常年於美國舉辦外，也會定期由非美國地區舉辦，今年特別移師到加拿大首都渥太華舉行，大會主席 Kris Hatashita 先生也特別在大會手冊上對這個美麗的城市做了簡單的介紹。渥太華在 1857 年由維多利亞女王指定為加拿大首都，在此之前，加拿大首都常常由多倫多、魁北克以及京士頓三個城市輪替，後來因為這三座城市過

於靠近美國，讓英國皇室深感威脅，於是維多利亞女王花了 25 萬英鎊將政府遷移到現今的渥太華麗都運河(Rideau Canal)北邊，以遠離美加的邊界，時至今日，麗都運河也成為了聯合國列名的世界文化遺產。

本次會議共蒐集了 200 多篇頂尖論文、數個不同主題的研討會及課程、以及現場最新電磁相容技術的實機展示，會期第二天上午則安排了美國太空總署強森太空實驗室首席電磁相容工程師 Robert Scully 博士為此次大會帶來精彩的專題演講。此外，因過去幾次研討會融入信號與電源完整性等主題，深獲好評，且加拿大在軍事以及太空技術在國際上享有聲名，會議也開闢相關的主題，供與會的專家學者經驗分享與及技術交流。以下將分別介紹次會會議的專題研討會、專題演講以及進入大會決選的論文。

## 一、專題研討會(Workshop)

### 1. IEEE P370 – Standard Development for Electrical Characterization of High Speed Interconnect (IEEE P370 計畫-高速連接之電氣特性標準發展)

主講者：Xiaoning Ye, Intel, USA

摘要：幾乎所有的量測設備都具備同軸介面(coaxial interface)，透過標準校正件的使用，量測頻寬可高達 110 GHz(以外導體直徑 1mm 同軸接頭為例)，然而許多待測物並不具有同軸接點，往往需要設計轉接治具(fixture)來連接同軸纜線，但不良的治具設計及不可靠的校正方法對精密量測是大災難。有鑑於業界對於校正參數的驗證及測試治具的需求，IEEE 成立 P730 計畫以解決高速連接介面的問題，P730 計畫項下成立三個工作小組，第一個工作小組負責合適治具的設計(proper fixture design)，定義測試治具的特性門檻以及提供符合特性的範例供參考；第二個工作小組則負責去嵌入方法驗證(de-embedded verification)，主要發展標準方法來驗證使用者去嵌入程序及結果；第三個工作小組負責射頻參數品質檢查(S-parameter quality check)，主要發展標準流程與方法來評估射頻參數的因果關係(causality)、被動性(passivity)以及相互作用性(reciprocity)等三大特性。工作小組群於 2015 年 7 月成立，目標在 2016 年底提出相關草案。

### 2. Application of Reverb Chambers (電波迴響室之應用)

主講者：Vignesh Rajamani, Exponent, USA; Chuck Bunting, Oklahoma State University, USA; Gustav J. Freyer, Consultant, Monument, USA

摘要：電波迴響室是一個八面皆由導體構成的封閉空間，利用轉動空間中的金屬葉片或改變天線/待測物位置、方向與極性等方式，使電磁波在導體表面重複反射，而激發出模態(modal structure)。一個運作正常的電

波迴響室可以提供具等向性(isotropic)、相位關係相同的極化分量、以及電磁場分布均勻的密閉環境，因此具備重複性與再現性、低耗能、硬體建置成本低、低不確定度等優點，但也有元件輻射指向性(directionality)無法測量、測試時間長等缺點。一般而言，電波迴響室可使用於隔離度測試(Shielding Effectiveness)、模擬無線裝置的射頻環境、量測天線的效率等應用。

### **3. State-of-the-Art Research and Education in Electromagnetic Information Security(電磁資安的頂尖研究與教育)**

主講者：Josep Balasch, KU Leuven, Belgium

摘要：講師分兩部分說明，首先了解加密模組的物理安全機制，一般的加密模組會在電子元件中植入加密演算法搭配加密金鑰的方式，然而百密仍有一疏，如果系統上使用加密技術，通常駭客會想辦法繞過它，不與其硬碰硬，而駭客攻擊的手法可分為幾種：

(1)主動型：直接將晶片進行硬體修改，例如使用電路修補(FIB)技術斷開安全感測電路，或是阻隔加密金鑰的輸出等方式。

(2)被動型：利用微型探針直接讀取晶片內部未加密的資料。

以上兩種皆屬於侵入式手段，需要高成本及技術門檻，而更高明的方式則是偵測晶片或系統所輻射出的電磁波，將機密資料解讀出來，此手法被稱為非侵入式攻擊(non-invasive attack)，因屬於非破壞且是被動型，對於加密模組具有更嚴重的威脅。講者則提出非侵入式攻擊範例，可運用電磁場探棒、電流探棒等器具，將未經過加密模組而輻射出的資料，透過示波器等儀器在時間軸上進行數位解析及重組，找出其關聯性，進而達到竊取的目的。

### **4. Automotive EMC – Future Standards Updates and New Test Methodologies(車輛電磁相容 – 未來標準更新與新測試方法)**

主講者：Craig Fanning, Elite Electronic Engineering, Inc., USA

摘要：由於智慧汽車的發展，舉凡娛樂、通訊、控制、安全等系統，甚至車輛自動駕駛，未來車用電子的比重及數量將持續增加，因此這些車輛上的複雜電子系統將共同面臨更嚴峻的電磁相容環境，為此，車輛電磁相容標準與評估方式將因應這些新技術而必須有所修正或變化。早期的車用電磁相容起源於軍規標準 MIL-STD-461，由此發展出一套典型的車輛元件測試方法，接著這些測試方法被 SAE 採納並出版為美國車輛測試標準，然後 SAE 標準成為 CISPR(輻射)及 ISO(抗擾)國際標準，而這兩套標準現今廣為國際的車輛製造商認同及依循。目前在車輛元件或模組

的電磁相容標準有：CISPR 25(輻射)以及 ISO 11452(抗擾)，而在整車的電磁相容標準有：CISPR 12、25(輻射)以及 ISO 11451(抗擾)。

目前正在發展的新標準有 CISPR 36(輻射頻段小於 30 MHz)，預定在 2018 年底出版。而 CISPR 12 第 7 版則正在第二次的 CD 階段，內容更新了電動車上車用充電器的裝設規定，以及未來可能增加戶外試驗場(OTS)之驗證程序及關連性。CISPR 25 第四版在 FDIS 階段，關於汽車模組部分內容則是更新在附錄 I 的高電壓模組測試方法以及附錄 J 的 ESA ALSE 抗擾度驗證程序，驗證的頻段為 150 kHz 至 1000 MHz；而整車測試部分，則是新增電動車上車用充電器的裝設規定，CISPR 25 預計將於 2016 年底出版。最後則歸納幾項未來車輛的新趨勢，如可行駛 200 英里以上的電動車、使用 94 GHz 雷達波的車輛防撞系統、2020 年將會有 1000 萬輛具備自動駕駛系統的車輛上路!

## **5. The Role of the IEC Advisory Committee on EMC (ACEC) in Coordinating IEC EMC Activities(IEC 諮詢委員會對於電磁相容活動所扮演之角色)**

主席：Don Heirman, Don HEIRMAN Consultants, USA; William Radasky , Metatech Corporation, USA

摘要：IEC 國際標準組織設立的射頻干擾國際特別委員會(International Special Committee on Radio Interference, CISPR)負責電磁相容的國際標準制定、維護與更新，委員會主席目前由美國籍 Don Heirman 先生擔任，藉由本次研討會，他向與會的專家學者說明目前委員會及其子委員會所規劃的目標與議題，歸納說明如下：

- (1) 無線充電(Wireless Power Transfer)標準：CISPR 目前正等待國際電信聯盟無線電通信部門(ITU-R)對於工業、科學和醫學頻段(ISM band)的限制值規範，也關注 ITU-R 對於短距通訊裝置的輻射限制規定，此外，對於電動車無線充電部分，因其採用電感方式，可能會採用環型磁場天線(magnetic loop antenna)作量測考量。
- (2) 低頻量測標準：此項標準目前是最熱門的議題，目前 CISPR 子委員會 SC77A 的第 8 工作小組負責相關標準的制定，涵蓋的頻段為 9 kHz 至 150 kHz，內容為制定與電網聯接變頻器之總電源輻射限制值以及安裝於總電源上通訊裝置的抗擾度，此標準對於智慧電表之通訊相當重要。目前委員會對於 2 至 30 kHz 已有初步共識，然而在 30 至 150 kHz 的非意圖式輻射上尚未達成共識。



- (3) 關於技術委員會 TC 77 的議題：該委員會主要負責 IEC 61000 系列標準，預計將電動車、第 4 代行動通訊(LTE)、數位紅利(digital dividend) 以及智慧電網等電磁相容議題納入 IEC TR 61000-2-5 中。
- (4) 關於子委員會 SC 77B 的進度：此委員會負責的阻尼振盪磁場抗擾度測試標準(IEC 61000-4-10 Ed. 2.0 - Damped oscillatory magnetic field immunity test)第 2 版已經通過 CDV 階段；交流總電源寬頻傳導干擾抗擾度測試標準(IEC 61000-4-31 Ed. 1.0 - AC mains ports broadband conducted disturbance immunity test)第 1 版已經通過 CDV 階段；在近距離輻射場的抗擾度測試標準(IEC 61000-4-39 Ed. 1.0 - Radiated fields in close proximity - immunity test)第 1 版正在 CDV 階段；脈衝磁場抗擾度測試標準(IEC 61000-4-9 Ed. 2.0 - Impulse magnetic field immunity test) 第 2 版已經通過 CDV 階段。
- (5) 關於子委員會 SC 77C 的進度：此委員會負責的高強度電磁脈衝 (HEMP)及其他輻射干擾的保護裝置測試方法標準(IEC 61000-4-23 Ed. 2.0 - Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances) 第 2 版正在 CDV 階段。

## **6. Smart Grid Support and EMC Issues**

主席：Don Heirman, USA

摘要：本次研討會關於智慧電網標準的內容如下：

- (1) 國際電工委員會之技術委員會 TC77 主要負責電磁相容抗擾度標準之制定，除制定住宅與工業應用的電磁抗擾度標準外(IEC 61000-6-1, - 2)，在智慧電網相關的標準目前為發電站與變電站環境所要求的電磁抗擾度通用標準(IEC 61000-6-5 Ed. 1.0 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-5: Generic standards - Immunity for equipment used in power station and substation environment)，此份標準主要提供發電站以及高/中壓變電站(HV/MV substations)使用設備的電磁抗擾度參考，取代舊版(2001 年)的技術規範，並融入最新的 61000-2-5 環境相關內容，此份通用標準已於 2015 年 8 月出版。
- (2) 智慧電網互通性委員會(SGIP)基於 2007 年美國能源獨立和安全法案 (EISA)由美國國家標準與技術研究院(NIST)於 2009 年成立，並於 2012 年轉型成由業界成員主導的非營利組織(俗稱 SGIP 2.0)，目前該會正致力於智慧產業迫切需求的開放場域訊息匯流(Open Field Message Bus, OpenFMB)計畫、加強網路安全以及互通性標準測試平台之發展。OpenFMB 計畫並與工業物聯網聯盟(Industrial Internet

Consortium, IIC)合作，應用標準化及無專利的網路通信架構，以提供電力系統場域裝置之需求規範，裝置可符合可擴充點對點(peer-to-peer)發布/訂閱(publish/subscribe)式通信架構，並採資料中心(data-centric)通信導向來調和系統與裝置的連接。

- (3) 智慧電網互通性委員會下設之電磁互通性問題工作組(Electromagnetic Interoperability Issues Working Group, EMIIWG)提出互通性流程參考手冊(Interoperability Process Reference Manual, IPRM)，該手冊旨在提醒測試管理者需將電磁相容議題納入智慧電網測試及驗證中的重要性，手冊定義通用測試方針、測試規範、測試範圍、互通性驗證技術軟體、試驗室品質的需求及建議，內容亦包含施行方法，手冊已成為美國國家標準協會/美國電器製造商協會(ANSI/NEMA)標準並於 2016 年出版。

## **7. ITE EMC Regulatory Intelligence to market products in B.R.I.C countries**

主席：Organizer: Elizabeth Perrier, CA

摘要：金磚四國(巴西、蘇俄、印度、中國大陸)佔有近全球 4 成的 30 億人口數，其高度成長的市場亦是許多公司關注的目標，因此大會也特別安排這四國的電磁相容法規的討論。

### (1) 巴西：

巴西國內電子電機商品由兩個政府機關管轄，其中國家量測、標準暨工業品質機構 (National Institute for Metrology, Standardization and Industrial Quality, INMETRO) 相當於本局之角色，除制定國家標準外，亦是符合性評估管理單位以及驗證機構和實驗室認證單位；國家電通局(The National Telecommunications Agency, ANATEL)則是電磁相容法規、測試與驗證之主管機關。該國的 442 號決議 (Resolution 442)為調和 CISPR 22 與 24 標準的電磁相容主要法規，在商品上需有葡萄牙語的標示與警語，而經過驗證的商品其標示是採用 GS1 或 EAN 條碼顯示。所販售的商品需經過 ANATEL 指定驗證機構(Organismo de Certificacao Designado, OCD)審核確認，而認證之商品需通過 INMETRO、OCD 認證之實驗室或是國家實驗室認證聯盟(International Laboratories Accreditation Cooperation)成員之國外實驗室測試。因 ANATEL 特別在商品標示有嚴格的要求且有些是未明文規定之潛規則，商品要能順利取得巴西的驗證，建議是透過當地的代理商以符合其葡萄牙語之正確標示規則。

(2) 蘇俄：

商品在進入蘇俄前需要清楚該國經過行政、立法與司法三程序的聯邦法律(Federal Law)，蘇俄的電磁相容由聯邦法律技術規範(On Technical Regulating)明定其電磁相容管理及安規等內容。關稅同盟(Customs Union, CU)協定目前是蘇俄、白俄羅斯、哈薩克斯坦等國仿效歐盟所協議的規定，2013 年起生效的關稅同盟技術規範(TR-CU)取代了舊有的 GOST 標準，而對於影音資訊商品的電磁相容技術規範為 TR-CU No. 879 - Electromagnetic compatibility of equipment。過去未改變且經 GOST 系統驗證之商品在 2015 年前 3 月 15 日前仍有效，之後所有的商品需經過新的 TR-CU 驗證程序以取得 EAC 標章，而 TR-CU 驗證程序與舊的 GOST-R 系統類似，差別在於新的程序驗證需經透過國內代理單位來取得驗證，第二個差異是商品驗證必須經過工廠檢查，檢查員必須符合 TR-CU 之規定，取得驗證之商品有效年限最多 5 年，且每年仍需提報。因蘇俄也有許多未明文規定的潛規則，且須因應新的 TR-CU 規範，商品要能順利過關仍然建議透過熟知當地關務的代理商以了解相關流程，才能避免因錯誤的報關程序產生多餘的成本支出。

(3) 印度：

曾經為英國殖民地的印度，有類似英國系統的議會賦予政府部會相關監督及管理權力，目前由兩個單位統合管理電子商品的製造與販售，一個為消費者事務、食物與公共事務部(Ministry of Consumer Affairs, Food, and Public Distribution, MCAFPD)，另一個為通訊與資訊技術部(Ministry of Communications and Information Technology, MCIT)，MCAFPD 下屬的印度事務局(Bureau of Indian Affairs, BIS)主管國家標準發展、法規制定與認證系統管理，而 MCIT 下屬的電信工程中心(Telecommunication Engineering Center, TEC)則是負責有線通訊產品電磁相容標準及法規的單位，該單位也是通信產品吸收率(absorption rate, SAR)要求的法規制定者，目前該國之有線通信設備電磁相容規範為 TEC/EMI/TEL-001/01/FEB-09, “Electromagnetic Compatibility Standard for Telecommunication Equipment”，因英文為印度官方語言，相關的驗證申請資訊與資料皆可由 IEC 網站取得。雖然已經有相當完整的資訊，但報關申請仍然可能阻礙商品的輸入，建議透過當地的代理商以釐清入關的細節，以免造成延誤。

(4) 中國大陸：

中國大陸的電子商品電磁相容規範由中國國家認證認可監督管理委員會(CNCA)負責，透過中國強制性產品驗證(CCC)系統管制國內外商品的電磁相容及安規，目前關於電磁相容的標準為 GB 9254-2008：資訊科技設備無線電干擾特性 — 限值與測量方法。在管理方面，中國合格評定國家認可委員會(CNAS)由國家認證認可監督管理委員會設立並授權的國家認可機構，統一負責對驗證機構、實驗室和檢查機構等相關單位的認可工作，因為 CNCA 未與其他認證系統達成相互承認協議，所有的商品必須經由符合 CNCA 認證的試驗室檢測，才能核發 CCC 標章得以販售。對於外國廠商要進入中國市場，除語言隔閡外，當地代理商對產品的經驗以及清楚相關法律的律師亦是關鍵。

## 二、專題演講(Keynote Presentation)

摘要：本屆研討會邀請 Scully 博士主講，主題為 2016 年的電磁相容以及未來：它是什麼以及為何我們如此在乎？(“Electromagnetic Compatibility in 2016 and Beyond: What Is It and Why Do We Care?”)。Scully 博士是美國太空總署強森太空中心的首席電磁相容工程師，過去也曾經擔任電機電子工程師學會(IEEE)之電磁相容協會主席。他談到電磁相容議題已經行之有年，從早期戰鬥機上為了控制及減低機上無線電設備使用時的電波干擾，進而發現與暴露在機身的天線位置有相關影響，此外，Scully 博士也精采地回顧電磁科學的歷史，從將電場與磁場集大成的著名英國物理與數學家馬克斯威爾(Maxwell)到專精於無線電通訊的義大利工程師馬可尼(Marconi)，讓與會人士彷彿回到過去上了一課。時至今日，電磁相容議題牽涉到的不再只是單一面向甚至必須考慮到特殊的環境，因此，在相同頻寬下多系統的共存(co-existence)和互通性問題，以及有意圖(intentional)與非意圖(unintentional)的電磁干擾等複合式問題驅使著許多軟硬體、系統工程師重新思考電磁相容所扮演的重要且關鍵性定位，其範圍不僅僅涵蓋一般大眾所觸及的智慧手機、智慧家電、智慧車、無人機甚至牽涉到金融、軍事、太空等領域，Scully 博士最後指出，隨著處理器時脈的增加以及電路體積的縮小，未來將持續面臨信號完整性、電源完整性以及電磁相容的挑戰。

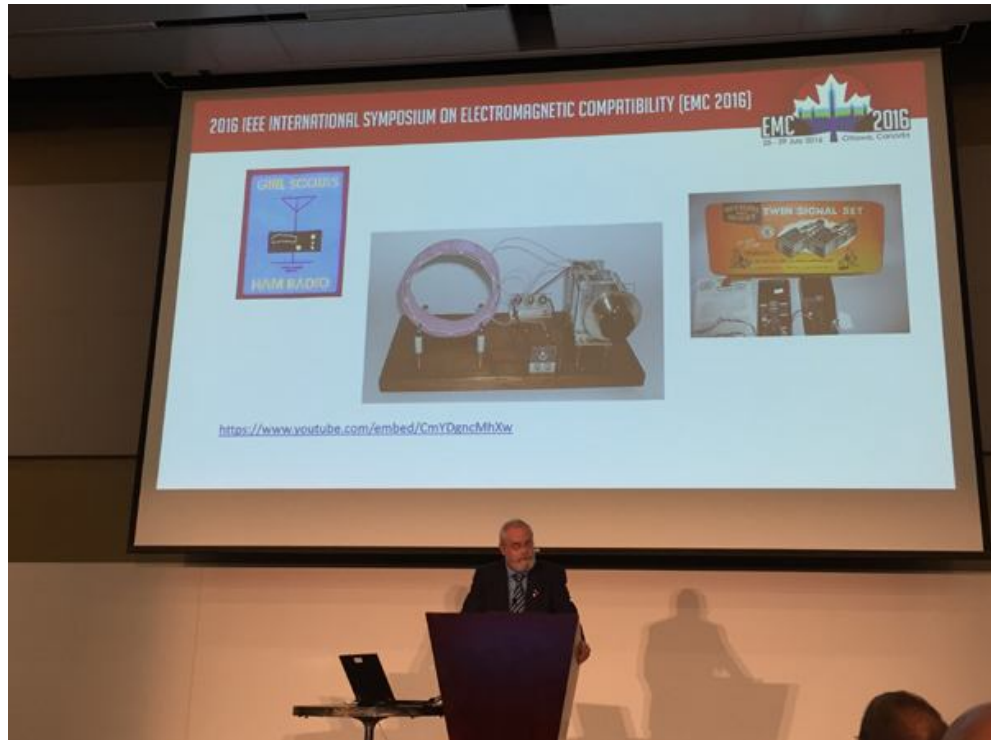


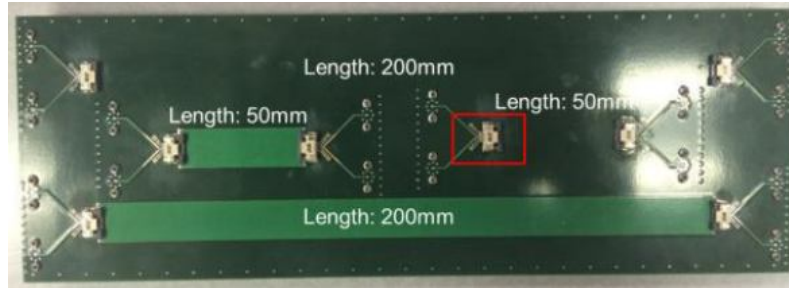
圖 1：Scully 博士演講

### 三、進入大會決選之論文

#### 1. EMI Control Performance of the Absorbing Material for Application on Flexible Cables (應用於彈性纜線上之吸波材料其電磁干擾控制特性)

作者群：Guangyao Shen, Qian Liu, Xiangyang Jiao, Ruijie He, and Victor Khilkevich, Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, USA, Paul Dixon, Yoeri Arien and Mohammad Ali Khorrami, Laird, Randolph, Massachusetts, USA

摘要：此篇論文獲得大會最佳學生論文獎。彈性電纜線上的共模信號是非常熟知的電磁干擾來源，一般而言會在纜線上使用吸波材料來抑制共模電流。此篇論文主要貢獻在設計可估算吸波材料特性的測試治具，並可同時量測三種典型輻射架構的電纜線：單極天線、環形天線、以及傳輸線。此篇論文也藉由模擬與實測發現，吸波材料與纜線的間隔 0.25 厘米為可降低共模信號的最佳化距離，最後再利用治具找出吸波材料的特性參數並搭配實際產品的量測，以驗證該治具的可行性，未來可藉由此治具對吸波材料的數量與配置最佳化，以達到減低電磁干擾的成效及對信號完整性的評估。

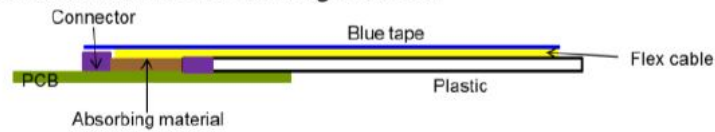


(a)

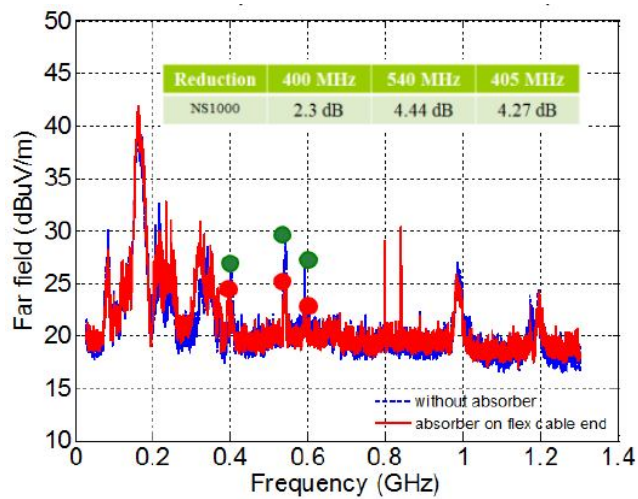


With absorbing material: 50mm

Side view of added absorbing material:



(b)



(c)

圖 2：(a)測試治具；(b)單極天線量測配置；(c)吸收材料的有無對於降低遠場結果的比較

## 2. Canonical Statistical Model for Maximum Expected Immission of Wire Conductor in an Aperture Enclosure (在單開口封閉暗室中導線的最大可預期典型輻射統計模型)

作者群：Paul Bremner, Robust Physics, Del Mar, California, USA, Gabriel Vazquez, Dawn Trout, and Daniel Christiano, NASA Kennedy Space Center, Cape Canaveral, Florida, USA

摘要：此篇論文獲得大會最佳論文獎。要預測諸如太空船、飛機、汽車等大型導體在電波暗室測量時的最大電磁場是系統層級電磁相容的重要議題，此篇論文主要導入統計型功率平衡模型(statistical power balance

model)，用以預測具單開口封閉暗室內的導體上的最大電流，模型可同時計算出平均值與變異數，相較於其他類似的機率函數所預測的輻射數據，此模型可在最少的電磁參數條件下提供更快速的分析且不失精確度。

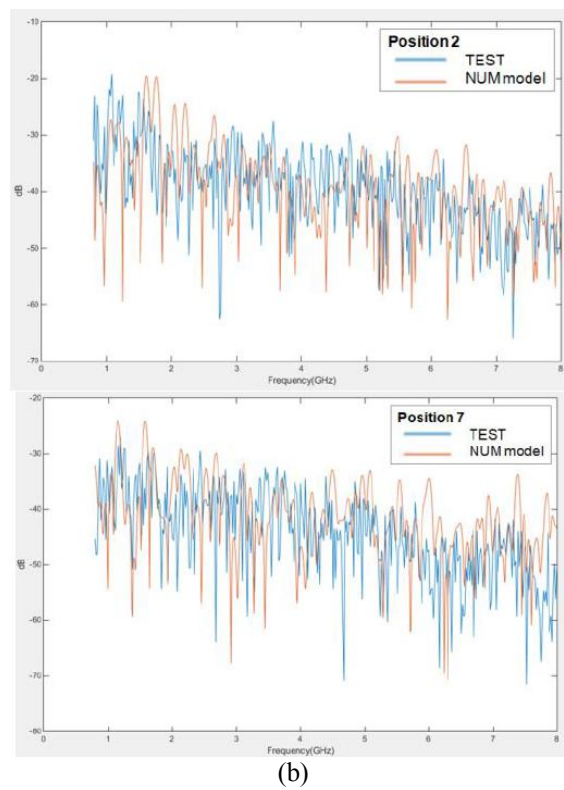
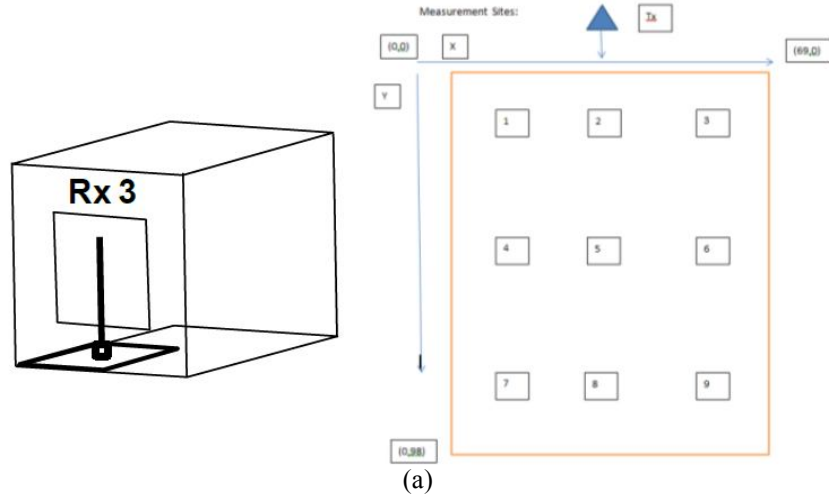


圖 3：(a) 纜線在具開口腔體的量測位置；(b) 不同位置(2與7)上之模型與實測比較

### 3. Top-Layer Inductance Extraction for the Pre-Layout Power Integrity using the Physics-Based Model Size Reduction (PMSR) Method (運用物理為基礎且可簡化電路的模型方法來萃取電源完整性應用之電路板上層結構的電感)

作者群：Ying S. Cao, Tamar Makharashvili, Samuel Connor, Bruce Archambeault, Li Jun Jiang, Albert E. Ruehli, Jun Fan and James. L. Drewniak

摘要：此篇論文獲得大會最佳學生論文獎。正確的電源完整性分析對於電路板上電源分佈網路是必要的方式，如果能夠以物理的基礎為出發並發展關鍵結構的等效電路對電源網路設計會有相當的幫助。此篇論文提出以物理為基礎且可簡化電路的方法(physics-based model size reduction, PMSR)來獲得接地層以上幾何架構(above-ground geometries)的等效電路，該法所萃取的模型相容於局部元素等效電路法(partial element equivalent circuit, PEEC)，因為 PMSR 法以物理為基礎，因此其萃取的等效模型與電路板的幾何大小有關，所以可直覺地調整電源網路上的電感，進而減少直流電源上的電流漣波。

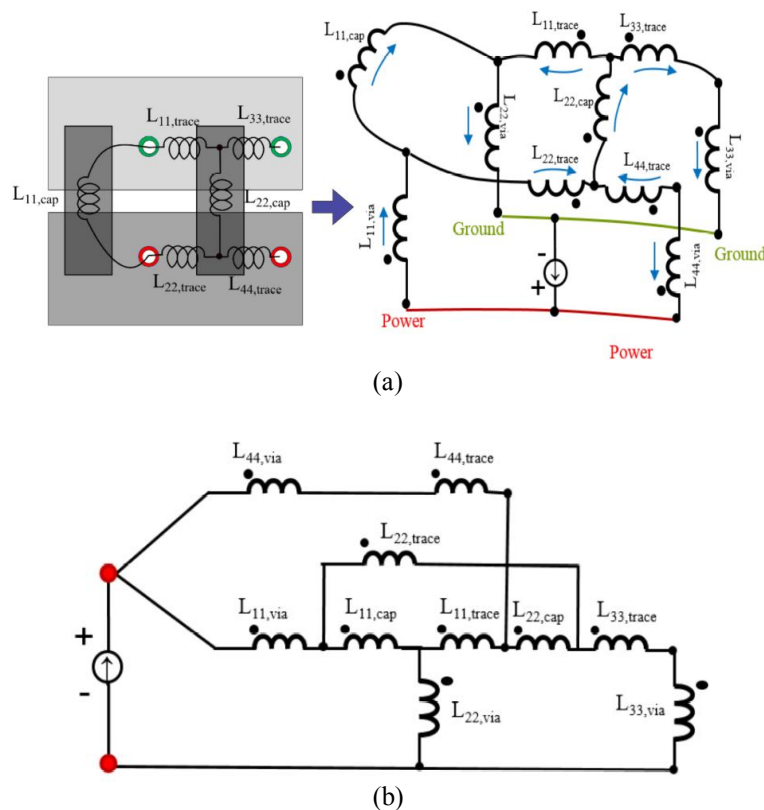


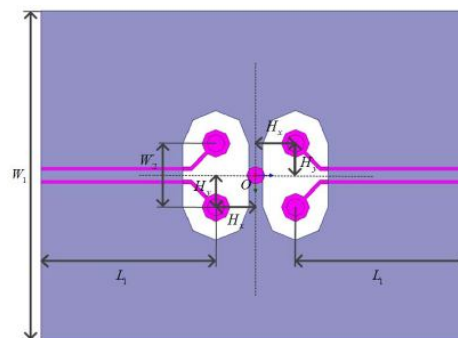
圖 4：(a)共Pad之PMSR模型；(b)及其電路圖



#### 4. Variability Analysis of Crosstalk among Pairs of Differential Vias Using the Polynomial-Chaos and Design of Experiments Methods (應用多項式混沌與實驗設計法對差動導孔進行串音變異性分析)

作者群：Yansheng Wang, Srinath Penugonda, Shuai Jin, and Jun Fan,  
Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri,  
USA, Ji Chen, University of Houston, Houston, Texas, USA

摘要：本篇論文主要針對差動導孔(differential vias)相對於不同的接地位置所造成的串音(crosstalk)變異性進行研究，並使用多項式混沌(polynomial-chaos, PC)以及實驗設計(design of experiments, DoE)兩種方法來建構統計模型。PC 法基本上是將輸出結果(如串音之變異)由一組正交多項式(orthogonal polynomials)搭配適當的係數及輸入變數所組合而成，而根據輸入變數的機率分布，選用合適的多項式為基底可有效收斂輸出結果，假設电路板的幾何變數(如圖 2 之  $H_x$  和  $H_y$ )為均勻分布，可選擇 Legendre 多項式；DoE 法基本上是如何設計在有限的實驗下以獲取最大化可用資料的統計方法，DoE 允許使用許多輸入因子來決定這些因子對結果所造成的影響，本篇研究採用 Latin Hypercube (LH)設計作為輸入因子，主要是 LH 類似均勻分布的關係。對於變異性及不確定性分析，蒙地卡羅法(Monte Carlo, MC)是最廣為使用的分析方法，但缺點是需要大量的模擬時間以收斂結果，相較於蒙地卡羅法，PC 和 DoE 兩種統計方法皆可快速且有效執行串音的變異分析，經實驗結果證實，此篇論文選擇實驗設計法來分析差動導孔的變異性分析，因該法可花費較少的模擬時間。



(a)

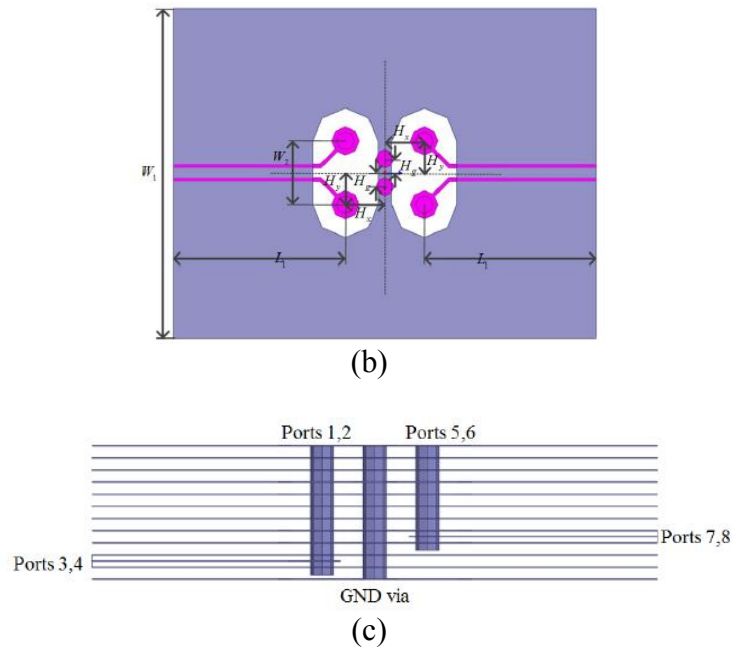


圖 5：用PC法及DoE法所驗證之差動導孔電路板設計(a)單顆接地導孔；(b)雙顆接地導孔；(c)剖面圖

## 5. Extraction of the Parameters of the Coupling Capacitance Hysteresis Cycle for TSV Transient Modeling (可用於矽穿孔模型的耦合電容遲滯周期參數之萃取)

作者群：Antonio Orlandi, Francesco de Paulis, Stefano Piersanti, and Enza Pellegrino University of L'Aquila, L'Aquila, Italy, Joungho Kim, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, The Republic of Korea, Jun Fan, Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, USA

摘要：本篇論文主要以實驗萃取矽穿孔(through silicon via, TSV)耦合電容之參數以描述時域的遲滯現象，研究內容提出可相容於標準電路模擬軟體的等效電容模型演算法，並討論矽穿孔與主動元件相互間串音的遲滯效應。演算法主要用大量的遲滯量測數據，並借助內插法(interpolation)以及最小平方方法(least-squares)來發展泛用的非線性電壓控制模型，藉由該演算法可瞭解矽穿孔遲滯現象的物理機制。

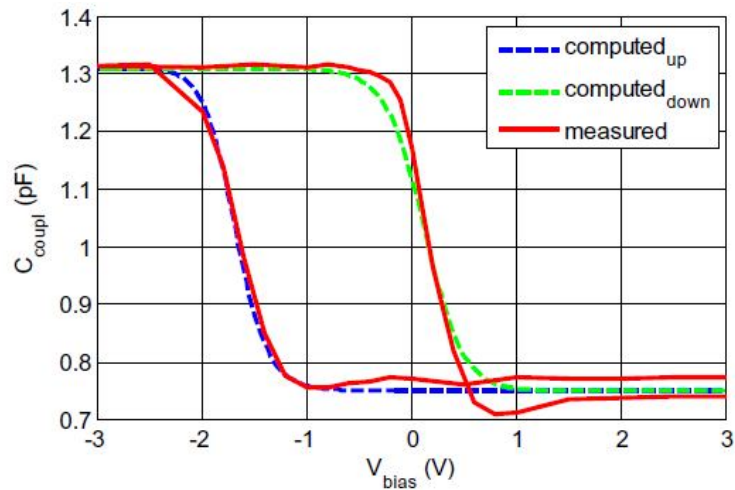


圖 6：矽穿孔耦合電容之遲滯現象模擬與量測比較

## 6. Cost-Effective Characterization of Dissipative Loss of Printed Circuit Board Traces (低成本之電路板線路損耗特性評估)

作者群：Kai Xiao, Intel Corp, DuPont, Washington, USA, Xiaoning Ye, Intel Corporation, Hillsboro, Oregon, USA, Jimmy Hsu, Thomas Su, and Yuan-liang Li, Intel Corporation, Taipei, Taiwan

摘要：要如何精確的估測及控制通道的損耗是設計高速傳輸系統成功關鍵之處，由於電路板仍然是電腦系統設計不可或缺的一環，因此多層電路板的材料特性評估以及電路板上線路傳輸的損耗量測在電腦系統設計流程中是必要的一步，本篇論文針對不同的電路板線路損耗量測方法進行探討及比較，並提出一低成本的測量方法稱作 **Delta-L**，該方法的設計與量測流程如下：

- (1) 首先準備兩塊電路板，板上並有治具以及長度分別為  $l$  和  $2l$  的傳輸線。
- (2) 將網路分析儀的參考平面校正到纜線接頭端或是微型探針的接觸點。
- (3) 接著量測兩塊電路板的散射參數(S-parameters)，可分別定義為  $s'$  (對應於短線  $l$ ) 及  $s''$  (對應於長線  $2l$ )。
- (4) 計算兩插入損耗的比值為  $|s21''|/|s21'|$ 。如果取對數，則比值為兩數相減。
- (5) 再來將上述的比值用平均函數反覆疊代數次以消除由治具所造成的多重反射產生之漣波。
- (6) 最後將損耗比值除以兩長度之差 ( $2l - l = l$ ) 以得到曲線正規化，最後的步驟即為此方法的命名由來。

值得一提的是，**Delta-L** 法在數據的後處理是相當簡單且無須求解複雜的矩陣，更重要的是，該方法不易受量測誤差所影響。最後該方法可

用來評估用於伺服器電腦系統的電路板線路，模擬與量測結果也驗證該方法具有其效益及精確性。此篇論文提出的方法也是第 6 頁中 IEEE P370 計畫第二工作小組所負責的去嵌入方法驗證分項之研究內容。

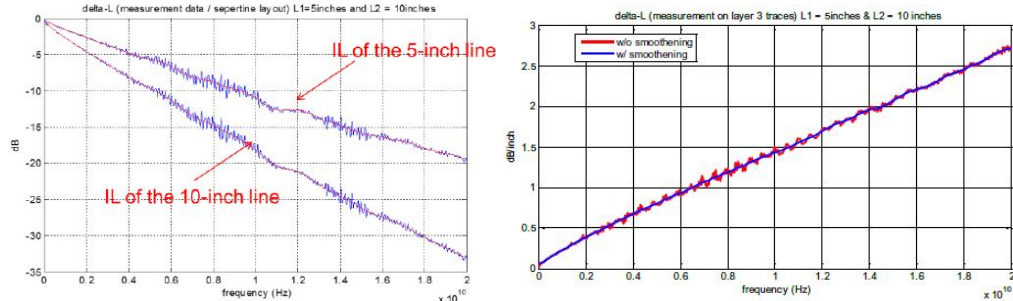
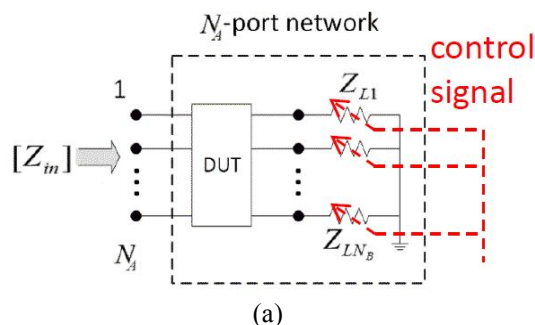


圖 7：經過Delta-L法處理之散射參數

## 7. SNEM: Full S-Parameter Synthesis From Near-End Measurement (SNEM:由近端量測之全散射參數合成法)

作者群：Yunhui Chu and Rob Friar, Intel, Hillsboro, Oregon, USA, Kai Xiao and Gong Ouyang, Intel Corp, DuPont, Washington, USA, Yu Ho and Zhichao, Zhang, Intel, Chandler, Arizona, USA, Beomtaek Lee, Intel Corporation, Santa Clara, California, USA

摘要：本篇論文提出一個新方法稱之為近端(near-end)量測之全散射參數合成法(SNEM)，此法可以僅由量測被動線性網路的所有埠口的子集合(subset)再配合不同的阻抗值(未量測的埠口需接上終端阻抗，如圖 7)來得到完整的散射參數，透過  $Z$  矩陣公式轉換以及量測數據可求所有的散射參數，但由於 SNEM 法會遇到無法量測終端阻抗或阻抗值與實際值差距過大時的狀況，作者提出終端錯誤修正演算法(Termination error correction algorithm)來作為終端阻抗值的優化選擇，演算法係將  $Z$  矩陣參數之變動範圍以及額定值由使用者輸入得到一個誤差值，再將誤差值與實際值經過反覆的比對以將此誤差值最小化，如此可以獲得更精準的  $Z$  參數，進而組合成所有的散射參數，此方法可應用於積體電路封裝、晶片結構以及插座或接頭的特性量測。



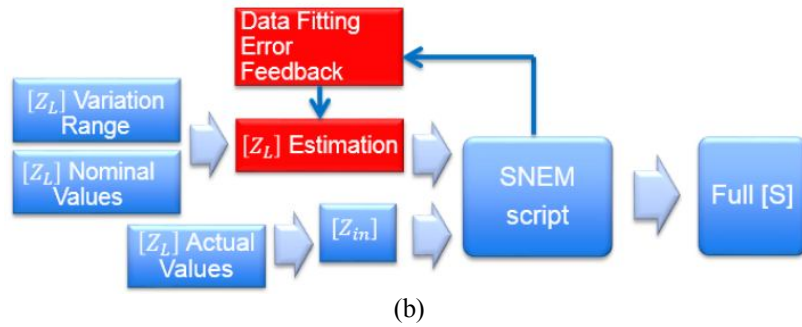


圖 8：(a)SNEM法概念架構；(b)終端錯誤修正演算法

## 8. On the Adequacy of Standardized Lightning Current Waveform for Composite Structures for Aircraft and Wind Turbine Blades (適合於飛機與風力機之複合性結構之標準電擊電流波形)

作者群：Farhad Rachidi, Alexander Smorgonskiy, and Anastasios Vassilopoulos, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Switzerland, Nikolay Korovkin, Petersburg State Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, Marcos Rubinstein, University of Applied Sciences Western Switzerland, Yverdon-les-Bains, Switzerland

摘要：現今飛機所測試用之標準雷擊波形是由天空向下的雷擊波 (downward lightning)，然而有證據顯示也有反向的雷擊波，同時，碳纖維複合式材料已被廣泛使用於飛機與風力機葉片，本篇論文主要研究由地面向上的雷擊波對於這些材料所造成的影響。根據研究，當雷擊擊中機身時，雷擊能量會由飛機本身向上與向下傳遞出去，並造成飛機的傷害，而高建築物本身亦容易引發有地面向上的雷擊波，此外，根據由位於瑞士 124 米的高塔所量測到的 500 次雷擊波資料顯示，99%都是向上的雷擊波，因此高建築物本身亦容易引發由地面向上的雷擊波，研究也指出目前使用的最大雷擊連續電流為 200 庫倫，遠小於高塔實測到的 500 甚至 1000 庫倫，且相較於向下雷擊波，向上雷擊波的具有高加乘性的初始連續電流(initial continuous current, ICC)，綜此，飛機或風力機的雷擊測試標準波形應考量此篇論文所研究之實際狀況。

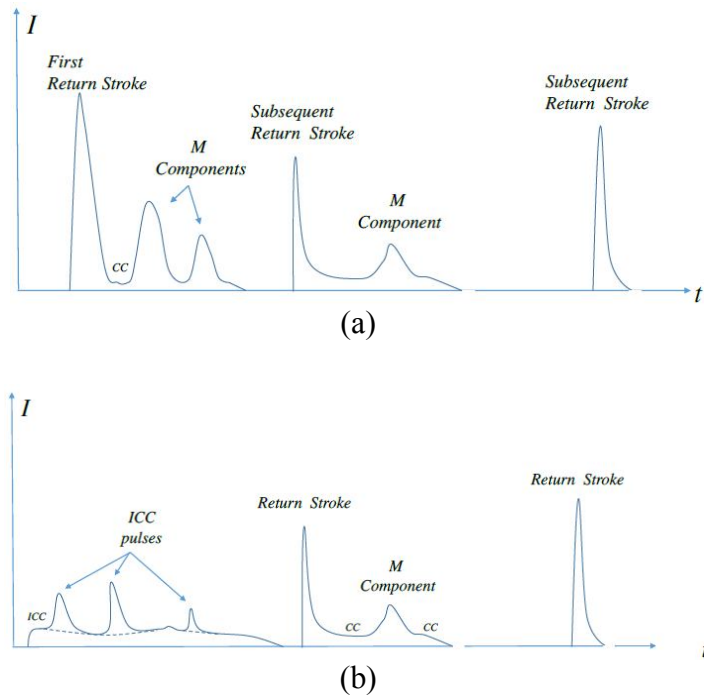


圖 9：(a)向下雷擊波型；(b) 向上雷擊波型

## 9. Sensitivity Analysis of Cable Crosstalk to Uncertain Parameters Using Stochastic Reduced Order Models (使用隨機降階模型對未知參數的纜線串音感度分析)

作者群：Zhouxiang Fei, Yi Huang, Jiafeng Zhou, and Qian Xu, University of Liverpool, Liverpool, United Kingdom

摘要：本篇論文使用隨機降階模型(SROM)來分析未知參數的纜線串音感度，研究發現，如果將未知參數對於串音不確定度的個別影響進行排序，並省略影響程度較小的參數，將不影響評估的正確性；將 SROM 法與蒙地卡羅(MC)法進行比較，SROM 法因簡化關聯性較小之參數，故可大幅降低運算時間至少兩個數量級，除此之外，此方法是第一次被運用於統計電磁相容問題，最後，此方法利用減低隨機參數之維度的概念，亦可被運用於其他隱藏不確定度因素的電磁相容議題。

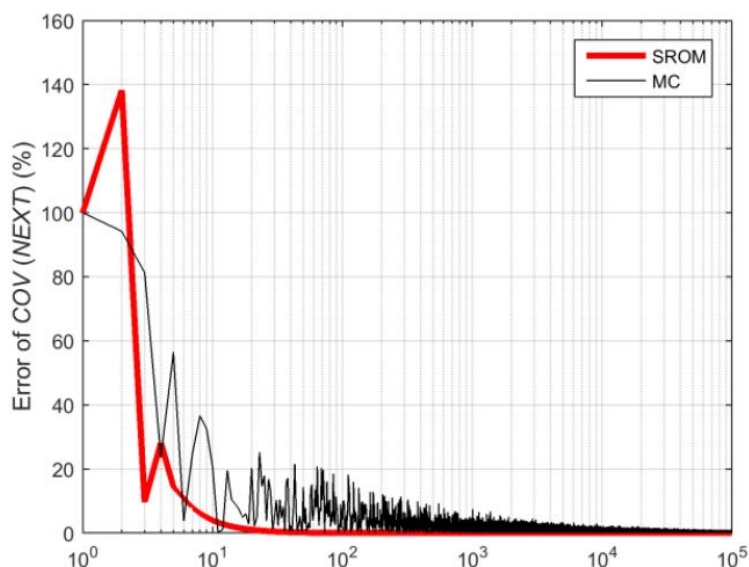


圖 10：SROM法與MC法之近端串音分析之收斂速度比較

**10. A 90 dB PSRR, 4 dBm EMI Resistant, NMOS-Only Voltage Reference Using Zero-VT Active Loads (具有 90 dB 電源抑制比、4 dBm 抗電磁干擾能力、使用零臨界電壓主動附載以及全 N 通道金氧半場效電晶體之電源參考電路)**

作者群：David Cordova and Pedro Toledo, NSCAD and UFRGS, Porto Alegre, Brazil, Eric Fabris, Sergio Bampi and Hamilton Klimach, UFRGS, Porto Alegre, Brazil

摘要：耦合至電源線上的電磁干擾往往會影響電路的運作，這部分的效應可由電源抑制比來判斷，本篇論文主要是完全使用 N 通道金氧半場效電晶體與零臨界電壓(zero-VT)主動附載製作電源參考電路來達成高電源抑制比以及抗電磁干擾能力的目標，電路使用 130 nm CMOS 製程，經模擬結果得知，此電路的電源抑制比可達 90 dB，參考直接功率注入法標準，該電路可承受 4 dBm 之電磁干擾能量。

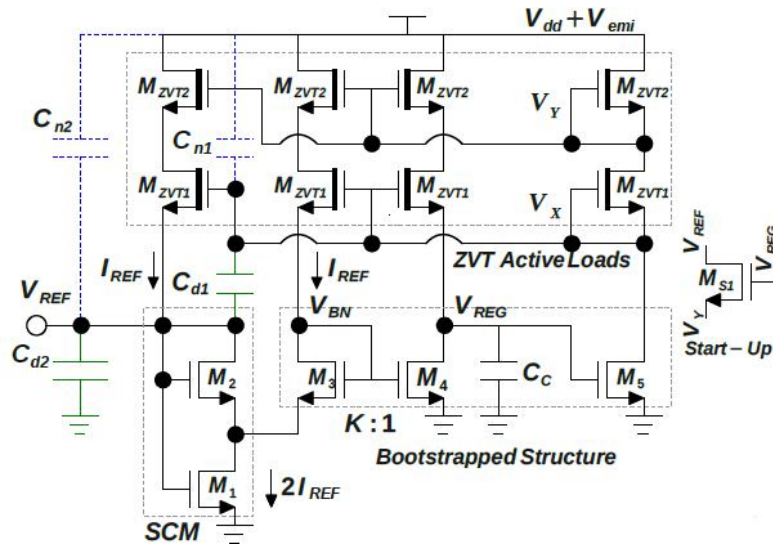


圖 11：全N通道金氧半場效電晶體之電源參考電路

### 11. Extension of the IEC 61000-4-20 Annex C to the Use of Arbitrary Transient Signals (將 IEC 614000-4-20 附錄 C 之測試方法擴展至任意暫態信號之使用)

作者群：Niklas Briest, Leibniz Universit Hannover, Hannover, Germany,  
 Heyno Garbe, Institute of Electrical Engineering and Measurement  
 Technology, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Germany,  
 David Hamann, Anglerweg 14b, Gifhorn, Germany, Stefan Potthast,  
 Bundeswehr Research Institute for Protective Technologies and NBC  
 Protection, Munster Germany

摘要：IEC 61000-4-20 標準主要在描述橫向電磁波導 (Transverse electromagnetic, TEM) 或寬頻橫向電磁波導 (GTEM) 在輻射與抗擾度之應用，其中附錄 C 在描述如何使用雙指數波形 (double exponential waveform) 之高強度電磁脈對於抗擾度的測試，波形由上升時間及脈衝寬度這些參數所定義，而這些參數也決定了入射電磁波能否在波導內傳遞的品質，但這些參數並無法涵蓋任意的輸入暫態波形，因而局限其用途。本篇論文提出信號專用之驗證 (Signal Dedicated Validation, SiDeV) 程序可將雙指數波型擴展至任意波形，首先在波導內架設雙天線以量測出與輸入電壓信號具關聯性之參考波形 (圖 12)，接著經過後處理將可能的信號反射及失真去除，在經過皮爾森關聯係數 (Pearson Correlation Coefficient, PCC) 運算處理後，可以得到信號在橫向電磁波導內之傳遞特性，本篇研究內容已提交至 IEC 標準委員會審查，未來將會在 IEC 61000-4-20 附錄 C 中補充相關細節。



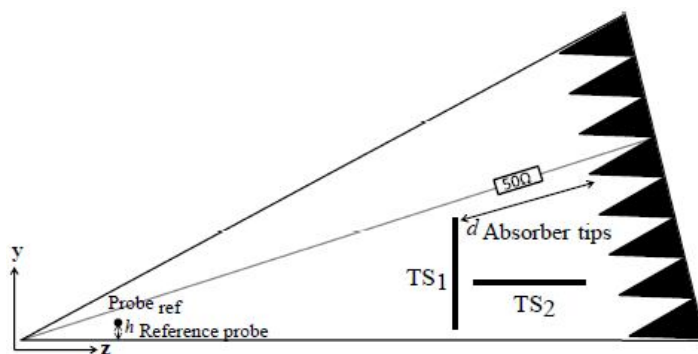


圖 12：GTEM內部之架設示意圖

## 12. A Fast Surface Method to Model Skin Effect in Transmission Lines with Conductors of Arbitrary Shape or Rough Profile (可表示任意外型或粗糙表面傳輸線導體的集膚效應模型之快速表面方法)

作者群：Utkarsh Patel and Piero Triverio, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada

摘要：模型的正確性決定了電子系統信號完整性的研究，本篇論文提出快速表面方法可以計算出任意外型的傳輸線導體之阻抗，該方法較傳統的有限元素(finite elements)法快上 140 倍，過去的方法使用表面導納(surface admittance)運算子來求解導體表面的電流分布及集膚效應，但侷限於簡單的外型，如圓形、三角形等，而這個方法的核心在使用了可運用於任意形狀的 Helmholtz 運算子，解出相關的特徵函數(eigenfunctions)，透過特徵函數可以清楚瞭解電流的表面分布，而將這些特徵函數分解可以導出表面的阻抗公式，進而計算出任意外型導體的集膚效應。

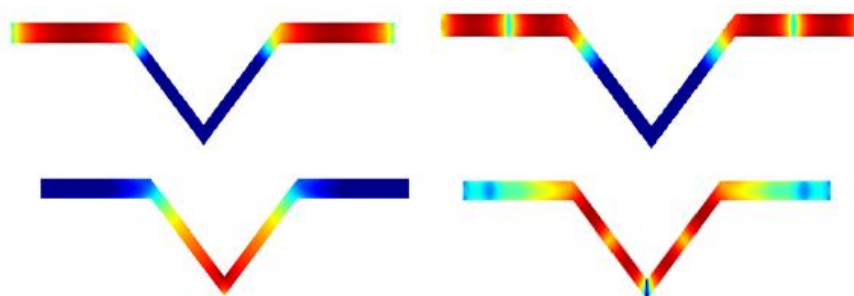


圖 13：經過Helmholtz 運算子所得到的特徵函數電場分布(山谷型範例)

### 13. Estimating the Near Field Coupling from SMPS Circuits to a Nearby Antenna Using Dipole Moments (使用偶極矩估算可切換模式電源供應器電路與附近天線的近場耦合)

作者群：Chunyu Wu, Yansheng Wang, Liang Li, Jingnan Pan, and Jun Fan, Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, USA, Lijuan Qu and Joakim Eriksson, Microsoft Mobile, Beijing, China

摘要：本篇研究使用偶極矩(dipole moments)來估算切換模式電源供應器(Switched Mode Power Supplies, SMPS)電路與附近天線的近場耦合，首先利用磁場探棒掃描 SMPS 電路上方，接著將磁場數值輸入全波模擬軟體以得到近場耦合的預估值，使用這個方法有兩個關鍵處，因為偶極矩會被當作發射源，偶極矩需要被正確的表示才能得到精確的近場耦合，要如何確認偶極矩可以在電路上方另一高度再次掃描磁場，藉由兩個不同高度的磁場來得到正確的偶極矩；另一個關鍵為模擬使用的模型要正確。

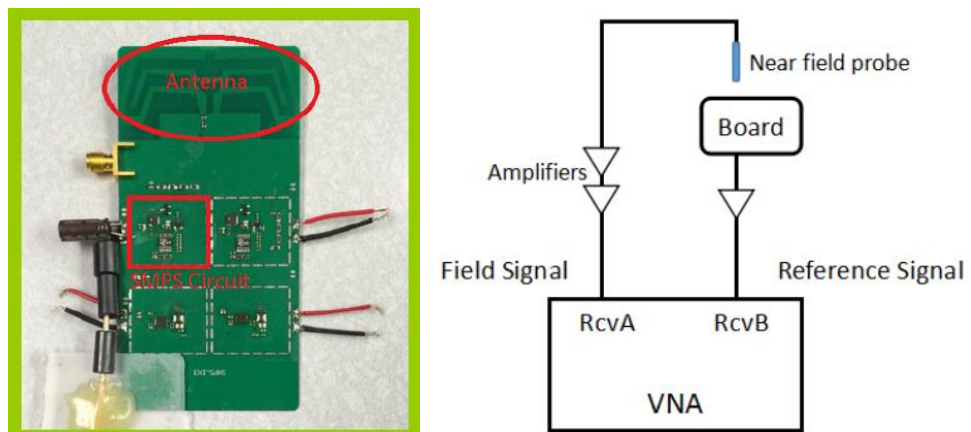


圖 14：測試電路版與量測架設

### 14. A New Method to Calculate Phase Center Locations for Arbitrary Antenna Systems and Scenarios (對於任意天線系統可找出相位中心位置的新方法)

作者群：Dominic Haerke and Heyno Garbe, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Germany, Prashant Chakravarty, University of York, York, United Kingdom

摘要：對於天線量測找出正確的相位中心是非常重要的事情，在電磁波領域，如果能夠找到一個點能輻射出等向性(isotropic)的球型波，這個點就是相位中心，方法是透過遠場的 Poynting 向量來反推找出電磁波的發射來源，論文提出演算法找出可表示 Poynting 向量線的中心點，再用這些線的中心點各自找出與相位中心的相位角以及位置。

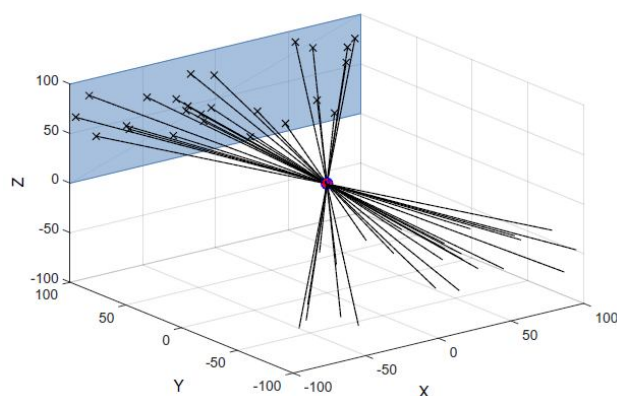
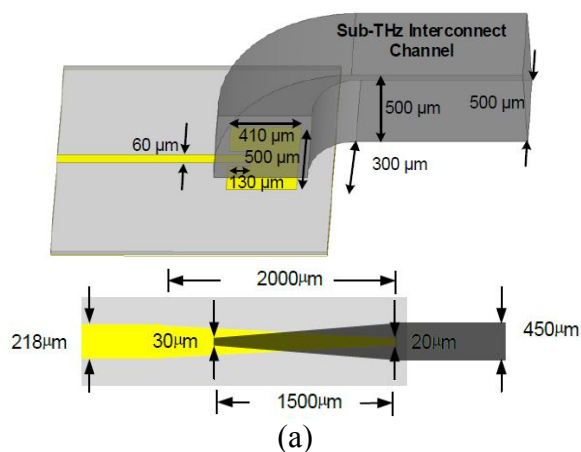


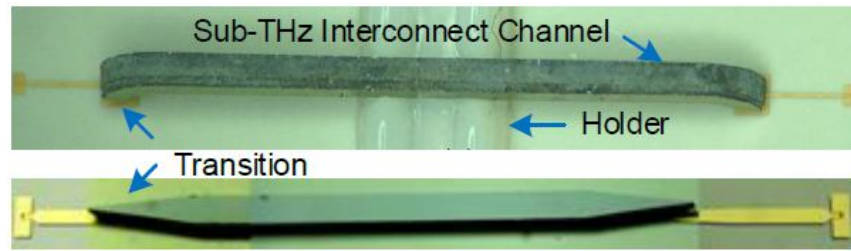
圖 15：由Poynting 向量找出相位中心

## 15. Sub-THz Interconnect Channel for Planar Chip-to-Chip Communication (晶片與晶片間之次 THz 連接通道)

作者群：Bo Yu, Yu Ye, Xiaoguang Liu, and Qun Jane Gu, University of California-Davis, Davis, California, USA

摘要：本篇論文提出一個可用於次 THz、高頻寬之高速連接波導，要完成超高頻寬介面，有幾項因素需要考慮，首先是材料損耗，本篇選擇高阻抗矽，根據量測結果，該材料在 200 GHz 的損耗為 0.1dB/m。因晶片是平面，所以在通道上需要考慮彎曲介面，在遠場轉接部分，電路板上使用貼片天線(patch antenna)當作發射源，傳輸線則使用共平面波導(coplanar waveguide, CPW)結構；在近場轉接部分，因彎曲的結構會造成傳輸上的損耗且貼片天線有其頻寬限制，為避免在轉接過程因電路板與高速通道波導間阻抗不匹配造成電磁波反射，轉接的部分使用錐形(taper)並經過模擬找出最佳的幾何長度，最後採用圖 16(a)下方之設計。經實測結果，此高速連接波導之插入損耗在 12.6 GHz 為 8.4 dB 以及在 59 GHz 為 4.0 dB。





(b)

圖 16：(a)遠場轉接設計(上方)，近場轉接設計(下方)；(b)遠場轉接實照(上方)，近場轉接實照(下方)

#### 肆、心得及建議

- 一、IEEE P730 計畫規劃高速連接之電氣特性標準，並成立三個工作小組將治具的設計準則、去嵌入方法之驗證以及射頻參數品質之檢查寫成標準草案，預計在 2016 年底提出草案內容，此標準將有助於高頻連接系統之品質，減少因治具所造成的不確定度及錯誤解讀。
- 二、電磁資訊安全議題關係著智慧電網甚至物聯網的發展，高明的網路駭客甚至可以利用電磁場探棒偵測未經過加密的電路所洩漏之電磁波，進行資料的逆向工程(reverse engineering)，因此相關的資安標準也相當受到電磁國際標準組織的重視。
- 三、關於汽車電磁相容標準方面，CISPR 12 內容更新電動車上車用充電器的裝設規定，以及未來可能增加戶外試驗場(OTS)之驗證程序及關連性；CISPR 25 則更新附錄 I 的高電壓模組測試方法以及附錄 J 的 ESA ALSE 抗擾度驗證程序，預計將於 2016 年底出版；而目前正在發展的新標準有輻射頻段小於 30 MHz 的 CISPR 36，預定在 2018 年底出版。
- 四、IEC 目前最關注的議題為低頻電磁相容量測標準，此項標準目前由 CISPR 子委員會 SC77A 的第 8 工作小組負責相關標準的制定，涵蓋的頻段為 9 kHz 至 150 kHz，內容為制定與電網聯接變頻器之總電源輻射限制值以及安裝於總電源上通訊裝置的抗擾度，此標準對於智慧電表之通訊相當重要。目前委員會對於 2 至 30 kHz 已有初步共識，然而在 30 至 150 kHz 的非意圖式輻射上尚未達成共識。
- 五、關於智慧電網部分，最新的 IEC 標準為發電站與變電站環境所要求的電磁抗擾度通用標準(IEC 61000-6-5 Ed. 1.0：2015)，此份標準主要提供發電站以及高/中壓變電站(HV/MV substations)使用設備的電磁抗擾度參考，取代舊版(2001 年)的技術規範，並融入最新的 61000-2-5 環境相關內容。而智慧電網互通性委員會(SGIP)，目前正致力於智慧產業迫切需求的開放場域訊息匯流

(OpenFMB)計畫、加強網路安全以及互通性標準測試平台之發展。其中 OpenFMB 計畫並與工業物聯網聯盟(IIC)合作，應用標準化及無專利的網路通信架構，以提供電力系統場域裝置之需求規範，該計畫也刻正由美國能源部下的國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)與其他合作夥伴進行試辦，找出可將業界各自不同的再生能源技術與電網整合的方法，解決諸如當雲朵飄過屋頂上的太陽光電系統時，如何讓太陽能板的變流器、太陽能電池以及電網端的電壓調節器能同步反應的互通性問題，簡而言之，該計畫企圖讓發電業者選用 A 供應商的電池系統，選擇 B 供應商的太陽光電模組，再使用 OpenFMB 輕易地將兩種不同廠商所開發的系統進行整合。

- 六、要符合金磚四國相關電磁相容及安規要求，以及免除該國報關之錯誤程序，尋求當地通曉法規、熟悉語言轉換及合法公正的代理商將是關鍵。
- 七、專題演講的 Scully 博士指出了在相同頻寬下多系統的共存和互通性等問題，以及有意圖與非意圖等複合式電磁干擾問題皆使電磁相容扮演更重要且關鍵性的角色；而隨著處理器時脈的增加以及電路體積的縮小，未來將持續面臨信號完整性、電源完整性以及電磁相容的挑戰。
- 八、獲得大會最佳學生論文獎有兩篇，其中一篇為「應用於彈性纜線上之吸波材料其電磁干擾控制特性」(EMI Control Performance of the Absorbing Material for Application on Flexible Cables)，該論文主要貢獻在設計可估算吸波材料特性的測試治具，並可藉由此治具對吸波材料的數量與配置最佳化，以達到減低電磁干擾的成效及對信號完整性的評估。另一篇是「運用物理為基礎且可簡化電路的模型方法來萃取電源完整性應用之電路板上層結構的電感」(Top-Layer Inductance Extraction for the Pre-Layout Power Integrity using the Physics-Based Model Size Reduction (PMSR) Method)，此篇論文提出以物理為基礎且可簡化電路的方法(PMSR)來獲得接地層以上幾何架構(above-ground geometries)的等效電路，該法所萃取的模型相容於局部元素等效電路法(PEEC)，因為 PMSR 法以物理為基礎，因此其萃取的等效模型與電路板的幾何大小有關，所以可直覺地調整電源網路上的電感，進而減少直流電源上的電流漣波。大會論文獎則由「在單開口封閉暗室中導線的最大可預期典型輻射統計模型」(Canonical Statistical Model for Maximum Expected Immission of Wire Conductor in an Aperture Enclosure)獲得，此篇論文主要導入統計型功率平衡模型(statistical power balance model)，用以預測具單開口封閉暗室內的導體上的最大電流，模型可同時計算出平均值與變異數，相較

於其他類似的機率函數所預測的輻射數據，此模型可在最少的電磁參數條件下提供更快速的分析且不失精確度。