

การเปรียบเทียบโพรบสนามไฟฟ้าชนิดฝัง สำหรับวัดการดูดกลืนพลังงานความถี่วิทยุ ในร่างกาย

สงวน บุญปัญญารักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร. อาจณรงค์ ฐานันโธษ

Gregory Gajda

Radiation Protection Bureau,

Health Canada

บทคัดย่อ

การวัดการดูดกลืนพลังงานความถี่วิทยุในระบบชีวภาพเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามมาตรฐาน และมีความสำคัญต่อการศึกษาลักษณะในเชิงชีวภาพ การวัดดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้โพรบ สนามไฟฟ้าชนิดฝังขนาดเล็กที่มีการตอบสนองแบบไอโซทรอปิก ก่อนการใช้งานโพรบควรมีผ่านปรับเทียบอย่างถูกต้องเพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำและเชื่อถือได้ การพยายามทำให้ uncertainty ของผลการวัดต่ำเป็นสิ่งท้าทายและมีความสำคัญต่อการตรวจสอบอุปกรณ์สื่อสารและการศึกษาลักษณะต่อชีวภาพ ในบทความนี้ผู้เขียนได้อธิบายถึงระบบและขั้นตอนที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการปรับเทียบโพรบสนามไฟฟ้า ค่าประมาณของผลรวม uncertainty ที่ได้จากการลองปรับเทียบมีขนาดไม่เกิน ± 10.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่าค่าแนะนำ ± 25 เปอร์เซ็นต์ที่กำหนดไว้ใน Safety Code 6 ของกระทรวงสาธารณสุขแคนาดา

Calibration of Implantable E-Field Probe for Measuring Radiofrequency Energy Absorption in the Human Body

Sa-nguan Boonpanyarak

Faculty of Engineering

Khon Kaen University

Dr. Artnarong Thansandota

Gregory Gajda

Radiation Protection Bureau

Health Canada

Abstract

Measurements of radiofrequency energy absorption in biological systems are of importance for compliance evaluation of portable radio transmitters as well as for study of biological effects. These measurements are made possible following the development of implantable, miniature electric-field probes with an isotropic response. The probe should be properly calibrated before it can provide reliable and accurate measurements. Keeping uncertainties small is a challenge and is crucial for both compliance evaluation and studies of biological effects. In this paper, we describe a system and procedures which have been developed for electric-field probe calibration. The total uncertainty associated with a trial calibration was estimated to be within $\pm 10.3\%$ which is better than the $\pm 25\%$ recommendation specified in Health Canada's Safety Code 6.

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีวิทยุโทรคมนาคมได้ก้าวหน้าไปมากและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในรอบสิบปีที่ผ่านมาการใช้เครื่องรับ-ส่งวิทยุเคลื่อนที่เช่น วอล์คกี้-ทอล์คกี้ และโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ใกล้ตัวผู้ใช้ขณะใช้งาน ผู้ใช้หลายคนมีความกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยจากการถูกคลื่นวิทยุที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์เหล่านี้ ความกังวลดังกล่าวได้ส่งผลให้บริษัทผู้ผลิตออกแบบและปรับปรุงวิทยุเคลื่อนที่เพื่อให้การถูกคลื่นอยู่ในระดับที่ลดลงและต่ำกว่าขีดจำกัดที่ระบุไว้ในมาตรฐานความปลอดภัย

ขีดจำกัดการถูกคลื่นที่ใช้กับวิทยุเคลื่อนที่แบบใช้งานใกล้ตัวจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราการดูดกลืนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในร่างกาย ปริมาณดังกล่าวมีชื่อเฉพาะว่าอัตราการดูดกลืนจำเพาะ (specific absorption rate) หรือเรียกด้วยคำย่อว่า *SAR* ตามมาตรฐานความปลอดภัยในสหรัฐอเมริกาและแคนาดา [1], [2] ขีดจำกัด *SAR* เฉพาะส่วนของร่างกายสำหรับศีรษะ คอ และลำตัว เมื่อเฉลี่ยในเนื้อเยื่อ 1 กรัมใดๆ มีค่าเป็น 1.6 วัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg)

บริษัทผู้ผลิตวิทยุเคลื่อนที่หลายบริษัทได้ลงทุนสร้างห้องปฏิบัติการเพื่อใช้วัดค่า *SAR* ในหุ่นจำลองของร่างกาย (phantom) อันเนื่องจากผลิตภัณฑ์วิทยุเคลื่อนที่ บางบริษัทได้ส่งผลิตภัณฑ์ของตนไปให้ห้องปฏิบัติการอื่นที่เชื่อถือได้วัดค่า *SAR* ขึ้นเพื่อยืนยันผลว่าต่ำกว่าขีดจำกัดหรือไม่ ในขณะเดียวกันสถาบันหลายแห่งเช่น Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) และ Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) ได้จัดทำมาตรฐานการวัด *SAR* [3]-[5] เพื่อเป็นแนวทางให้บริษัทผู้ผลิตวิทยุเคลื่อนที่นำไปใช้ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ของตน

เทคนิคการวัด *SAR* นอกจากจะมีประโยชน์ต่อการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ในแง่ความปลอดภัยแล้ว ยังใช้ในการตรวจหาระดับพลังงานดูดกลืนในชีวสารเพื่อประโยชน์ต่อการศึกษาผลในเชิงชีววิทยาอีกด้วย

อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการวัด *SAR* ก็คือโพรบสนามไฟฟ้าชนิดฝัง (implantable E-field probe) ซึ่งมีหลายบริษัทผลิตขาย ก่อนนำไปใช้งานโพรบเหล่านี้ต้องผ่านการเปรียบเทียบเพื่อให้ผลการวัดมีความเชื่อถือได้

ในบทความนี้ผู้เขียนจะบรรยายถึงเทคนิคการปรับเทียบโพรบที่ความถี่ประมาณ 1.9 GHz ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการแม่เหล็กไฟฟ้าของ Radiation Protection Bureau ที่ประเทศแคนาดา ส่วนหนึ่งของบทความจะพูดถึงความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากการหาคุณสมบัติของโพรบ

พารามิเตอร์สำหรับการดูดกลืนพลังงาน

อัตราการดูดกลืนจำเพาะ (specific absorption rate) หรือ *SAR* มีคำจำกัดความเชิงคณิตศาสตร์ดังนี้ [3]

$$SAR = c \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

(1)

เมื่อ

- c*

คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) มีหน่วยเป็นจูลส์ต่อกิโลกรัมเซลเซียส (J.kg⁻¹.degree C⁻¹)
- ΔT

คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากพลังงานดูดกลืนในร่างกาย มีหน่วยเป็นเซลเซียส (°C)
- Δt

คือระยะเวลาการถูกพลังงาน มีหน่วยเป็นวินาที (s)

ทั้งนี้เราสมมุติว่าการวัด *SAR* ทำอยู่ในสภาวะ non-thermodynamic กล่าวคือไม่มีการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีหรือการแผ่รังสีหรือโดยการปรับควบคุมอุณหภูมิ (การไหลเวียนโลหิต เหงื่อออก ฯลฯ) *SAR* มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) และสามารถวัดได้โดยใช้โพรบแบบเทอร์มิสเตอร์ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงพอ

ในกรณีที่ความร้อนอันเกิดจากพลังงานดูดกลืนในร่างกายมีน้อย และโพรบแบบเทอร์มิสเตอร์ไม่มีความไวเพียงพอ เราจะใช้โพรบสนามไฟฟ้าชนิดฝังแทน ในกรณีนี้คำจำกัดความเชิงคณิตศาสตร์ของ *SAR* คือ [3]

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}$$

(2)

เมื่อ

- σ

คือสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของเนื้อเยื่อ มีหน่วยเป็นซีเมนส์ต่อเมตร (S/m)
- E*

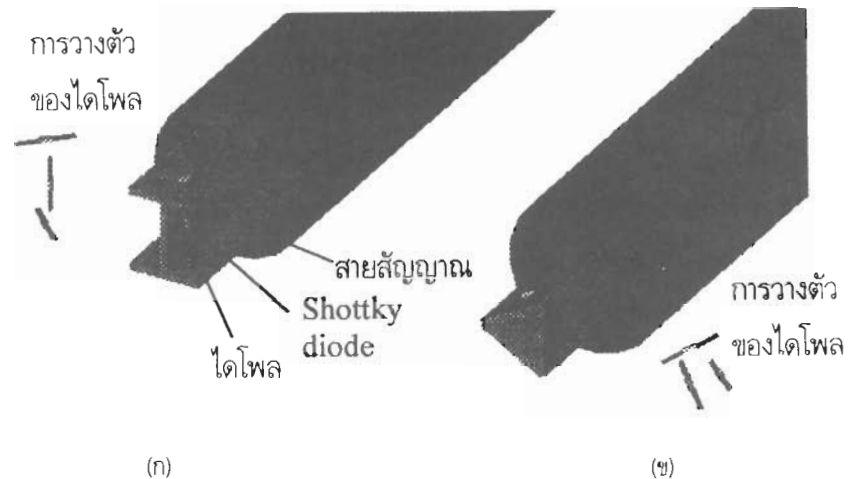
คือสนามไฟฟ้า (electric field) ที่ถูกเหนี่ยวนำในร่างกาย มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m)

ρ คือความหนาแน่นมวล (mass density) ของเนื้อเยื่อ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

โพรบวัดสนามไฟฟ้าชนิดฝัง (Implantable E-Field Probe)

โดยทั่วไปค่า SAR อันเนื่องมาจากอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ชนิดมือถืออยู่ในช่วง 10 mW/kg ถึง 20 W/kg [6] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรุ่น ความถี่และกำลังส่งของอุปกรณ์ ค่า SAR ในช่วงดังกล่าวจะสอดคล้องกับความเข้มของสนามไฟฟ้า 2.5 V/m ถึง 150 V/m (ตามสมการที่ 2) และถ้าหากดูในเชิงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก็จะอยู่ในช่วง $3 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ถึง 6 mK/s (ตามสมการที่ 1) ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีโพรบสองชนิดที่สามารถใช้วัดค่า SAR ได้ แต่ในทางปฏิบัติผู้วัดค่า SAR จะใช้โพรบสนามไฟฟ้าชนิดฝังที่มีไดโพลเป็นตัวดีเทกต์ เนื่องจากโพรบชนิดนี้มีพิสัยพลวัต (dynamic range) ครอบคลุม SAR ช่วงดังกล่าวและยังเอื้อให้สามารถอ่านค่า SAR ได้อย่างรวดเร็ว โพรบวัดสนามไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ (ก) มีขนาดเล็กเพื่อว่าจะก่อให้เกิดการรบกวนต่อสนามไฟฟ้าที่วัดน้อย (ข) มีความไวเท่ากันในทุกทิศทางหรือมีคุณสมบัติไอโซทรอปิก (isotropic) และ (ค) มีการตอบสนองเชิงเส้นกับกำลังส่งของความเข้มสนามไฟฟ้าตกกระทบ ในเชิงโครงสร้างโพรบวัดสนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก 3 ตัวซึ่งวางตั้งฉากซึ่งกันและกันเพื่อให้มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก ที่ขั้วของไดโพลแต่ละตัวจะมี Schottky diode ต่อเชื่อมเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดีเทกต์ ไดโพลแต่ละตัวจะวางอยู่บนแกนซึ่งเป็นแผ่นเซรามิคหรือควอตซ์ การวางแกนประกบกันมีอยู่ 2 รูปแบบคือ แบบ i-beam และแบบ delta-beam ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1

สำหรับโพรบแบบ i-beam นั้น ที่ปีกบนและล่างของรูปตัว I ไดโพลจะถูกวางทำมุม 45° กับแนวแกนของโพรบและไดโพลบนปีกทั้งสองจะวางทแยงซึ่งกันและกัน ส่วนไดโพลตัวที่ 3 จะถูกวางบนแกนกลางของรูปตัว I และทำมุม 90° กับแนวแกนของโพรบ สำหรับโพรบแบบ delta-beam ที่ด้านแต่ละด้านของสามเหลี่ยม ไดโพลจะถูกวางให้ทำมุม 54.7° กับแนวแกนของโพรบ เปลือกนอกของโพรบทำด้วยโลหะ (พลาสติก) ทั้งนี้เพื่อให้โพรบรบกวนสนามไฟฟ้าที่วัดน้อยที่สุด เอาต์พุตที่ได้จากโพรบจะเป็นแรงดันกระแสตรงจำนวน 3 ช่อง ถ้าไดโอดที่ต่อเชื่อมขั้วไดโพลทำงานตามกฎกำลังสอง (square law) แรงดันแต่ละช่องจะสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับ $|E|^2$ เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าที่ขนานกับไดโพลช่องนั้น



รูปที่ 1 แสดงการวางไดโพลของโพรบวัดสนามไฟฟ้าบนแกน (ก) แบบ i-beam และ (ข) แบบ delta-beam

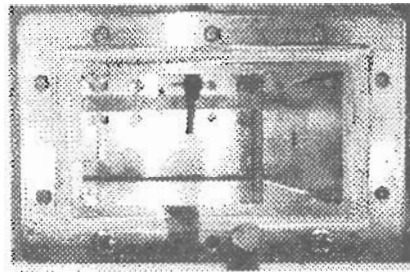
โพรบที่นำมาใช้ในการปรับเทียบครั้งนี้เป็นโพรบแบบ delta-beam ผลิตโดยบริษัท 3D-EMC ซึ่งอยู่ที่มลรัฐฟลอริดา ลักษณะตัวโพรบเป็นแท่งพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ความยาวรวมประมาณ 28.5 เซนติเมตร และสายอากาศไดโพลที่ใช้สำหรับวัดสนามไฟฟ้ามีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร

ระบบการปรับเทียบ

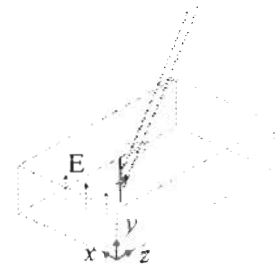
เพื่อให้สามารถวัดค่า SAR ได้ถูกต้องโพรบจะต้องผ่านการปรับเทียบเสียก่อน ที่ทำเช่นนี้ก็เพราะว่าเราต้องทราบความไว (sensitivity) ในการแปลงสนามไฟฟ้าออกมาเป็นแรงดันกระแสตรง อีกทั้งไดโอดแต่ละตัวอาจมีความไวต่างกัน การปรับเทียบโพรบจะต้องทำ 2 ขั้นตอนคือ (ก) การปรับเทียบโพรบเพื่อหาแฟกเตอร์ที่ใช้รับความไวในแต่ละช่องเพื่อให้โพรบมีคุณสมบัติไอโซทรอปิก และ (ข) การปรับเทียบเพื่อให้สามารถวัดค่า SAR ได้ถูกต้อง ในการปรับเทียบโพรบผู้เขียนเลือกทำที่ความถี่ 1.9 GHz ซึ่งเป็นความถี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิตอลในอเมริกาเหนือ การปรับเทียบในแต่ละขั้นมีรายละเอียดดังนี้

(ก) การปรับเทียบโพรบเพื่อหาแฟกเตอร์ที่ใช้รับความไวในแต่ละช่องเพื่อให้โพรบมีคุณสมบัติไอโซทรอปิก หลักการก็คือจะต้องปรับให้ความไวแต่ละช่องมีค่าเท่ากันซึ่งสามารถทำได้โดยปรับอัตราขยายของวงจรขยายแรงดันที่ต่อกับโพรบ อุปกรณ์สำคัญที่ใช้สำหรับการวัดหาความไวก็คือหอนำคลื่นสี่

เหล็ยมีนผ้าเบอร์ WR430 ที่มีช่วงความถี่การทำงาน (operating frequency) ระหว่าง 1.7 ถึง 2.6 GHz ด้านบนของท่อนำคลื่นมีรูเพื่อให้สามารถแทงโพรบเข้าไปในท่อได้ การเจาะรูจะเป็นมุมเอียงกับผิวท่อนำคลื่นเพื่อว่าเมื่อเราหมุนโพรบรอบแกนแล้วจะต้องมีตำแหน่งหนึ่งที่ไดโพลอยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น สำหรับโพรบแบบ delta-beam ตัวโพรบจะต้องทำมุม 54.7° กับผิวของท่อนำคลื่น ลักษณะการแทงโพรบในท่อนำคลื่นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2



(ก)

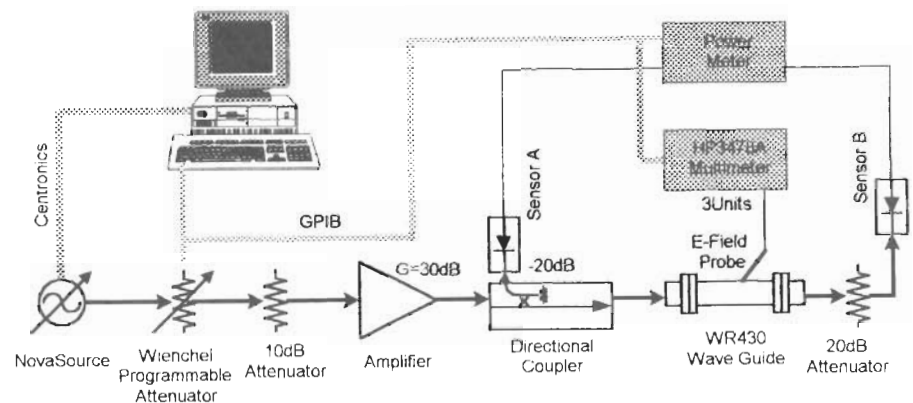


(ข)

รูปที่ 2 (ก) โพรบเมื่อแทงลงไปในท่อนำคลื่น (ข) การวางตัวของโพรบกับท่อนำคลื่นและแสดงให้เห็นไดโพลที่อยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า

ท่อนำคลื่นจะถูกป้อนด้วยสัญญาณต่อเนื่องความถี่ 1.9 GHz ที่สามารถปรับกำลังได้ แผนภูมิการติดตั้งชุดปรับกำลังของสัญญาณได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 ชุดปรับกำลังดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดประมาณ 20 dBm (100 mW) แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุคือ NovaSource (Nova Engineering, Inc รุ่น 15002000-100) ซึ่งให้กำลังสูงสุดประมาณ 8 dBm สามารถให้กำเนิดสัญญาณในช่วงความถี่ 1.5 GHz ถึง 2.0 GHz และสามารถปรับเปลี่ยนความถี่เป็นขั้นๆ ละ 100 kHz การปรับเปลี่ยนความถี่ทำได้โดยการควบคุมผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ (centronics port) ของคอมพิวเตอร์ การปรับกำลังของสัญญาณทำได้โดยการปรับค่าลดทอนของตัวลดทอนกำลังที่โปรแกรมได้ (programmable attenuator ยี่ห้อ Weinschel รุ่น 3200T-2 ของ Weinschel Corporation) การปรับค่าลดทอนสามารถโปรแกรมได้จากคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต GPIB (general purpose interface bus) ผ่านชุดอินเตอร์เฟซรุ่น 8210A-1 ของบริษัทเดียวกัน ค่าลดทอนสามารถปรับได้จาก 0 dB ถึง 60 dB และมีความละเอียดในแต่ละขั้นเป็น 0.5 dB สัญญาณที่ได้ถูกขยายกำลังโดยตัวขยายกำลัง (power amplifier ของ Mini Circuits รุ่น ZHL-42) ซึ่งมีอัตราขยาย 30 dB กำลังสูงสุด 28 dBm ที่ 1 dB

compression สัญญาณที่เอาต์พุตจากตัวขยายกำลังจะถูกตั้งให้มิกำลังประมาณ 20 dBm และป้อนเข้าสู่ท่อนำคลื่นความยาว 28 เซนติเมตร ซึ่งถูกเจาะรูสำหรับแท่งโพรบที่ระยะ 18 เซนติเมตรจากปลายด้านที่ป้อนคลื่นเข้า ปลายทั้ง 2 ด้านของท่อนำคลื่นจะมีตัวปรับต่อ (adapter ยี่ห้อ Apollo รุ่น 14646) ต่ออยู่เพื่อให้สามารถต่อกับสายเคเบิลแกนร่วมได้ การวัดกำลังของคลื่นจะใช้มิเตอร์วัดกำลัง (power meter ยี่ห้อ Gigatronics รุ่น 8542) ซึ่งสามารถวัดสัญญาณได้ 2 ช่องพร้อมกัน และใช้ sensor รุ่น 80401A ซึ่งสามารถวัดสัญญาณที่มีกำลังไม่เกิน 200 mW ในช่วงความถี่ 0.01 GHz ถึง 18 GHz การอ่านค่าจากมิเตอร์สามารถทำได้โดยอ่านที่หน้าปัทม์ของมิเตอร์โดยตรงหรือจะอ่านผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยผ่านพอร์ต GPIB ก็ได้



รูปที่ 3 แผนภูมิการติดตั้งชุดกำเนิดสัญญาณสำหรับการปรับเทียบโพรบให้มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก

เพื่อให้การปรับเทียบมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ผู้เขียนได้ออกแบบติดตั้งท่อนำคลื่นให้สามารถปรับมุมได้ โดยปลายด้านหนึ่งของท่อนำคลื่นมีล้อเลื่อนรองรับและอีกด้านหนึ่งยึดติดอยู่กับฐานเคลื่อนที่ได้ (stage mechanism ไม่มียี่ห้อ) ตามแนวตั้ง เมื่อปรับฐานขึ้นลงก็จะทำให้ท่อนำคลื่นปรับเปลี่ยนมุมไปด้วย ส่วนของชุดจับยึดโพรบก็จะติดตั้งบนฐานเคลื่อนที่ได้แบบสองมิติ (Edmund Scientific รุ่น H31241 และรุ่น H36347) เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวการเคลื่อนที่ของท่อนำคลื่นและสามารถปรับให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อแท่งโพรบเข้าไปในท่อนำคลื่นได้ ที่ปลายแขนของชุดยึดโพรบจะเป็นอุปกรณ์ยึดจับโพรบซึ่งเป็นฐานหมุนได้รอบแกน (rotary stage ยี่ห้อ Edmund Scientific รุ่น H38193) รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว

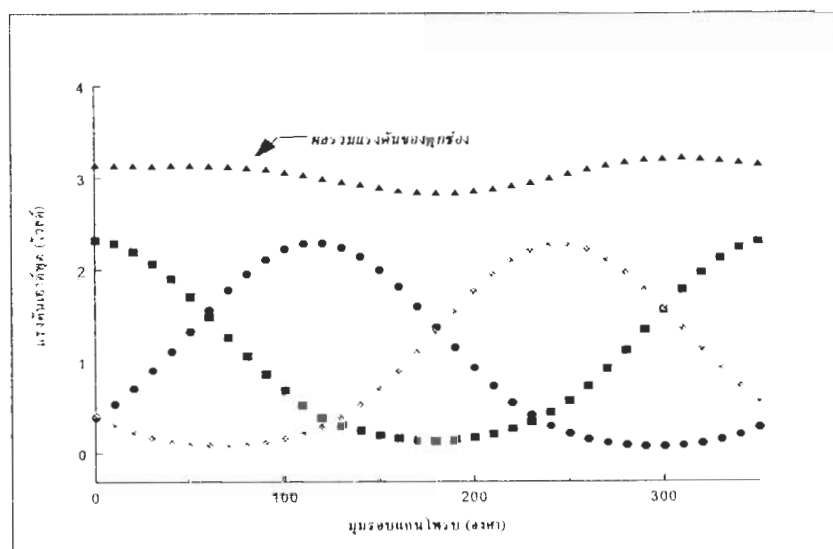
หัวของโพรบจะต่อกับวงจรขยายแรงดันชนิด 3 ช่องเพื่อขยายแรงดันจากโพรบให้สูงขึ้น เอาต์พุตจากวงจรขยายแรงดันแต่ละช่องจะต่อกับมัลติมิเตอร์ (Hewlett-Packard รุ่น HP 3478A) การอ่านค่าจากมิเตอร์สามารถทำได้โดยอ่านที่หน้าปัดของมิเตอร์โดยตรงหรือจะอ่านผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยผ่านพอร์ต GPIB ก็ได้ เพื่อความสะดวกในการทำงานผู้เขียนได้เขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมทุกส่วนที่ควบคุมได้ทางคอมพิวเตอร์เพื่อให้มีการทำงานที่สัมพันธ์กัน การพัฒนาได้ทำโดยใช้ภาษาโปรแกรมเชิงภาพ LabView version 4.01 ของ National Instruments โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะช่วยให้ระบบทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อการอ่านข้อมูลจากมิเตอร์ทุกตัวและเก็บข้อมูลลงไฟล์ ไฟล์ที่ได้สามารถเรียกเข้าสู่ spread sheet ทั่วไปได้ทันที



รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์สำหรับยึดจับโพรบและปรับเปลี่ยนมุมของหัวนำคลื่น

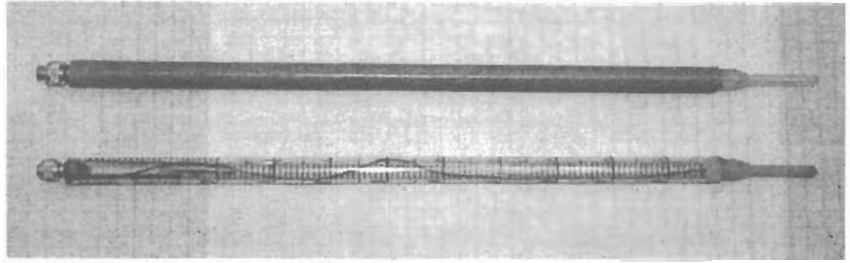
ก่อนทำการเปรียบเทียบจะต้องปรับค่าแรงดัน offset ของเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณทุกช่องให้เป็นศูนย์ ทำการทดลองเหมือนการเปรียบเทียบจริงเพียงแต่ว่าในครั้งแรกนี้ต้องการเพียงตำแหน่ง (ค่ามุมตามแนวรอบแกนโพรบ) ที่สัญญาณแต่ละช่องมีค่าสูงสุดและหาว่าค่าสูงสุดเป็นเท่าไร จากนั้นปรับอัตราขยายของวงจรขยายแรงดันของแต่ละช่องให้ได้ค่าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากันทุกช่อง การทำเช่นนี้จะทำให้โพรบมีการตอบสนองเป็นไอโซทรอปิก มากที่สุด รูปที่ 5 เป็นกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบ หลังจากปรับอัตราขยายแล้ว

(ข) การเปรียบเทียบโพรบเพื่อให้สามารถวัดค่า SAR ได้ถูกต้อง จากคำจำกัดความในหัวข้อที่ 2 เราสามารถหาค่า SAR ได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (สมการที่ 1) หรือการวัดสนามไฟฟ้า (สมการที่ 2) การเปรียบเทียบในขั้นตอนนี้ก็จะใช้หลักการดังกล่าว การหาค่า SAR จากการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (thermal measurement) นั้นจะใช้โพรบเทอร์มิสเตอร์ซึ่งผู้เขียนได้สร้างขึ้นเอง โดยใช้เทอร์มิสเตอร์ของ Weitek นำมาประกอบในกระบอกพลาสติกที่มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับโพรบ สนามไฟฟ้า (รูปที่ 6) ทั้งนี้เพื่อให้โพรบทั้งสองมีผลกระทบต่อนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5 กราฟแสดงแรงดันแอมพลิจูดของแต่ละช่องและแรงดันรวมเทียบกับมุมรอบแกนโพรบ เมื่อโพรบทำมุม 54.7° กับท่อนำคลื่น.

โพรบเทอร์มิสเตอร์จะต้องผ่านการเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์กับอุณหภูมิ ผู้เขียนได้ทำการเปรียบเทียบโพรบเทอร์มิสเตอร์กับเทอร์มิสเตอร์ (Omega รุ่น DP472) ในช่วงอุณหภูมิ 18° ถึง 22° ซึ่งเป็นอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการ จากนั้นใช้โปรแกรม TableCurve 2D version 3 วิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ สมการที่ได้ถูกนำไปรวมอยู่ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้หาค่า SAR



รูปที่ 6 (บน) โพรบวัดสนามไฟฟ้า (ล่าง) โพรบเทอร์มิสเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบโพรบเทอร์มิสเตอร์ได้แสดงในรูปที่ 7 ส่วนสำคัญคือท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า WR430 ขนาดภาคตัดขวางภายใน $109.2 \text{ ม.ม.} \times 54.6 \text{ ม.ม.}$ สองท่อนความยาวท่อนละ 20 เซนติเมตร ระหว่างรอยต่อของท่อนนำคลื่นทั้งสองจะมีแผ่นฟิล์มพลาสติกหนา 0.3 ม.ม. กั้นอยู่ ท่อนนำคลื่นท่อนบนบรรจุน้ำและปลายด้านบนเปิดเพื่อให้สามารถหยะโพรบเข้าไปได้ โพรบที่ใช้ในการทดลองจะถูกติดตั้งอยู่บนแขนกลซึ่งมีความแม่นยำในการเคลื่อนที่ 5 ไมครอน เหตุที่เลือกใช้น้ำเพราะเราทราบคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความจุความร้อนจำเพาะ ($4800 \text{ J.kg}^{-1}.\text{degree C}^{-1}$) ความหนาแน่นมวล (1000 kg/m^3) ส่วนค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำได้จากวัดโดยใช้โพรบแบบสายแกนร่วมปลายเปิดและเครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (network analyzer ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น HP8720B) จากการวัดได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าประมาณ 0.778 S/m ความลึกของน้ำในท่อนนำคลื่นจะต้องมากกว่า 3 เท่าของความลึกผิว (skin depth) เพื่อให้กำลังของคลื่นถูกดูดกลืนหมด ภายในท่อนนำคลื่นท่อนล่างมีแต่อากาศ การออกแบบท่อนล่างจะต้องคำนึงถึงความยาวเพื่อให้คลื่นภายในท่อนมีคุณสมบัติเป็นเอกรูป (uniform) ก่อนถึงรอยต่อและจะต้องมีการปรับจูนเพื่อให้คลื่นสะท้อนจากรอยต่อที่ปรากฏต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณมีความแรงน้อยที่สุด การปรับจูนได้ทำโดยใช้ตัวนอตหนึ่งตัวขนาด ๑ นิ้วขันเข้าไปในท่อนนำคลื่นด้านกว้าง ตำแหน่งของตัวนอตบนท่อนนำคลื่นได้จากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีท่อนนำคลื่น หลังจากปรับจูนแล้วสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ค่า $|S_{11}|$) ที่ปรากฏต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณมีขนาดเป็น -27.6 dB ที่ความถี่ 1.8868 GHz การวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย

การเปรียบเทียบในขั้นตอนนี้ส่วนหนึ่งเป็นการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อให้พลังงานดูดกลืนในน้ำสูงพอที่จะทำให้เกิดความร้อนเราจึงแทรกวงจรขยายกำลัง (power amplifier ของ Remec Q-Bit รุ่น QBS-265) เข้าไประหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับท่อนนำคลื่นท่อนล่าง วงจรขยายกำลังให้กำลังด้านออกถึง 10 วัตต์ หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดดังกล่าวแล้วรันโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบน LabView ซึ่งโปรแกรมจะสวิตซ์ตัวลวดท่อนให้ได้กำลังตามที่กำหนด จากนั้นจะ

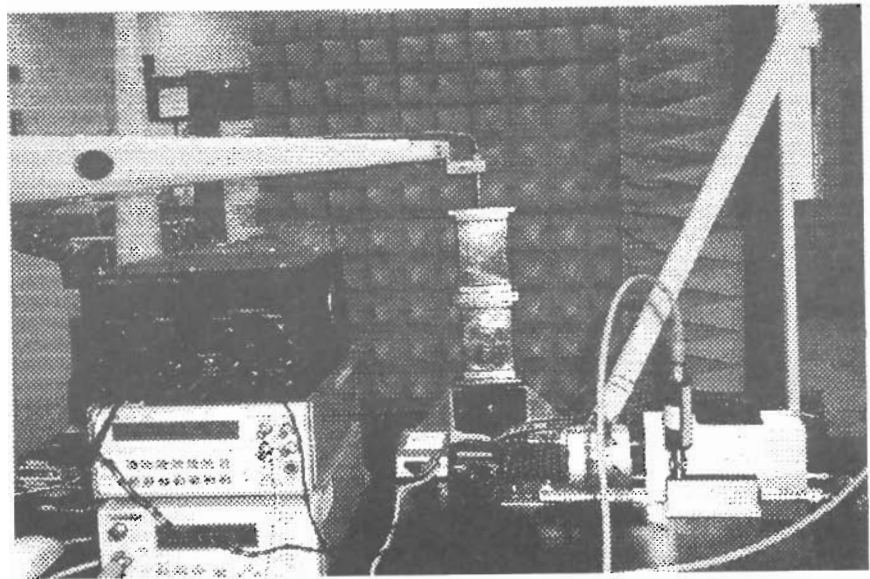
ชักตัวอย่างอ่านค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จากมัลติมิเตอร์ (HP3478A) แล้วคำนวณออกมาเป็นอุณหภูมิพร้อมทั้งพลอตกราฟเทียบกับเวลาไปด้วยในตัว ผู้ใช้สามารถเห็นอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจากกราฟ เมื่อได้ข้อมูลเพียงพอแล้วก็สั่งให้โปรแกรมหยุดอ่าน จากนั้นก็เลือกช่วงกราฟที่ต้องใช้ในการคำนวณค่า SAR ในกรณีนี้โปรแกรมคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วยวิธี linear regression ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนระดับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่น ความสัมพันธ์ระหว่าง SAR กับกำลังของสัญญาณจะเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$SAR = m_1 P \quad (3)$$

เมื่อ

m_1 คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง SAR กับกำลังของสัญญาณ

P คือ กำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่นมีหน่วยเป็นวัตต์(W)



รูปที่ 7 แสดงท่อนำคลื่นที่ใช้ในการปรับเทียบโพรบให้สามารถวัด SAR ได้ถูกต้อง

เมื่อได้ค่า SAR จากการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามต้องการแล้ว ก็เปลี่ยนโพรบเทอร์มิสเตอร์เป็นโพรบวัดสนามไฟฟ้าแล้วทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่คราวนี้อ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายแรงดันของแต่ละช่องโดยใช้มัลติมิเตอร์ (3 ตัว) ทำการทดลองซ้ำโดยปรับเปลี่ยนระดับกำลัง

ของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่น ระดับกำลังเหล่านี้จะต้องมีขนาดพอเหมาะเพื่อให้การทำงานของไดโอดอยู่ในย่าน square law ผลรวมแรงดันเอาต์พุตจากวงจรขยายแรงดันทั้ง 3 ช่องสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับขนาดของสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนี้ผลรวมแรงดันเอาต์พุตยังสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่นอีกด้วย ซึ่งเราสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$V = m_2 P$$

(4)

และ

$$V = k |E|^2$$

(5)

เมื่อ

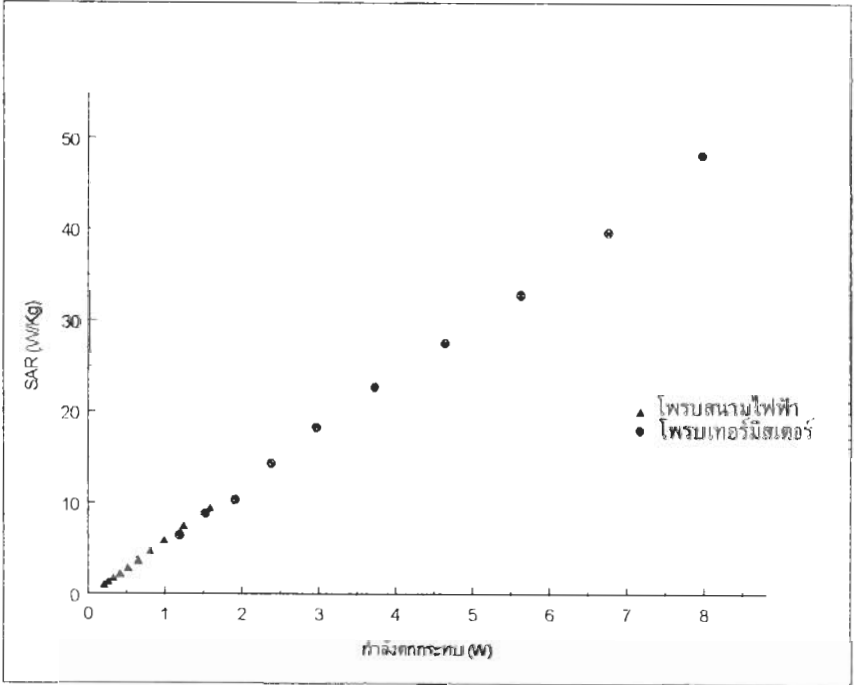
- V

คือ ผลรวมของแรงดันเอาต์พุตทั้ง 3 ช่อง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- m_2

คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของแรงดันกับกำลังของสัญญาณ
- k

คือ ค่าคงตัวใดๆ ในการเปรียบเทียบโพรบ (calibration factor)
- E

คือ สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบโพรบ มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m)



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่า SAR กับกำลังที่ตกกระทบที่ได้จากการวัดโดยโพรบสนามไฟฟ้าและโพรบเทอร์มิสเตอร์

ความชัน m_1 และ m_2 ในสมการที่ (3) และ (4) หาได้จากการคำนวณหลังจากป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้องเข้าโปรแกรม Axum version 5.0 ของบริษัท Mathsoft, Inc. จากสมการที่ (3) และ (4) ถ้า P อยู่ในช่วงเดียวกันจะได้ว่า

$$SAR = \frac{m_1}{m_2} V \quad (6)$$

จากสมการที่ (2) (5) และ (6) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง SAR กับ $|E|^2$ และคำนวณหาค่าคงตัว k ได้ สำหรับ k ที่ได้จากการเปรียบเทียบเมื่อนำเป็นชีวสารจำลองมีค่าเป็น $3.91 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1}$

ผลการทดลองทั้งสองในข้อ (ข) หัวข้อการเปรียบเทียบ สามารถนำมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SAR กับกำลังของสัญญาณได้ดังรูปที่ 8

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

ปกติค่าที่ได้จากการวัดจะเป็นเพียงค่าประมาณการเท่านั้น หากต้องการให้ผลที่ได้มีความสมบูรณ์จะต้องรวมเอาความไม่แน่นอน (uncertainty) ของการวัดเข้าไปด้วย การประเมินค่า uncertainty ในการเปรียบเทียบจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นถึงคุณภาพและความถูกต้องของผลที่ได้จากการวัด การคำนวณหาค่า uncertainty จะต้องพิจารณาถึงค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ (tolerance) ของเครื่องมือวัด ตัวแปรต่างๆ ในการติดตั้งเครื่องมือวัด เทคนิคและอุปกรณ์ช่วยที่ใช้ในการวัด วิธีการประเมินค่า uncertainty ของการวัดสามารถดูได้ใน NIST Technical Note 1297 [7] ส่วนประกอบของ uncertainty จะแบ่งออกเป็น 2 แบบตามวิธีประเมิน แบบแรก (Type A) เป็นการประเมิน uncertainty จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งอาจจะเป็นการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลที่เป็นอิสระหรือการ fit curve โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square) เพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนแบบที่สอง (Type B) คือการประเมินในเชิงวิทยาศาสตร์จากข้อมูลที่มีอยู่ เช่นข้อมูลจากการทดลองครั้งก่อน โดยใช้ประสบการณ์หรือความรู้ในพฤติกรรมหรือคุณสมบัติของสารหรือเครื่องมือที่ใช้ และคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ผู้ผลิตกำหนด การรวมค่า uncertainty เป็นการรวมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเข้าด้วยกัน โดยหารากที่สองของผลรวมกำลังสอง (root-sum-square) ของ uncertainty ทั้งสองแบบ

สำหรับค่าประมาณของ uncertainty ในการเปรียบเทียบนี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 โดยที่ค่าตัวเลขในสดมภ์ที่ 2 เป็นค่าสัมพัทธ์ (relative) ของ uncertainty ของส่วนประกอบแต่ละตัวที่มีผลต่อการหาค่า SAR แต่ละส่วนประกอบในสดมภ์ที่ 1 มีการประเมินดังนี้

ตารางที่ 1
ค่าประมาณของ uncertainty ในการเปรียบเทียบโพรบสนามไฟฟ้าแยกตามส่วนประกอบที่มีผลต่อการหาค่า SAR

ส่วนประกอบที่มีผลต่อค่า SAR	Uncertainty (%)
probe isotropy	8.2
ความเป็นเชิงเส้นของโพรบ	3.2
กำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่น	2.0
curve-fitting ของเทอร์มิสเตอร์	0.06
linear regression ของข้อมูลจากการเปรียบเทียบทั้งสองขั้นตอน	0.5
ความแม่นยำของสัญญาณนาฬิกา	0.05
ค่าสภาพนำไฟฟ้า	5.0
ผลรวม Uncertainty (root-sum-square)	10.3

- probe isotropy uncertainty ได้มาจากการผลของการเปรียบเทียบในขั้นตอนแรก ข้อ (ก)
- ความเป็นเชิงเส้นของโพรบได้จากการทดลองเพิ่มเติมหลังจากเสร็จสิ้นตามการเปรียบเทียบในขั้นตอนแรก ข้อ (ก) กล่าวคือ หลังจากขั้นตอนดังกล่าวได้ทำการทดลองสำหรับแต่ละช่องของ โพรบ โดยหมุนโพรบให้อ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของช่องนั้นได้สูงสุด จากนั้นจึงปรับระดับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่นและบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุต แล้วนำข้อมูลที่ได้มาป้อนเข้าโปรแกรม Axum เพื่อหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกำลังของสัญญาณและหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยวิธี linear regression
- ค่าผิดพลาดจากการอ่านค่ากำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าท่อนำคลื่น คิดจากค่ารับประกันความแม่นยำที่ทางบริษัทผู้ผลิต power meter ระบุไว้ในคู่มือการใช้งาน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังจากทำ curve-fitting แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ซึ่งหาได้โดยใช้โปรแกรม TableCurve 2D
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังจากทำ linear regression โดยใช้ข้อมูลการเปรียบเทียบทั้งสองขั้นตอน คำนี้นหาได้จากโปรแกรม Axum
- ความแม่นยำของสัญญาณนาฬิกาในการวัด Δt ซึ่งค่านี้นหาจากการทดสอบเทียบเวลาที่ได้จากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องคอมพิวเตอร์กับเวลาที่อ่านได้จากนาฬิกาจับเวลาจำนวนหนึ่ง

- ความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าสนามไฟฟ้าของน้ำซึ่งหาได้จากการวัดโดยใช้โพรบแบบสายแกนร่วมปลายเปิดและเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดอื่นๆ ซึ่งมีผลกระทบต่อการปรับเทียบน้อยมาก ยกตัวอย่างเช่น ขนาดของท่อนำคลื่น หรือความแม่นยำของตำแหน่งของโพรบจากการเคลื่อนที่ของแขนกล ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

สรุป

ผู้เขียนได้พัฒนาระบบเพื่อใช้ในการปรับเทียบโพรบสนามไฟฟ้าชนิดฝังสำหรับวัด SAR ที่ความถี่ 1.9 GHz ในหุ่นจำลองของร่างกาย การปรับเทียบได้ทำเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการปรับเทียบให้โพรบมีคุณสมบัติไอโซโทรปิก ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการปรับเทียบให้โพรบสามารถวัดค่า SAR ได้ถูกต้อง

ผลจากการปรับเทียบดังกล่าวเป็นไปตามความคาดหวัง เมื่อดูจากกราฟในรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่า SAR แปรผันเป็นเชิงเส้นกับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าระบบปรับเทียบ การปรับเทียบครั้งนี้มีค่า uncertainty ของการวัดเป็น ± 10.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่าระดับมาตรฐาน (± 25 เปอร์เซ็นต์) ที่กำหนดไว้ใน Safety Code 6[1]

แม้ว่าการปรับเทียบนี้จะใช้น้ำแทนชีวสารจำลอง (simulated liquid) แต่วิธีการก็สามารถนำไปใช้ได้กับกรณีที่ใช้ชีวสารจำลอง และผลที่ได้น่าจะไปในทิศทางเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนนายสงวน บุญปัญญารักษ์ไปทำวิจัยที่ Radiation Protection Bureau, Health Canada เพื่อนำไปสู่วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโททางสาขาวิศวกรรมศาสตร์ ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น การฝึกอบรมของนายสงวนในครั้งนั้นเป็นส่วนหนึ่งของการปฏิบัติตามบันทึกข้อตกลงว่าด้วยความร่วมมือทางวิทยาศาสตร์ระหว่างกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมของไทย กับกระทรวงสาธารณสุขแคนาดา ซึ่งทั้งสองฝ่ายได้ลงนามเมื่อ พ.ศ. 2540

เอกสารอ้างอิง

- [1] **Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz.**: Safety Code 6. Cat. H46-2/99-237, ISBN 0-662-83894-7. Available from Health Canada's web site at: www.hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/catalogue/rpb_pubs/99ehd237.pdf
- [2] IEEE std. C95.1-1999, **IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.** Available from Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA.
- [3] IEEE std. C95.3-1991, **IEEE Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields--RF and Microwave.** Available from Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA.
- [4] **Safety Considerations for Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Telecommunication Equipment (MTE) in the Frequency Range 30 MHz - 6 GHz.**: WGMTE of CENELEC TC211/B, Second Draft. Available from European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium.
- [5] **Specific Absorption Rate (SAR) Estimation for Cellular Phone.: ARIB STD-T56, Version 1.0.** Available from Association of Radio Industries and Business, Nittochi Bldg., 14th Floor, 1-4-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0013, Japan.
- [6] IEEE Standards Coordinating Committee 34 (SCC-34), **IEEE Recommended Practice for Determining the Spatial-Peak Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body Due to Wireless Communications Devices: Experimental Techniques (Draft).**
- [7] **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results.**: NIST Technical Note 1297, 1994 Edition. Available

from National Institute of Standards and Technology, United Staes
Department of Commerce Technology Administration, Washington, DC
20402, USA or NIST's web site at: [physics.nist.gov/Pubs/guidelines/
TN1297/tn1297s.pdf](http://physics.nist.gov/Pubs/guidelines/TN1297/tn1297s.pdf).