

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

เรื่อง การพัฒนาเครื่องตรวจสอบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Development of Dielectric Testing System Using Microwave



ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
นายดวงอาทิตย์ ศรีมูถ  
นายจิรัฏฐ์ เหมือนชู

RCH  
TK  
4842  
D53  
รA51

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **67406**  
วัน,เดือน,ปี **29 พ.ย. 2549**

b. 1166518x  
i. ....

ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารไร้สาย  
สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานการวิจัย  
เรื่องการพัฒนาเครื่องตรวจสอบ ไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ  
Development of Dielectric Testing System Using Microwave

ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ ประจำปีงบประมาณ 2548

ระยะเวลาทำงานวิจัย 1 ปี ระหว่าง 1 ตุลาคม 2547 ถึง 30 กันยายน 2548

รายนามคณะผู้จัดทำ

1. ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์
3. นายดวงอาทิตย์ ศรีมูล
4. นายจิรัฏฐ์ เหมือนชู

สถานที่ทำการวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารไร้สาย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

An inverse technique by reflection measurement in spatial domain is proposed instead of frequency domain. A steepest descent algorithm is used for minimizing performance functions to obtain fast convergence. Comparison results of inverse technique in spatial domain provide good agreement to those obtained from frequency domain. It shows the possibility to design a low cost dielectric-property determination system.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

การวัดค่าการสะท้อนกลับในโดเมนเชิงเชิงพิกัด (Spatial) ด้วยวิธีการแบบย้อนกลับได้ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อแทนที่วิธีการในโดเมนเชิงความถี่ เพื่อให้ได้การเข้าสู่ที่เร็วโดยใช้อัลกอริทึมแบบ Steepest descent ในการลดค่าฟังก์ชันเชิงสมรณะให้มีค่าที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการแบบย้อนกลับในโดเมนเชิงพิกัดกับผลลัพธ์ที่ได้จากโดเมนเชิงความถี่แล้วแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามันมีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบระบบการตรวจสอบคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกด้วยต้นทุนที่ต่ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลิตอาหารเพื่อบริโภคและส่งออกสู่ตลาดโลกเป็นอุตสาหกรรมหลัก สิ่งสำคัญของสินค้าส่งออกคือคุณภาพของสินค้าต้องได้มาตรฐาน และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างสม่ำเสมอและเที่ยงตรง ตัวอย่างได้แก่ผลไม้ ซึ่งต้องสามารถตรวจสอบรสชาติได้อย่างแม่นยำ การตรวจสอบรสชาติผลไม้ที่ทำอยู่ในปัจจุบันทำได้โดยอาศัยคนที่ใช้ความชำนาญเป็นหลัก การพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยทำงานแทนคนได้อย่างแม่นยำ และมีจำนวนมากโดยที่มีความเที่ยงตรงสูงเป็นสิ่งที่สำคัญและควรได้รับการพัฒนา การตรวจสอบคุณสมบัติของผลไม้ อาจทำได้โดยการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ได้แก่ค่าสภาพยอมและความนำไฟฟ้า ซึ่งมักมีผลแสดงการวัดวัสดุบางอย่างเป็นตารางใน [1] ในกรณีที่ไม่มีการวัดเก็บข้อมูลไว้ ดังเช่นในกรณีของผลไม้ที่ประเทศไทยผลิต จำเป็นต้องจัดการวัดขึ้นมาใหม่ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยในปีงบประมาณ 2545 ในโครงการ การพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อตรวจสอบคุณภาพวัสดุเพื่อการส่งออก [2] ซึ่งใช้การวัดการกระเจิงย้อนกลับ ที่ทำได้โดยส่งคลื่นไมโครเวฟไปตกกระทบยังวัสดุที่ต้องการทดสอบ แล้ววัดคลื่นตรงจากแหล่งกำเนิดและคลื่นกระจายรวมทั้งคลื่นเลี้ยวเบน จากนั้นคำนวณย้อนกลับจากสมการอินทิกรัล เพื่อหาค่าสภาพยอมและความนำไฟฟ้า ในงานวิจัยดังกล่าวได้วัดทดสอบค่าสภาพยอมและความนำไฟฟ้าของมะม่วงเขียวเสวย น้ำดอกไม้ และแรด ที่ความถี่ 2450 MHz แล้วเปรียบเทียบกับค่า Fructose และ pH ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ที่วันต่างๆหลังการเก็บเกี่ยวอย่างเห็นได้ชัด

การวัดแบบไม่ทำลาย (Nondestructive measurements) โดยใช้วิธีการแบบย้อนกลับได้มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการตรวจสอบคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกหรือใช้ในการตรวจสอบค่าความหนาของวัสดุโดยปราศจากการสัมผัสหรือไม่มีการทำลาย [3] วิธีการแบบย้อนกลับนั้นมีพื้นฐานมาจากวิธีการแบบ Least square แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งข้อจำกัดในการวัดนั้นจะต้องกระทำในแถบความถี่กว้าง เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องและเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีค่ามากเพียงพอสำหรับการคำนวณในเชิงสถิติได้ นอกจากนี้แล้วยังต้องใช้อุปกรณ์ในการวัดแบบแถบความถี่กว้างซึ่งมีราคาแพงอีกทั้งการคำนวณยังมีความซับซ้อนเนื่องจากสมการของ Debye ของวัสดุที่เป็นแบบ Dispersive ต้องสอดคล้องอยู่ในแบบจำลองด้วย ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการพัฒนาระบบการวัดในช่วงความถี่แถบหรือใช้เพียงความถี่เดียวในปัจจุบันนี้สายอากาศแบบไมโครสตริปที่มีการสวิตช์ด้วยไดโอด PIN ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการถ่ายเอกซเรย์แบบ 3 มิติที่ใช้การสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ [4] ซึ่งแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการวัดคลื่นสะท้อนกลับจากวัตถุในโดเมนเชิงพิกัด

แรงจูงใจสำหรับงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาระบบการตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต้นทุนต่ำด้วยวิธีการวัดการสะท้อนกลับในโดเมนเชิงพิกัด งานวิจัยนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากระบบการวัดที่ใช้โดเมนเชิงความถี่กับโดเมนเชิงพิกัดซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบการวัดต้นทุนต่ำของการตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

#### วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาเครื่องตรวจสอบรสชาติผลไม้โดยอาศัยการวัดการสะท้อนและเลี้ยวเบนของคลื่นไมโครเวฟเพื่อหาค่าสภาพยอมและความนำไฟฟ้า

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตเครื่องตรวจสอบรสชาติผลไม้ที่มีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

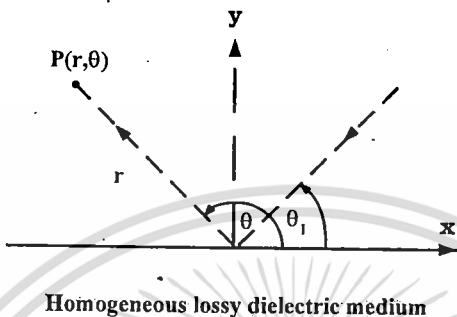
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### กล่าวนำ

ในบทนี้จะอธิบายหลักการของระบบตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยการวัดคลื่นที่สะท้อนกลับ และคำนวณย้อนกลับแบบ Steepest descent

#### 2.1 การคำนวณคลื่นสะท้อนกลับ



#### รูปที่ 1 การคำนวณคลื่นสะท้อนกลับ

สมมติให้คลื่นระนาบ TM ที่มีแอมพลิจูด  $E_0$  ตกกระทบทำมุมเอียงจากอวกาศว่างที่มีค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น  $k_0$  บนตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบเนื้อเดียวที่มีการสูญเสียด้วยมุม  $\theta_1$  ดังแสดงในรูปที่ 1 คลื่นที่สะท้อนที่จุดสังเกต  $P(r, \theta)$  มีค่า

$$\vec{E}^r = \hat{a}_r R E_0 e^{jk_0 r \cos(\theta_1 + \theta)} \quad (1)$$

เมื่อ  $R$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบ TM ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจาก (1) มีค่า

$$R(\theta_1) = \frac{\sin(\theta_1) - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta_1)}}{\sin(\theta_1) + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta_1)}} \quad (2)$$

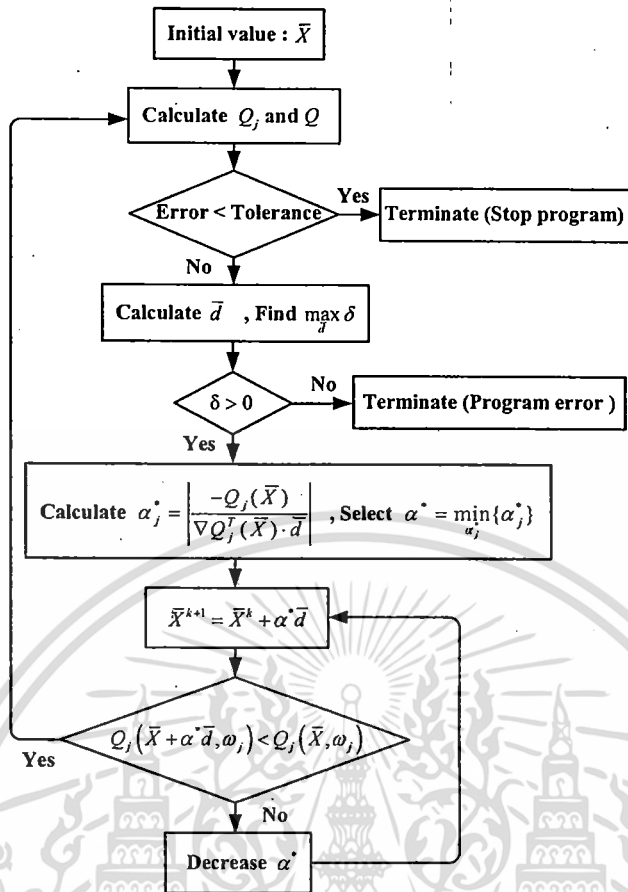
เมื่อ  $\epsilon_r$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เชิงซ้อนของตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r'$ ) และ loss factor ( $\epsilon_r''$ ) นิยามโดย

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (3)$$

#### 2.2 เทคนิคย้อนกลับจากหลักการของ Steepest Descent

เทคนิคย้อนกลับเป็นวิธีเพื่อใช้กำหนดคุณลักษณะของไดอิเล็กตริกที่ไม่ทราบค่าของตัวกลาง เทคนิคนี้หาได้จากการใช้เทคนิคการ optimization โดยการประมาณฟังก์ชันประเมินผล เมื่อ parameter ของฟังก์ชันประเมินผลถูกปรับเพื่อให้ได้ค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดระหว่างฟังก์ชันที่ต้องการและฟังก์ชันการประมาณ ในโดเมนของตัวแปรอิสระ ในรายงานฉบับนี้ฟังก์ชันที่ต้องการ คือ ค่าที่วัดได้ขณะที่ฟังก์ชันการประเมินค่าที่ได้จากการคำนวณเทคนิคการ optimization หลาย ๆ เทคนิคได้ถูกพัฒนามาแล้ว

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2 Steepest Descent Algorithm

อัลกอริทึมนี้ได้ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ อัลกอริทึมการ optimization แบบดั้งเดิมและแบบใหม่ [5] ซึ่งแบบดั้งเดิม ยกตัวอย่างเช่น วิธีของ Cauchy (Steepest descent), วิธีของ Newton, วิธีของ Marquardt และวิธี Variablemetric (Davidov Fletcher Powell) ใช้จำนวนในการวนรอบเพื่อ converge ค่าที่ยอมรับไม่มากนัก (ใช้เวลาน้อย) สำหรับอัลกอริทึมการ Optimize แบบใหม่นั้น ยกตัวอย่างเช่น อัลกอริทึมแบบ Genetics, Simulated Annealing, ซึ่งวิธีการดังกล่าวหาได้แบบ potential search กับ อัลกอริทึมการ optimize เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือใช้จำนวนในการวนรอบนาน (ใช้เวลามาก) อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมแบบ Steepest Descent ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติการลู่เข้าเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

Performance Function มีอยู่มากมายหลายแบบที่ขึ้นอยู่กับปัญหาค้างที่ได้กล่าวมาแล้วใน [3] ในงานวิจัยนี้ Performance Function ที่เหมาะสม คือ ผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองของปริมาณที่ได้จากการจำลองและปริมาณที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งปริมาณที่กล่าวถึงในที่นี้ คือ ค่าขนาดและเฟสของคลื่นสะท้อน ผลที่ได้จากการจำลอง ( $\bar{E}_{Sim}^r$ ) หารได้ ดังแสดงไว้ใน [3] ขณะที่ค่าที่ได้จากการคำนวณ ( $\bar{E}_{Cal}^r$ ) หารได้จากสมการที่ (1) ถึง สมการที่ (3) ดังนั้น Performance Function  $Q_1$  และ  $Q_2$  สามารถแสดงในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$Q_1(\bar{X}, \omega_j) = \sum_{j=1}^L \left[ \text{Mag}[\bar{E}_{Sim}^r(\omega_j)] - \text{Mag}[\bar{E}_{Cal}^r(\bar{X}, \omega_j)] \right]^2 \quad (4)$$

$$Q_2(\bar{X}, \omega_j) = \sum_{j=1}^L \left[ \text{Phas}[\bar{E}_{Sim}^r(\omega_j)] - \text{Phas}[\bar{E}_{Cal}^r(\bar{X}, \omega_j)] \right]^2 \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\bar{X}$  คือ ตัวแปรที่เป็นเวกเตอร์ ตัวอย่างเช่น  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$   $\omega_j$  คือตัวแปรอิสระของจุด sampling ในงานวิจัยนี้  $\omega_j$  เป็นตำแหน่ง Performance Function รวมทั้งหมดเป็นผลรวมของ แต่ละ Performance Function ที่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ภายในเวลาเดียวกันแสดงได้ดังนี้

$$Q(\bar{X}, \omega_j) = Q_1(\bar{X}, \omega_j) + Q_2(\bar{X}, \omega_j) \quad (6)$$

สามารถหาค่าฟังก์ชันประเมินผลที่ดีที่สุด จากอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของฟังก์ชันที่จุดใด ๆ ซึ่งเป็นการแสดงทิศทางที่ได้ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชัน ณ จุดนั้น ดังนั้น ค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันควรจะหาได้จากทิศทางตรงกันข้ามของอนุพันธ์ลำดับที่ 1 เรียกว่า การหา Descent กำหนดให้เป็น [6]

$$\bar{d} = -\nabla Q(\bar{X}, \omega_j) \quad (7)$$

เงื่อนไข  $\max \frac{\delta}{d}$  หาได้จากการใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น ตามเงื่อนไข  $-\nabla Q^T(\bar{X}, \omega_j) \cdot \bar{d} \geq \delta$  และ  $0 \leq \|\bar{d}\| \leq 1$  เมื่อด้วย T หมายถึงทรานส์โพสของเมตริกซ์และ  $\|\cdot\|$  คือ norm ของเมตริกซ์ ในกรณีของ  $\delta \leq 0$  , เกิดความผิดพลาดและการคำนวณเสร็จสิ้น ค่าเริ่มต้นและรูปแบบของฟังก์ชันควรเปลี่ยนไปและการคำนวณจะเริ่มใหม่

ในกรณี  $\delta > 0$  การคำนวณจะทำต่อเนื่องและใช้ค่า  $\alpha_j^*$  ทั้งหมดในแต่ละรูปแบบของฟังก์ชันตัวที่มีค่าน้อยได้เลือกจากทิศทางการลดลงของเวกเตอร์พารามิเตอร์คำนวณจากทิศทางการหา Descent และ Step Length ได้นำมาใช้ปรับ

ถ้าฟังก์ชันรูปแบบของเวกเตอร์ตัวแปรมีค่ามากกว่าหนึ่ง ดังนั้น  $\alpha^*$  จะลดลงเข้าหาค่าที่เหมาะสมและจะเรียกเวกเตอร์ตัวแปรนี้ว่าค่าคำนวณก่อน (Precalculated) ถ้าฟังก์ชันรูปแบบของเวกเตอร์ตัวแปรน้อยกว่า 1 ทำให้โปรแกรมคำนวณต่อไปในการวนรอบซ้ำจนกว่าความผิดพลาดจะน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้จากนั้นเวกเตอร์ตัวแปรในขั้นตอนนี้จะเป็นค่าที่ยอมรับได้ ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมสามารถดูได้จากรูปที่ 2

### บทที่ 3

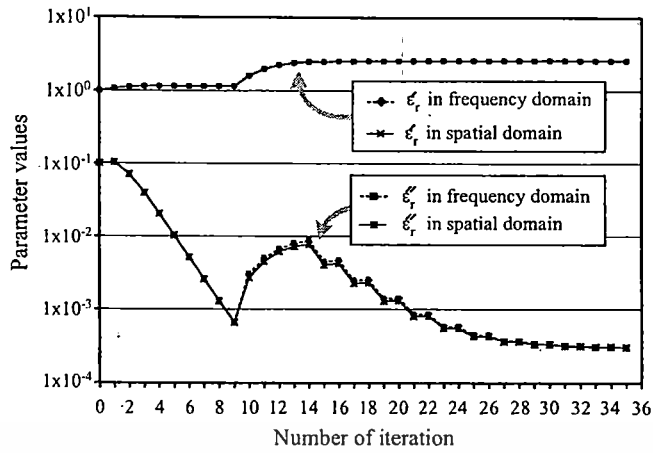
#### ผลการจำลองและวิจารณ์ผล

บทนี้แสดงการเปรียบเทียบผลของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) และตัวประกอบการสูญเสีย (Loss Factor) ของสารไดอิเล็กตริกที่สูญเสียแบบเอกพันธ์ เมื่อคลื่นสะท้อนถูกปรับให้เหมาะสมในเชิงอวกาศและความถี่ กำหนดค่าที่ยอมรับได้ของการคำนวณเป็น  $10^{-9}$  เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของโปรแกรมในทางปฏิบัติสามารถกำหนดให้มีค่าสูงกว่านี้ได้ กำหนดค่าการจำลองของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียเป็น 2.6 และ  $3.0 \times 10^{-4}$  ตามลำดับซึ่งนำไปใช้ใน [3] ในกรณีของเชิงอวกาศในตารางที่ 1 ตำแหน่งของสายอากาศซึ่งสอดคล้องกับการทดลองเรียงกันเป็นเชิงเส้น กำหนดความถี่เป็น 10 GHz

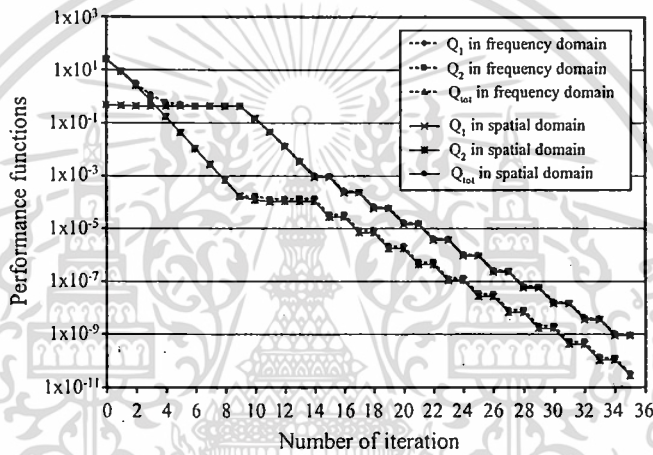
ในกรณีของเชิงความถี่ ได้กำหนดตำแหน่งที่ระยะ 1 เมตร ด้วยมุมสังเกต  $90^\circ$  และได้ทดสอบที่ความถี่ 8.0, 8.4, 8.8, 9.2, 9.6, 10.0, 10.4, 10.8, 11.2, 11.6, และ 12.0 GHz ได้แบ่งค่าเริ่มต้นของตัวแปรเป็นสองกรณีเพื่อเป็นการแสดงตัวอย่าง กรณีที่หนึ่งคือ ได้กำหนดค่าให้ใกล้เคียงการจำลองใน [3] ได้แก่  $\epsilon'_r = 1$  และ  $\epsilon''_r = 0.1$  กรณีที่สองคือได้กำหนดค่าเริ่มให้ห่างจากการจำลอง ได้แก่  $\epsilon'_r = 150.0$  และ  $\epsilon''_r = 150.0$  รูปที่ 3 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรเมื่อจำนวนของการทำซ้ำเพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าผลที่ได้จากการเปลี่ยนของตัวแปรในเชิงอวกาศและเชิงความถี่จะเหมือนกัน พังค์ประสิทธิภาพของทั้งสองย่านในรูปที่ 3 (ก) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนการทำซ้ำที่เพิ่มขึ้น และมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่กำหนด ( $10^{-9}$ ) ที่การทำซ้ำที่ 35 อัลกอริทึมยังคงมีประสิทธิภาพถึงแม้ว่าค่าเริ่มต้นของตัวแปรจะแตกต่างจากค่าการจำลองมาก สามารถสังเกตได้ในรูปที่ 4 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 1 ข้อมูลเชิงอวกาศ

r (m)	$\theta$ (deg)
1.56	40
1.31	50
1.15	60
1.06	70
1.01	80
1.00	90
1.01	100
1.06	110
1.15	120
1.31	130
1.56	140

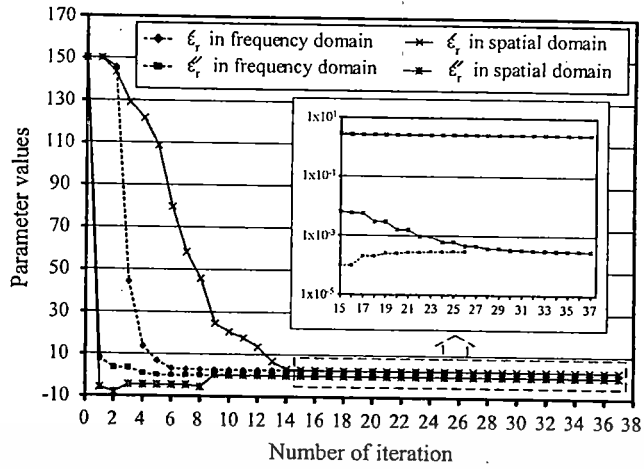


(ก)

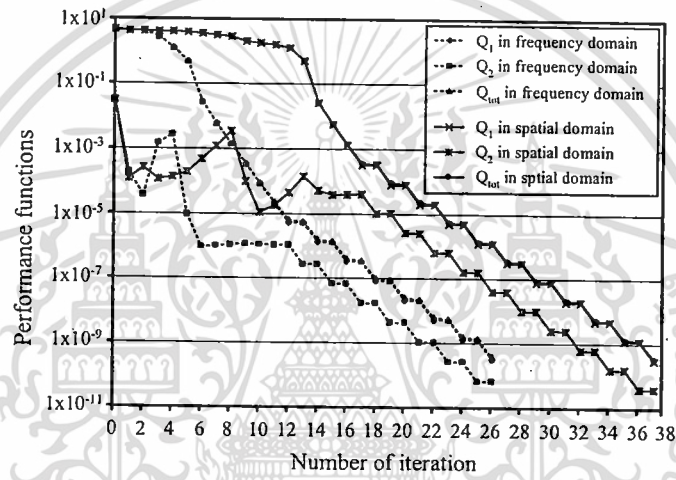


(ข)

รูปที่ 3 ผลการปรับแต่งให้เหมาะสมในเชิงเวลาและความถี่เมื่อค่าเริ่มต้นเป็น  $\epsilon'_r = 1$  และ  $\epsilon''_r = 0.1$  (ก) ค่าตัวแปรต่อจำนวนการทำซ้ำ (ข) ฟังก์ชันประสิทธิภาพต่อจำนวนการทำซ้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ผลการปรับแต่งให้เหมาะสมในเชิงเวลาและความถี่เมื่อค่าเริ่มต้นเป็น  $\epsilon''_r = 150.0$  และ  $\epsilon'_r = 150.0$  (ก) ค่าตัวแปรต่อจำนวนการทำซ้ำ (ข) ฟังก์ชันประสิทธิภาพต่อจำนวนการทำซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### สรุป

คุณสมบัติไดอิล็กทริกของสารที่มีการสูญเสียสามารถพิจารณาได้โดยเทคนิคย้อนกลับซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการ (Steepest Descent Method) การเปรียบเทียบของการวัดคลื่นที่สะท้อนในเชิงอวกาศและเชิงความถี่แสดงได้ว่าเทคนิคทั้งสองสามารถถูกนำไปใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติไดอิล็กทริกกับผลในกรณีของค่าเริ่มต้น ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและห่างจากค่าจริง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงความเป็นไปได้ของการพัฒนาระบบการหาคุณสมบัติไดอิล็กทริกที่ราคาต่ำในการใช้งานจริงการวัดคลื่นที่สะท้อนจะถูกรบกวนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โปรแกรมการคำนวณจะถูกปรับปรุงเพิ่มความแม่นยำที่มากขึ้นและการคำนวณที่เร็วขึ้น ในงานวิจัยถัดไปจะนำสารที่มีขนาดจำกัดมาพิจารณา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A.R. von Hippel, "Dielectric Materials and Applications," The Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, Boston, 1995.
- [2] โมไนย ไกรฤกษ์ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และอาณัติ เหมือนชู, "รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัย การพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อตรวจสอบคุณภาพวัสดุเพื่อการส่งออก" สำนักงานคณะกรรมการ การวิจัย ปีงบประมาณ 2546
- [3] K. P. Thakur and W. S. Holmes, "Noncontact Measurement of Moisture in Layered Dielectrics From Microwave Reflection Spectroscopy Using an Inverse Technique," *IEEE Microwave Theory Tech.*, vol. 52, pp. 76-82, Jan. 2004.
- [4] H. Ko, Y.J. Kim, M.Q. Feng and F.D. Flariis, "PIN Switched Microstrip Slot Antenna for 3D Microwave Reflection Tomography," Proc. of 2003 Asia-Pacific Microwave Conference, Vol.2, pp.1060-1063, Korea, 2003.
- [5] J. F. Rouviere, N. Douchin, and P. F. Combes, "Diffraction by Lossy Dielectric Wedges Using Both Heuristic UTD Formulations and FDTD," *IEEE Transactions on. Antennas and Propagation*, Vol. 47, pp.1702-1708, 1999.
- [6] W.Kiranon, T. Machida and M. Yoneyama, "Simultaneous Approximation for Two kinds of System Characteristics using Decent Method," *Jour I.E.C.E.*, Japan, Vol. 64-A, No. 6, 1981.