

การแยกประเภทพีชไรต์ด้วยการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

นายพีระพงษ์ อุฑารสกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-198-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CROP CLASSIFICATION USING POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES

Mr. Peerapong Uthansakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

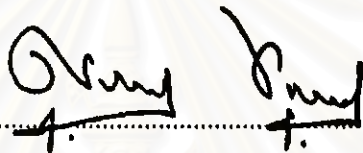
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-198-9

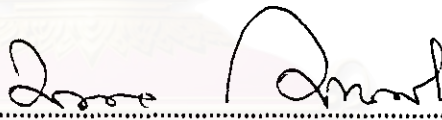
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแยกประเภทพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง
โดย นาย พิระพงษ์ อุทวารสกุล
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

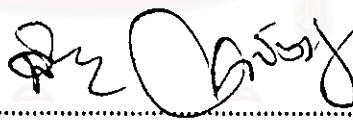


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



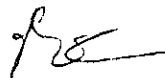
.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)



.....กรรมการ
(ดร. อีรศักดิ์ มานูพิรพันธ์)

นักวิชาการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

พระพงษ์ อุทราสกุล : การแยกประเภทพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง
(CROP CLASSIFICATION USING POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ฉัตรชัย ไวยาศฒนกร ; 120 หน้า. ISBN 974-638-198-9

งานวิจัยจำนวนมากศึกษาการแยกประเภทพืชไร่โดยอาศัยการพิจารณาสถานะการโพลาไรซ์ของคลื่นที่กระเจิงกลับ เพื่อหาสมบัติการกระเจิงของพืชไร่และใช้ค่านี้ในการจำแนกชนิด ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้มีการวิเคราะห์ผลที่ได้เฉพาะกลุ่มเป้าหมาย โดยไม่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ บนเป้าหมายชนิดเดียวกัน ทำให้ไม่ทราบความสามารถในการใช้งานของแต่ละวิธีได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสร้างระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงเพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เปรียบเทียบผล พร้อมทั้งเสนอแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์ เพื่อแยกประเภทพืชไร่

ระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงที่สร้างขึ้นเป็นระบบเสมือนเอกสติดบนภาคพื้นดินย่านความถี่ 3.3 ถึง 4.2 GHz โดยที่สามารถปรับสายอากาศส่งและรับได้ 4 กรณี (HH HV VH และ VV) ระบบวัดนี้ศึกษาการแยกประเภทพืชไร่ทั้ง 7 ชนิดอันได้แก่ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ถั่วเหลือง งา ฝ้าย ถั่วเขียว และทานตะวัน ข้อมูลที่วัดได้จะนำมาหาค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงเพื่อใช้บอกความแตกต่างของพืชไร่แต่ละชนิดด้วยการวิเคราะห์แบบต่าง ๆ 5 วิธีคือ 1) การวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตและความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิง 2) การวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิง 3) การวิเคราะห์ด้วยระดับชั้นการโพลาไรซ์ 4) การวิเคราะห์ด้วยสถานะการโพลาไรซ์บนทรงกลมปวงกาเร และ 5) การวิเคราะห์ด้วยระยะห่างระหว่างกลุ่มข้าวเหมือนและกลุ่มข้าวต่าง ซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่เสนอขึ้นในงานวิจัยนี้

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าสามารถใช้ในการแยกประเภทพืชไร่ได้ เพราะกลุ่มข้อมูลของพืชไร่ชนิดเดียวกันอยู่ใกล้กัน และแยกออกจากชนิดอื่น ๆ การวิเคราะห์ด้วยระยะห่างระหว่างกลุ่มข้าวเหมือนและกลุ่มข้าวต่างสามารถแยกชนิดของพืชไร่ได้ดีที่สุด แต่วิธีนี้ใช้ชุดของข้อมูลทั้งช่วงความถี่จึงทำให้การจำแนกชนิดมีส่วนเผือกกว้างกว่าวิธีอื่น ซึ่งถ้าพิจารณาเฉพาะ 4 วิธีแรกพบว่าการวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตและความแปรปรวนของ S_{HH} และ S_{VH} ให้ความถูกต้องมากที่สุด แต่วิธีนี้ไม่สามารถบอกถึงพฤติกรรมของคลื่นที่กระเจิงกลับจากพืชไร่ได้ เมื่อเทียบกับการใช้ระดับชั้นการโพลาไรซ์ หรือการใช้สถานะการโพลาไรซ์ ที่สามารถบอกถึงสมบัติโพลาไรเซชันของคลื่นที่กระเจิงกลับจากพืชไร่ได้ เมื่อพิจารณาความถูกต้องของการแยกประเภทพืชไร่ด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าอยู่ในช่วง 47 ถึง 70 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 70 ตำแหน่ง) แสดงว่าระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงที่สร้างขึ้นสามารถใช้ในการแยกประเภทพืชไร่ได้จริง ซึ่งพบว่าการใช้ระยะห่างระหว่างกลุ่มข้าวเหมือน และกลุ่มข้าวต่างเป็นวิธีใหม่ที่น่าสนใจมากสำหรับการแยกประเภท

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิติต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

3971241221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: CROP CLASSIFICATION / POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES

PEERAPONG UTHANSAKUL : CROP CLASSIFICATION USING POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. CHATCHAI WAIYAPATANAKORN, Ph.D. 120 pp.

ISBN 974-638-198-9

There have been a significant number of researches on the use of the scattered waves polarisation states for crop classification. However, most of the researches have their specific techniques for data analysis which are not standard nor amenable to other work. Thus a polarimetric measurement system is developed and comparative study of many analysis techniques are carried out. A novel classification index is also proposed herein.

The system developed is ground based quasi-monostatic and operates in the range from 3.3-4.2 GHz. Four combinations of polarisation states can be achieved, i.e. HH HV VH and VV. The system is used to collect data from 7 types of crops: corn; sorghum; soybean; mungbean; sesame; sunflower; cotton. The measured data are calculated to form the four components of the scattering matrix useful for differentiating all crops. Five Data analysis techniques are employed : 1) mean values and variance of each component of the scattering matrix 2) mean values of two components of the scattering matrix 3) degree of polarisation 4) polarisation state on Poincare' sphere and 5) co-polar and cross-polar gap. The last technique is the new one proposed in this work.

Results from data analysis show that all 5 techniques are capable of classifying all types crops. Data associated with each crop tend to cluster together as a group. Hence it is convenient to indentify one from another. It is apparent that the use of co-polar and cross-polar gap yields the best result in terms of classification capability. However this technique requires data of the full frequency band. For the other 4 techniques, it is found that use of the mean of S_{HH} and S_{VH} gives the best result, but it does not provide information on the scattered waves' behaviour compared with the use of degree of polarisation or the polarisation state which has information on polairsation properties of the scattered waves. It is found that the performance of all classification techniques ranges from 47 out of 70 to 70 out of 70 measured spot. It is therefore concluded that the polarimetric measurement system developed functions satisfactorily and effectively. In particular it is worth noting that the co-polar and cross-polar gap is a very interesting novel classification index.

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา..... ดว้้นแม่เหล็กไฟฟ้า
ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จัตรชัย ไวยาพัฒน์กรอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. นิรศักดิ์ มานูพิรพันธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลา และให้ข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการติดต่อสถานที่เพื่อทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในงานวิจัย และเชื้อเพื่อเครื่องสแกนเนอร์ในห้องปฏิบัติการ DSP

ขอขอบพระคุณ คุณไพศาล อุฑารสกุล บิดา คุณสุวิมล อุฑารสกุล มารดา คุณสุรพันธ์ อุฑารสกุล และคุณกนกอร รุ่งอภิรักษ์กุล ที่สนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆด้านมาโดยตลอด และขอบคุณคุณมนตรีทิพย์ภา อินทรารูร ที่เป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณอรุณกิจ ซอสุขไพบูลย์ วิศวกรบริษัทฮีโอนิก ประเทศไทย จำกัด ที่เชื้อเพื่อเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ให้ใช้งานตลอดการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพัฒนเกียรติ ณ นคร เชื้อเพื่อเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลของงานวิจัยนี้ และขอบคุณ ต๋อย ต่าย น้องวี เอก ดี เด่นพงษ์ แผน ชวน พี่เล็ก พี่ใจ พี่หนอง พี่อ้วน และพี่ๆ น้องๆในห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ช่วยเหลือผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการศึกษา และงบประมาณในการทำงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยตระหนักดีว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้เลย หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลใดบุคคลหนึ่งที่ได้กล่าวถึงในข้างต้นนี้ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณด้วยใจจริงอีกครั้งหนึ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตของโครงการวิทยานิพนธ์.....	3
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 หลักการของระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	5
หลักการของระบบวัดการกระเจิง.....	5
การกระเจิงของคลื่นจากเป้าหมาย.....	8
โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	11
ปัจจัยในการออกแบบระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	15
บทที่ 3 ระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	17
แนวคิดในการออกแบบระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	17
1. ปัจจัยในการออกแบบตามหลักการของระบบวัด.....	18
2. ปัจจัยในการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับระบบวัดในทางกายภาพ.....	20
โครงสร้างของระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	21
1. ระบบจ่ายไฟ.....	23
2. เครื่องมือวัดและบันทึกผล.....	25
3. เสาจับสายอากาศ และอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ	30
รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบวัดของคลื่นกระเจิง.....	34

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
พืชไร่ที่ดำเนินการศึกษาในโครงการวิจัยนี้.....	35
1. ข้าวโพด.....	36
2. ข้าวฟ่าง.....	36
3. ถั่วเขียว.....	37
4. ถั่วเหลือง.....	38
5. งา.....	38
6. ทานตะวัน.....	39
7. ฝ้าย.....	40
ขั้นตอนในการดำเนินการวัด.....	41
ปัญหาและอุปสรรคของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	41
บทที่ 4 ผลการวัดจากระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	42
การเปรียบเทียบและผลการวัดที่ได้.....	42
ค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิง.....	44
บทที่ 5 บทวิเคราะห์และวิจารณ์ผล.....	46
แนวทางในการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิง.....	46
1. การวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าความแปรปรวนของ แต่ละองค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิง.....	47
2. การวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ 2 องค์ประกอบร่วมกัน.....	51
3. การวิเคราะห์ด้วยระดับชั้นการโพลาไรซ์.....	55
4. การวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาวงรีของการโพลาไรซ์.....	57
5. การวิเคราะห์ด้วยระยะห่างระหว่างกลุ่มหัวหมื่นและกลุ่มหัวต่าง.....	61
การแยกประเภทพืชไร่.....	66
1. การแยกประเภทพืชไร่ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าความแปรปรวนของ องค์ประกอบ S_{HH}	67
2. การแยกประเภทพืชไร่ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ S_{HH} และ S_{VH} ร่วมกัน.....	71

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3. การแยกประเภทพืชไร่ด้วยระดับขั้นการไหลาไรท์.....	74
4. การแยกประเภทพืชไร่ด้วยการพิจารณาวงรีของการไหลาไรท์.....	75
5. การแยกประเภทพืชไร่ด้วยระยะห่างระหว่างกลุ่มข้าวเหมือนและกลุ่มข้าวต่าง.....	77
สรุปการแยกประเภทพืชไร่.....	79
บทที่ 6 บทสรุป.....	81
สรุปผลการวิจัย.....	81
ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก ก วิธีคำนวณขนาดของปากแตรของสายอากาศย่านซี.....	86
ภาคผนวก ข วิธีคำนวณอัตราขยายด้วยวิธีสายอากาศสองตัน.....	87
ภาคผนวก ค โปรแกรมต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.....	88
ภาคผนวก ง คำสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ และเมทริกซ์การกระเจิงของพืชไร่ทั้งหมด.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	120

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1	รายละเอียดของอุปกรณ์ของระบบจ่ายไฟ.....24
3.2	รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบวัดโวลตาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....35
3.3	ข้อมูลของพีซไร้หิ้ง 7 ชนิด.....40
5.1	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าความแปรปรวนขององค์ประกอบ S_{HH} (แบบกรอบสี่เหลี่ยม).....69
5.2	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าความแปรปรวนขององค์ประกอบ S_{HH} (แบบการแจกแจงปกติ).....71
5.3	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ S_{HH} และ S_{VH} ร่วมกัน (แบบกรอบสี่เหลี่ยม).....72
5.4	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ S_{HH} และ S_{VH} ร่วมกัน (แบบการแจกแจงปกติ).....73
5.5	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยระดับชั้นการโพลาริไซ.....75
5.6	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยสถานะการโพลาริไซ บนระนาบ yz76
5.7ก	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยระยะห่างระหว่างกลุ่มขั้วเหมือนและกลุ่มขั้วต่าง โดยอาศัยการรู้จำของระบบโครงข่ายประสาท (ข้อมูลที่เรียนรู้).....78
5.7ข	การแยกประเภทพีซไร้ด้วยระยะห่างระหว่างกลุ่มขั้วเหมือนและกลุ่มขั้วต่าง โดยอาศัยการรู้จำของระบบโครงข่ายประสาท (ข้อมูลที่ทดสอบ).....79
6.1	สรุปการแยกประเภทพีซไร้ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบต่าง ๆ.....82

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	ปรากฏการณ์ของคลื่นเมื่อตกกระทบกับวัตถุ.....	6
2.2	ระบบวัดการกระเจิงทั้งสามประเภท.....	7
2.3	ระบบการกระเจิงของเป้าหมาย.....	8
2.4	เป้าแบบจุดชนิดต่างๆ.....	9
2.5	การกระเจิงจากพื้นผิวต่างๆของเป้ากระจาย.....	10
2.6	ความสัมพันธ์ของความหมายต่อความยาวคลื่น กับความเข้มของพลังงานจากคลื่น กระเจิงกลับและคลื่นสะท้อน.....	10
2.7	การกระเจิงบนพื้นผิวและการกระเจิงเชิงปริมาตร.....	11
2.8	ความสัมพันธ์ของมุม θ T และ γ บนวงรีของการโพลาไรซ์.....	12
2.9	ความสัมพันธ์ของสถานะการโพลาไรซ์บนทรงกลมปวงกาเร.....	13
2.10	ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิง กับคลื่นตกกระทบและ คลื่นกระเจิงกลับ.....	15
3.1	การวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับทั้ง 4 กรณี.....	19
3.2ก	โครงสร้างอย่างง่ายของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	21
3.2ข	อุปกรณ์ของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	22
3.3	ระบบจ่ายไฟของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	23
3.4	ผังวงจรระบบจ่ายไฟ.....	24
3.5	เครื่องมือวัดและบันทึกผลของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	25
3.6	สายอากาศส่งและรับในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	26
3.7ก	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า.....	27
3.7ข	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	27
3.7ค	แบบรูปการแผ่พลังงานข้ามหัวของสายอากาศ.....	28
3.8	เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรและชุดทดสอบพารามิเตอร์เอส.....	29
3.9	คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	30
3.10	เสาจับสายอากาศชุดแรก.....	31
3.11	เสาจับสายอากาศชุดที่สอง.....	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า	
3.12ก	ลักษณะการวางสายอากาศส่งและรับ กรณี HH.....	32
3.12ข	ลักษณะการวางสายอากาศส่งและรับ กรณี HV.....	32
3.12ค	ลักษณะการวางสายอากาศส่งและรับ กรณี VH.....	33
3.12ง	ลักษณะการวางสายอากาศส่งและรับ กรณี VV.....	33
3.13	แผ่นสะท้อนคลื่น.....	33
3.14	อุปกรณ์ขณะดำเนินการวัด.....	34
3.15	แปลงข้าวโพดในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	36
3.16	แปลงข้าวฟ่างในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	37
3.17	แปลงถั่วเขียวในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	37
3.18	แปลงถั่วเหลืองในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	38
3.19	แปลงงาในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	39
3.20	แปลงทานตะวันในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	39
3.21	แปลงฝ้ายในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	40
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตและความแปรปรวนของพีชไรท์ทั้ง 7 ชนิด.....	48
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ 2 องค์ประกอบ.....	51
5.3	ระดับชั้นการโพลาไรซ์ของพีชไรท์ทั้ง 7 ชนิด.....	56
5.4	ความสัมพันธ์ของสถานะการโพลาไรซ์บนทรงกลมปวงกาเร.....	58
5.5	ระนาบ xy และ yz ของทรงกลมปวงกาเร.....	60
5.6	Cxgap ของข้าวโพด.....	63
5.7	Cxgap ของข้าวฟ่าง.....	63
5.8	Cxgap ของงา.....	64
5.9	Cxgap ของทานตะวัน.....	64
5.10	Cxgap ของฝ้าย.....	65
5.11	Cxgap ของถั่วเหลือง.....	65
5.12	Cxgap ของถั่วเขียว.....	66
5.13	แสดงตัวอย่างของการกำหนดขอบเขตพื้นที่เพื่อบอกชนิดของพีช.....	68

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
5.14	ขอบเขตพื้นที่ของพีชทั้ง 7 ชนิดแบบกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าความแปรปรวนขององค์ประกอบ S_{HH}69
5.15	ขอบเขตพื้นที่ของพีชทั้ง 7 ชนิดแบบการแจกแจงปกติ เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าความแปรปรวนขององค์ประกอบ S_{HH}70
5.16	ขอบเขตพื้นที่ของพีชทั้ง 7 ชนิดแบบกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ S_{HH} และ S_{VH} ร่วมกัน.....72
5.17	ขอบเขตพื้นที่ของพีชทั้ง 7 ชนิดแบบแจกแจงปกติ เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ S_{HH} และ S_{VH} ร่วมกัน.....73
5.18	ขอบเขตพื้นที่ของพีชทั้ง 7 ชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วยระดับชั้นการไหลาไรท์.....74
5.19	ขอบเขตสถานะไหลาไรท์ของพีชทั้ง 7 ชนิด บนระนาบ yz.....76
5.20	แนวโน้มของ CXgap ของพีชไรท์ทั้ง 7 ชนิด.....77
5.21	ผังระบบโครงข่ายประสาทที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....78
ก.1	สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด.....88
ง.1	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของข้าวโพด.....99
ง.2	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของข้าวฟ่าง.....100
ง.3	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของถั่วเหลือง.....101
ง.4	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของถั่วเขียว102
ง.5	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของงา.....103
ง.6	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของทานตะวัน.....104
ง.7	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับและความถี่ ของฝ้าย.....105
ง.8	ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของข้าวโพด.....106
ง.9	ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของข้าวฟ่าง.....107
ง.10	ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของถั่วเหลือง.....108
ง.11	ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของถั่วเขียว.....109
ง.12	ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของงา.....110

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
ง.13 ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของทานตะวัน.....	111
ง.14 ความสัมพันธ์ของมุมเฟสของคลื่นกระเจิงกลับและความถี่ ของฝ้าย.....	112
ง.15 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ ของข้าวโพด.....	113
ง.16 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ ของข้าวฟ่าง.....	114
ง.17 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ ของถั่วเหลือง.....	115
ง.18 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ ถั่วเขียว.....	116
ง.19 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ งา.....	117
ง.20 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ ของทานตะวัน.....	118
ง.21 ความสัมพันธ์ของขนาดองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงและ ความถี่ ของฝ้าย.....	119