การศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแถบกว้างยิ่งเวลาย้อนกลับ โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

STUDY ON FOCUSING RESOLUTION OF TIME-REVERSED ULTRA WIDEBAND ELECTROMAGNETIC WAVES BY USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

ธนพร พยอมใหม่

TANAPORN PAYOMMAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-230-014

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแถบกว้างยิ่งเวลาย้อนกลับ โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

STUDY ON FOCUSING RESOLUTION OF TIME-REVERSED ULTRA WIDEBAND ELECTROMAGNETIC WAVES BY USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

จ151
T076689

ธนพร พยอมใหม่

TANAPORN PAYOMMAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....76689
วัน,เดือน,ปี.....-6 ส.ค. 2550

.b.....11850206.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-230-014

STUDY ON FOCUSING RESOLUTION OF TIME-REVERSED ULTRA WIDEBAND ELECTROMAGNETIC WAVES BY USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

TANAPORN PAYOMMAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

KMITL-2007-EN-M-230-014

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแถบกว้างยิ่งเวลาย้อนกลับโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

Study on Focusing Resolution of Time-Reversed Ultra Wideband Electromagnetic Waves by Using Finite Difference Time Domain Method

นักศึกษา นางสาวธนพร พยอมใหม่

รหัสประจำตัว 48061065

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.พิชญ สุพรรณกูล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
อาจารย์สถาพร	พรหมวงศ์	
รศ.นิกร	สุขุตมตันติ	
รศ.ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	
ผศ.มนต์ชัย	แช่มช้อย	
ผศ.พิชญ	สุพรรณกูล	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 24 กรกฎาคม 2550 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....14.....**เดือน**.....กันยายน.....**พ.ศ**.....2550.....

วิทยานิพนธ์	การศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแถบกว้างยิ่งเวลาย้อนกลับโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา
นักศึกษา	นางสาวธนพร พยอมใหม่
รหัสประจำตัว	48061065
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.พิชญ สุพรรณกูล

บทคัดย่อ

ความสามารถแยกโฟกัสเป็นประสิทธิภาพที่สำคัญมากสำหรับระบบการสร้างภาพแถบกว้างยิ่ง (UWB) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิดเวลาย้อนกลับ (TR) ในการศึกษาได้ใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขของวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (FDTD) โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ทำการพิจารณาความสามารถแยกโฟกัสที่เป้าหมายทั้งหมด 147 เป้าหมายในตัวกลางอวกาศว่าง ได้แสดงตัวอย่างการกระจายเชิงสเปซและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส นอกจากนั้นยังได้ศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสในเทอมของความผิดพลาดไดเรคชันเนล โดยพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ TR (TRA) ได้แสดงฮิสโทแกรมและฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (CDF) ของความผิดพลาดไดเรคชันเนล จากผลที่จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของ TRA สามารถเพิ่มความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส

Thesis Title	Study on Focusing Resolution of Time-Reversed Ultra Wideband Electromagnetic Waves by Using Finite Difference Time Domain Method
Student	Miss Tanaporn Payommai
Student ID.	48061065
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

The focusing resolution is very important performance for ultra wideband (UWB) imaging systems. In this thesis, the focusing resolution of UWB electromagnetic waves produced by time-reversal (TR) algorithm is studied. The study is done via numerical simulation of finite difference time domain (FDTD) method. The modulated Gaussian pulses are used as the UWB electromagnetic waves. The focusing resolution of 147 targets in free space medium is considered. The spatial distribution and directivity of focused UWB electromagnetic waves are shown. Moreover, the accuracy of focusing resolution is studied in the term of directional error. The element numbers of TR arrays (TRAs) are considered. The histogram and cumulative distribution function (CDF) of directional errors are shown. From the results, we clearly see that the increasing of TRA elements can be improved the accuracy of focusing resolution.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย ให้คำสั่งสอน ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ สุพรรณกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ และผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่คอยให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ให้ชีวิตและคอยดูแลให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ในการศึกษาวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยมาถึงจุดนี้ได้

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธนพร พยอมใหม่

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป VIII

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ X

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.1.1 ระบบการสื่อสารและการวัด 1

1.1.2 ระบบเรดาร์ยานพาหนะ 2

1.1.3 ระบบการสร้างภาพ 2

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา 3

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 3

1.5 การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน 4

1.6 ขอบเขตการวิจัย 4

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา 5

บทที่ 2 เทคโนโลยี UWB 6

2.1 บทนำ 6

2.2 นิยามของสัญญาณ UWB 7

2.3 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาและสเปกตรัมมาร์ค 8

2.3.1 ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำ 9

2.3.2 ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลาง 10

2.3.3 ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง 11

2.4 รูปคลื่น UWB 12

2.5 บทสรุป 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธี FDTD และแนวความคิด TR 14

3.1 บทนำ 14

3.2 แนวความคิดของยี 14

3.3 สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัด 17

3.4 แนวความคิด TR FDTD 20

3.5 เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข 20

3.6 สัญญาณการกระตุ้น UWB 21

3.7 PML ABC 21

3.8 การทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล 23

3.9 บทสรุป 24

บทที่ 4 ผลการจำลองแบบเชิงตัวเลข 26

4.1 บทนำ 26

4.2 ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข 26

4.2.1 การกำหนดโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง 27

4.2.2 การทำแบบจำลอง FDTD 28

4.2.3 การทำแบบจำลอง TR FDTD 30

4.2.4 การหาเอาท์พุตที่ต้องการ 31

4.3 ผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัส 31

4.4 ผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส 39

4.5 บทสรุป 42

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 44

5.1 สรุปผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัส 44

5.2 สรุปผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส 44

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....46

ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....48

ประวัติผู้เขียน.....64

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำ ที่กำหนดโดย FCC 10

2.2 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลาง ที่กำหนดโดย FCC 11

2.3 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง ที่กำหนดโดย FCC 12

4.1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดไดเรคชันเนลสำหรับ TRA ที่มี จำนวนองค์ประกอบเป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ 42

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สเปกตรัมของเทคโนโลยี UWB เทียบกับสเปกตรัมของระบบแถบแคบอื่น	7
2.2	สเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำที่กำหนดโดย FCC	10
2.3	สเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลางที่กำหนดโดย FCC	11
2.4	สเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC	12
3.1	ตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ตามแนวความคิดของยี	15
3.2	แบบแผนขั้นเวลาลีฟฟรอกตามแนวความคิดของยี สำหรับการแพร่กระจายของคลื่นในหนึ่งมิติ	16
3.3	โครงสร้างของกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC	22
4.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข	26
4.2	แบบจำลองที่ใช้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัส	27
4.3	แบบจำลองที่ใช้ศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส	28
4.4	รูปคลื่นสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นเทียบกับขั้นเวลา	29
4.5	ความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC	30
4.6	แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 100	32
4.7	แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 200	32
4.8	แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 300	33
4.9	แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 400	33
4.10	สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ด้านซ้าย	34
4.11	สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ตรงกลาง	34
4.12	สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ด้านขวา	35
4.13	การกระจายเชิงสเปซของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1	35
4.14	การกระจายเชิงสเปซของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 2	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.15 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 ในแนวแกน x 37

4.16 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 ในแนวแกน y 37

4.13 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 2 ในแนวแกน x 38

4.14 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 2 ในแนวแกน y 38

4.18 ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ 39

4.19 ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 5 องค์ประกอบ 40

4.20 ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 7 องค์ประกอบ 40

4.21 CDF ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ 41

4.22 CDF ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 5 องค์ประกอบ 41

4.23 CDF ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 7 องค์ประกอบ 42

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (Absorbing Boundary Condition)	ABC
ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function)	CDF
กระแสตรง (Direct Current)	DC
คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
ผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain)	FDTD
เรดาร์ทะลุพื้น (Ground Penetrating Radar)	GPR
ชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer)	PML
ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density)	PSD
แม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic)	TM
เวลาย้อนกลับ (Time-Reversal)	TR
แถวลำดับ TR (Time-Reversal Array)	TRA
แถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband)	UWB
เครือข่ายพื้นที่ท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network)	WLAN
เครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network)	WPAN
แอมแปร์ (Ampere)	A
ฟารัด (Farad)	F
กิกกะเฮิร์ทซ์ (Gigahertz)	GHz
เฮนรี (Henry)	H
เฮิร์ทซ์ (Hertz)	Hz
เมกกะเฮิร์ทซ์ (Megahertz)	MHz
ซีเมนส์ (Siemens)	S
โวลต์ (Volt)	V
เดซิเบล (Decibel)	dB
เดซิเบลเทียบกับกำลัง 1 มิลิวัตต์ (Decibel Relative to Power of 1 Milliwatt)	dBm
เมตร (Meter)	m
มิลลิโวลต์ (Millivolt)	mV
นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
วินาที (Second)	s
โอห์ม (Ohm)	Ω

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

แอมพลิจูดสูงสุด (Maximum Amplitude), V, V/m	A
สนามไฟฟ้า (Electric Field), V/m	E
สนามไฟฟ้าการกระตุ้น (Excitation Electric Field), V/m	E_s
สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field), A/m	H
ขั้นเวลาทั้งหมด (Total Time Step)	N
ตัวร่วมการสะท้อนที่มุมศูนย์องศา (Reflection Factor at Zero Degree Angle)	$R(0)$
ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่น (Spectral Density of Waveform), V/Hz	V_s
ความผิดพลาดไดเรคชันเนล (Directional Error), m	e
ความผิดพลาดไดเรคชันเนลในทิศทาง x (Directional Error in x Direction), m	e_x
ความผิดพลาดไดเรคชันเนลในทิศทาง y (Directional Error in y Direction), m	e_y
ความถี่ (Frequency), Hz	f
แบนด์วิดท์ (Bandwidth), Hz	f_b
ความถี่พาห์ (Carrier Frequency), Hz	f_c
แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน (Fractional Bandwidth)	f_f
ความถี่สูงสุด (Upper Frequency), Hz	f_H
ความถี่ต่ำสุด (Lower Frequency), Hz	f_L
อันดับการเพิ่มขึ้น (Order of Increment)	m
เวลา (Time), s	t
คุณลักษณะ $1/e$ ของเวลาที่ลดลง ($1/e$ Characteristic Decay Time), s	t_d
รูปคลื่น (Waveform), V	v_s
ค่าที่เพิ่มขึ้นของเวลา (Time Increment), s	Δt
ค่าที่เพิ่มขึ้นของสเปซในทิศทาง x (Space Increment in x Direction), m	Δx
ค่าที่เพิ่มขึ้นของสเปซในทิศทาง y (Space Increment in y Direction), m	Δy
สภาพนำ (Conductivity), S/m	σ
สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูล (Equivalent Magnetic Resistivity), Ω/m	σ^*
สภาพนำมากสุด (Maximum Conductivity), S/m	$\sigma_{\max}$
สภาพนำในทิศทาง x (Conductivity in x Direction), S/m	σ_x
สภาพนำในทิศทาง y (Conductivity in y Direction), S/m	σ_y

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลในทิศทาง x (Equivalent Magnetic Resistivity in x Direction), Ω/m	σ_x^*
สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลในทิศทาง y (Equivalent Magnetic Resistivity in y Direction), Ω/m	σ_y^*
สภาพยอม (Permittivity), F/m	ε
ความลึกของแต่ละ PML (Depth of Each PML), m	ρ
ความลึกทั้งหมดของ PML (Total Depth of PML), m	δ
ความซาบซึมได้ (Permeability), H/m	μ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) ได้ถูกนำมาใช้งานในการสื่อสารระบบเรดาร์ และการสื่อสารทางทหาร ซึ่งในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ในการสื่อสาร [1]-[3] โดยทางคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) [4] ได้กำหนดข้อบังคับของเทคโนโลยี UWB ให้ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลบนพื้นฐานการส่งพัลส์ช่วงเวลาสั้น ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมีคุณสมบัติราคาถูก และใช้กำลังส่งที่ต่ำ เนื่องจากเทคโนโลยี UWB เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก และได้มีสเปกตรัมไปทับซ้อนกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น เครือข่ายพื้นที่ท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ดังนั้น FCC จึงได้ตั้งข้อกำหนดความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density: PSD) ที่แผ่กระจายออกมาของสัญญาณ แบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB จะพิจารณาที่ระดับลดลงมาจากระดับสูงสุด 10 dB โดยได้กำหนดแบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB อยู่ในช่วงต่างๆ ที่เหมาะสมตามการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้ FCC ยังได้นิยามสัญญาณ UWB เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz สำหรับกฎข้อบังคับของ FCC ได้จัดชนิดอุปกรณ์ UWB ตามการประยุกต์ใช้งานออกเป็นสามชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย [4]

1. ระบบการสื่อสารและการวัด
2. ระบบเรดาร์ยานพาหนะ
3. ระบบการสร้างภาพ

ซึ่งในอดีตระบบแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจะเป็นกลุ่มทางการทหารและแผนกรักษาความปลอดภัย แต่ต่อมาได้ระบบแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจมากขึ้น จึงทำให้มีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ด้วย

1.1.1 ระบบการสื่อสารและการวัด

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงทำให้มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที ซึ่งทำให้รองรับกับระบบมัลติมีเดียที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงอยู่แล้ว ซึ่งแนวคิดในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้ในด้านการติดต่อสื่อสารหรือการรับส่งข้อมูลก็คือระบบเครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network:

WPAN) โดยจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ภายในบ้าน หรืออาคารสำนักงาน

1.1.2 ระบบเรดาร์ยานพาหนะ

สัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาไม่แพงและถูนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเรดาร์ที่มีความสามารถเพิ่มขึ้น ระบบเรดาร์จะมีการเจริญเติบโตทางการตลาดอย่างมาก ซึ่งในอดีตระบบเรดาร์ได้ถูกพัฒนาและใช้เพื่อการทหารแต่ในอนาคตอันใกล้นี้ระบบเรดาร์จะถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ มากขึ้นเรื่อยๆ

1.1.3 ระบบการสร้างภาพ

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่เราสามารถใช้ค้นหาตำแหน่งหรือพิกัดต่างๆ บนโลกได้ โดยใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) แต่ในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้งาน ซึ่งใช้ภายในอาคารเป็นหลักมีความเหมาะสมมากสำหรับปัญหาในระบบระยะสั้น ซึ่งมันสามารถที่จะระบุตำแหน่งได้แม่นยำ

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ UWB ที่เป็นระบบการสร้างภาพ และระบบการสร้างภาพได้รวมถึงระบบเรดาร์การทะลุพื้น (Ground Penetrating Radar: GPR) ระบบการสร้างภาพกำแพง ระบบการสร้างภาพทะลุกำแพง ระบบระแวดระวังภัย และระบบทางการแพทย์ ซึ่งจะมีความสำคัญมาก โดยมีหน้าที่หรือกระบวนการในการสร้างภาพนิ่ง ภายเคลื่อนไหว กราฟฟิกคอมพิวเตอร์สามมิติ หรือการแสดงตำแหน่งต่าง ๆ ในทางกายภาพ การโฟกัสเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของระบบการสร้างภาพ เนื่องจากเป็นกระบวนการในการตรวจจับหาตำแหน่งของเป้าหมายเพื่อนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติการแยกโฟกัสจึงเป็นสิ่งจำเป็นและน่าสนใจ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อนำเสนอความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิดเวลาย้อนกลับ (Time-Reversal: TR) ในการศึกษาได้หาวิธีเชิงตัวเลขที่นำมาช่วยวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้น โดยได้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) [5], [6] ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข [7] และได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer Absorbing Boundary Condition: PML ABC) [8] มาวิเคราะห์ เนื่องจากวิธี FDTD เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลาแบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic: TM) ในสองมิติ อีกทั้งแนวความคิด TR ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง

สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความสามารถแยกโฟกัสสูง [9] แนวความคิด TR นี้สามารถทำได้โดยตรงกับวิธี FDTD [10] โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ได้ใช้แถวลำดับ TR (Time-Reversal Array: TRA) เชิงเส้นซึ่งเป็นเครื่องรับส่งและแหล่งกำเนิดแบบจุด โดยพิจารณาเป้าหมายและตัวกลางเป็นตัวนำสมบูรณ์และอวกาศว่างตามลำดับ หลังจากนั้นได้แสดงตัวอย่างการกระจายเชิงสเปซและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส และท้ายสุดได้ทำการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสที่มี TRA แบบต่างๆ โดยจะพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของ TRA

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมติฐานความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิด TR ซึ่งเป็นวิธีที่มีความสามารถแยกโฟกัสสูง สามารถทำได้โดยตรงกับวิธี FDTD ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขและได้ใช้เงื่อนไข PML ABC มาวิเคราะห์ เนื่องจากวิธี FDTD เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลาแบบแผน TM ในสองมิติ โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ได้ใช้ TRA เชิงเส้นซึ่งเป็นเครื่องรับส่งและแหล่งกำเนิดแบบจุด โดยพิจารณาเป้าหมายและตัวกลางเป็นตัวนำสมบูรณ์และอวกาศว่างตามลำดับ หลังจากนั้นได้แสดงตัวอย่างการกระจายเชิงอวกาศว่างและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส และศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสที่มี TRA แบบต่างๆ โดยจะพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของ TRA โดยองค์ประกอบของ TRA เพิ่มขึ้น ความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสจะสูงขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิด TR ในการศึกษาได้ใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขของวิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นวิธีที่ทำการจำลองแบบในโดเมนเวลา สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีความกว้างพัลส์แคบและมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากได้ในการจำลองแบบเพียงครั้งเดียว ทำให้วิธีนี้เหมาะสมสำหรับการจำลองแบบการแพร่กระจายของสัญญาณ UWB รวมทั้งได้ทำการจำลองแบบในสองมิติ ทำให้ใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ไม่มาก โดยที่ขอบโดเมนการคำนวณได้ใช้ PML ABC ซึ่งเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนและลดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุด สัญญาณการกระตุ้นได้ใช้รูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดระบบการสร้างภาพ

ความถี่สูงซึ่งกำหนดโดย FCC และเนื่องจากวิธี FDTD เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลาแบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ อีกทั้งแนวความคิด TR ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความสามารถแยกโฟกัสสูง แนวความคิด TR นี้สามารถทำได้โดยตรงกับวิธี FDTD โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ได้ใช้ TRA เชิงเส้นซึ่งเป็นเครื่องรับส่งและแหล่งกำเนิดแบบจุด โดยพิจารณาเป้าหมายและตัวกลางเป็นตัวนำสมบูรณ์และอวกาศว่างตามลำดับ หลังจากนั้นได้แสดงตัวอย่างการกระจายเปชิงสเปซและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส ซึ่งจะพิจารณาที่ TRA แบบต่างๆ โดยจะพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของ TRA

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิด TR ในการศึกษาได้ใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขของวิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ

ระบบการสร้างภาพแบบเดิมมีเทคนิคการโฟกัสจำนวนมาก เช่น การสร้างภาพสัญญาณสะท้อนความลึกที่ถูกโฟกัส [11] เทคนิคการโฟกัสอะเพอร์เจอร์ [12], [13] และแนวความคิดการโฟกัสอัตโนมัติ [14] แต่หลังจากได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี UWB ขึ้นมา ระบบการสร้างภาพ UWB จะใช้แนวความคิด TR เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความสามารถแยกโฟกัสสูง นอกจากนั้น แนวความคิด TR นี้ยังสามารถทำได้โดยตรงกับวิธี FDTD

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิด TR ในการศึกษาได้ใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขของวิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ได้ใช้ TRA เชิงเส้นซึ่งเป็นเครื่องรับส่งและใช้แหล่งกำเนิดแบบจุด โดยพิจารณาเป้าหมายและตัวกลางเป็นตัวนำสมบูรณ์และอวกาศว่างตามลำดับ หลังจากนั้นได้แสดงตัวอย่างการกระจายเชิงสเปซและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส และท้ายสุดได้ทำการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสที่มี TRA แบบต่างๆโดยจะพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของ TRA

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 บท ด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยี UWB ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ นิยามของสัญญาณ UWB ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาและสเปกตรัมมาร์ค รูปคลื่น UWB และบทสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธี FDTD และแนวความคิด TR ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ แนวความคิดของยี สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัด แนวความคิด TR FDTD เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข สัญญาณการกระตุ้น UWB PML ABC การทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล และบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองแบบเชิงตัวเลข ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข ผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัส ผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส และบทสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งประกอบไปด้วย สรุปผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัส สรุปผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส ท้ายสุดเป็นข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

บทที่ 2
เทคโนโลยี UWB

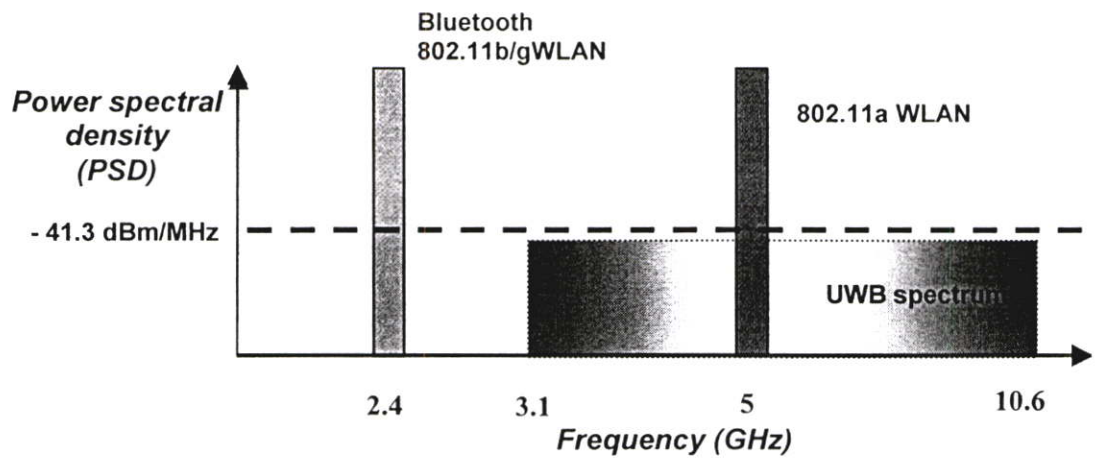
2.1 บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) บนพื้นฐานการส่งพัลส์ช่วงเวลาสั้นมีความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมีคุณสมบัติราคาถูก และใช้กำลังส่งที่ต่ำ [1]-[3] เทคโนโลยี UWB มีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารความถี่วิทยุอื่นๆ โดยเทคโนโลยี UWB ใช้พัลส์ที่มีความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density: PSD) อยู่ในช่วงสเปกตรัมของความถี่ที่กว้างมากแทนการใช้คลื่นความถี่พาห์ (Carrier Frequency) แบบแถบแคบ โดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) ได้กำหนดมาตรฐานเชิงเทคนิคและข้อจำกัดการทำงานสำหรับอุปกรณ์ UWB ที่แตกต่างกันสามชนิดโดยแบ่งตามศักยภาพที่ทำให้เกิดการแทรกสอด อุปกรณ์ UWB สามชนิดนี้ประกอบไปด้วย 1) ระบบการสร้างภาพ 2) ระบบเรดาร์ยานพาหนะ และ 3) ระบบการสื่อสารและการวัด โดยที่การประยุกต์ใช้งานระบบการสร้างภาพ UWB ได้รวมถึงระบบเรดาร์ทะลุพื้น (Ground Penetrating Radar: GPR) ระบบการสร้างภาพกำแพง ระบบการสร้างภาพทะลุกำแพง ระบบระแวดระวังภัย และระบบทางการแพทย์ [4]

เนื่องจากเทคโนโลยี UWB เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก และได้มีสเปกตรัมไปซ้อนทับกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น เครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) เป็นต้น ดังนั้น FCC จึงได้กำหนดให้ PSD ที่แผ่กระจายออกมามีระดับที่ต่ำมากและได้กำหนดแบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสมตามการประยุกต์ใช้งาน จากการที่เทคโนโลยี UWB ใช้แถบความถี่ที่กว้างมากโดยที่แถบความถี่ที่ใช้นั้นได้มีการซ้อนทับกับระบบการสื่อสารแบบแถบแคบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้น FCC จึงได้กำหนดระดับของ PSD ที่แผ่กระจายออกมาในระบบ UWB ไว้ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz นอกจากนี้ทาง FCC ยังได้นิยามสัญญาณ UWB เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ทั้งนี้หากเปรียบเทียบเทคโนโลยี UWB นี้กับเทคโนโลยีแถบแคบแล้ว จะพบว่าเทคโนโลยี UWB จะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีแถบแคบทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำกว่า รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของสัญญาณ UWB ข้อกำหนดการแผ่กระจาย PSD และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC รวมทั้งรูปคลื่น UWB ที่ใช้สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB

2.2 นิยามของสัญญาณ UWB [4]

เนื่องจากเทคโนโลยี UWB มีการใช้ความถี่ช่วงเดียวกันกับระบบการสื่อสารแถบแคบอื่นๆ ดังนั้น เพื่อป้องกันปัญญาของการแทรกสอดจากสัญญาณ UWB ทาง FCC จึงได้กำหนดให้สัญญาณ UWB ที่ถูกส่งออกมาต้องมี PSD ที่ต่ำกว่าระดับการจำกัดสัญญาณรบกวนส่วนที่ 15 หรือที่ระดับ -41.3 dBm/MHz ซึ่งเป็นข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ โดยสเปกตรัมของเทคโนโลยี UWB เทียบกับสเปกตรัมของระบบแถบแคบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของเทคโนโลยี UWB เทียบกับสเปกตรัมของระบบแถบแคบอื่น

ข้อแตกต่างระหว่างเทคโนโลยี UWB และเทคโนโลยีแถบแคบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลักๆ คือ

1) เทคโนโลยี UWB ได้ใช้การส่งพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์แคบมาก โดยที่ไม่มีการมอดูเลททางความถี่ของสัญญาณที่ต้องการส่งกับสัญญาณพาห์ ดังนั้น เครื่องรับและเครื่องส่งในระบบเทคโนโลยี UWB จึงไม่มีภาคของการมอดูเลทสัญญาณเหมือนกับระบบเทคโนโลยีแถบแคบ ส่งผลให้เทคโนโลยี UWB มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าเทคโนโลยีแถบแคบ

2) ความกว้างของแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการเข้าครอบครองในระบบเทคโนโลยี UWB ได้ถูกกำหนดโดย FCC ซึ่งได้กำหนดให้สัญญาณ UWB ต้องมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz โดยแบนด์วิดท์ f_b นิยามเป็น

$$f_b = f_H - f_L \tag{2.1}$$

นอกเหนือจากแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการเข้าครอบครอง ทาง FCC ยังได้กำหนดแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนของระบบเทคโนโลยี UWB เข้ามาด้วย โดยกำหนดให้สัญญาณ UWB ต้องมีการใช้แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 ซึ่งแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน f_f นี้นิยามเป็น

$$f_f = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \tag{2.2}$$

เมื่อ f_H คือความถี่สูงสุด และ f_L คือความถี่ต่ำสุด ของสัญญาณ UWB โดยค่าความถี่สูงสุดและต่ำสุดของแถบความถี่นี้ได้พิจารณาที่ตำแหน่งที่ระดับสูงสุดลดลงมา 10 dB

2.3 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาและสเปกตรัมมาร์ค [4]

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นในเทคโนโลยี UWB นั่นก็คือการจัดสรรความถี่ในการใช้งาน ทั้งนี้เพื่อเป็นการตอบสนองทางเทคโนโลยีและความต้องการเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดกันกับระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ก่อน ซึ่งในแต่ละประเทศได้มีการกำหนดกฎข้อบังคับในการใช้งานของระบบเทคโนโลยี UWB ไปตามความเหมาะสมของกิจการโทรคมนาคมของประเทศนั้นๆ เช่น ประเทศญี่ปุ่น ประเทศทางกลุ่มสหภาพยุโรป ประเทศสหรัฐอเมริกา และอีกหลายประเทศที่กำลังพัฒนากฎข้อบังคับของระบบเทคโนโลยี UWB นี้

สำหรับกฎข้อบังคับของเทคโนโลยี UWB ในประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมติที่ประชุม ทาง FCC ได้อนุญาตให้ใช้เทคโนโลยี UWB ครั้งแรกในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2002 โดยได้กำหนดการทำงานของอุปกรณ์เทคโนโลยี UWB แบ่งชนิดตามการประยุกต์ใช้งาน และยังได้กำหนดกฎข้อบังคับขึ้นมาอย่างเข้มงวดเพื่อเป็นการยืนยันว่าเทคโนโลยี UWB จะไม่ไปแทรกสอดกับระบบการบริการสื่อสารคลื่นวิทยุอื่นๆ และให้ได้รับผลประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีนี้ได้อย่างเต็มที่

ข้อบังคับ FCC ได้อนุญาตให้อุปกรณ์ของเทคโนโลยี UWB สามารถทำงานภายใต้ระดับการจำกัดสัญญาณรบกวนส่วนที่ 15 ของกฎข้อบังคับ FCC โดยมีการกำหนดควบคุม PSD ที่เข้มงวดมากกว่า สัญญาณ UWB จะต้องมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz สำหรับกฎข้อบังคับของ FCC ได้จัดชนิดอุปกรณ์ UWB ตามการประยุกต์ใช้งานออกเป็นสามชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ระบบการสร้างภาพ 2) ระบบเรดาร์ยานพาหนะ และ 3) ระบบการสื่อสารและการวัด

สำหรับอุปกรณ์ UWB ที่นำมาประยุกต์ใช้งานเป็นระบบการสร้างภาพ ยังสามารถแบ่งออกเป็น

1. ระบบ GPR ทำงานในแถบความถี่ที่น้อยกว่า 960 MHz หรือในช่วงแถบความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz GPR จะทำงานเพียงเมื่ออุปกรณ์ได้สัมผัสกับพื้นเพื่อตรวจจับหรือสร้างภาพวัตถุที่อยู่ในพื้น ซึ่งจะทำให้ PSD ที่ออกจาก GPR มีทิศทางพุ่งลงไปในพื้นโดยตรง ระบบ UWB ชนิดนี้

กำหนดให้ใช้ได้กับเฉพาะองค์กรควบคุมบังคับให้เป็นไปตามกฎหมาย หน่วยงานดับเพลิง หน่วยงานช่วยชีวิต สถาบันวิจัยทางวิทยาศาสตร์ โรงงานขุดเหมือง และบริษัทก่อสร้างเท่านั้น

2. ระบบการสร้างภาพกำแพง ทำงานในแถบความถี่ที่น้อยกว่า 960 MHz หรือในช่วงแถบความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ภายในกำแพง เช่น โครงสร้างคอนกรีต ด้านข้างของสะพาน หรือผนังของเหมืองแร่ ระบบ UWB ชนิดนี้กำหนดให้ใช้ได้กับเฉพาะองค์กรควบคุมบังคับให้เป็นไปตามกฎหมาย หน่วยงานดับเพลิง หน่วยงานช่วยชีวิต สถาบันวิจัยทางวิทยาศาสตร์ โรงงานขุดเหมือง และบริษัทก่อสร้างเท่านั้น

3. ระบบการสร้างภาพทะลุกำแพง ทำงานในแถบความถี่ที่น้อยกว่า 960 MHz หรือในช่วงแถบความถี่ตั้งแต่ 1.99 ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ตรวจจับตำแหน่งของวัตถุ การเคลื่อนไหวของบุคคลหรือวัตถุที่อยู่อีกด้านของกำแพง ระบบ UWB ชนิดนี้กำหนดให้ใช้ได้กับเฉพาะองค์กรควบคุมบังคับให้เป็นไปตามกฎหมาย หน่วยงานดับเพลิง และหน่วยงานช่วยชีวิตเท่านั้น

4. ระบบระแวดระวังภัย ทำงานในช่วงแถบความถี่ตั้งแต่ 1.99 ถึง 10.6 GHz ระบบนี้ใช้เพื่อรักษาความปลอดภัย โดยทำการตรวจจับบุคคลหรืออุปกรณ์ในบริเวณที่กำหนด ระบบ UWB ชนิดนี้กำหนดให้ใช้ได้กับเฉพาะองค์กรควบคุมบังคับให้เป็นไปตามกฎหมาย หน่วยงานดับเพลิง หน่วยงานช่วยชีวิต สถานที่สาธารณะ และโรงงาน

8. ระบบทางการแพทย์ ทำงานในช่วงแถบความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz ระบบนี้ใช้เกี่ยวกับการรักษาและตรวจสุขภาพร่างกาย โดยตรวจจับหรือดูภายในร่างกายของบุคคลหรือสัตว์ ระบบ UWB ชนิดนี้กำหนดให้ใช้ได้กับเฉพาะบุคคลที่ได้รับใบอนุญาตทางการแพทย์

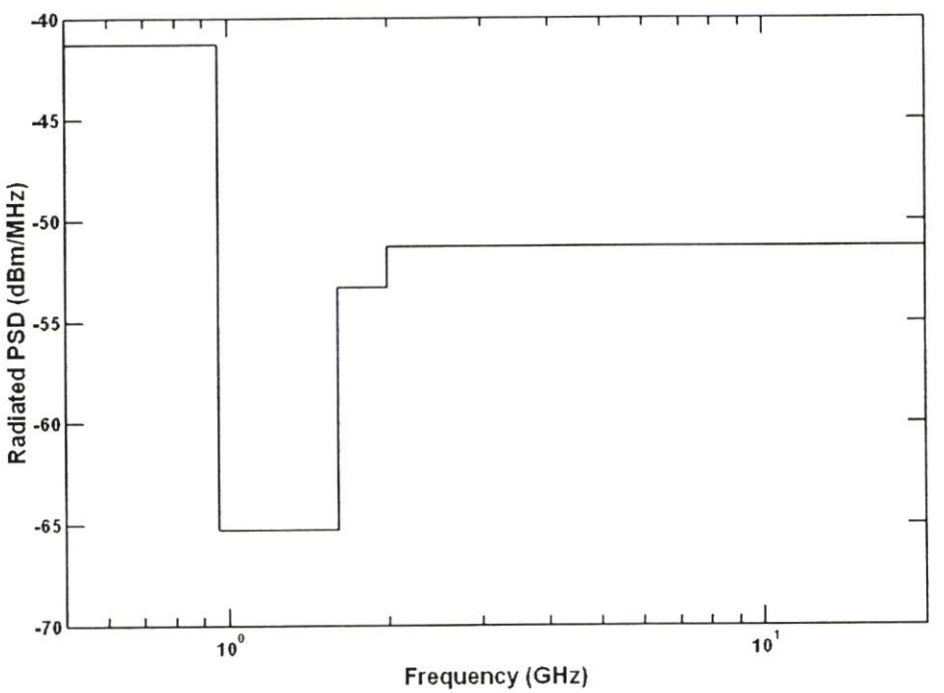
ในการกำหนด PSD ที่แผ่กระจายออกมาและสเปกตรัมมาร์ค FCC ได้แบ่งประเภทของระบบการสร้างภาพ UWB ตามช่วงแถบความถี่ที่ใช้งานไว้สามประเภท คือ 1) ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำ 2) ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลาง และ 3) ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง

2.3.1 ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำ

ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของ FCC สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 กราฟสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะมีช่วงแถบความถี่ในการใช้งานน้อยกว่า 860 MHz

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำที่กำหนดโดย FCC

ช่วงความถี่ที่กำหนด (MHz)	PSD ที่แผ่กระจายออกมา (dBm/MHz)
น้อยกว่า 960	-41.3
960-1610	-65.3
1610-1990	-53.3
มากกว่า 1990	-51.3



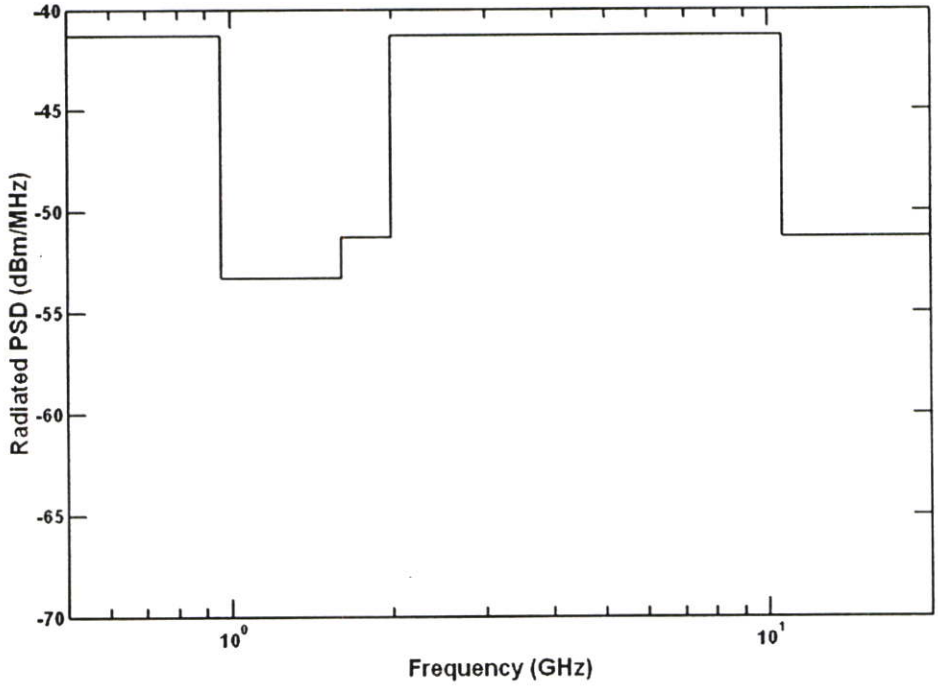
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำที่กำหนดโดย FCC

2.3.2 ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลาง

ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของ FCC สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลางได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 กราฟสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลางที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีช่วงแถบความถี่ในการใช้งานตั้งแต่ 1.99 ถึง 10.6 GHz

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลางที่กำหนดโดย FCC

ช่วงความถี่ที่กำหนด (MHz)	PSD ที่แผ่กระจายออกมา (dBm/MHz)
น้อยกว่า 960	-41.3
960-1610	-53.3
1610-1990	-51.3
1990-10600	-41.3
มากกว่า 10600	-51.3



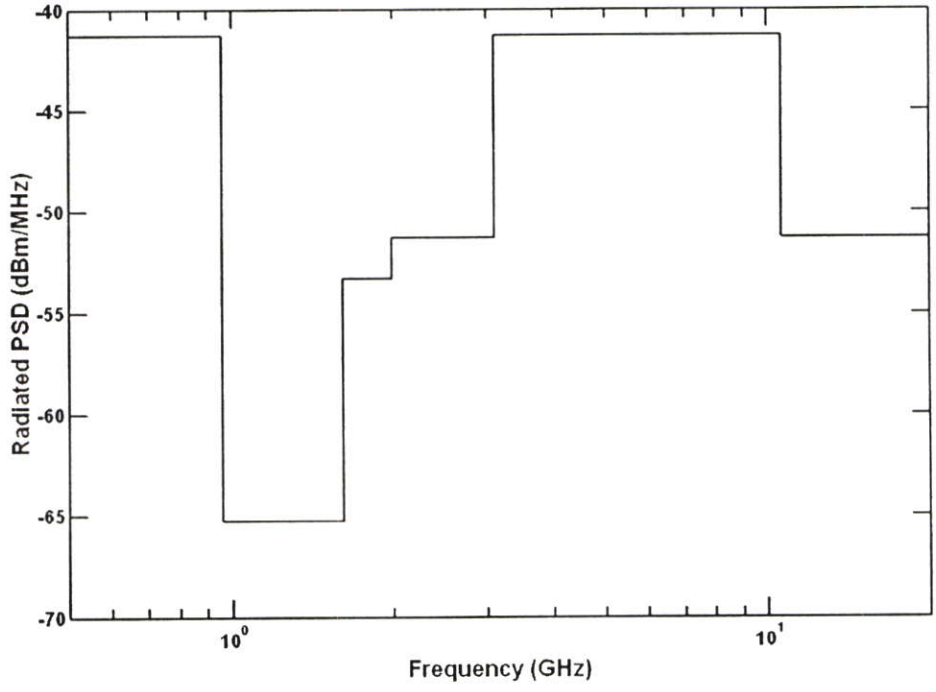
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลางที่กำหนดโดย FCC

2.3.3 ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง

ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของ FCC สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 กราฟสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะมีช่วงแถบความถี่ในการใช้งานตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC

ช่วงความถี่ที่กำหนด (MHz)	PSD ที่แผ่กระจายออกมา (dBm/MHz)
น้อยกว่า 960	-41.3
960-1610	-65.3
1610-1990	-53.3
1990-3100	-51.3
3100-10600	-41.3
มากกว่า 10600	-51.3



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC

2.4 รูปคลื่น UWB

รูปคลื่น UWB ที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือรูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นรูปคลื่นอย่างง่ายที่ได้นำมาใช้กับการสื่อสาร UWB โดยจะมี PSD ที่แผ่กระจายออกมาเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาย UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC สมการรูปคลื่นการกระตุ้นในโดเมนเวลา v_s และฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นในโดเมนความถี่ V_s กำหนดโดย [15]

$$v_s(t) = Ae^{-(t/t_d)^2}\sin(2\pi f_c t) \tag{2.3}$$

$$V_s(f) = \frac{At_d\sqrt{\pi}}{j2}\left[e^{-\pi^2 t_d^2 (f-f_c)^2} - e^{-\pi^2 t_d^2 (f+f_c)^2}\right] \tag{2.4}$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นเกาส์ f_c คือความถี่พาห์ และ t_d คือเวลาที่รูปคลื่นเกาส์มีแอมพลิจูดลดลงเป็น $1/e$ เท่าของแอมพลิจูดสูงสุด

รูปคลื่นนี้เป็นการมอดูเลตรูปคลื่นเกาส์ที่มีแอมพลิจูดสูงสุด A ที่เวลา $t = 0$ และมีแอมพลิจูดลดลงเป็น A/e ที่เวลา $t = \pm t_d$ ด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ f_c เนื่องจากรูปคลื่นเกาส์นี้มีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคู่จึงใช้ฟังก์ชันไซน์ซึ่งมีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคี่มามอดูเลตรูปคลื่นนี้เพื่อทำให้ส่วนประกอบกระแสตรง (Direct Current: DC) ของรูปคลื่นมีค่าเป็นศูนย์

2.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงนิยามและข้อกำหนดของเทคโนโลยี UWB ที่กำหนดโดย FCC ซึ่งได้จะกล่าวถึงนิยามของสัญญาณ UWB ข้อกำหนดของ PSD ที่แผ่กระจายออกมา และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ซึ่งแบบออกเป็นสามประเภท ได้แก่ ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำ ระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่กลาง และระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง และท้ายสุดได้กล่าวถึงรูปคลื่น UWB ที่ใช้สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษารูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง

บทที่ 3

วิธี FDTD และแนวความคิด TR

3.1 บทนำ

วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้หาผลเฉลยทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถึงแม้ว่าวิธีนี้ได้เกิดขึ้นมาตั้งแต่ 30 กว่าปีมาแล้วก็ตาม แต่ก็ยังนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วิธี FDTD ถูกเสนอครั้งแรกโดยยี (Yee) ในปี ค.ศ. 1966 ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ง่ายและสะดวกในการแก้ปัญหาอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์โดยทำให้อยู่ในรูปแบบดิสครีต ซึ่งใช้กริดสนามไฟฟ้า (Electric Field: $\bar{E}$) และกริดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field: $\bar{H}$) เพื่อทำการปรับปรุงสมการสนามที่อยู่ในโดเมนการคำนวณให้อยู่ในเทอมของสนามในโดเมนเวลาที่ผ่านมา การปรับปรุงสมการนี้จะใช้แบบแผนลีฟฟรอก (Leap frog) โดยที่จะทำการปรับปรุงสนาม $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ สลับกันในโดเมนเวลา

หลังจากได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) ขึ้นมา ระบบการสร้างภาพ UWB จะใช้แนวความคิดเวลาย้อนกลับ (Time-Reversal: TR) เพื่อแยกโฟกัส เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความสามารถแยกโฟกัสสูง นอกจากนั้น แนวความคิด TR นี้ยังสามารถนำมาวิเคราะห์และจำลองแบบได้โดยตรงกับวิธี FDTD

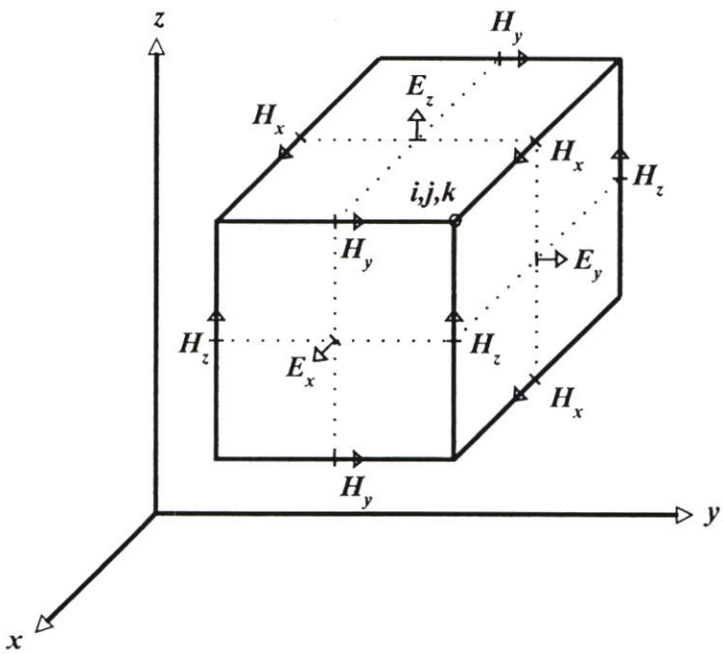
ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดของยี สมการผลต่างสืบเนื่อง แนวความคิดผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลาที่เวลาย้อนกลับ (Time-Reversal Finite Difference Time Domain: TR FDTD) เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข สัญญาณการกระตุ้น UWB โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer Absorbing Boundary Condition: PML ABC) การทำขั้นเวลาเอกซ์โพเนนเชียล และท้ายสุดเป็นบทสรุป

3.2 แนวความคิดของยี [5], [6]

แนวความคิดของยีซึ่งเป็นแนวความคิดพื้นฐานของวิธี FDTD มีดังต่อไปนี้

1. ทำการแก้ปัญหาทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโดเมนเวลาและอวกาศว่างโดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) แทนที่จะแก้ปัญหาสนามไฟฟ้าอย่างเดียว (หรือสนามแม่เหล็กอย่างเดียว) โดยใช้สมการคลื่น
   - ซึ่งจะเหมือนกับสูตรสมการอินทิกรัลสนามรวมในวิธีโมเมนต์ เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของทั้ง $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ บนพื้นผิวของโครงสร้างวัสดุ

- การใช้ข้อมูลของทั้ง $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ จะได้ผลเฉลยที่ดีกว่าการใช้สนามชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว (เช่น จะมีความเที่ยงตรงสำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) คุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้าและแม่เหล็กสามารถกำหนดได้โดยทำเป็นแบบจำลอง
- สามารถทำแบบจำลองที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละสนามได้ ถ้ามีทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น เช่น สนาม $\bar{H}$ ที่สัมผัสบริเวณขอบและมุม สนาม $\bar{H}$ ที่ล้อมรอบเส้นลวด สนาม $\bar{E}$ ในแนวรัศมีที่อยู่บริเวณจุด ขอบ และเส้นลวด



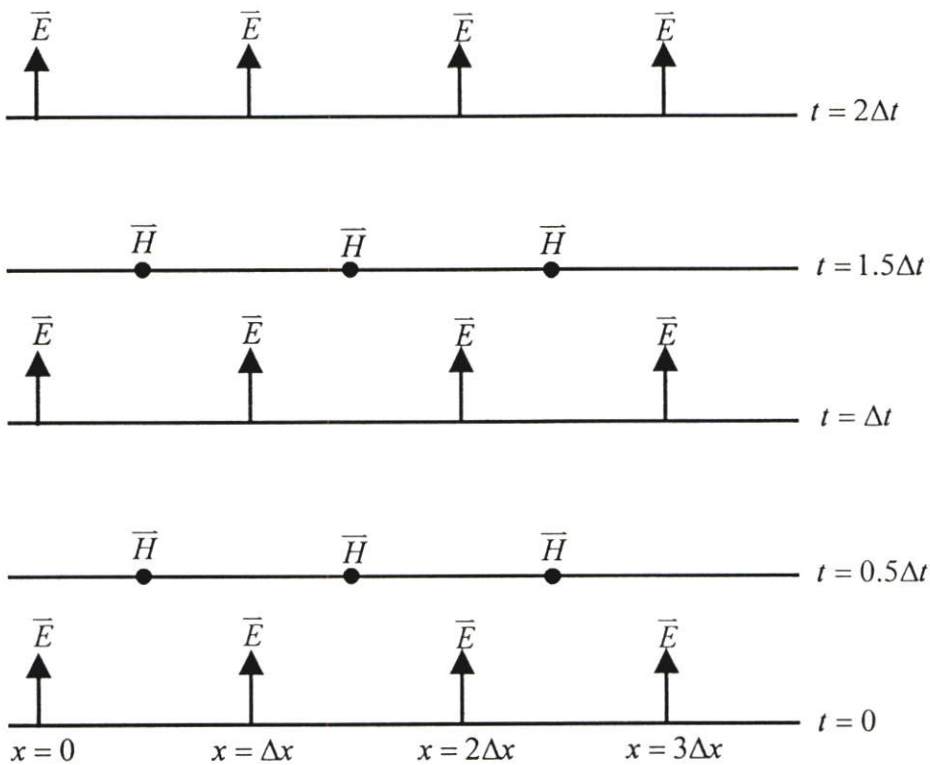
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ตามแนวความคิดของยี

2. ส่วนประกอบของสนาม $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ในอวกาศว่างสองมิติ ทุกส่วนประกอบของสนาม $\bar{E}$ จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม $\bar{H}$ และทุกส่วนประกอบของสนาม $\bar{H}$ จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม $\bar{E}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

- จะได้รูปอย่างง่ายของอวกาศว่างสองมิติ ซึ่งประกอบไปด้วยแถวลำดับที่เชื่อมต่อกันตามกฎ คอนทัวร์ของฟาราเดย์ และกฎคอนทัวร์ของแอมแปร์
- ผลของนิพจน์ผลต่างสืบเนื่องจำกัดสำหรับอนุพันธ์อวกาศว่างที่ใช้ในตัวดำเนินการเคิร์ลจะเป็นผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง
- ในกรณีที่มีความต่อเนื่องของสนามสัมผัส $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ข้ามรอยต่อของวัสดุที่มีชนิดต่างกัน และรอยต่อขนานกับแกนพิกัดของกริด จะได้ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดย

ที่ไม่ต้องทำการแมตช์เงื่อนไขขอบเขตสนามที่รอยต่อ โดยเพียงทำการกำหนดสภาพยอมและความซึมซาบได้ของวัสดุที่แต่ละตำแหน่งส่วนประกอบของสนาม ถ้าเป็นเม็ช (Mesh) ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของยี จะมีลักษณะการประมาณพื้นผิวและรูปทรงภายในของโครงสร้างที่สนใจเป็นแบบขั้นบันได โดยกำหนดความละเอียดของอวกาศว่างจากขนาดของหน่วยเซลล์แลตทิช (Lattice)

- ตำแหน่งส่วนประกอบสนาม $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ในกริดของยี และการดำเนินการผลต่างสืบเนื่องแบบตรงกลางบนส่วนประกอบเหล่านี้จะเป็นไปตามกฎของเกาส์



รูปที่ 3.2 แบบแผนขั้นเวลาลีฟฟรอกตามแนวความคิดของยี สำหรับการแพร่กระจายของคลื่นในหนึ่งมิติ

3. ส่วนประกอบสนาม $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ในเวลาจะอยู่ในเทอมของลีฟฟรอก ทำการคำนวณสนาม $\bar{E}$ ทั้งหมดในอวกาศว่างสามมิติเสร็จสมบูรณ์และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำโดยใช้ข้อมูลของสนาม $\bar{H}$ ที่เก็บไว้แล้วในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ ต่อมาทำการคำนวณสนาม $\bar{H}$ ทั้งหมดในแบบจำลองอวกาศว่างเสร็จสมบูรณ์และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำโดยใช้ข้อมูลของสนาม $\bar{E}$ ที่พึ่งคำนวณมาได้ การกระทำแบบนี้จะเกิดขึ้นอีกครั้ง โดยคำนวณส่วนประกอบของสนาม $\bar{E}$ จาก

สนาม $\bar{H}$ ที่พึ่งได้มา ซึ่งกระบวนการนี้จะกระทำต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงขั้นเวลาตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

- กระบวนการทำขั้นเวลาลีฟฟรอกนี้จะมีกระบวนการที่แน่นอน จึงสามารถหลีกเลี่ยงการแก้สมการสองสมการพร้อมกันและการหาเมตริกผกผันได้อย่างสมบูรณ์
- ผลของนิพจน์ผลต่างสืบเนื่องจำกัดสำหรับอนุพันธ์เวลาที่ใช้ในสมการเคิร์ลจะเป็นผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง
- ผลของแนวความคิดขั้นเวลาจะไม่เป็นการสิ้นเปลือง เนื่องจากแบบแผนคลื่นเชิงตัวเลขจะแพร่กระจายในเม็ชที่สร้างขึ้นโดยมีลักษณะที่เหมือนจริง

3.3 สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัด

ยีได้พัฒนาสมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดมาจากระบบสมการเคิร์ลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของแมกซ์เวลล์

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\nabla \times \bar{E} - \frac{\sigma^*}{\mu}\bar{H} \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\nabla \times \bar{H} - \frac{\sigma}{\varepsilon}\bar{E} \tag{3.2}$$

โดยที่ $\bar{H}$ คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก $\bar{E}$ คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (Permeability: μ) คือความซึมซาบได้ (Permittivity: ε) คือ สภาพยอม (Equivalent Magnetic Resistivity: σ^*) คือ สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูล และ(Conductivity: σ) คือ สภาพนำ ในที่นี้จะพิจารณาแบบแผนคลื่น (Transverse Magnetic: TM) ในสองมิติ ซึ่งสามารถกระจายได้เป็น

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\cdot\left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma^* H_x\right) \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\cdot\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \sigma^* H_y\right) \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\cdot\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z\right) \tag{3.5}$$

เพื่อความสะดวก จะกำหนดสัญลักษณ์สำหรับจุดอวกาศว่างและฟังก์ชันของอวกาศว่างและเวลา โดยที่กำหนดให้อวกาศว่างในระบบพิกัดมุมฉากสองมิติมีรูปแบบเป็น

76689

$$(i, j) = (i\Delta x, j\Delta y) \tag{3.6}$$

เมื่อ Δx และ Δy เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นในแลตทิซอวกาศว่างในทิศทางพิกัด x และ y ตามลำดับ ส่วน i และ j เป็นจำนวนเต็ม ต่อมากำหนดให้ u เป็นฟังก์ชันใดๆ ของอวกาศว่างและเวลาที่จุดดิสครีตในกริดและจุดดีสครีตในเวลามีรูปแบบเป็น

$$u(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = u^n_{i,j} \tag{3.7}$$

เมื่อ Δt เป็นเวลาที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นเวลา โดยกำหนดให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และ n เป็นจำนวนเต็ม

ต่อมาทำการประมาณอนุพันธ์อวกาศว่างและเวลาด้วยนิพจน์ของผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง โดยมีความเที่ยงตรงอันดับที่สองในอวกาศว่างและเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้นิพจน์ของอนุพันธ์อวกาศว่างโดยกำหนดให้เวลาคงที่ที่ $t_n = n\Delta t$ และนิพจน์ของอนุพันธ์เวลาโดยกำหนดให้อวกาศว่างคงที่ที่พิกัด (x, y) เป็น

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = \frac{u^n_{i+1/2,j} - u^n_{i-1/2,j}}{\Delta x} \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = \frac{u^n_{i,j+1/2} - u^n_{i,j-1/2}}{\Delta y} \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = \frac{u^{n+1/2}_{i,j} - u^{n-1/2}_{i,j}}{\Delta t} \tag{3.10}$$

นำนิพจน์อนุพันธ์อวกาศว่างและขั้นเวลา n และจุดอวกาศว่างแลตทิซ (i, j) ของสมการ (3.8) ถึง (3.10) แทนลงในระบบสมการแมกซ์เวลล์ (3.3) ถึง (3.5) จะได้

$$\frac{H_y\Big|^{n+1/2}_{i,j} - H_x\Big|^{n-1/2}_{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \cdot \left(\frac{E_z\Big|^{n}_{i,j-1/2} - E_z\Big|^{n}_{i,j+1/2}}{\Delta y} - \sigma^*_{i,j} \cdot H_x\Big|^{n}_{i,j} \right) \tag{3.11}$$

$$\frac{H_y\Big|^{n+1/2}_{i,j} - H_y\Big|^{n-1/2}_{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \cdot \left(\frac{E_z\Big|^{n}_{i+1/2,j} - E_z\Big|^{n}_{i-1/2,j}}{\Delta x} - \sigma^*_{i,j} \cdot H_y\Big|^{n}_{i,j} \right) \tag{3.12}$$

$$\frac{E_z\Big|_{i,j}^{n+1}-E_z\Big|_{i,j}^{n}}{\Delta t}=\frac{1}{\varepsilon_{i,j}}\cdot\left(\begin{array}{l}\dfrac{H_y\Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2}-H_y\Big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x}\\ -\dfrac{H_x\Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2}-H_x\Big|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y}-\sigma_{i,j}\cdot E_z\Big|_{i,j}^{n+1/2}\end{array}\right) \tag{3.13}$$

ทำการประมาณค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางใดๆ ที่ขั้นเวลา n และค่าสนามไฟฟ้าในทิศทางใดๆ ที่ขั้นเวลา $n+1/2$ เป็น

$$H_x\Big|_{i,j}^{n}=\frac{H_x\Big|_{i,j}^{n+1/2}+H_x\Big|_{i,j}^{n-1/2}}{2} \tag{3.14}$$

$$H_y\Big|_{i,j}^{n}=\frac{H_y\Big|_{i,j}^{n+1/2}+H_y\Big|_{i,j}^{n-1/2}}{2} \tag{3.15}$$

$$E_z\Big|_{i,j}^{n+1/2}=\frac{E_z\Big|_{i,j}^{n+1}+E_z\Big|_{i,j}^{n}}{2} \tag{3.16}$$

นำสมการ (3.14) ถึง (3.16) แทนลงในสมการ (3.11) ถึง (3.13) ตามลำดับ และกำหนดให้สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูล σ^* เท่ากับศูนย์ จะได้สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบแผนคลื่น TM ในสองมิติเป็น

$$H_x\Big|_{i,j}^{n+1/2}=H_x\Big|_{i,j}^{n-1/2}+\left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\cdot\left(\frac{E_z\Big|_{i,j-1/2}^{n}-E_z\Big|_{i,j+1/2}^{n}}{\Delta y}\right) \tag{3.17}$$

$$H_y\Big|_{i,j}^{n+1/2}=H_y\Big|_{i,j}^{n-1/2}+\left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\cdot\left(\frac{E_z\Big|_{i+1/2,j}^{n}-E_z\Big|_{i-1/2,j}^{n}}{\Delta x}\right) \tag{3.18}$$

$$E_z\Big|_{i,j}^{n+1}=C_a\Big|_{i,j}E_z\Big|_{i,j}^{n}+C_b\Big|_{i,j}\cdot\left(\frac{H_y\Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2}-H_y\Big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x}-\frac{H_x\Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2}-H_x\Big|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y}\right) \tag{3.19}$$

โดยที่

$$C_a\Big|_{i,j}=\left(1-\frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right)/\left(1+\frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \tag{3.20}$$

$$C_b\Big|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1+\frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \tag{3.21}$$

3.4 แนวความคิด TR FDTD

เพื่อให้ได้ทิศทางเวลาย้อนกลับลำดับเวลาของแนวความคิด FDTD จะถูกทำย้อนกลับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า E^n และ $H^{n-1/2}$ จะคำนวณได้จาก $H^{n+1/2}$ และ E^n ตามลำดับ ดังนั้น แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติของ FDTD เวลาย้อนกลับสามารถเขียนได้เป็น [19]

$$E_z\Big|_{i,j}^{n} = C_a\Big|_{i,j} E_z\Big|_{i,j}^{n+1} - C_b\Big|_{i,j}\left(\frac{H_y\Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{H_x\Big|_{i,j-1/2}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y}\right) \tag{3.22}$$

$$H_y\Big|_{i,j}^{n-1/2} = H_y\Big|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z\Big|_{i+1/2,j}^{n} - E_z\Big|_{i-1/2,j}^{n}}{\Delta x}\right) \tag{3.23}$$

$$H_x\Big|_{i,j}^{n-1/2} = H_x\Big|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z\Big|_{i,j-1/2}^{n} - E_z\Big|_{i,j+1/2}^{n}}{\Delta y}\right) \tag{3.24}$$

3.5 เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข [7]

เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขเป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ผลเฉลยเชิงตัวเลขที่ได้จากการจำลองแบบ FDTD มีค่าลู่เข้าผลเฉลยที่ถูกต้อง ซึ่งมีนิยามเป็น

$$\Delta t \le \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}}} \tag{3.25}$$

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้กรณีของขั้นเวลาเมจิก (Magic time step) ซึ่งเป็นขั้นเวลาที่มีค่าผิดพลาดของการแพร่กระจายตามความถี่ที่น้อยที่สุด ซึ่งจะมีเงื่อนไขเป็น

$$\Delta t = \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}}} \tag{3.26}$$

3.6 สัญญาณกระตุ้น UWB

สัญญาณกระตุ้น UWB จะใช้รูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลต [15] ซึ่งเป็นไปตามนิยามและสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC ทฤษฎีของรูปคลื่นนี้ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.4 แต่เนื่องจากรูปคลื่นในทางทฤษฎีจะมีส่วนประกอบรูปคลื่นอยู่ที่เวลาติดลบ ทำให้ไม่สามารถสร้างรูปคลื่นนี้ในวิธี FDTD ได้โดยตรง ดังนั้น จึงได้ทำการแก้ไขรูปคลื่นนี้โดยกำหนดเวลาให้อยู่ในเทอมของขั้นเวลา นั่นคือ $t = n\Delta t$ และกำหนดให้รูปคลื่นมีขั้นเวลาการประวิงเป็น n_0 เพื่อทำการเลื่อนส่วนประกอบรูปคลื่นมาอยู่ที่เวลาบวกทั้งหมด ซึ่งจะได้นิพจน์ของสัญญาณการกระตุ้นที่อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าใช้สำหรับวิธี FDTD เป็น

$$E_s\big|^n = Ae^{-[(n-n_0)\Delta t/t_d]^2}\sin[2\pi f_c(n-n_0)\Delta t] \tag{3.27}$$

3.7 PML ABC [8]

ข้อจำกัดของการจำลองแบบวิธี FDTD โดยใช้คอมพิวเตอร์ คือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปถึงปลายโดเมนการคำนวณที่ได้จำกัดไว้ในทิศทาง x และ y สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดจะไม่สามารถหาค่าส่วนประกอบสนามที่สัมผัสขอบนอกโดเมนการคำนวณได้ จะเกิดการสะท้อนกลับที่ขอบของโดเมนการคำนวณ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นในบริเวณโดเมนที่กำลังพิจารณาอยู่ เพื่อที่จะกำจัด หรือทำให้สนามเกิดการสะท้อนกลับให้น้อยลง จะใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (Absorbing Boundary Condition : ABC) วางไว้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ เพื่อทำให้โดเมนการคำนวณเปรียบเสมือนมีขนาดเป็นระยะอนันต์

ได้มีการพัฒนาแนวความคิดของ ABC มาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตกกระทบให้มากที่สุด จนในปัจจุบันได้ใช้ PML ABC ซึ่งเป็น ABC ที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด

แนวความคิดของ PML ABC มาจากสมการแมกซ์เวลล์ (3.1) ถึง (3.2) ในการพิจารณาที่แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ จะแบ่งส่วนประกอบสนามไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนประกอบ ซึ่งทำให้สมการแมกซ์เวลล์กระจายออกมาเป็นสมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดที่ใช้ร่วมกับ PML ABC ได้ทั้งหมด 4 สมการ คือ

$$\mu\frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^{*}H_x = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \tag{3.28}$$

$$\mu\frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^{*}H_y = \frac{\partial E_z}{\partial x} \tag{3.29}$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \tag{3.30}$$

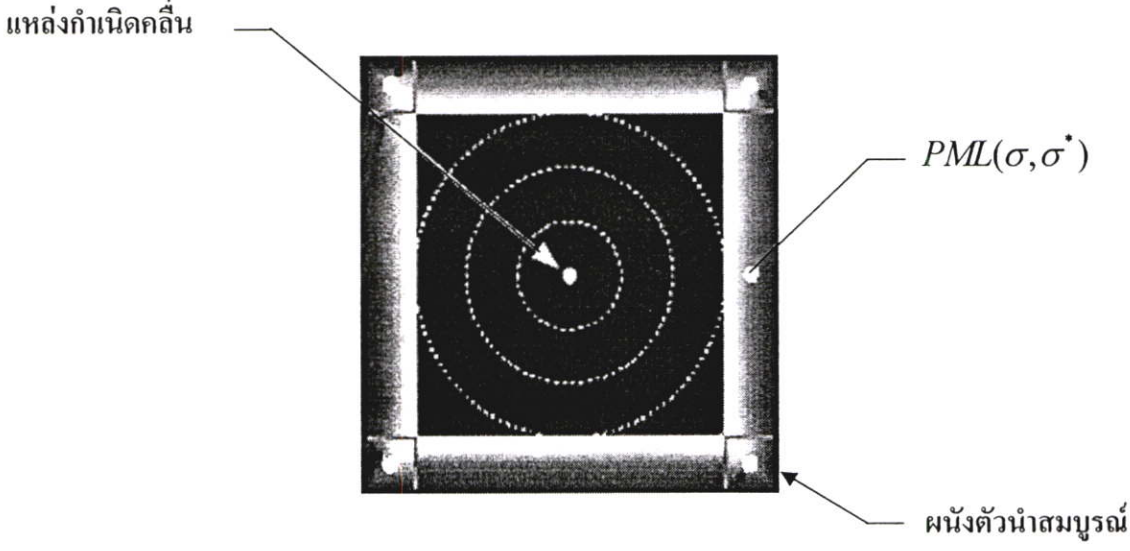
$$\varepsilon \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \tag{3.31}$$

โดยที่

$$E_z = E_{zx} + E_{zy} \tag{3.32}$$

เมื่อ σ_x และ σ_y เป็นสภาพนำทางไฟฟ้าในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ส่วน σ_x^* และ σ_y^* เป็นสภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลในทิศทาง x และ y ตามลำดับ โดยที่แต่ละชั้นของ PML ABC จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขการแมตช์

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma^*}{\mu} \tag{3.33}$$



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC

จากสมการ (3.33) จะได้อิมพีแดนซ์ของคลื่นในตัวกลางที่มีความสูญเสียเท่ากับในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย และทำให้ไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อคลื่นระนาบแพร่กระจายตั้งฉากข้ามรอยต่อระหว่างสองตัวกลางนี้ ตัวกลางที่มีความสูญเสียชนิดนี้เรียกว่า (Perfectly Matched Layer: PML) ซึ่ง

จะนำมาใช้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ FDTD โดยที่ประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของ PML ที่ใช้วิเคราะห์

เพื่อที่จะทำให้เข้าใจแนวความคิดของ PML ABC ได้ง่ายขึ้น จะพิจารณาโครงสร้างกริด FDTD สองมิติ ที่มีโดเมนการคำนวณล้อมรอบด้วย PML ABC ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีผนังตัวนำสมบูรณ์อยู่ขอบนอกสุด ที่ขอบด้านซ้ายและขวา แต่ละ PML จะมี σ_x และ σ_x^* ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.33) โดยมี $\sigma_y = \sigma_y^* = 0$ เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนที่ PML กลับเข้ามาในโดเมนการคำนวณ ในทำนองเดียวกัน ที่ขอบด้านล่างและด้านบน แต่ละ PML จะมี σ_y และ σ_y^* เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.33) โดยมี $\sigma_x = \sigma_x^* = 0$ และที่มุมทั้งสี่ที่มีการซ้อนทับกันของ PML จะมี σ_x, σ_x^*, σ_y และ σ_y^* เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.33)

รูปแบบการแบ่งชั้น PML ควรจะมีการเพิ่มขึ้นของสภาพนำทางไฟฟ้า และสภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลอย่างราบเรียบ โดยมีความสัมพันธ์กับความลึกของ PML ในแต่ละชั้น ρ ซึ่งรูปแบบการแบ่ง PML โดยทั่วไปจะมีสภาพนำทางไฟฟ้าอยู่ในเทอมของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล คือ

$$\sigma(\rho) = \sigma_{\max}(\rho/\delta)^m \tag{3.34}$$

เมื่อ δ เป็นความลึกทั้งหมดของ PML σ เป็นได้ทั้ง σ_x และ σ_y ส่วน m เป็นอันดับการเพิ่มขึ้นของ σ $\sigma_{\max}$ เป็นค่าสภาพนำทางไฟฟ้ามากสุด ซึ่งหาได้จากการกำหนดค่าของตัวร่วมการสะท้อนที่มุมศูนย์องศา $R(0)$ โดยจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$R(0) = e^{-2\sigma_{\max}\delta/(N+1)\varepsilon_0 c} \tag{3.35}$$

เมื่อได้ค่าของสภาพนำไฟฟ้าใน PML แต่ละชั้นแล้ว จะหาค่าของสภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลใน PML แต่ละชั้นได้โดยใช้สมการ (3.33) และในการทำขั้นเวลาในบริเวณ PML จะต้องเป็นการทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.8 การทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล [6]

ในบริเวณของ PML ABC จะใช้การทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล เพื่อให้สนามที่แพร่กระจายในบริเวณนี้ถูกลดทอนลงอย่างรวดเร็ว พิจารณาระบบสมการของแมกซ์เวลล์ในตัวกลางนำไฟฟ้าของสมการ (3.28) ถึง (3.31) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งเป็น

$$\frac{\partial H_x}{\partial t}+\frac{\sigma_y^*}{\mu}H_x=-\frac{1}{\mu}\frac{\partial E_z}{\partial y} \tag{3.36}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t}+\frac{\sigma_x^*}{\mu}H_y=\frac{1}{\mu}\frac{\partial E_z}{\partial x} \tag{3.37}$$

$$\frac{\partial E_{zx}}{\partial t}+\frac{\sigma_x}{\varepsilon}E_{zx}=\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial H_y}{\partial x} \tag{3.38}$$

$$\frac{\partial E_{zy}}{\partial t}+\frac{\sigma_y}{\varepsilon}E_{zy}=-\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial H_x}{\partial y} \tag{3.39}$$

ทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งนี้ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้ที่เวลา $t = 0$ ของแต่ละส่วนประกอบสนามมีค่าเป็นศูนย์ แล้วทำผลเฉลยที่ได้ให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างสืบเนื่องจำกัด ซึ่งจะได้สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดที่มีการทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียลเป็น

$$H_x\Big|_{i,J}^{n+1/2}=e^{-\sigma_y^*\Delta t/\mu}H_x\Big|_{i,J}^{n-1/2}+\frac{1-e^{-\sigma_y^*\Delta t/\mu}}{\sigma_y^*}\cdot\left(\frac{E_z\Big|_{i,J-1/2}^{n}-E_z\Big|_{i,J+1/2}^{n}}{\Delta y}\right) \tag{3.40}$$

$$H_y\Big|_{i,J}^{n+1/2}=e^{-\sigma_x^*\Delta t/\mu}H_y\Big|_{i,J}^{n-1/2}+\frac{1-e^{-\sigma_x^*\Delta t/\mu}}{\sigma_x^*}\cdot\left(\frac{E_x\Big|_{i+1/2,J}^{n}-E_z\Big|_{i-1/2,J}^{n}}{\Delta x}\right) \tag{3.41}$$

$$E_{zx}\Big|_{i,J}^{n+1}=e^{-\sigma_x\Delta t/\varepsilon}E_{zx}\Big|_{i,J}^{n}+\frac{1-e^{-\sigma_x\Delta t/\varepsilon}}{\sigma_x}\cdot\left(\frac{H_y\Big|_{i+1/2,J}^{n+1/2}-H_y\Big|_{i-1/2,J}^{n+1/2}}{\Delta x}\right) \tag{3.42}$$

$$E_{zy}\Big|_{i,J}^{n+1}=e^{-\sigma_y\Delta t/\varepsilon}E_{zy}\Big|_{i,J}^{n}+\frac{1-e^{-\sigma_y\Delta t/\varepsilon}}{\sigma_y}\cdot\left(\frac{H_x\Big|_{i,J-1/2}^{n+1/2}-H_x\Big|_{i,J+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y}\right) \tag{3.43}$$

3.9 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแนวความคิดของยี ซึ่งเป็นแนวความคิดพื้นฐานของวิธี FDTD ต่อมาได้แสดงที่มาของสมการผลต่างสืบเนื่องโดยพิจารณาเฉพาะแบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ อีกทั้งแนวความคิด TR ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความสามารถแยกโฟกัสสูง แนวความคิด TR นี้สามารถทำได้โดยตรงกับวิธี FDTD เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขของสมการผลต่างสืบเนื่องนี้ สัญญาณการกระตุ้น UWB ซึ่งจะใช้เป็น

สัญญาณแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลต หลังจากนั้นได้กล่าวถึง PML ABC ซึ่งเป็นรูปแบบของ ABC ที่ดีที่สุดในปัจจุบัน และบทสรุป

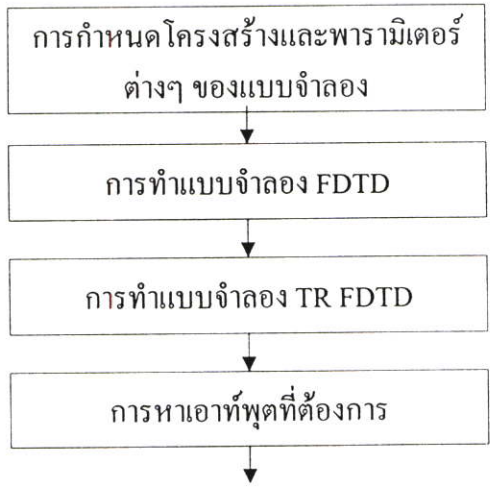
บทที่ 4
ผลการจำลองแบบเชิงตัวเลข

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้ใช้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) ที่สร้างจากแนวความคิดเวลาย้อนกลับ(Time-Reversal: TR) ในการศึกษาได้ใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขของวิธีผลต่างสืบเนื่องโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB กำหนดให้แถวลำดับ TR (Time-Reversal Array: TRA) เชิงเส้นเป็นเครื่องรับส่งและใช้แหล่งกำเนิดแบบจุด ได้พิจารณาความสามารถแยกโฟกัสของเป้าหมายในตัวกลางอวกาศว่าง โดยแสดงตัวอย่างการกระจายเชิงอวกาศว่างและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส เพื่อทำการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส ซึ่งจะพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของ TRA

4.2 ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข

ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลขแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ประกอบไปด้วย การกำหนดโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง การทำแบบจำลอง FDTD การทำแบบจำลอง TR FDTD และการหาเอาท์พุตที่ต้องการ ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1

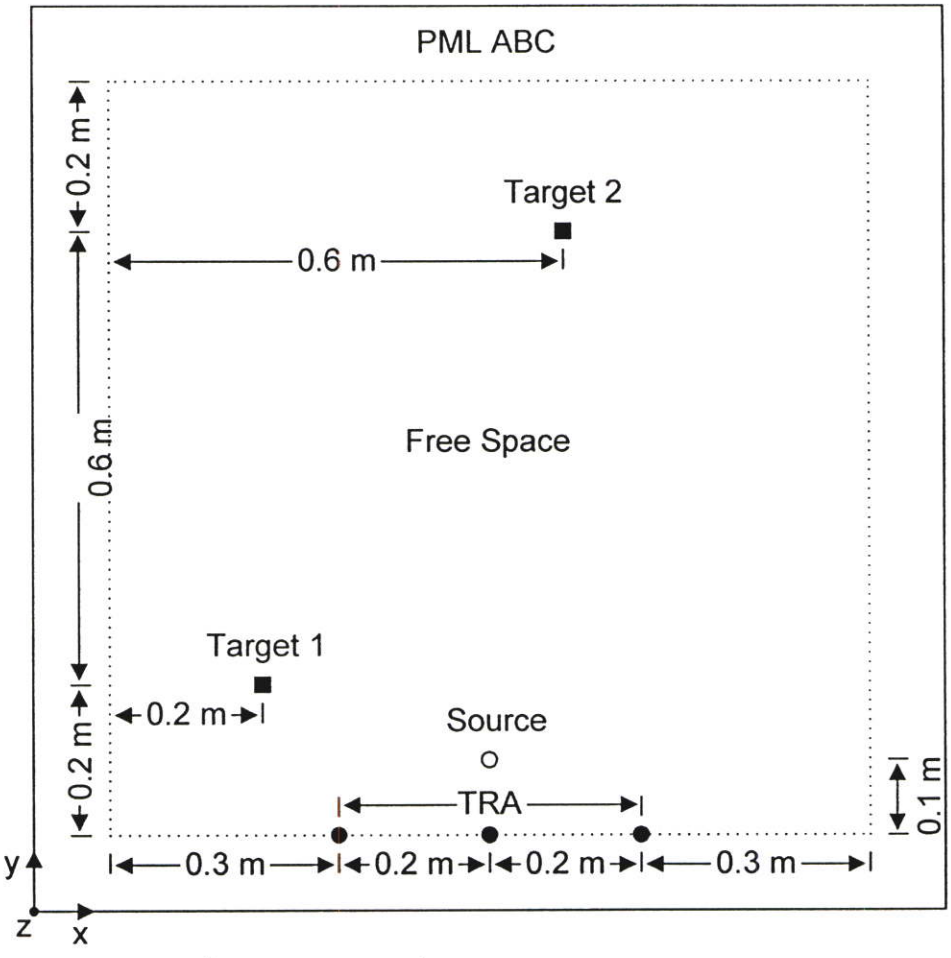


รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข

4.2.1 การกำหนดโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของการจำลอง

แบบจำลองที่ได้ทำการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบที่หนึ่งเป็นการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสและแบบที่สองเป็นการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส

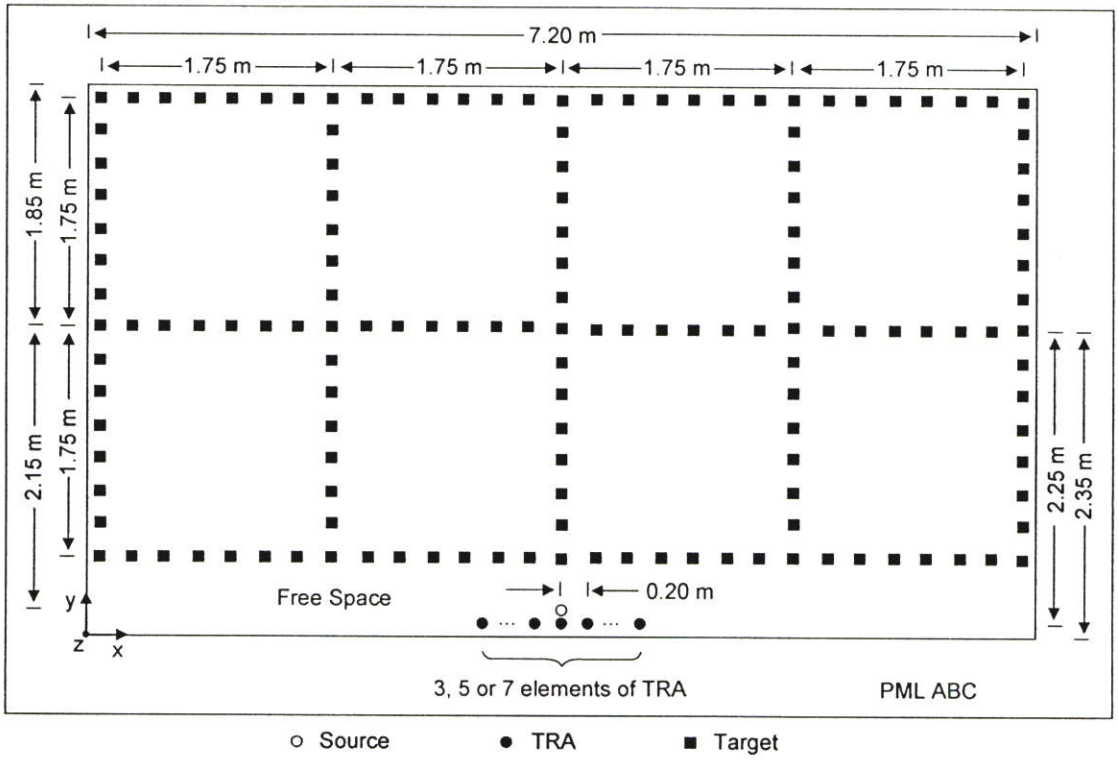
แบบจำลองแรกซึ่งเป็นการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสได้ทำแบบจำลองโดยมีตัวกลางเป็นอวกาศว่าง กำหนดให้เครื่องรับส่งเป็น TRA ที่มี 3 องค์ประกอบ มีหนึ่งแหล่งกำเนิดแบบจุด และกำหนดให้มีสองเป้าหมาย โดยเป้าหมายทั้งสองเป็นตัวนำสมบูรณ์ แบบจำลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองที่ใช้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัส

และในแบบจำลองที่สองเป็นการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสได้ทำแบบจำลองโดยมีตัวกลางเป็นอวกาศว่าง โดยได้พิจารณาองค์ประกอบของเครื่องรับส่ง TRA 3 กรณี คือ ที่มี 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ โดยแต่ละองค์ประกอบอยู่ห่างกัน 0.20 m มีหนึ่งแหล่งกำเนิดแบบจุด และกำหนดให้มีเป้าหมายทั้งหมด 147 เป้าหมาย โดยแต่ละ

เป้าหมายห่างกันจากเป้าหมายข้างเคียงในแนวแกน x และแกน y เป็น 0.25 m เป้าหมายทั้งหมดนี้เป็นตัวนำสมบูรณ์ แบบจำลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



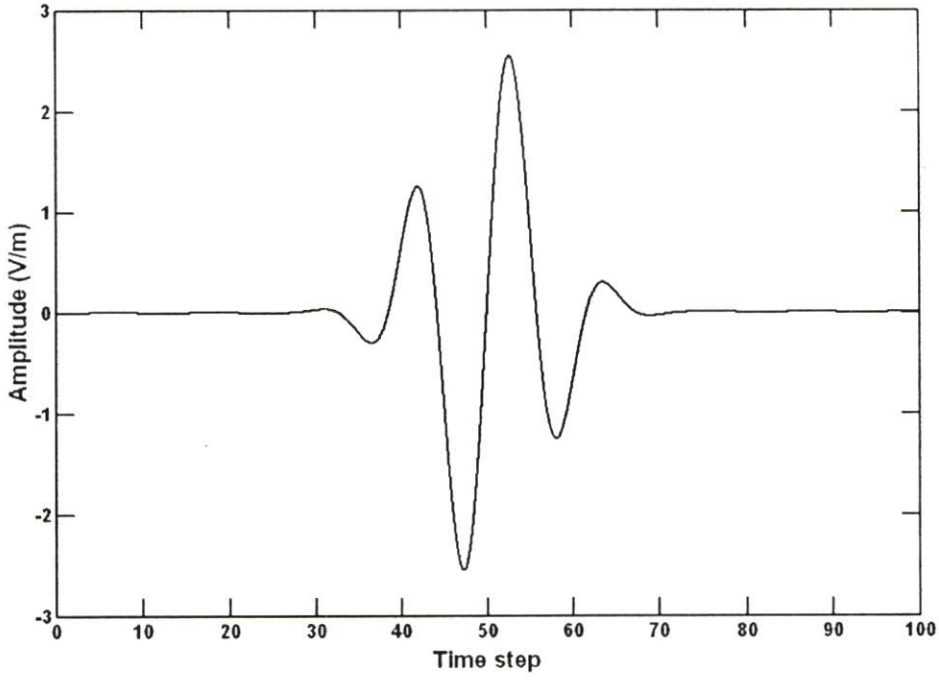
รูปที่ 4.3 แบบจำลองที่ใช้ศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส

4.2.2 การทำแบบจำลอง FDTD

ได้ใช้การจำลองแบบ FDTD แบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic: TM) ในสองมิติมาจำลองโครงสร้างนี้ โดยกำหนดให้ขนาดเซลล์ในทิศทาง x และ y เป็น $\Delta x = \Delta y = 0.005$ m ใช้ PML ABC ที่มี 16 ชั้นเพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการสะท้อนที่ขอบของโดเมนการจำลองแบบ ขนาดโดเมนการคำนวณทั้งหมดเป็น $872 \times 1{,}472$ เซลล์ ช่วงเวลาของแต่ละขั้นเวลาเป็น 11.79 ps ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข ขั้นเวลาทั้งหมดในการจำลองแบบนี้เป็น $N = 2{,}500$ ซึ่งเป็นขั้นเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนการคำนวณทั้งหมดมีค่าประมาณเป็นศูนย์

สำหรับการกระตุ้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ได้ใช้รูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยมีพารามิเตอร์เป็น $f_c = 6.85$ GHz $d = 0.20$ ns $A = 2.79$ V และ $n_o = 50$ รูปคลื่นสนามไฟฟ้าเทียบกับขั้นเวลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัญญาณการกระตุ้นที่กำหนดนี้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และ

ข้อกำหนดของ FCC สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูง ซึ่งจะมี $f_H = 10.45$ และ $f_L = 4.24$ GHz มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.84 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.21 GHz และมีพลังงานเท่ากับ -62.70 dBm

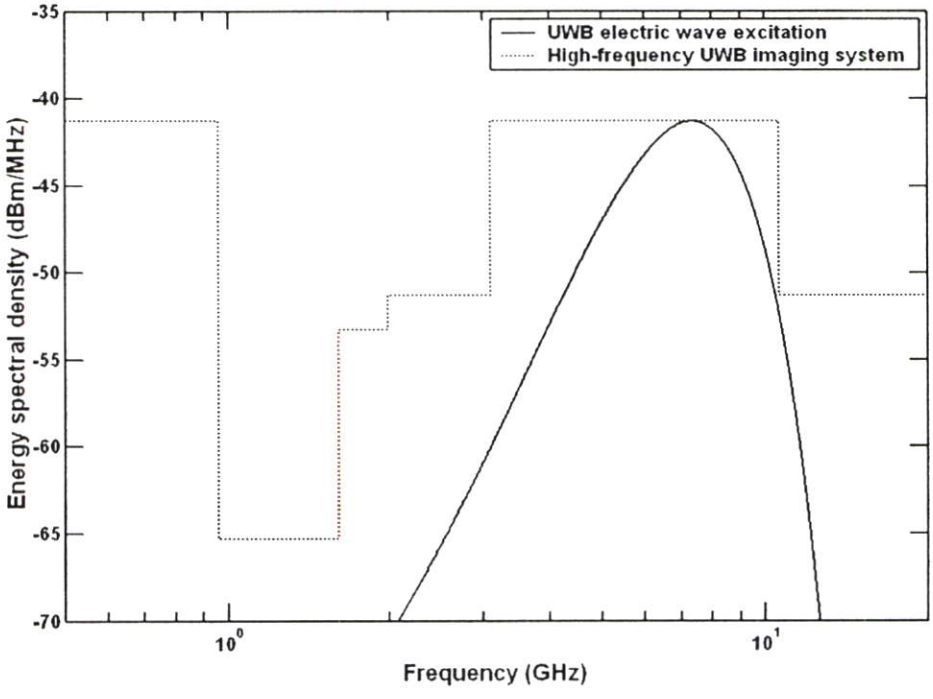


รูปที่ 4.4 รูปคลื่นสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นเทียบกับขั้นเวลา

ในการจำลองแบบ ขั้นแรกจะกระตุ้นแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยใช้วิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB จะแพร่กระจายออกไปถึงเป้าหมายและจะเกิดการสะท้อนกลับมายัง TRA ที่อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด แต่ละองค์ประกอบของ TRA จะบันทึกข้อมูลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่รับได้ โดยจะทำการตัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่มาจากเส้นทางตรงจากแหล่งกำเนิดออกไป

โดยแบบการจำลองที่หนึ่งเป็นการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสซึ่งมีแบบการจำลองดังรูปที่ 4.2 ซึ่งได้กำหนดเป้าหมายไว้ 2 เป้าหมาย ในการทำแบบจำลอง FDTD ของการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสจึงสามารถส่งสัญญาณครั้งเดียวไปยังเป้าหมายทั้งสองที่กำหนดไว้ แต่ในการจำลองแบบการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสซึ่งมีแบบจำลองดังรูปที่ 4.3 ซึ่งได้กำหนดเป้าหมายไว้ 147 เป้าหมาย ซึ่งถ้าส่งสัญญาณครั้งเดียวไปยังเป้าหมายทั้งหมด จะทำการแยกสัญญาณที่สะท้อนออกจากแต่ละเป้าหมายได้ยาก จึงทำการได้ทำการจำลองแบบ 1 ครั้งต่อ 1 เป้าหมาย เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาดในการหาพัสส์ของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น โดยจะเปลี่ยนตำแหน่งของเป้า

หมายไปที่ละตำแหน่งตามที่กำหนดไว้จนครบ 147 เป้าหมายและทำการจำลองแบบต่อโดยเพิ่มองค์ประกอบ TRA เป็น 5 องค์ประกอบและ 7 องค์ประกอบตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงที่กำหนดโดย FCC

4.2.3 การทำแบบจำลอง TR FDTD

การทำแบบจำลองของ TR FDTD จะมีพารามิเตอร์และโครงสร้างแบบจำลองเหมือนกับการทำแบบจำลอง FDTD แต่การทำแบบจำลอง TR FDTD จะต่างจากแบบจำลอง FDTD ที่การจำลองแบบ TR FDTD เป็นการทำขั้นเวลาจากมากไปน้อย โดยพิจารณาจากสมการ FDTD ที่ถูกย้อนกลับตามสมการที่ 3.22 ถึง3.24 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการทำแบบจำลองTR FDTD เมื่อ TRA รับสัญญาณและบันทึกข้อมูลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB หลังจากนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สะท้อนกลับจากแต่ละเป้าหมายจะถูกแยกออกจากกันแล้วทำแนวความคิด TR คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่ใช้แนวความคิด TR จะถูกส่งออกไปจากแต่ละองค์ประกอบของ TRA โดยใช้วิธี TR FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่ถูกส่งออกไปนี้จะโฟกัสกลับไปที่แต่ละเป้าหมาย

4.2.4 การหาเอาท์พุตที่ต้องการ

ผลการจำลองที่ได้จะแบ่งออกเป็นผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสและผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส ในการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสเอาว์พุตที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของตัวอย่างการกระจายเชิงอวกาศว่าง และสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส

ส่วนในการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส พารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสจะพิจารณาในเทอมของความผิดพลาดไดเรคชันเนล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงถึงระยะทางที่ผิดพลาดของความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า TR เมื่อโฟกัสกลับมายังเป้าหมาย ซึ่งนิยามได้เป็น

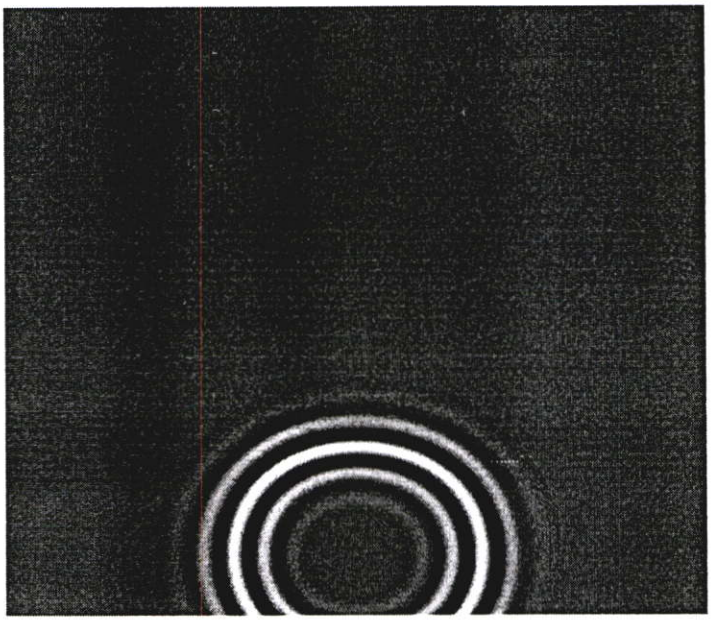
$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \tag{5.1}$$

เมื่อ e_x และ e_y เป็นค่าความผิดพลาดไดเรคชันเนลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า TR เมื่อโฟกัสกลับมายังเป้าหมายในแนวทิศทาง x และ y ตามลำดับ โดยแสดงฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ รวมทั้งแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ ตามลำดับ

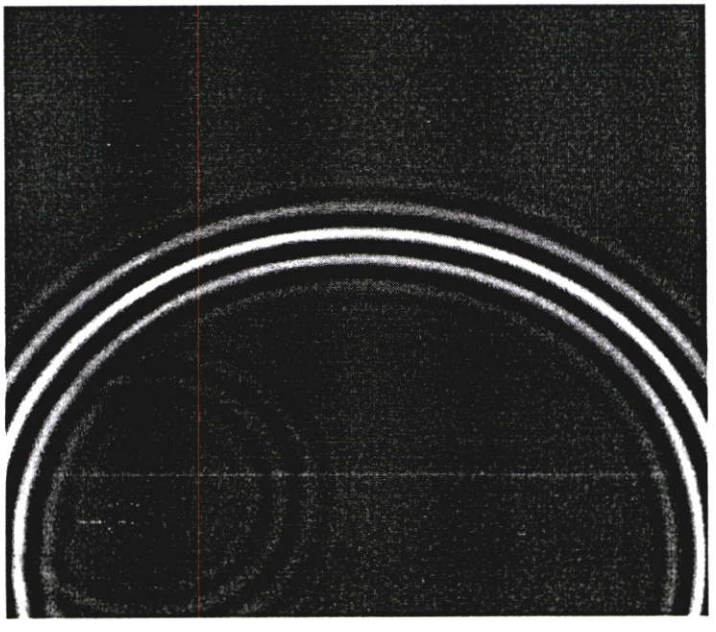
4.3 ผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัส [16]

รูปที่ 4.6 ถึง 4.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 100 200 300 และ 400 ตามลำดับ จากรูปสามารถเห็นถึงกลไกการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าซึ่งจะมีการแพร่กระจายไปยังเป้าหมายที่ 1 และ 2 และเกิดการสะท้อนกลับไปยังแต่ละองค์ประกอบของ TRA

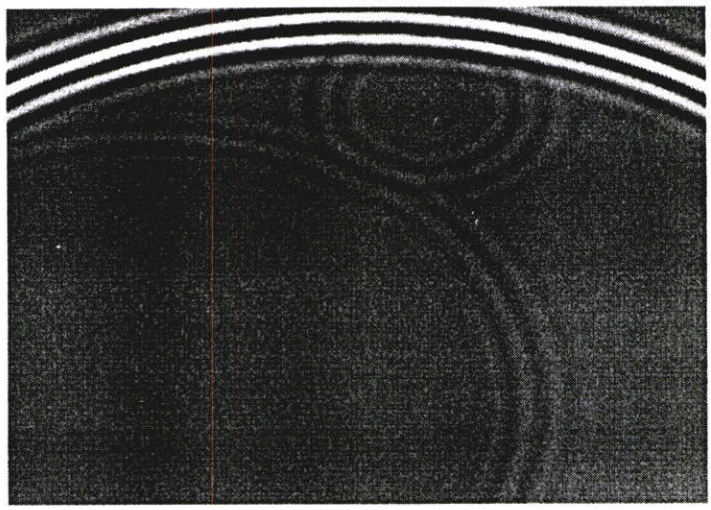
รูปที่ 4.10 ถึง 4.12 แสดงสนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ด้านซ้าย ตรงกลาง และทางด้านขวา ตามลำดับ โดยได้กำจัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ในแนวเส้นทางตรงจากแหล่งกำเนิดทิ้งไป ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดว่าจะมีเพียงสองพัลส์หลักที่สะท้อนกลับมา โดยพัลส์แรกได้สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายที่ 1 ส่วนพัลส์ที่สองได้สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายที่ 2



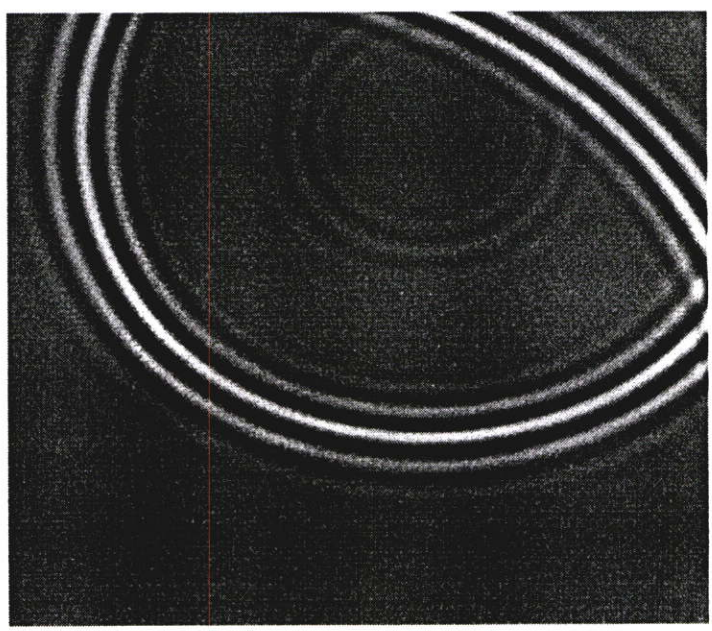
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 100



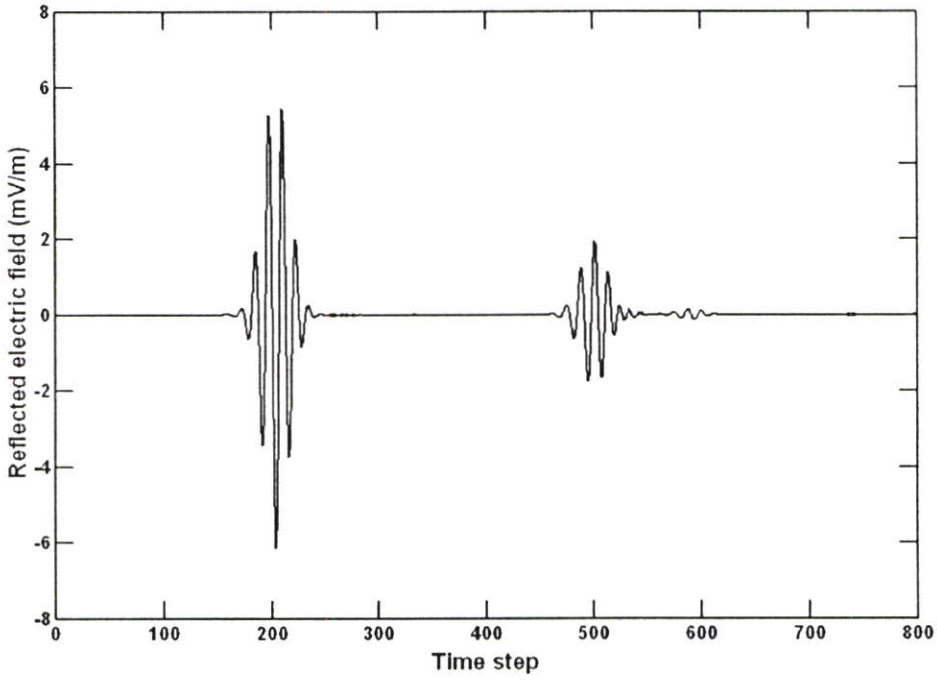
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 200



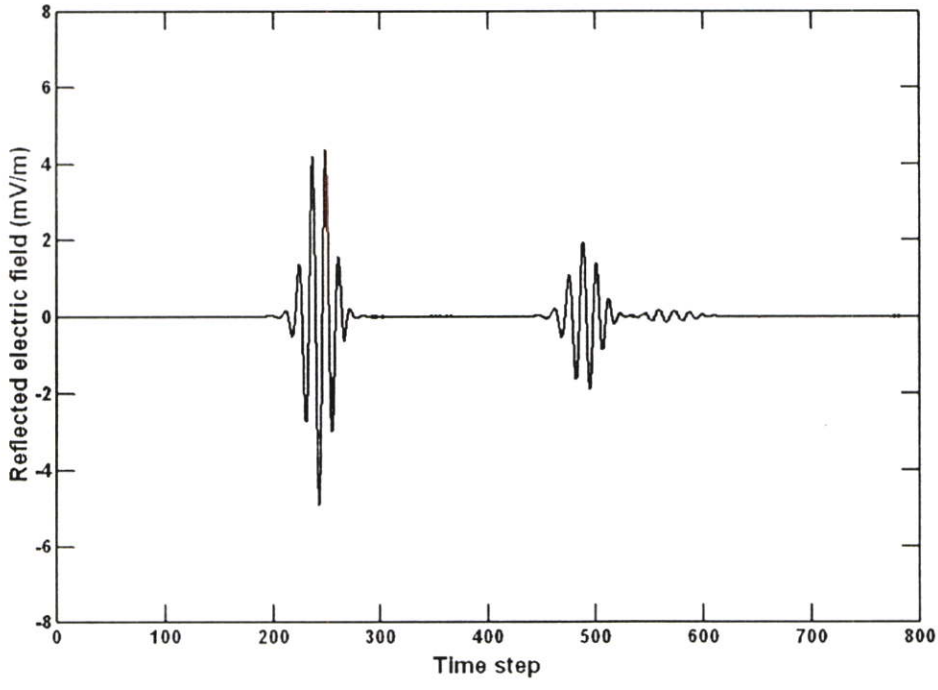
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 300



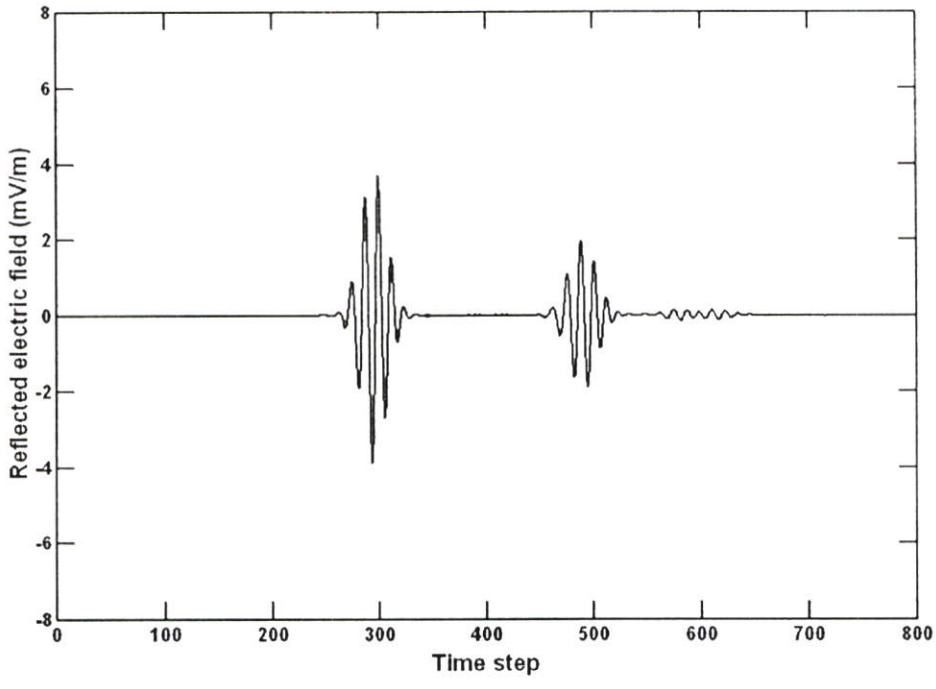
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้นเวลา 400



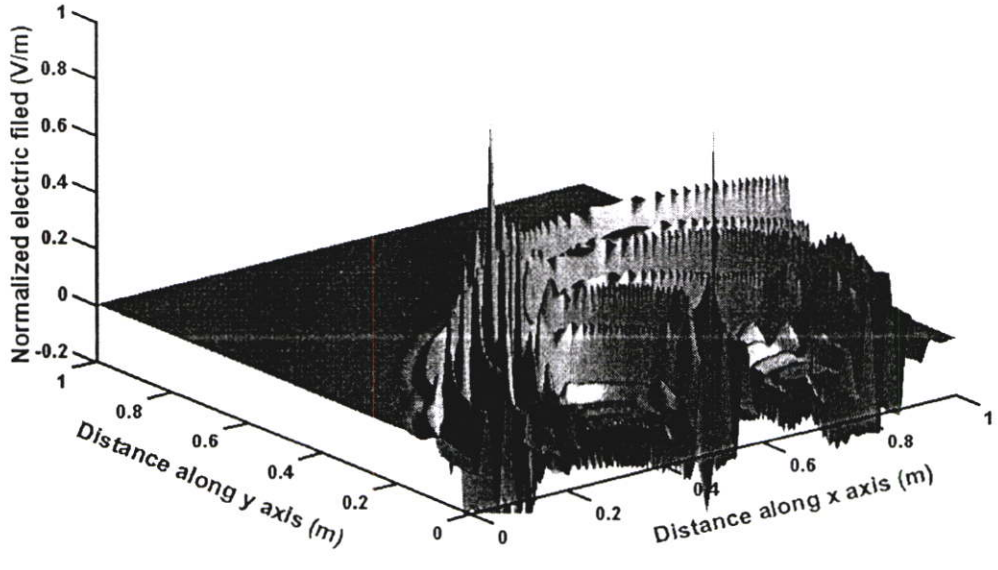
รูปที่ 4.10 สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ด้านซ้าย



รูปที่ 4.11สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ตรงกลาง

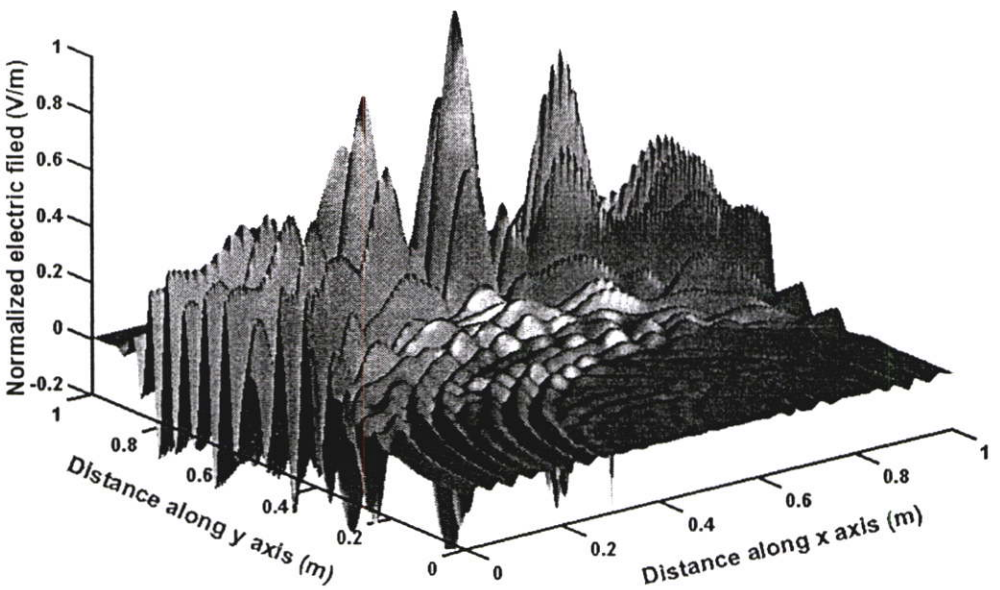


รูปที่ 4.12 สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายซึ่งรับได้จาก TRA องค์ประกอบที่อยู่ด้านขวา



รูปที่ 4.13 การกระจายเชิงสเปซของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1

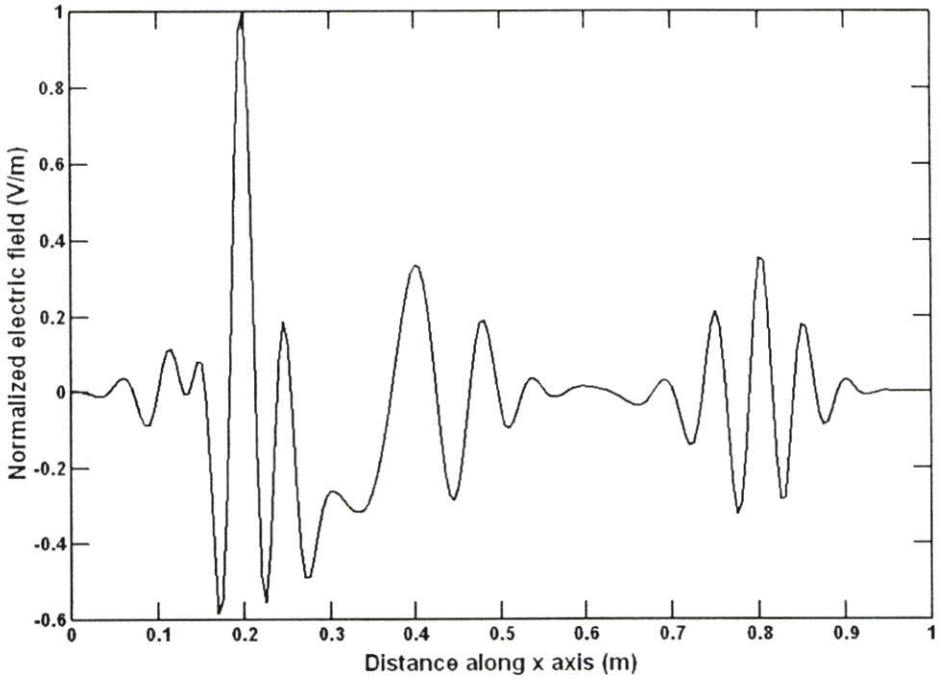
ต่อมาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สะท้อนกลับมาจากแต่ละเป้าหมายนี้จะถูกแยกออกมาและทำแนวความคิด TR หลังจากนั้นจะถูกส่งออกไปโดยใช้แนวความคิด TR FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า TR จะโฟกัสกลับไปยังเป้าหมายที่ 1 และ 2 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งแสดงการกระจายเชิงสเปซของสนามแม่เหล็กนอร์แมลไลซ์ที่โฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สนามไฟฟ้าจะถูกนอร์แมลไลซ์โดยสนามไฟฟ้ามากสุดในโดเมนการคำนวณ จากรูปจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากสุดอยู่ที่ตำแหน่งของเป้าหมายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



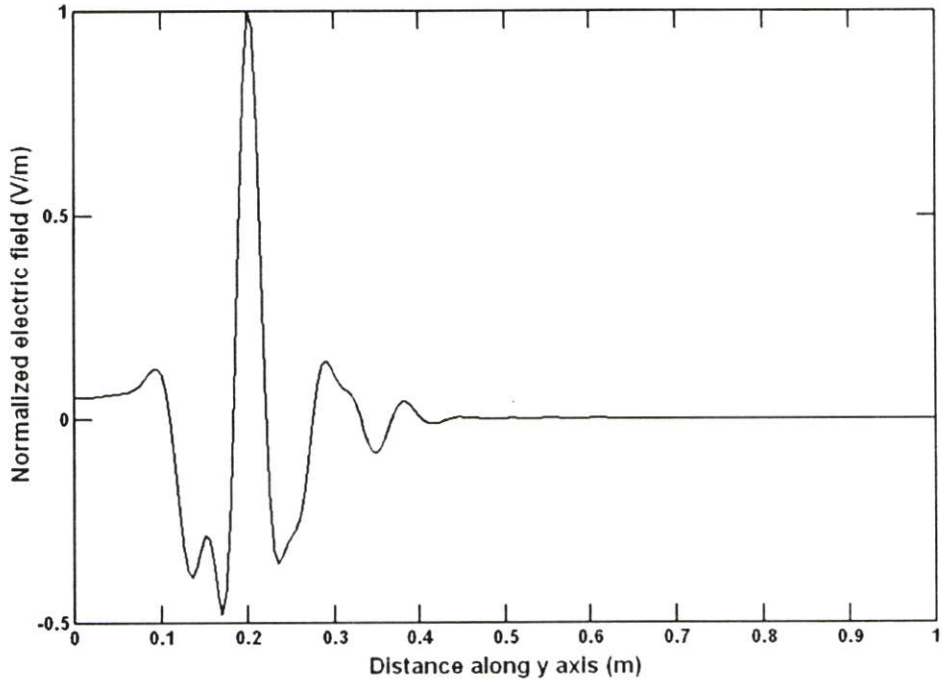
รูปที่ 4.14 การกระจายเชิงสเปซของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 2

สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอแมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 ในแนวแกน x และ y ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าตำแหน่งโฟกัสของเป้าหมายที่ 1 อยู่ที่ $x = y = 0.200$ m ซึ่งไม่มีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น

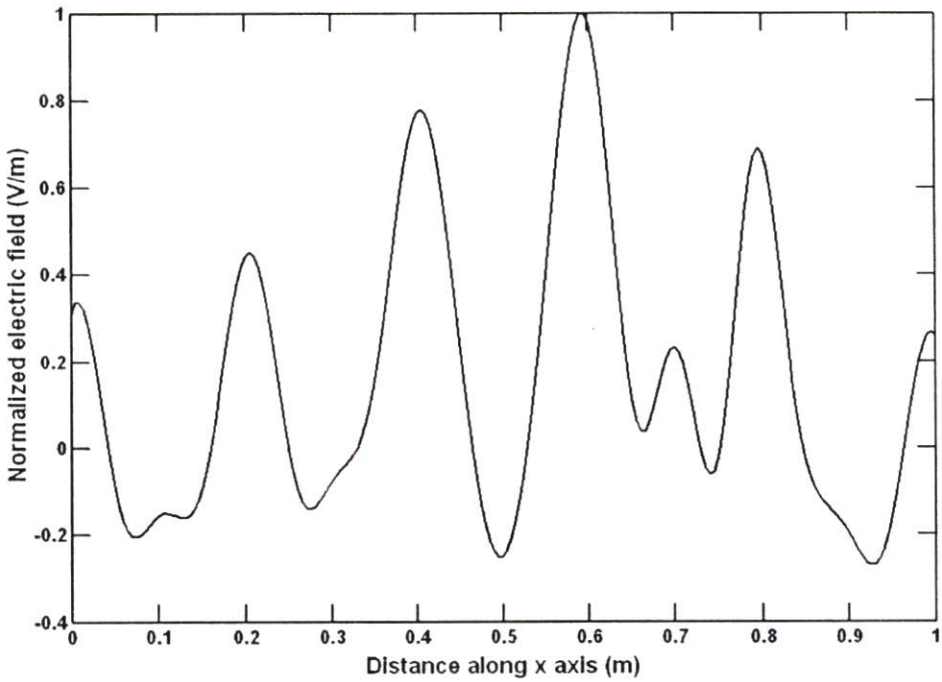
รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงสภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอแมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าตำแหน่งโฟกัสของเป้าหมายที่ 2 อยู่ที่ $x = 0.595$ m และ $y = 0.800$ m ซึ่งมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นตามแกน x เพียงเล็กน้อย (0.005 m) เนื่องจากตำแหน่งเป้าหมายที่ 2 นี้อยู่ห่างจาก TRA



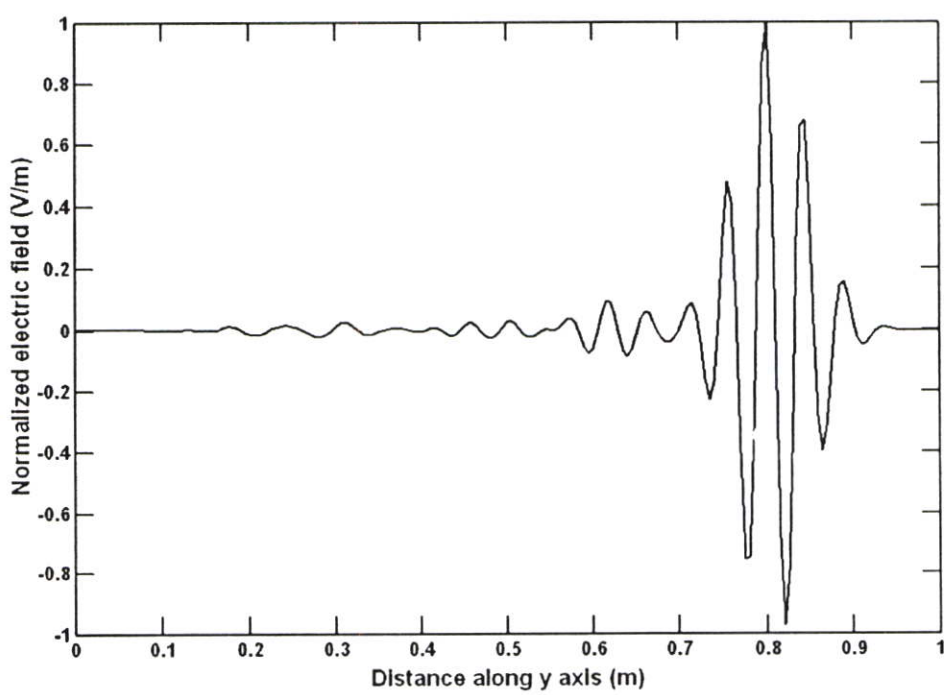
รูปที่ 4.15 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 ในแนวแกน x



รูปที่ 4.16 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 1 ในแนวแกน y



รูปที่ 4.17 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 2 ในแนวแกน x

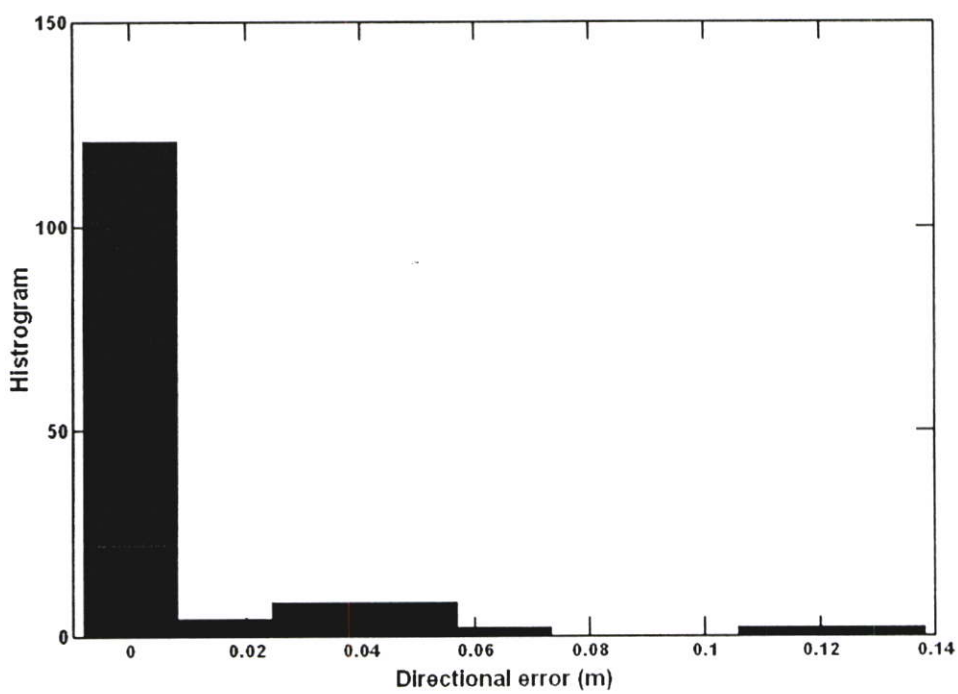


รูปที่ 4.18 สภาพเจาะจงทิศทางของสนามไฟฟ้านอร์แมลไลซ์ซึ่งโฟกัสไปยังเป้าหมายที่ 2 ในแนวแกน y

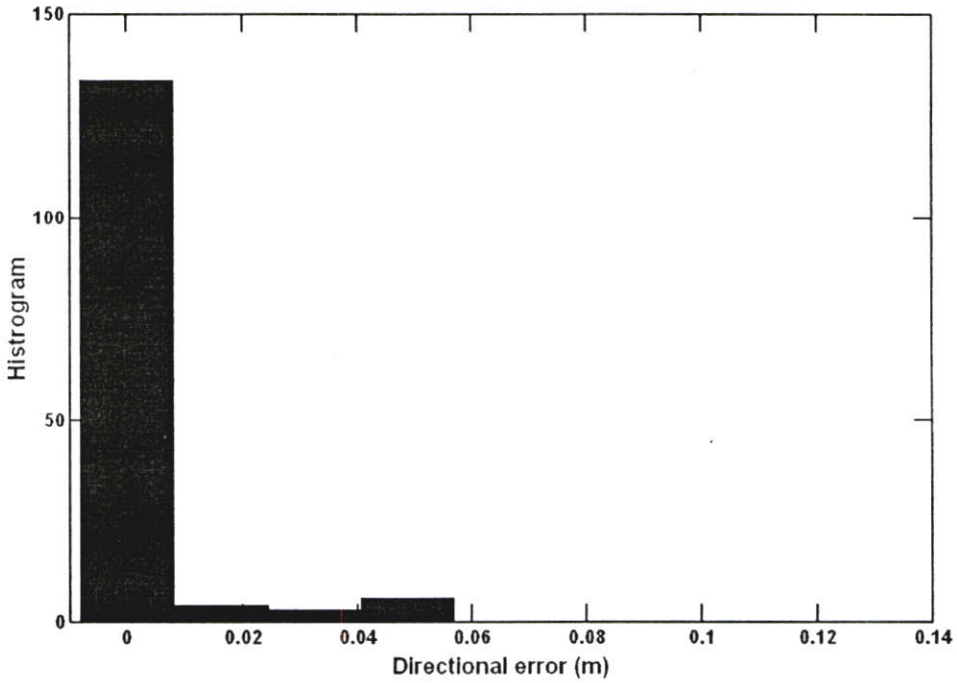
4.4 ผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส [17], [18]

ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 ตามลำดับ รูปที่ 4.21 ถึง 4.23 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cdf) ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ชัดว่าเมื่อจำนวนองค์ประกอบของ TRA เพิ่มขึ้น ความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะมีเป้าหมายที่โฟกัสผิดพลาดเป็น 26 เป้าหมาย 13 เป้าหมาย และ 1 เป้าหมาย จากเป้าหมายทั้งหมด 147 เป้าหมาย ซึ่งมีค่าผิดพลาดประมาณ 17.69 % 8.84 % และ 0.68 % สำหรับ TRA ที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ ตามลำดับ

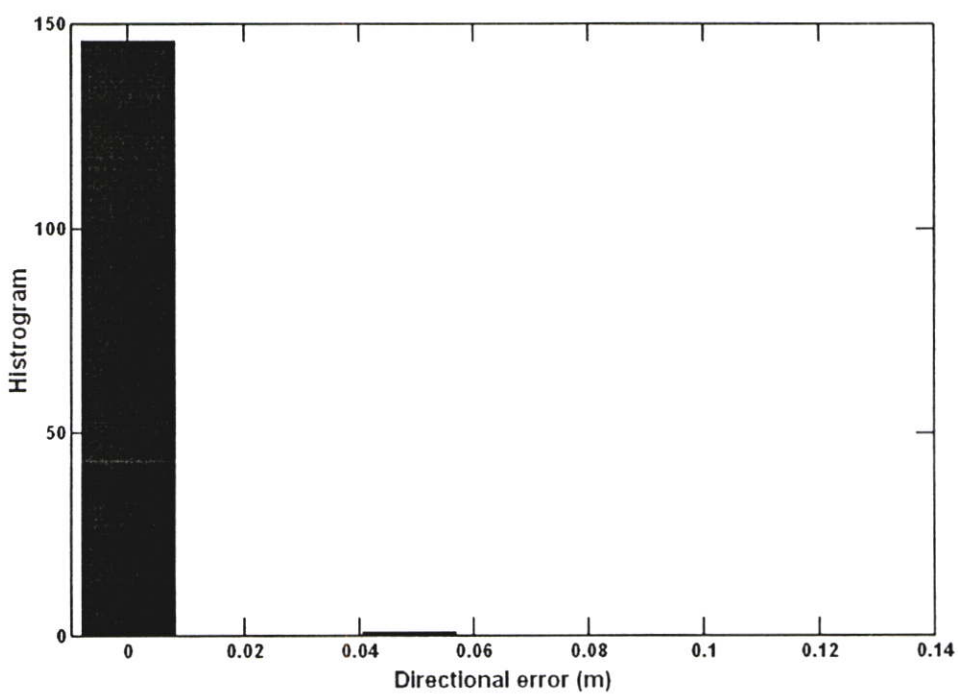
ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดไดเรคชันเนลสำหรับ TRA ที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนองค์ประกอบของ TRA เพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดไดเรคชันเนลจะมีค่าลงลง



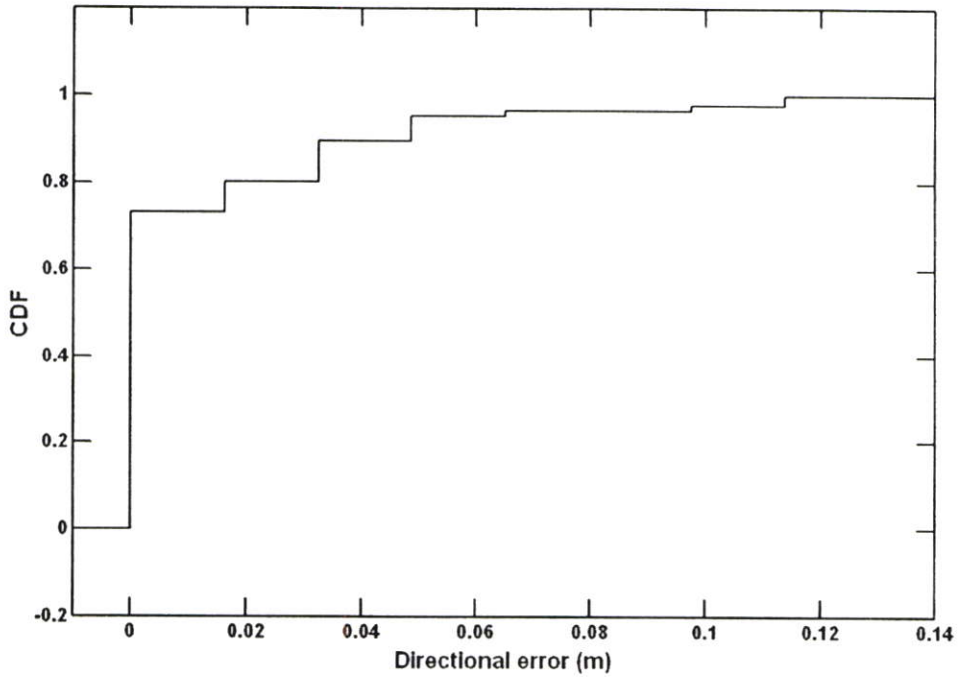
รูปที่ 4.19 ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ



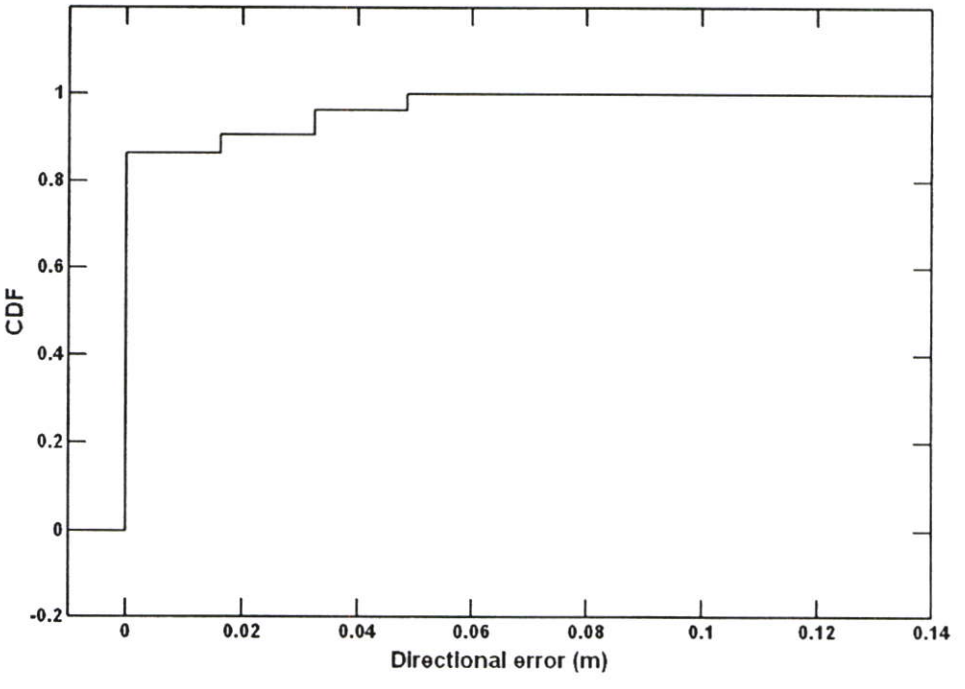
รูปที่ 4.20 ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 5 องค์ประกอบ



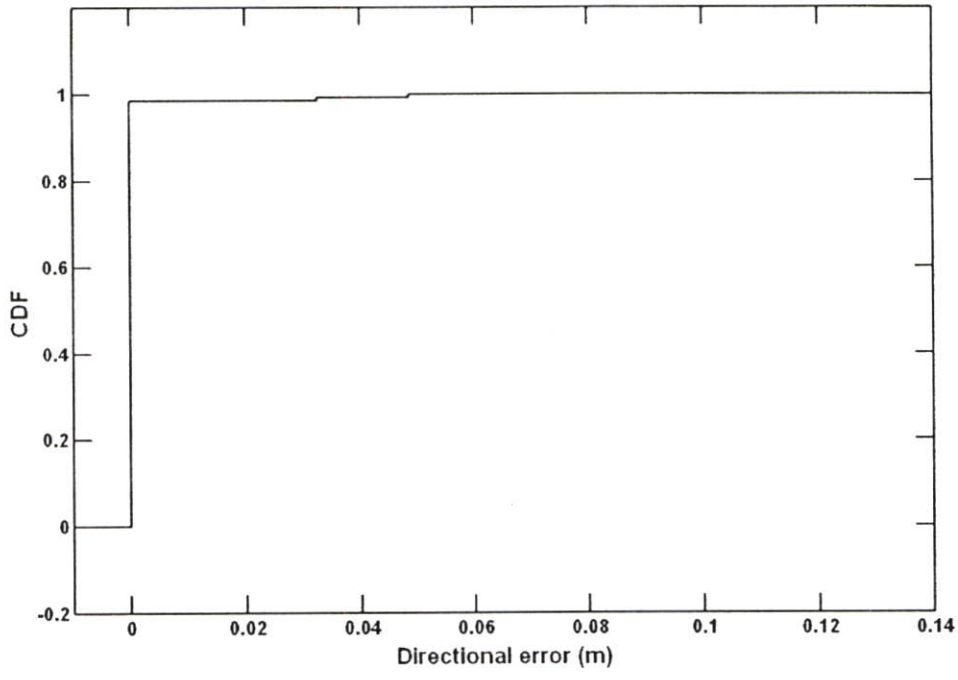
รูปที่ 4.21 ฮิสโทแกรมของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 7 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.22 CDF ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 3 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.23 CDF ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 5 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.24 CDF ของความผิดพลาดไดเรคชันเนลที่มีจำนวนองค์ประกอบของ TRA เป็น 7 องค์ประกอบ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดไดเรคชันเนลสำหรับ TRA ที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ

จำนวนองค์ประกอบของ TRA	ค่าเฉลี่ย (m)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (m)
3	0.0104	0.0242
5	0.0035	0.0108
7	0.0007	0.0043

4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัสและศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิด TR ในการศึกษาได้ใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขของวิธี FDTD โดยกำหนดให้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB กำหนดให้ TRA เชิงเส้นเป็นเครื่องรับส่งและใช้หนึ่งแหล่งกำเนิดแบบจุด ได้พิจารณาความสามารถแยกโฟกัสของเป้าหมายในตัวกลางอวกาศว่าง โดยแสดงตัวอย่างการกระจายเชิงสเปซและสภาพเจาะจงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่โฟกัส หลังจากนั้นได้ศึกษาความเที่ยงตรงของ

ความสามารถแยกโฟกัสโดยใช้ความผิดพลาดไดเรคชันเนล ซึ่งจะพิจารณา TRA ที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ จากผลที่ได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อ TRA มีจำนวนองค์ประกอบมากขึ้น ค่าความผิดพลาดไดเรคชันเนลจะลดลง ดังนั้น ในการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของ TRA จะสามารถปรับปรุงความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสให้เพิ่มขึ้นได้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาความสามารถแยกโฟกัสและความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) ที่สร้างจากแนวความคิดเวลาย้อนกลับ (Time-Reversal: TR) ในการศึกษาได้ใช้วิธีเชิงตัวเลขมาช่วยวิเคราะห์ โดยได้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) แบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic: TM) ในสองมิติ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข และได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer Absorbing Boundary Condition: PML ABC) มาวิเคราะห์ เนื่องจากวิธี FDTD เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลา และสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแนวความคิด TR ได้โดยตรง

5.1 สรุปผลการศึกษาความสามารถแยกโฟกัส

จากที่ได้ศึกษาขั้นตอนการใช้วิธี FDTD ร่วมกับแนวความคิด TR สำหรับการโฟกัสเป้าหมายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB จะเห็นได้ว่าวิธีการจำลองแบบ TR FDTD นี้ มีขั้นตอนที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากมีการแก้ไขสูตรทั่วไปของ FDTD เพียงเล็กน้อย และผลที่ได้มีค่าความเที่ยงตรงที่สูง นั่นคือ ในการโฟกัสไปที่เป้าหมายที่ 2 ซึ่งมีระยะห่างจากแถวลำดับ TR (Time-Reversal Array: TRA) ประมาณ 0.8 m จะมีค่าผิดพลาดเพียง 0.005 m

5.2 สรุปผลการศึกษาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัส

ในการศึกษาหาความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB โดยใช้วิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข และได้ใช้เงื่อนไขขอบเขต PML ABC ร่วมกับแนวความคิด TR ได้ศึกษาความเที่ยงตรงโดยใช้พารามิเตอร์ความผิดพลาดไดเรคชันเนล และได้พิจารณา TRA ที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็น 3 องค์ประกอบ 5 องค์ประกอบ และ 7 องค์ประกอบ จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนองค์ประกอบของ TRA เพิ่มมากขึ้น ความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสเพิ่มมากขึ้น โดยมีเป้าหมายที่โฟกัสผิดพลาดจาก 26 เป้าหมาย ลดลงเหลือเพียง 1 เป้าหมาย หรือจาก 17.69 % ลดลงเหลือเพียง 0.68% จากเป้าหมายทั้งหมด รวมทั้งค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดไดเรคชันเนลจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อจำนวนองค์ประกอบของ TRA เพิ่มขึ้นจาก 3 องค์ประกอบ เป็น

5 องค์ประกอบ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของ TRA จะสามารถปรับปรุงความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสให้เพิ่มขึ้นได้

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากที่ได้ทำการศึกษาความสามารถแยกโฟกัสและความเที่ยงตรงของความสามารถแยกโฟกัสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UWB ที่สร้างจากแนวความคิด TR โดยได้เลือกใช้วิธี FDTD ในแบบแผนคลื่น TM จะเห็นได้ว่าสามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบการสร้างภาพ UWB ได้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีความสามารถแยกโฟกัสสูง และแนวความคิด TR นี้ยังสามารถทำได้โดยตรงกับวิธี FDTD

ในการจำลองแบบ FDTD ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงตามความเป็นจริงมากขึ้น จึงควรพัฒนาไปเป็นการจำลองแบบ FDTD ในสามมิติ และนำเอาคุณสมบัติของสายอากาศเข้ามารวมในการทำแบบจำลองด้วย นอกจากนั้น ในการศึกษานี้ได้พิจารณาเพียงในกรณีที่เป็นระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่สูงเท่านั้น จึงควรมีการศึกษาในกรณีที่เป็นระบบการสร้างภาพ UWB ความถี่ต่ำและความถี่กลางด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วน

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a new technology," **2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.

[2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Important RF Technology," **2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.

[3] K. Siwiak, "Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver," **2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.

[4] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rule Regarding UWB Transmission Systems," **First Report**, FCC 02-48, Apr. 2002.

[5] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol.14, pp. 302-307, 1996.

[6] A. Taflove, **Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method**, Norwood, MA: Artech House, 1995.

[7] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using The Time-Dependent Maxwell's Equation," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, vol. 23, pp. 623-630, 1975.

[8] J. Berenger, "A Perfectly Matched Layer for The Absorption of Electromagnetic Wave," **Journal on Computational Physics**, vol. 14, pp. 185-200, 1994.

[9] M. E. Yavuz and F. L. Teixeira, "A Numerical Study of Time-Reversed UWB Electromagnetic Wave in Continuous Random Medium," **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 4, pp. 43-46, 2005.

[10] R. Sorrentino, L. Roselli and P. Mezzanotte, "Time Reversal in Finite Difference Time Domain Method," **IEEE Microwave and Guided Wave Letters**, vol. 3, no. 11, pp. 402-404, Nov. 1993.

[11] M. Soumekh, "Depth-Focused Interior Echo Imaging" **IEEE Transaction on Image Processing**, vol. 8, no. 11, pp. 1608-1618, Nov. 1999.

[12] L. J. Busse, "Three-Dimensional Imaging Using a Frequency Domain Synthetic Aperture Focusing Technique," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, vol. 39, no. 2, pp. 174-179, March 1992.

[13] M. Li, W. Guan and P. Li, "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique with Applications in High-Frequency Ultrasound Imaging," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, vol. 51, no. 1, pp. 63-70, Jan. 2004.

[14] S. D. Silverstein, "A Robust Auto-Focusing Algorithm for Medical Ultrasound: Consistent Phase References from Scaled Cross-Correlation Functions," **IEEE Signal Processing Letter**, vol. 8, no. 6, pp. 177-179, June 2001.

[15] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada "Simple Waveform for UWB Communication," **The 2005 Electrical Engineer/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2005)**, pp. 626-629, May 2005.

[16] P. Supanakoon, T. Payommai, S. Promwong, P. Sithiyopasukul and J. Takada, "Study on Focusing Resolution of Time-Reversed Ultra Wideband Electromagnetic Waves by Using Finite Difference Time Domain Method," **The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006)**, no. 1, pp 289-292, July 2006.

[17] T. Payommai, P. Supanakoon, S. Promwong, N. Sukutamtanti and J. Takada, "Accuracy Analysis of Focusing Resolution with TR EM Pulse Propagation for UWB Imaging Systems," **The 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2007)**, no. 2, pp 919-922, 9-12 May 2007.

[18] T. Payommai, P. Supanakoon, S. Promwong and N. Sukutamtanti, "Accuracy Improvement of Focusing Resolution for Ultra Wideband Imaging Systems," **Have been submitted to 2007 Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2007)**.

ภาคผนวก ก
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

[1] P. Supanakoon, **T. Payommai**, S. Promwong, P. Sithiyopasukul and J. Takada, "Study on Focusing Resolution of Time-Reversed Ultra Wideband Electromagnetic Waves by Using Finite Difference Time Domain Method," The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006), no. 1, pp 289-292, July 2006.

[2] **T. Payommai**, P. Supanakoon, S. Promwong, N. Sukutamtanti and J. Takada, "Accuracy Analysis of Focusing Resolution with TR EM Pulse Propagation for UWB Imaging Systems," The 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2007), no. 2, pp 919-922, 9-12 May 2007.

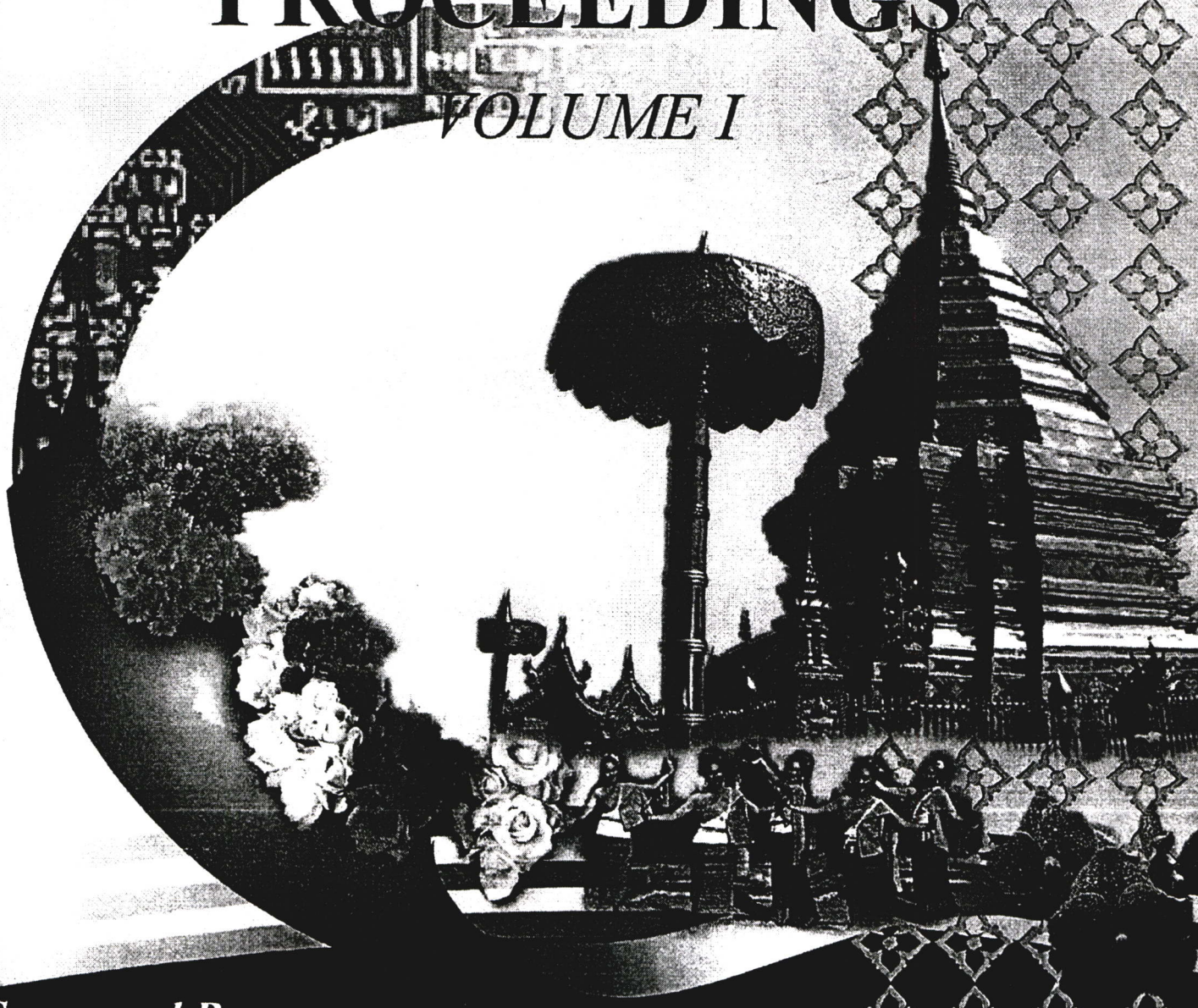
[3] **T. Payommai**, P. Supanakoon, S. Promwong and N. Sukutamtanti, "Accuracy Improvement of Focusing Resolution for Ultra Wideband Imaging Systems," Have been submitted to 2007 Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2007).

ITC-CSCC 2006

The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications

PROCEEDINGS

VOLUME I



Sponsored By

THE ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION ASSOCIATION (ECTI), THAILAND

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS ENGINEERS OF KOREA (IEEK), KOREA

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS (IEICE), JAPAN

NATIONAL ELECTRONICS AND COMPUTER TECHNOLOGY CENTER, THAILAND

In association with IEEE THAILAND SECTION

STUDY ON FOCUSING RESOLUTION OF TIME-REVERSED ULTRA WIDEBAND ELECTROMAGNETIC WAVES BY USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

Pichaya Supanakoon[1,2], *Tanaporn Payommai*[2], *Sathaporn Promwong*[1,2], *Pisan Sithiyopasukul*[2] *and Jun-ichi Takada*[3]

[1] Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT),
[2]Department of Information Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
E-mail: {kspichay,s8061065,kpsathap,kspisan}@kmitl.ac.th
[3]Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1-S6-4, O-okayama, Meguro-ku, 152-8550, Tokyo, Japan.
E-mail: takada@ide.titech.ac.jp

ABSTRACT

In this paper, the focusing resolution of ultra wideband (UWB) electromagnetic (EM) waves produced by time-reversal (TR) algorithm is studied. The study is done via numerical simulation of finite difference time domain (FDTD) method. The modulated Gaussian pulses are used as the UWB EM waves. The focusing resolutions of two targets in free space medium are considered. The spatial distribution and directivity of focused UWB EM waves are shown. The results are discussed in the paper.

Keywords: Focusing resolution, finite difference time domain (FDTD) method, ultra wideband (UWB) image system.

1. INTRODUCTION

Recently, ultra wideband (UWB) radio technology based on the transmission of short duration pulses has gained much interest because of its low cost and low power consumption potentials [1]. The Federal Communications Commission (FCC) established different technical standards and operating restrictions for three types of UWB devices based on their potential to cause interference [2]. These three types of UWB devices are 1) image systems, 2) vehicular radar systems and 3) communications and measurement systems. The applications of UWB image systems include ground penetrating radar (GPR), wall image, through-wall image, surveillance and medical systems.

The focusing resolution is important performance of image system. There are many focusing techniques for image systems, such as depth-focused echo imaging [3], aperture focusing technique [4],[5] and auto-focusing algorithm [6]. The time reversal (TR) algorithm is widely used for UWB image system because its simplicity and high focusing resolution [7]. This TR algorithm can be directly performed by using the FDTD method [8],[9]. The use of FDTD method for TR is purposed in [10].

In this paper, the focusing resolution of UWB EM waves produced by TR algorithm is studied. The study is done via numerical simulation of two-dimensional (2-D) transverse magnetic (TM) mode of FDTD method. The modulated Gaussian pulses are used as the UWB EM waves. The focusing resolution of two targets in free space medium are considered. The spatial distribution and directivity of focused UWB EM waves are shown. The results are discussed in the paper.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2, the FDTD method used in this paper is described. Next, the numerical simulation results are demonstrated in Sec. 3. Finally, the conclusions are discussed in Sec. 4.

2. FDTD METHOD

2.1. Conventional FDTD Algorithm

The 2-D TM mode of finite difference equations are directly derived from Maxwell's curl equations in time domain. Maxwell's curl equation can be written as [11]

$$\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}, \quad (1)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H}, \quad (2)$$

where H is the magnetic field, E is the electric field, μ is the magnetic permeability and ε is the electric permittivity.

To obtain discrete approximation of the continuous partial differential equations, the centered difference approximation is used on both the time and space first-order partial differences. The entire computation domain is the collection of all the unit cells. The dimensions of the unit cell along x and y directions are Δx and Δy, respectively. The node with subscript indices i and j corresponds to node number in x and y directions. The time step is indicated with the superscript index n. The time interval of each time step is Δt. After simple arrangement, the 2-D TM mode of

finite difference equations are described as [8],[9]

$$H_x|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_x|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} - E_z|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right), \quad (3)$$

$$H_y|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_y|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right), \quad (4)$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1} = C_a|_{i,j}E_z|_{i,j}^{n} + C_b|_{i,j}\left(\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right), \quad (5)$$

with the electric field updating coefficients at node (i, j) are given by

$$C_a|_{i,j} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right), \quad (6)$$

$$C_b|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right), \quad (7)$$

where the parameter σ is the electric conductivity.

2.2. TR FDTD Algorithm

To reversing the time direction, the time sequence of conventional FDTD algorithm is reversed. The EM waves, E^n and $H^{n-1/2}$, are computed form $H^{n+1/2}$ and E^n, respectively. Therefore, the 2-D TM mode of time reversal FDTD can be written as [10]

$$E_z|_{i,j}^{n} = C_a|_{i,j}E_z|_{i,j}^{n+1} - C_b|_{i,j}\left(\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right), \quad (8)$$

$$H_y|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = H_y|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right), \quad (9)$$

$$H_x|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = H_x|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} - E_z|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right), \quad (10)$$

2.3. Numerical Stability Condition

The maximum time step is limited by the stability restriction of the finite difference equation. The numerical stability condition of 2-D FDTD is specified as [12]

$$\Delta t \le \frac{1}{c}\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}, \quad (11)$$

where c is the velocity of light in free space.

2.4. Excitation of UWB EM Wave

The modulated Gaussian pulse is used as the UWB EM wave excitation V_S. The expression of this pulse is

$$V_S|^n = Ae^{-[(n-n_0)\Delta t/d]^2}\sin[2\pi f_c(n-n_0)\Delta t], \quad (12)$$

where A is the maximum amplitude of the envelope signal, f_c is the carrier frequency, d is the $1/e$ characteristic decay time and n_0 is the delayed time step.

2.5. PML ABC Treatment

The tangential field components on the four mesh walls must be specified in such a way that outgoing waves are not reflected. The FDTD simulation in this paper uses the perfectly matched layer adsorbing boundary condition (PML ABC) [13]. The PML ABC can effectively absorb propagation wave by using nonphysical lossy media adjacent to the outer-grid boundaries backed by perfectly conducting walls. The field components are split into two subcomponents. The electric and magnetic losses, σ_e and σ_h, inside the PML medium are specified by satisfying the PML impedance-matching condition

$$\frac{\sigma_e}{\varepsilon} = \frac{\sigma_h}{\mu}. \quad (13)$$

After the specification of electric and magnetic losses, EM waves inside the PML medium are rapidly attenuated. The explicit exponentially difference field-updating equations [9] are used to replace the conventional FDTD algorithm.

The electric loss inside the PML legion is assumed to increase with depth from zero at $\rho = 0$ to a maximum value of σ_{max} at $\rho = \delta$ by the quadratic ramping

$$\sigma_e(\rho) = \sigma_{max}\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^2, \quad (14)$$

where σ_{max} is chosen to bound the PML reflection coefficient. The PML reflection coefficient at normal incident has the following expression,

$$R(0) = e^{-2\sigma_{max}\delta/(3\varepsilon c)}. \quad (15)$$

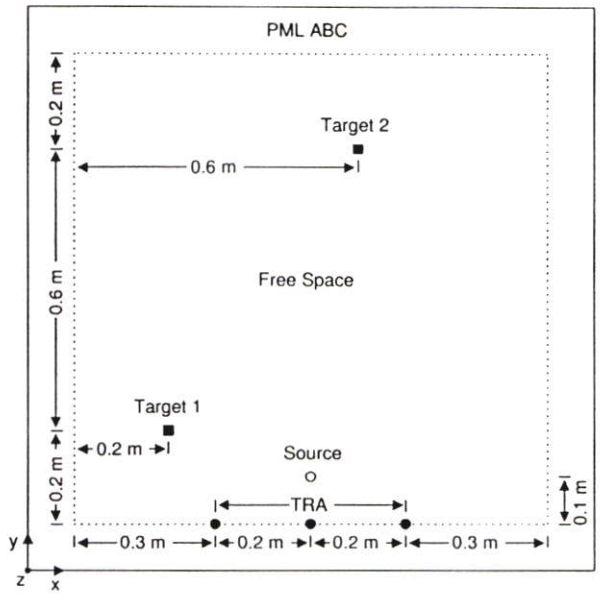


Fig.1: Simulation Model.

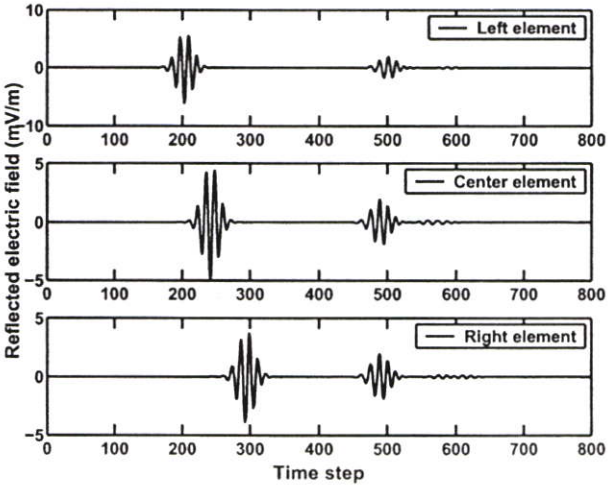


Fig.2: The reflected electric fields which are recorded by the elements of TRA.

3. NUMERICAL SIMULATION RESULTS

The simulation model is done in free space medium with two targets as shown is Fig. 1. There are three transceivers as the TR array (TRA) and one point source. Both targets are the perfect conductor.

Subsequently, the 2-D TM mode of FDTD simulation is used to model this structure. The cell sizes in x and y directions are $\Delta x = \Delta y = 0.005$ m. The PML ABC with 16 layers is used to reduce the reflection error at the edges of the simulation boundaries. The dimension of total lattice is 272 × 272 cells. The time interval of each time step is

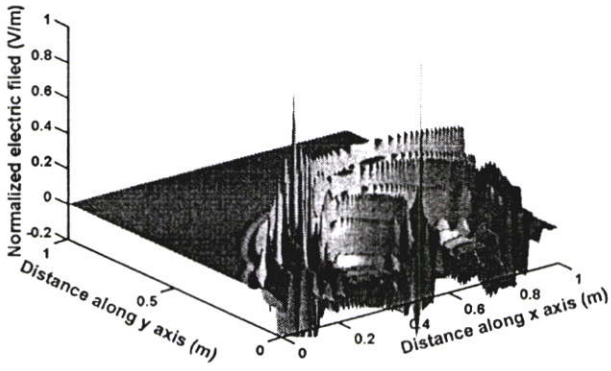


Fig.3: Spatial distribution of normalized electric field focuses to target 1.

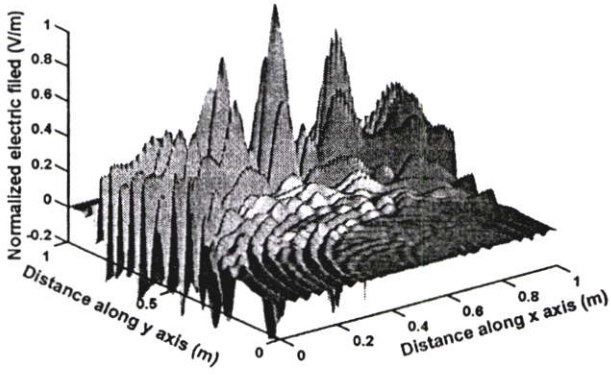


Fig.4: Spatial distribution of normalized electric field focuses to target 2.

$\Delta t = 11.79$ ps which is satisfied the numerical stability condition. The total time steps of this simulation is $n = 800$. For the UWB EM wave excitation, the parameters of modulated Gaussian pulse are $f_c = 6.85$ GHz, $d = 0.20$ ns, $A = 1.00$ ns, and $n_0 = 50$.

First, the UWB EM wave source is excited by using the 2-D TM mode of conventional FDTD algorithm. The UWB EM wave propagates to each target and reflects back to the TRA. Then, each element of TRA is recorded the reflected UWB EM waves, and the directed UWB EM wave from source is eliminated. The UWB EM waves, which are recorded by the elements of TRA, are shown in Fig 2. We can clearly see that there are two significant reflected pulses. First pulse is reflect from target 1 and second pulse is reflect from target 2.

Next, the reflected UWB EM waves of each target is sep-

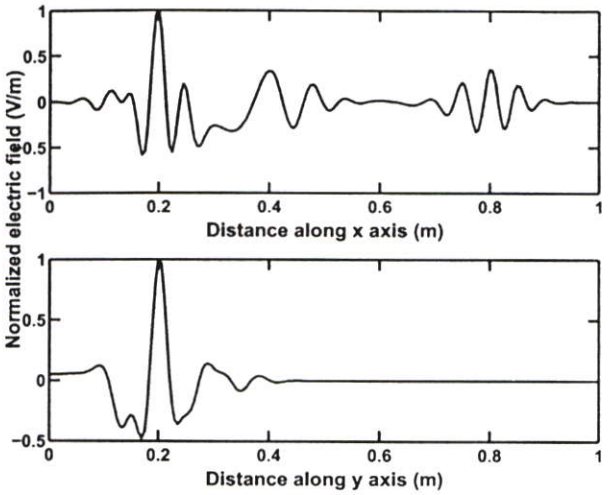


Fig.5: Directivity of normalized electric field focuses to target 1.

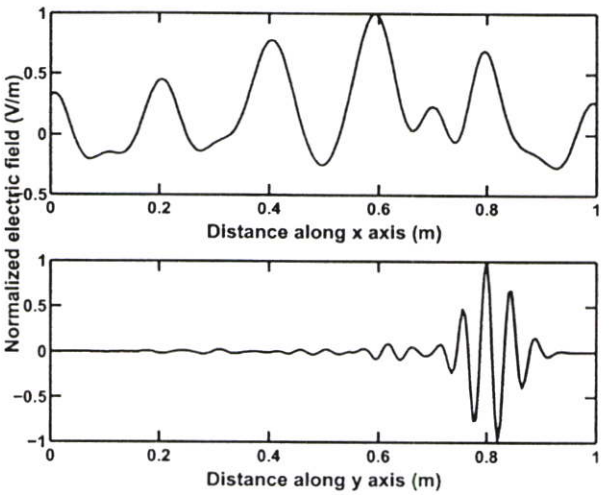


Fig.6: Directivity of normalized electric field focuses to target 2.

arated and performed the TR algorithm. The TR EM wave of each TRA element is transmitted by using the 2-D TM mode of TR FDTD algorithm. The TR EM waves focus back to targets 1 and 2. Figure 3 and 4 show the spatial distribution of normalized electric fields focus to targets 1 and 2, respectively. The electric fields are normalized by the maximum electric fields in computational domain. From the figures, the maximum electric fields are at the positions of targets 1 and 2, respectively.

The directivities of normalized electric fields focus to targets 1 and 2 are shown in Figs. 5 and 6, respectively. The focused position of target 1 is at $x = y = 0.200$ m, which is no error occurred. The focused position of target 2 is $x = 0.595$ m and $y = 0.800$ m. There is small error (that is 0.005 m) occurred along the x axis. That because the target position is far from the TRA.

4. CONCLUSION

In this paper, the focusing resolution of UWB EM waves produced by TR algorithm is studied. The study is done via numerical simulation of FDTD method. From the results, we can see that the TR FDTD method is simple and has high focusing resolution. Therefore, this algorithm has the great promise for the UWB image system. The detail of numerical error depended on target position and the improvement by increasing the elements of TRA are investigated in the future work.

5. REFERENCES

[1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.

[2] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.

[3] M. Soumekh, "Depth-Focused Interior Echo Imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol 8, no. 11, pp. 1608-1618, Nov. 1999.

[4] L. J. Busse, "Three-Dimensional Imaging Using a Frequency Domain Synthetic Aperture Focsing Technique," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol 39, no. 2, pp. 174-179, March 1992.

[5] M. Li, W. Guan and P. Li, "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique with Applications in High-Frequency Ultrasond Imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol 51, no. 1, pp. 63-70, Jan. 2004.

[6] S. D. Silverstein, "A Robust Auto-Focusing Algorithm for Medical Ultrasound: Consistent Phase References from Scaled Cross-Correlation Functions," *IEEE Signal Processing Letters*, vol 8, no. 6, pp. 177-179, June. 2001.

[7] M. E. Yavuz and F. L. Teixeira, "A Numerical Study of Time-Reversed UWB Electromagnetic Wave in Continuous Random Media," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol 4, pp. 43-46, 2005.

[8] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.

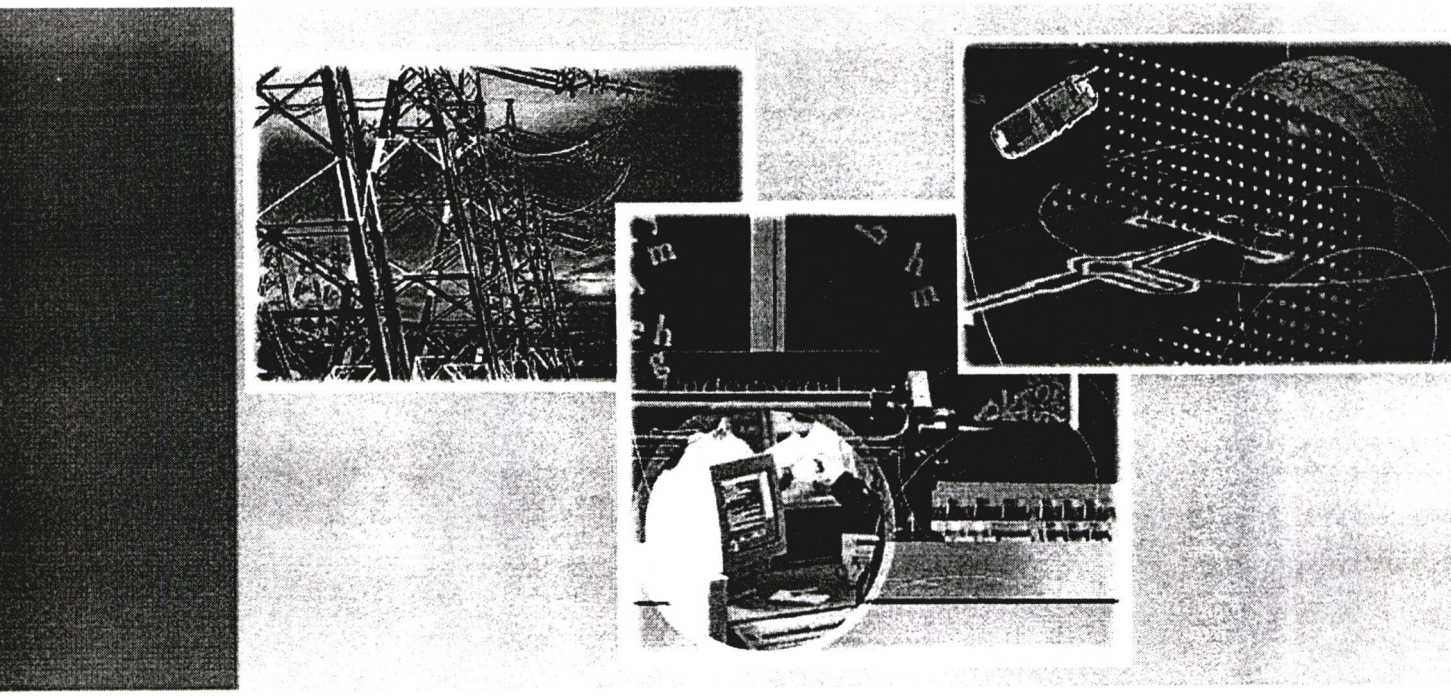
[9] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1995.

[10] R. Sorrentino, L. Roselli and P. Mezzanotte, "Time Reversal in Finite Difference Time Domain Method," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol 3, no. 11, pp. 402-404, Nov. 1993.

[11] C. A. BAlanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley, 1989.

[12] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using The Time-Dependent Maxwell's Equation," *IEEE Transections on Microwave Theory and Techniques*, vol. 23, pp. 623-630, 1975.

[13] J. Berenger, "A Perfectly Matched Layer for The Absorption of Electromagnetic Wave," *Journal on Comptattional Physics*, vol. 14, pp. 185-200, 1994.

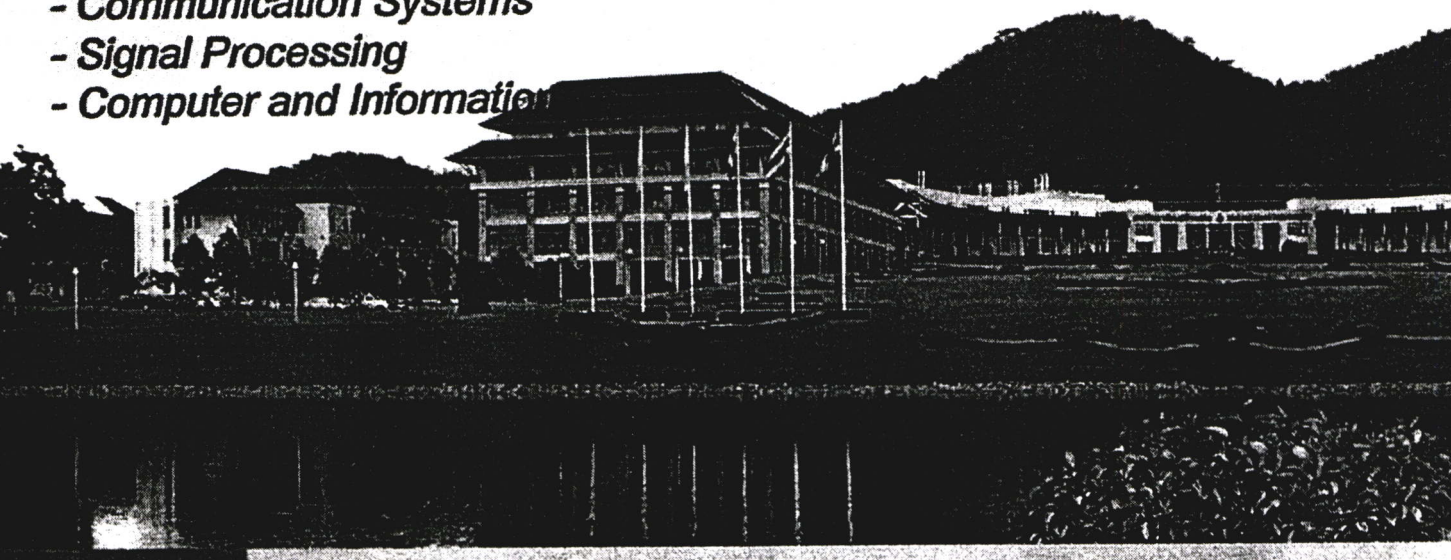


ECTI-CON 2007

Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand
May 9-12, 2007

VOLUME 1
- *Circuits and Systems*
- *Control Engineering*
- *Electrical Power Engineering*
- *Other Related Fields*

VOLUME 2
- *Communication Systems*
- *Signal Processing*
- *Computer and Information*



ECTI Association · IEEE THAILAND SECTION · NECTEC a member of NSTDA · WD Western Digital

Accuracy Analysis of Focusing Resolution with TR EM Pulse Propagation for UWB Imaging Systems

Tanaporn Payommai*, Pichaya Supanakoon*,†, Sathaporn Promwong*,†, Nikorn Sukutamtanti* and Jun-ichi Takada‡
*Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
†Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabung, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: {s8061065,kspichay,kpsathap,ksnikorn}@kmitl.ac.th
‡Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1-S6-4, O-okayama, Meguro-ku, 152-8550, Tokyo, Japan
E-mail: takada@ide.titech.ac.jp

***Abstract*— The focusing resolution is very important performance for ultra wideband (UWB) imaging system. In this paper, the accuracy of focusing resolution with time-reversal (TR) electromagnetic (EM) pulse propagation is analyzed. The TR EM pulse propagation is done via the numerical simulation of finite difference time domain (FDTD) method. The modulated Gaussian pulse is used as the UWB EM pulse. The directional error of focusing resolution at specific locations is shown. The results are discussed in the conclusion.**

I. Introduction

Recently, ultra wideband (UWB) radio technology based on the transmission of short duration pulses has gained much interest because of its low cost and low power consumption potentials [1]-[3]. Federal Communications Commission (FCC) [4] defined the UWB signal as those, which have a fractional bandwidth equal or greater than 0.20, or occupied bandwidth equal or greater than 500 MHz. The fractional and occupied bandwidth are defined as

$$\text{Fractional bandwidth} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L}, \quad (1)$$

$$\text{Occupied bandwidth} = f_H - f_L, \quad (2)$$

where f_L and f_H are the lowest and highest frequencies at the -10 dB point, respectively.

The FCC established different technical standards and operating restrictions for three types of UWB devices based on their potential to cause interference. These three types of UWB devices are 1) imaging systems, 2) vehicular radar systems and 3) communications and measurement systems. The applications of UWB imaging systems include ground penetrating radar (GPR), wall, through-wall, surveillance and medical imaging systems. Furthermore, the UWB imaging systems are designated as three classes, which are low-frequency, mid-frequency and high-frequency imaging systems. The FCC spectral masks of these UWB imaging systems are shown in Fig. 1. In this paper, we focus on only high-frequency imaging system.

The focusing resolution is important performance of imaging system. There are many focusing techniques for imaging

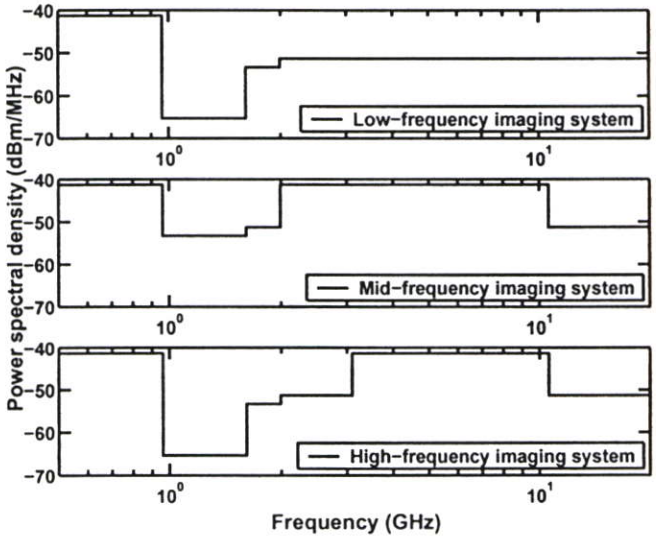


Fig. 1. FCC Spectral masks of UWB imaging systems [4]

systems, such as depth-focused echo imaging [5], aperture focusing technique [6], [7] and auto-focusing algorithm [8]. The time reversal (TR) algorithm is widely used for UWB imaging system because its simplicity and high focusing resolution [9]. This TR algorithm can be directly performed by using the FDTD method [10], [11]. The use of FDTD method for TR is purposed in [12]. Although, the focusing resolution of TM ER pulse propagation is proposed [13], there is no considered about its accuracy.

In this paper, the accuracy of focusing resolution with TR electromagnetic (EM) pulse propagation is analyzed. The TR EM pulse propagation is done via the numerical simulation of two-dimensional (2-D) transverse magnetic (TM) mode finite difference time domain (FDTD) method. The modulated Gaussian pulse is used as the UWB EM pulse. The directional error of focusing resolution at specific locations is shown. The results are discussed in the conclusion.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2, the FDTD method used in this paper is described. Next, the results of accuracy analysis are demonstrated in Sec. 3. Finally, the conclusions are discussed in Sec. 4.

II. FDTD METHOD

A. Conventional FDTD Algorithm

The 2-D TM mode finite difference equations are directly derived from Maxwell's curl equations in time domain. Maxwell's curl equation can be written as [14]

$$\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}, \tag{3}$$

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H}, \tag{4}$$

where H is the magnetic field, E is the electric field, μ is the magnetic permeability and ε is the electric permittivity.

To obtain discrete approximation of the continuous partial differential equations, the centered difference approximation is used on both the time and space first-order partial differences. The entire computation domain is the collection of all the unit cells. The dimensions of the unit cell along x and y directions are Δx and Δy, respectively. The node with subscript indices i and j corresponds to node number in x and y directions. The time step is indicated with the superscript index n. The time interval of each time step is Δt. After simple arrangement, the 2-D TM mode of finite difference equations are described as [10], [11]

$$H_x|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_x|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} - E_z|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right), \tag{5}$$

$$H_y|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_y|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right), \tag{6}$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1} = C_a|_{i,j} E_z|_{i,j}^{n} + C_b|_{i,j}\left(\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right), \tag{7}$$

with the electric field updating coefficients at node (i,j) are given by

$$C_a|_{i,j} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right), \tag{8}$$

$$C_b|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right), \tag{9}$$

where the parameter σ is the electric conductivity.

B. TR FDTD Algorithm

To reversing the time direction, the time sequence of conventional FDTD algorithm is reversed. The EM waves, E^n and $H^{n-1/2}$, are computed form $H^{n+1/2}$ and E^n, respectively. Therefore, the 2-D TM mode of time reversal FDTD can be written as [12]

$$E_z|_{i,j}^{n} = C_a|_{i,j} E_z|_{i,j}^{n+1} - C_b|_{i,j}\left(\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right), \tag{10}$$

$$H_y|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = H_y|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right), \tag{11}$$

$$H_x|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = H_x|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} - E_z|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right), \tag{12}$$

C. Numerical Stability Condition

The maximum time step is limited by the stability restriction of the finite difference equation. The numerical stability condition of 2-D FDTD is specified as [15]

$$\Delta t \le \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}}, \tag{13}$$

where c is the velocity of light in free space.

In this paper, the magic time step condition is used to obtain the minimum numerical error. The magic time step condition is defined as

$$\Delta t = \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}}. \tag{14}$$

D. Excitation of UWB EM Wave

The modulated Gaussian pulse is used as the UWB EM wave excitation V_S. The expression of this pulse is

$$V_S|^n = Ae^{-[(n-n_0)\Delta t/d]^2}\sin[2\pi f_c(n-n_0)\Delta t], \tag{15}$$

where A is the maximum amplitude of the envelope signal, f_c is the carrier frequency, d is the $1/e$ characteristic decay time and n_0 is the delayed time step.

E. PML ABC Treatment

The tangential field components on the four mesh walls must be specified in such a way that outgoing waves are not reflected. The FDTD simulation in this paper uses the perfectly matched layer adsorbing boundary condition (PML ABC) [16]. The PML ABC can effectively absorb propagation wave by using nonphysical lossy media adjacent to the outer-grid boundaries backed by perfectly conducting walls. The field components are

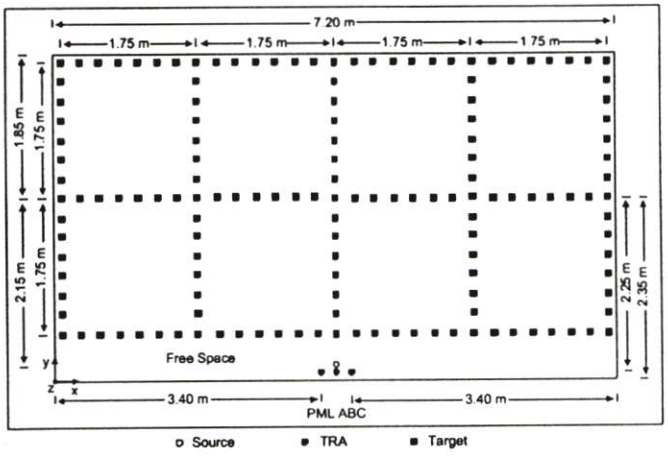


Fig. 2. Dimensions of simulation model and locations of target

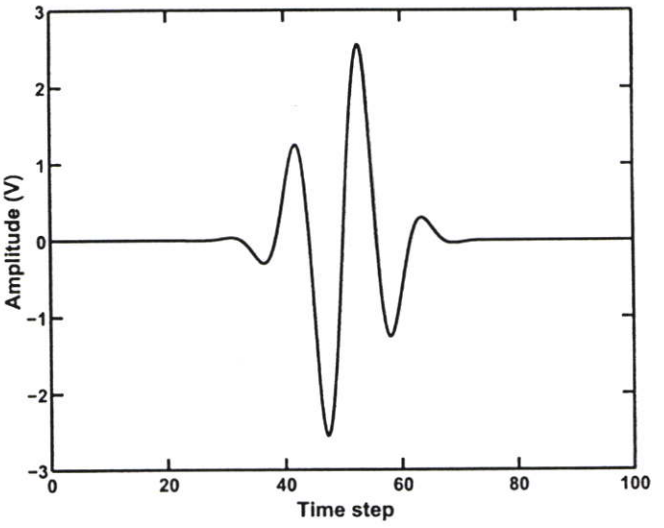


Fig. 3. Time domain waveform of UWB EM wave excitation.

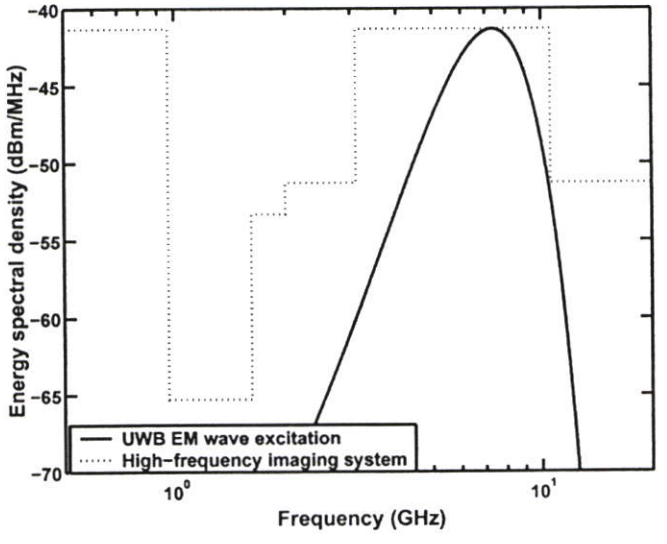


Fig. 4. Energy spectral density of UWB EM wave excitation compared with FCC spectral mask of high-frequency imaging system.

split into two subcomponents. The electric and magnetic losses, σ_e and σ_h, inside the PML medium are specified by satisfying the PML impedance-matching condition

$$\frac{\sigma_e}{\varepsilon} = \frac{\sigma_h}{\mu}. \tag{16}$$

After the specification of electric and magnetic losses, EM waves inside the PML medium is rapidly attenuated. The explicit exponentially difference field-updating equations [11] are used to replace the conventional FDTD algorithm.

The electric loss inside the PML legion is assumed to increase with depth from zero at $\rho = 0$ to a maximum value of σ_{max} at $\rho = \delta$ by the quadratic ramping

$$\sigma_e(\rho) = \sigma_{max}\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^2, \tag{17}$$

where σ_{max} is chosen to bound the PML reflection coefficient. The PML reflection coefficient at normal incident has the following expression,

$$R(0) = e^{-2\sigma_{max}\delta/(3\varepsilon c)}. \tag{18}$$

III. Accuracy Analysis Results

The simulation model is done in free space medium with three transceivers as the TR array (TRA) and one source point. The accuracy of focusing resolution is analyzed along both horizontal and vertical axes. The dimensions of simulation model and locations of targets are shown in Fig. 2. All targets are perfect conductors and the increment of each target location along the horizontal and vertical axes is 0.25 m.

Subsequently, the 2-D TM mode of FDTD simulation is used to model this structure. The cell sizes in x and y directions are $\Delta x = \Delta y = 0.005$ m. The PML ABC with 16 layers is used to reduce the reflection error at the edges of the simulation boundaries. The dimension of total lattice is $872 \times 1,472$ cells. The time interval of each time step is $\Delta t = 11.79$ ps which is satisfied the numerical stability condition. The total time steps of this simulation is $n = 2,500$. For the UWB EM wave excitation, the parameters of modulated Gaussian pulse are $f_c = 7.34$ GHz, $d = 0.11$ ns, $A = 2.79$ V, and $n_0 = 50$. The time domain waveform of UWB EM wave excitation and its energy spectral density are shown in Figs. 3 and 4, respectively. This waveform is well satisfied the FCC spectral mask of high-frequency imaging system.

First, the UWB EM wave source is excited by using the 2-D TM mode of conventional FDTD algorithm. The UWB EM wave propagates to each target and reflects back to the TRA. Then, each element of TRA is recorded the reflected UWB EM waves, and the directed UWB EM wave from source is eliminated. Next, the reflected UWB EM wave of each target is separated and performed the TR algorithm. The TR EM wave of each TRA element is transmitted by using the 2-D TM mode of TR FDTD algorithm. The TR EM waves focus back to each

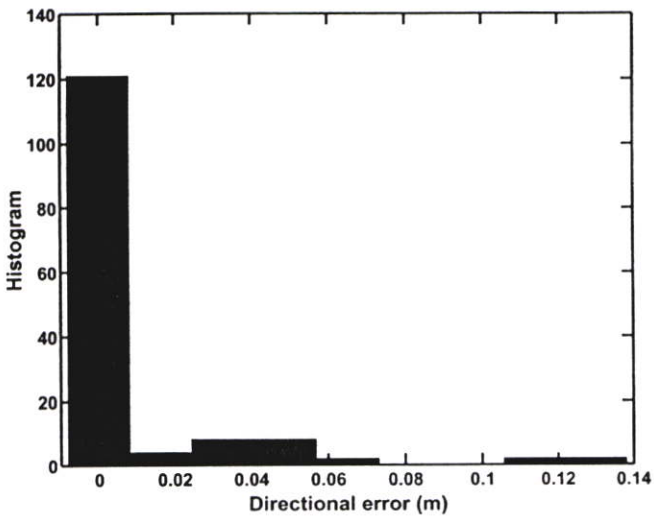


Fig. 5. Histogram of directional error.

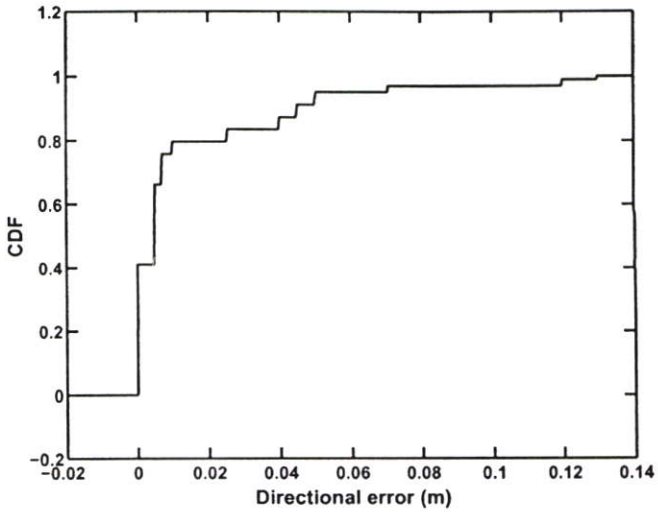


Fig. 6. CDF of directional error.

target. The accuracy of focusing resolution is considered in the terms of directional error.

The directional error e indicates the resolution accuracy of TR EM waves that focus back to the target and it can be written as

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}, \tag{19}$$

where e_x and e_y are the directional error of TR EM waves that focus back to the target along the x and y directions, respectively.

The histogram and cumulative distribution function (CDF) of directional error are shown in Figs. 5 and 6 respectively. There are 26 error targets from all 147 targets, which is about 17.69 %. All directional errors are less than 0.13 m. The mean and standard deviation of directional error are only 0.01 m and 0.02 m, respectively.

IV. Conclusion

In this paper, the accuracy of focusing resolution with TR EM pulse propagation is analyzed. The TR EM pulse propagation is done via the numerical simulation of FDTD method. The directional error of all target is evaluated. The histogram and CDF of directional error are shown. From the result, there are error targets about 17.69 %. The average and standard deviation of directional error are 0.01 m and 0.02 m, respectively. In future work, the improvement of directional error by increasing the elements of TRA is investigated.

References

[1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.

[2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Important RF Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.

[3] K. Siwiak, "Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.

[4] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.

[5] M. Soumekh, "Depth-Focused Interior Echo Imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol 8, no. 11, pp. 1608-1618, Nov. 1999.

[6] L. J. Busse, "Three-Dimensional Imaging Using a Frequency Domain Synthetic Aperture Focsing Technique," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol 39, no. 2, pp. 174-179, March 1992.

[7] M. Li, W. Guan and P. Li, "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique with Applications in High-Frequency Ultrasond Imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol 51, no. 1, pp. 63-70, Jan. 2004.

[8] S. D. Silverstein, "A Robust Auto-Focusing Algorithm for Medical Ultrasound: Consistent Phase References from Scaled Cross-Correlation Functions," *IEEE Signal Processing Letters*, vol 8, no. 6, pp. 177-179, June. 2001.

[9] M. E. Yavuz and F. L. Teixeira, "A Numerical Study of Time-Reversed UWB Electromagnetic Wave in Continuous Random Media," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol 4, pp. 43-46, 2005.

[10] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.

[11] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1995.

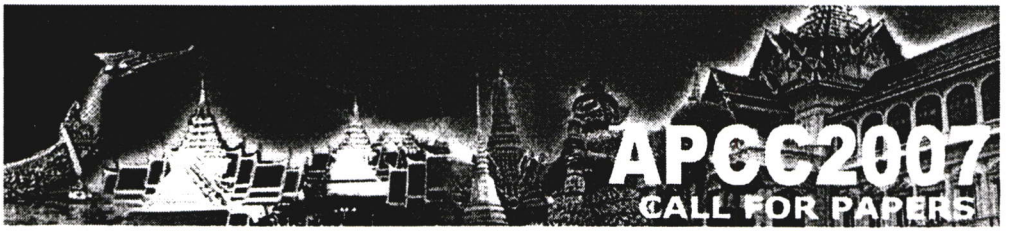
[12] R. Sorrentino, L. Roselli and P. Mezzanotte, "Time Reversal in Finite Difference Time Domain Method," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol 3, no. 11, pp. 402-404, Nov. 1993.

[13] P. Supanakoon, T. Payommai, S. Promwong, P. Sithiyopasukul and J. Takada, "Study on Focusing Resolution of Time-Reversed Ultra Wideband Electromagnetic Waves by Using Finite Difference Time Domain Method," *The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006)*, no. 1, pp 289-292, 10-13 July 2006.

[14] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley, 1989.

[15] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using The Time-Dependent Maxwell's Equation," *IEEE Transections on Microwave Theory and Techniques*, vol. 23, pp. 623-630, 1975.

[16] J. Berenger, "A Perfectly Matched Layer for The Absorption of Electromagnetic Wave," *Journal on Comptattional Physics*, vol. 14, pp. 185-200, 1994.



2007 Asia-Pacific Conference on Communications
Bangkok, Thailand

www.apcc2007.com

Venue: Grand Mercure Fortune Hotel, Bangkok, Thailand
Date: October 18-20, 2007
Organized by ECTI Assoication

Since its inauguration in 1993. the APCC has become a flagship international conference on the telecommunications in the Asia-Pacific region. The APCC 2007 provides a technical forum for researchers and engineers from Asia-Pacific region and other parts of the world to interact and disseminate information on the latest developments in advanced communication technologies and services.

Organizing Committee

General Chair:
Sawasd Tantaratana (SIIT)

Technical Program Co-Chairs:
Apinunt Thanachayanont (KMITL)
Tiparatana Wongcharoen (BU)

Publications Co-Chairs:
Theerayod Wiangtong (MUT)
Natthaphob Nimpitiwan (BU)

Exhibition Co-Chairs:
Apisak Worapishet (MUT)
Pinit Kumhom (KMUTT)
Keattisak Sripimanwat (NECTEC)

Publicity Co-Chairs:
Chalie Charoenlarpnopparut (SIIT)
Phanumas Khumsat (PSU)
Wipawee Hattagam (SUT)
Kosin Chamnogthai (KMUTT)

Finance Co-Chairs :
Banlue Srisuchinwong (SIIT)
Rujipan Sampanna (BU)

Local Arrangement Co-Chairs:
Supakorn Siddhichai (NECTEC)
Nisachon Tangsangiumvisai (Chula)
Yongyuth Permpoontanalarp (KMUTT)

General Secretaries:
Phaophak Sirisuk (MUT)
Phongsak Keeratiwintakorn (KMITNB)

Important Dates

Submission of papers:
May 15, 2007

Notification of acceptance:
June 30, 2007

Camera-ready papers due:
July 30, 2007

Registration deadline:
September 14, 2007

Conference starts:
October 18, 2007

Suggested Topics

Prospective authors of APCC 2007 are invited to submit papers describing original work in any of but not limited to, the following suggested topics.

- **ATM technologies**
- **Access and home networks**
- **Active and programmable networks**
- **Voice & video communications**
- **Antennas and propagations**
- **Broadcasting technologies**
- **Coding and modulations**
- **Computer communications**
- **Communication electronics**
- **Communication signal processing**
- **Communication theory**
- **Embedded systems**
- **EMC/EMI**
- **High-density and ad-hoc networks**
- **High-performance Internet**
- **Human interfaces**
- **IPV6**
- **Information security**
- **Intelligent network**
- **Intelligent transport systems**
- **Internet applications and technologies**
- **LAN and MAN technologies**
- **MPLS and multi-protocol network**
- **Mobile communication**
- **Multimedia communications**
- **Network middleware**
- **Network and service management**
- **Network Security**
- **Optical communications**
- **Photonic network technologies**
- **Power-line Communications**
- **Quality assurance management**
- **RF technologies**
- **Satellite and space communications**
- **Signal, speech and image processing**
- **Switching and routing technologies**
- **Teletraffic management and control**
- **Voice over packet (VoIP, VoATM)**
- **WIFI and WiMAX**
- **Wireless Internet**
- **Wireless systems and technologies**
- **Next Generation Network**

Submission

The program committee solicits papers describing original research in communications, including but not limited to the areas of interest indicated above. All papers should be submitted electronically as PDF files, according to the IEEE Xplore standards.

The papers will be published in the conference proceedings. For the publication of an accepted paper, registration of at least one of the authors is requested. Authors are expected to present their papers at the conference.

Format requirements :

Submitted full papers should be no more than 4 pages.

Each submission must be accompanied by the following information :

a short abstract

a complete list of authors and their affiliations

e-mail addresses

the topic(s) to which the paper pertains.

Submissions must be made via the conference at http://www.apcc2007.com/submission/index.php.

ECTI Association
IEEE THAILAND SECTION
NECTEC a member of NSTDA
IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY THAILAND CHAPTER
IEEE CAS Society Thailand Chapter
IEEE MTT/AP/ED THAILAND CHAPTER
IEEE Thailand Chapter

Accuracy Improvement of Focusing Resolution for Ultra Wideband Imaging Systems

Tanaporn Payommai*, Pichaya Supanakoon*,†, Sathaporn Promwong*,† and Nikorn Sukutamtanti*

*Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
†Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabung, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: {s8061065,kspichay,kpsathap,ksnikorn}@kmitl.ac.th

***Abstract*— The focusing resolution is very important performance for ultra wideband (UWB) imaging systems. In this paper, the accuracy of focusing resolution is improved for UWB imaging systems. The time-reversal (TR) electromagnetic (EM) pulse propagation is done via the numerical simulation of finite difference time domain (FDTD) method. The modulated Gaussian pulse is used as the UWB EM pulse. The accuracy is improved by increasing the elements of TR array (TRA). The directional error of each case is shown and investigated. From the results, we clearly see that the increasing of TRA elements can be improved the accuracy of focusing resolution.**

I. Introduction

Recently, ultra wideband (UWB) radio technology based on the transmission of short duration pulses has gained much interest because of its low cost and low power consumption potentials [1]-[3]. Federal Communications Commission (FCC) [4] defined the UWB signal as those, which have a fractional bandwidth equal or greater than 0.20, or occupied bandwidth equal or greater than 500 MHz. The fractional and occupied bandwidth are defined as

$$\text{Fractional bandwidth} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L}, \quad (1)$$

$$\text{Occupied bandwidth} = f_H - f_L, \quad (2)$$

where f_L and f_H are the lowest and highest frequencies at the -10 dB point, respectively.

The FCC established different technical standards and operating restrictions for three types of UWB devices based on their potential to cause interference. These three types of UWB devices are 1) imaging systems, 2) vehicular radar systems and 3) communications and measurement systems. The applications of UWB imaging systems include ground penetrating radar (GPR), wall, through-wall, surveillance and medical imaging systems. Furthermore, the UWB imaging systems are designated as three classes, which are low-frequency, mid-frequency and high-frequency imaging systems. In this paper, we focus on only high-frequency imaging systems. The FCC spectral mask of high-frequency UWB imaging systems is shown in Fig. 1.

The focusing resolution is important performance of imaging system. There are many focusing techniques for imaging systems, such as depth-focused echo imaging [5], aperture focusing technique [6], [7] and auto-focusing algorithm [8]. The time reversal (TR) algorithm is widely used for UWB imaging system because its simplicity and high focusing resolution [9]. This TR algorithm can be directly performed by using the finite difference time domain (FDTD) method [10], [11]. The use of FDTD method for TR is purposed in [12]. The focusing resolution of TR electromagnetic (EM) pulse propagation for UWB imaging sysgems is studied [13]. After that, its accuracy is analyzed in the term of directional error [14].

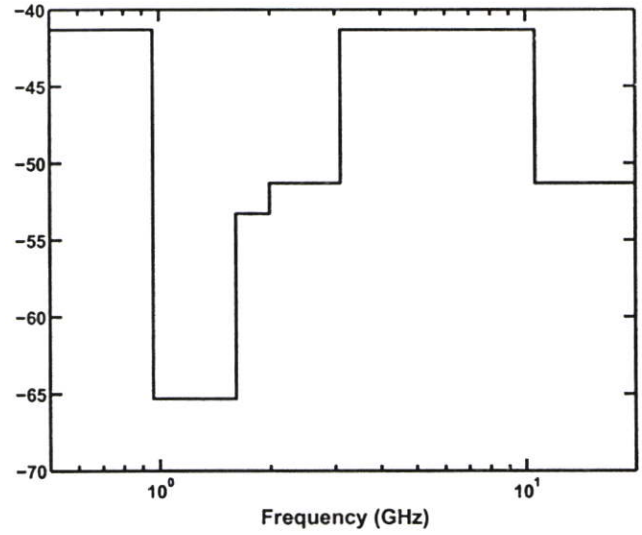


Fig. 1. FCC spectral mask of high-frequency UWB imaging systems [4]

In this paper, the accuracy of focusing resolution is improved for UWB imaging systems. The TR EM pulse propagation is done via the numerical simulation of FDTD method. The modulated Gaussian pulse specified FCC spectral mask of high-frequency UWB imaging system is used as the transmitted UWB EM pulse. The accuracy is improved by increasing the elements of TR array (TRA). The TRA elements of 3, 5 and 7 are considered. The directional error of each case is shown and investigated. From the results, we clearly see that the increasing of TRA elements can be improved the accuracy of focusing resolution.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2, the FDTD method used in this paper is described. Next, the results of accuracy improvement are demonstrated in Sec. 3. Finally, the conclusions are discussed in Sec. 4.

II. FDTD METHOD

A. Conventional FDTD Algorithm

The 2-dimensional (2-D) transverse magnetic (TM) mode finite difference equations are directly derived from Maxwell's curl equations in time domain. Maxwell's curl equation can be written as [15]

$$\mu\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} = -\nabla\times\vec{E}, \tag{3}$$

$$\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = \nabla\times\vec{H}, \tag{4}$$

where H is the magnetic field, E is the electric field, μ is the magnetic permeability and ε is the electric permittivity.

To obtain discrete approximation of the continuous partial differential equations, the centered difference approximation is used on both the time and space first-order partial differences. The entire computation domain is the collection of all the unit cells. The dimensions of the unit cell along x and y directions are Δx and Δy, respectively. The node with subscript indices i and j corresponds to node number in x and y directions. The time step is indicated with the superscript index n. The time interval of each time step is Δt. After simple arrangement, the 2-D TM mode of finite difference equations are described as [10], [11]

$$H_x|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_x|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} - E_z|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right), \tag{5}$$

$$H_y|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_y|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right), \tag{6}$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1} = C_{\mathrm{a}}|_{i,j}E_z|_{i,j}^{n} + C_{\mathrm{b}}|_{i,j}\left(\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right), \tag{7}$$

with the electric field updating coefficients at node (i,j) are given by

$$C_{\mathrm{a}}|_{i,j} = \left(1-\frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right)\Big/\left(1+\frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right), \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{b}}|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}}\right)\Big/\left(1+\frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right), \tag{9}$$

where the parameter σ is the electric conductivity.

B. TR FDTD Algorithm

To reversing the time direction, the time sequence of conventional FDTD algorithm is reversed. The EM waves, E^n and $H^{n-1/2}$, are computed form $H^{n+1/2}$ and E^n, respectively. Therefore, the 2-D TM mode of time reversal FDTD can be written as [12]

$$E_z|_{i,j}^{n} = C_{\mathrm{a}}|_{i,j}E_z|_{i,j}^{n+1} - C_{\mathrm{b}}|_{i,j}\left(\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right), \tag{10}$$

$$H_y|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = H_y|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right), \tag{11}$$

$$H_x|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = H_x|_{i,j}^{n+1/2} - \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} - E_z|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right), \tag{12}$$

C. Numerical Stability Condition

The maximum time step is limited by the stability restriction of the finite difference equation. The numerical stability condition of 2-D FDTD is specified as [16]

$$\Delta t \le \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}}}, \tag{13}$$

where c is the velocity of light in free space.

D. Excitation of UWB EM Wave

The modulated Gaussian pulse is used as the UWB EM wave excitation V_{S}. The expression of this pulse is

$$V_{\mathrm{S}}|^{n} = Ae^{-[(n-n_0)\Delta t/d]^2}\sin[2\pi f_{\mathrm{c}}(n-n_0)\Delta t], \tag{14}$$

where A is the maximum amplitude of the envelope signal, f_{c} is the carrier frequency, d is the $1/e$ characteristic decay time and n_0 is the delayed time step.

E. PML ABC Treatment

The tangential field components on the four mesh walls must be specified in such a way that outgoing waves are not reflected. The FDTD simulation in this paper uses the perfectly matched layer adsorbing boundary condition (PML ABC) [17]. The PML ABC can effectively absorb propagation wave by using nonphysical lossy media adjacent to the outer-grid boundaries backed by perfectly conducting walls. The field components are split into two subcomponents. The electric and magnetic losses, σ_{e} and σ_{h}, inside the PML medium are specified by satisfying the PML impedance-matching condition

$$\frac{\sigma_{\mathrm{e}}}{\varepsilon} = \frac{\sigma_{\mathrm{h}}}{\mu}. \tag{15}$$

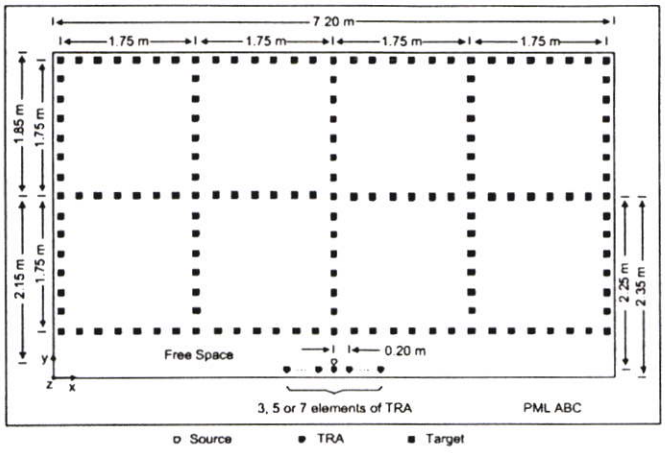


Fig. 2. Dimensions of simulation model and locations of target

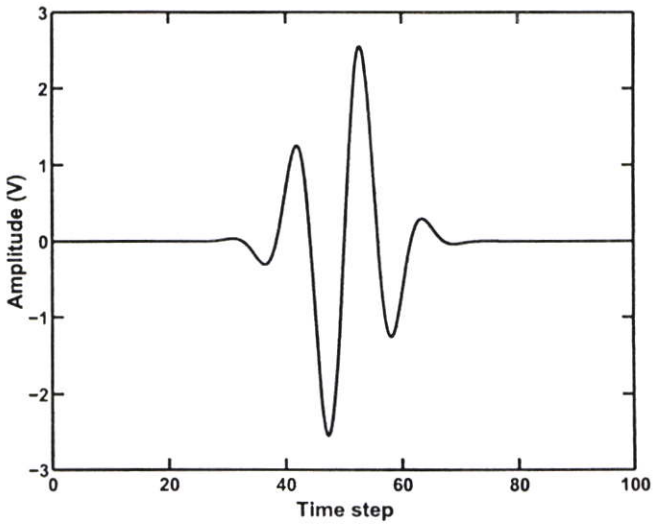


Fig. 3. Time domain waveform of UWB EM wave excitation.

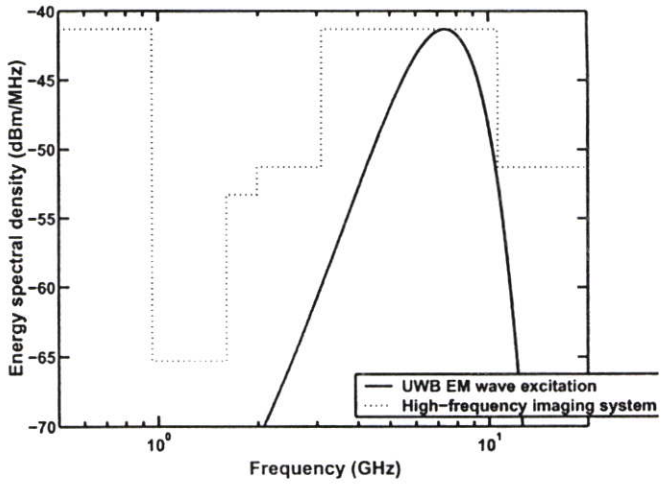


Fig. 4. Energy spectral density of UWB EM wave excitation compared with FCC spectral mask of high-frequency imaging system.

III. Accuracy Improvement Results

The simulation model is done in free space medium with one source point. The 3, 5 and 7 elements of TRA are considered to improve the accuracy. The increment of each TRA element along horizontal axes is 0.2 m. The accuracy of focusing resolution is analyzed along both horizontal and vertical axes. The dimensions of simulation model and locations of targets are shown in Fig. 2. All targets are perfect conductors and the increment of each target location along the horizontal and vertical axes is 0.25 m.

Subsequently, the 2-D TM mode of FDTD simulation is used to model this structure. The cell sizes in x and y directions are $\Delta x = \Delta y = 0.005$ m. The PML ABC with 16 layers is used to reduce the reflection error at the edges of the simulation boundaries. The dimension of total lattice is $872 \times 1,472$ cells. The time interval of each time step is $\Delta t = 11.79$ ps which is satisfied the numerical stability condition. The total time steps of this simulation is $N = 2,500$. For the UWB EM wave excitation, the parameters of modulated Gaussian pulse are $f_c = 7.34$ GHz, $d = 0.11$ ns, $A = 2.79$ V, and $n_0 = 50$. The time domain waveform of UWB EM wave excitation and its energy spectral density are shown in Figs. 3 and 4, respectively. This waveform is well satisfied the FCC spectral mask of high-frequency imaging system.

First, the UWB EM wave source is excited by using the 2-D TM mode of conventional FDTD algorithm. The UWB EM wave propagates to each target and reflects back to the TRA. Then, each element of TRA is recorded the reflected UWB EM waves, and the directed UWB EM wave from source is eliminated. Next, the reflected UWB EM wave of each target is separated and performed the TR algorithm. The TR EM wave of each TRA element is transmitted by using the 2-D TM mode of TR FDTD algorithm. The TR EM waves focus back to each target. The accuracy of focusing resolution is considered in the terms of directional error.

The directional error e indicates the resolution accuracy of TR EM waves that focus back to the target and it can be written as

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}, \tag{16}$$

where e_x and e_y are the directional error of TR EM waves that focus back to the target along the x and y directions, respectively.

The histograms and cumulative distribution functions (CDFs) of directional error are shown in Figs. 5 and 6, respectively. There are 26, 13 and 1 error targets from all 147 targets, which are about 17.69 %, 8.84 % and 0.68 % for 3, 5 and 7 elements of TRA, respectively. The means and standard deviations of directional error for 3, 5 and 7 elements of TRA are listed in Table 1.

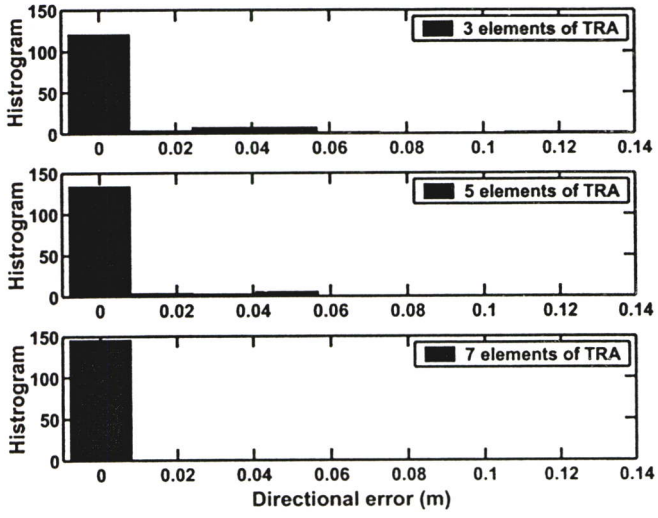


Fig. 5. Histograms of directional error.

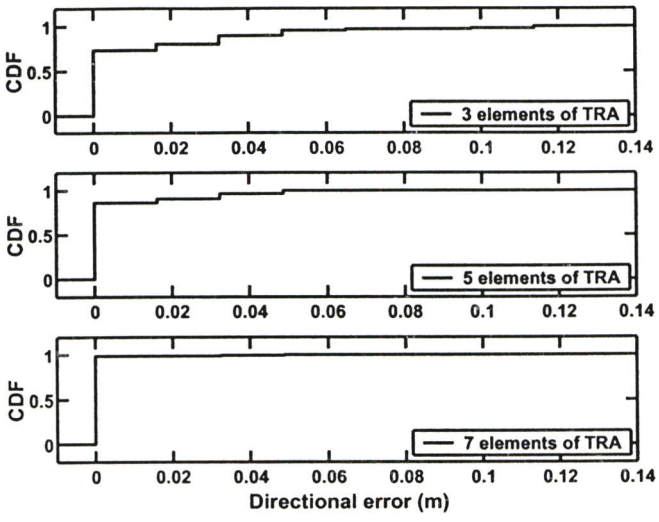


Fig. 6. CDFs of directional error.

TABLE I

MEANS AND STANDARD DEVIATIONS OF DIRECTIONAL ERROR.

	Mean (m)	Standard deviation (m)
3 elements of TRA	0.0104	0.0242
5 elements of TRA	0.0035	0.0108
7 elements of TRA	0.0007	0.0043

IV. CONCLUSION

In this paper, the accuracy of focusing resolution is improved. The TR EM pulse propagation is done via the numerical simulation of FDTD method. The directional error of all target is evaluated. The histograms and CDFs of directional error are shown. From the result, the error targets, mean and standard deviation of directional error are decreased, when increasing the elements of TRA. Therefore, the increasing of TRA elements can be improved the accuracy of focusing resolution for UWB imaging systems. In future work, the space distance between each element of TRA is investigated.

REFERENCES

[1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.

[2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Important RF Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.

[3] K. Siwiak, "Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.

[4] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.

[5] M. Soumekh, "Depth-Focused Interior Echo Imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol 8, no. 11, pp. 1608-1618, Nov. 1999.

[6] L. J. Busse, "Three-Dimensional Imaging Using a Frequency Domain Synthetic Aperture Focsing Technique," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol 39, no. 2, pp. 174-179, March 1992.

[7] M. Li, W. Guan and P. Li, "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique with Applications in High-Frequency Ultrasond Imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol 51, no. 1, pp. 63-70, Jan. 2004.

[8] S. D. Silverstein, "A Robust Auto-Focusing Algorithm for Medical Ultrasound: Consistent Phase References from Scaled Cross-Correlation Functions," *IEEE Signal Processing Letters*, vol 8, no. 6, pp. 177-179, June. 2001.

[9] M. E. Yavuz and F. L. Teixeira, "A Numerical Study of Time-Reversed UWB Electromagnetic Wave in Continuous Random Media," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol 4, pp. 43-46, 2005.

[10] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.

[11] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1995.

[12] R. Sorrentino, L. Roselli and P. Mezzanotte, "Time Reversal in Finite Difference Time Domain Method," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol 3, no. 11, pp. 402-404, Nov. 1993.

[13] P. Supanakoon, T. Payommai, S. Promwong, P. Sithiyopasukul and J. Takada, "Study on Focusing Resolution of Time-Reversed Ultra Wideband Electromagnetic Waves by Using Finite Difference Time Domain Method," *The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006)*, no. 1, pp 289-292, 10-13 July 2006.

[14] T. Payommai, P. Supanakoon, S. Promwong, N. Sukutamtanti and J. Takada, "Accuracy Analysis of Focusing Resolution with TR EM Pulse Propagation for UWB Imaging Systems," *The 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2007)*, no. 2, pp 919-922, 9-12 May 2007.

[15] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley, 1989.

[16] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using The Time-Dependent Maxwell's Equation," *IEEE Transections on Microwave Theory and Techniques*, vol. 23, pp. 623-630, 1975.

[17] J. Berenger, "A Perfectly Matched Layer for The Absorption of Electromagnetic Wave," *Journal on Comptattional Physics*, vol. 14, pp. 185-200, 1994.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวธนพร พยอมใหม่
วัน เดือน ปีเกิด	5 กรกฎาคม 2525
ที่อยู่	271/1 ถ.เดชอุดม อ.เมือง ต.ในเมือง จ.นครราชสีมา 30000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2548	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง