

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางการมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณ  
อัตราไวน์แบนด์แบบมีเส้นสายตา



นางสาวอิสริยา ไทยเนียม

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

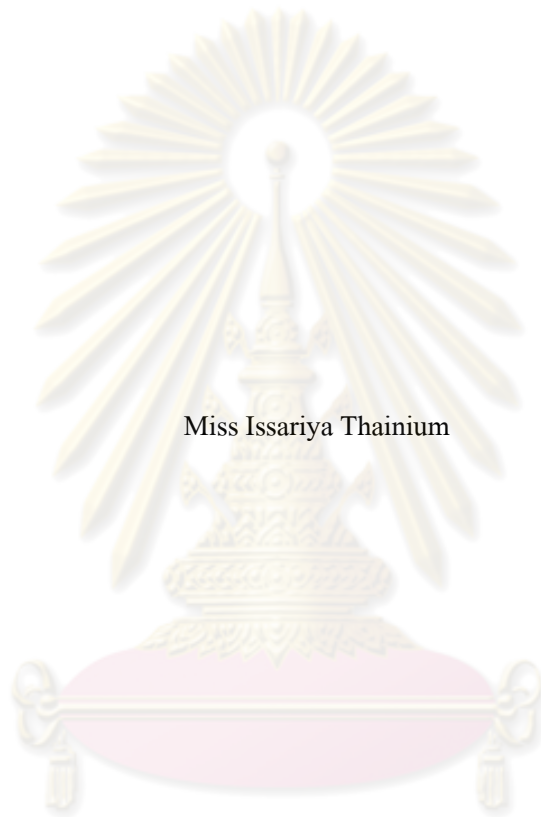
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARATIVE STUDY OF DIRECTION OF ARRIVAL ALGORITHMS FOR LINE-OF-  
SIGHT ULTRAWIDEBAND CHANNELS



Miss Issariya Thainium

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทาง  
มาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัตราไบนารีแบบ  
แบบมีเส้นสายตา

โดย

นางสาวอิสริยา ไทยเนียม


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ)

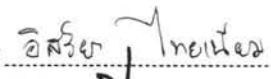

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย วุฒิสัทธาภิบาล)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ชัยรัตน์ พงศ์พันธุ์ภาณี)

อิสริยา ไทยเนียม : การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์แบบมีเส้นสายตา (A COMPARATIVE STUDY OF DIRECTION OF ARRIVAL ALGORITHMS FOR LINE-OF-SIGHT ULTRA WIDEBAND CHANNELS) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ประสิทธิ์ ทิมพุดิ, 69 หน้า

อัลตราไวน์แบนด์เป็นการสื่อสารไร้สายระยะสั้นด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นความสามารถด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ นอกจากนี้การสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการค้นหาวัตถุ โดยมีความสามารถในการอ่านตำแหน่งของวัตถุด้วยความแม่นยำในระดับเซนติเมตร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์แบบมีเส้นสายตา โดยทำการศึกษาอัลกอริทึมของวิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณเพื่อการหาทิศทางของสัญญาณ (Multiple signal classification) เปรียบเทียบกับวิธีคาปอน ซึ่งจะทำการหาทิศทางของสัญญาณที่มาถึงของสถานีเคลื่อนที่ด้วยการสื่อสารคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง โดยทำการศึกษาเฉพาะกรณีในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Model) เป็นแบบการสื่อสารทิศทางตรง (Line of sight : LOS) โดยมีข้อแม้ว่า ในการประมวลผลแต่ละครั้ง จำนวนสายสัญญาณของสถานีฐานจะต้องมีจำนวนมากกว่าจำนวนสถานีเคลื่อนที่ที่ต้องการระบุตำแหน่ง ซึ่งวิธีนี้สามารถระบุตำแหน่งของได้อย่างถูกต้องและแม่นยำสูง โดยจะนำสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศมาประมวลค่าสหสัมพันธ์แล้วทำการแยกสัญญาณรบกวนออก ต่อจากนั้นก็ประมวลค่าทิศทางโดยพิจารณาจากทิศทางที่มีกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังได้นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีคาปอน (Capon Angle of Arrival)

Department : วิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า  
Field of Study : วิศวกรรมไฟฟ้า  
Academic Year : 2552

Student's Signature :   
Advisor's Signature :   
Co-Advisor's Signature : .....



## 4870722821 : MAJOR Electrical Engineering

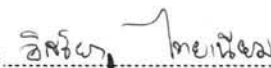

KEYWORDS : Ultra-Wideband / Positioning / MUSIC

ISSARIYA THAINIUM: A COMPARATIVE STUDY OF DIRECTION OF ARRIVAL  
ALGORITHMS FOR LINE-OF-SIGHT ULTRAWIDEBAND CHANNELS. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. PRASIT TEEKAPUT, 69 pp.

Ultra-Wideband technology has been around for so many years and has been used for a wide variety of applications is strong evidence of the viability and flexibility of the technology. Ultra-wideband is a radio technology that can be used at very low energy levels for short-range high-bandwidth communications by using a large portion of the radio spectrum. Ultra-Wideband communications systems have many traditional applications in radar imaging, target sensor data collection, precision locating and tracking applications and it has many attractive properties, including low-interference to and from other wireless systems, low-sensitivity to fading, easier-wall and floor penetration and inherent security. This thesis proposed a comparative study of direction of arrival algorithms for line-of-sight ultrawideband channels that study multiple signal classification algorithm and CAPON AOA algorithm. These methods will classify noise out of received signals at antenna and choose signal that have maximum power that contains angle data and transform angle from polar form to rectangular form. The result from Multiple Signal Classification algorithms has accuracy of direction of arrival better than Capon Angle of Arrival (Capon AOA) algorithm.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Electrical Engineering.....	Student's Signature 
Field of Study : Electrical Engineering.....	Advisor's Signature 
Academic Year : 2009.....	Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุดิ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีมาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ และอาจารย์ ดร.ชัชรัต พงศ์พันธุ์ภาณี ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดมา

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ส่งเสริมสนับสนุนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยวิทยุแถบความถี่กว้าง.....	5
2.1 พื้นฐานเทคนิคการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง.....	6
2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์.....	9
2.3 มาตรฐานสัญญาณวิทยุแถบความถี่กว้าง.....	10
2.4 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องส่งและเครื่องรับอัลตราไวน์แบนด์.....	13
2.5 คุณลักษณะเด่นของสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์.....	13
2.6 แอปพลิเคชันต่างๆของเทคโนโลยีอัลตราไวน์แบนด์.....	16
3 แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์.....	18
3.1 ความกว้างช่องสัญญาณ.....	18
3.2 เทคนิคการประมาณช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์.....	18
3.2.1 การประมาณช่องสัญญาณทางความถี่.....	19
3.2.2 การประมาณช่องสัญญาณทางเวลา.....	23

บทที่	หน้า
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์.....	27
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจำลองลักษณะของช่องสัญญาณ.....	28
3.4.1 แบบจำลองช่องสัญญาณซาล์-วาเลนซูเอล่า.....	30
3.4.2 แบบจำลองมัลติพาทอื่น.....	34
4 การระบุตำแหน่ง.....	35
4.1 Direct Calculation Method.....	36
4.2 Optimization Based Method.....	39
4.2.1 Objective Function.....	39
4.2.2 Gauss-Newton Method.....	40
5 การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ.....	43
5.1 ปัญหาการประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณ.....	43
5.2 วิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple Signal Classification) หรือ MUSIC.....	45
5.3 วิธีจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple Signal Classification) หรือ MUSIC ในทางปฏิบัติ.....	48
5.4 การประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณแบบคาปอน (Capon).....	50
6 ผลการทดลองการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึม MUSIC และ CAPON.....	52
6.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วย อัลกอริทึม MUSIC และ CAPON.....	52
6.2 ผลการทดลองศึกษาจำนวนเสาอากาศที่มีผลต่อความแม่นยำในการประมาณค่า ทิศทางของสัญญาณด้วยอัลกอริทึม MUSIC.....	61
6.3 ผลการทดลองศึกษาค่าความยาวคลื่นที่มีผลต่อความแม่นยำในการประมาณค่า ทิศทางของสัญญาณด้วยอัลกอริทึม MUSIC.....	63
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	65
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
รายการอ้างอิง.....	67
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	69



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แบบจำลอง SV .....33
6.1	ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ 4 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON.....55
6.2	ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของ สัญญาณ 4 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON.....55
6.3	ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ 8 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON.....58
6.4	ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการประมาณค่าทิศทางของ สัญญาณ 8 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON.....59

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.1	Vector Network Analyzer-based frequency domain channel sounding system.....20
3.2	การทำคอนจูเกตซีโรแพคคิงและผลตอบสนองอิมพัลซ์.....22
3.3	การทำคอนจูเกตด้วยซีโรแพคคิงและผลตอบสนองอิมพัลซ์.....23
3.4	Impulse Sounder.....24
3.5	Radio channel sounding system based on direct sequence spread spectrum technique.....27
3.6	การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย.....28
3.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสัญญาณไร้สาย.....29
4.1	รูปตัวอย่างสถานการณ์การระบุตำแหน่ง.....36
4.2	การซิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้กับสถานีฐาน.....45
5.1	การจัดวางสายอากาศแถวลำดับ (antenna array) ของสถานีฐาน.....43
5.2	กราฟแสดงค่าไอเกนแวลูร์ในอุดมคติและค่าไอเกนแวลูร์จากการประมาณค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์.....49
6.1	กราฟตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 4 สัญญาณ.....53
6.2	ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี CAPON โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 4 สัญญาณ.....54
6.3	ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 8 สัญญาณ.....56
6.4	ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี CAPON โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 8 สัญญาณ.....57
6.5	กราฟเปรียบเทียบแสดงค่า Root mean square ของความผิดพลาดในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC และ CAPON.....59
6.6	กราฟเปรียบเทียบแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC และ CAPON.....60

รูปที่	หน้า
6.7	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วย วิธี MUSIC เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเสาอากาศ.....62
6.8	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วย วิธี MUSIC เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น..... 64



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตและขั้นตอนของการศึกษาและวิธีดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ รวมทั้งลำดับเนื้อหาในบทถัดไป เพื่อให้เห็นภาพรวมของการศึกษาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานเริ่มมีสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน หรือการเชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อความบันเทิงภายในแหล่งที่พักอาศัย โดยมีเทคโนโลยีไร้สายที่นิยมใช้เพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย ไว-ไฟ (Wi-Fi) บลูทูธ (Bluetooth) และเทคโนโลยีคลื่นสั้น (Short-length) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันได้เกิดกระแสความสนใจในวงกว้างเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ซึ่งคาดว่าจะเข้ามาเปลี่ยนแปลงระบบการสื่อสารข้อมูลครั้งใหญ่ ด้วยความสามารถที่เหนือกว่าเทคโนโลยีเดิมอย่าง ไว-ไฟ (Wi-Fi) และบลูทูธ (Bluetooth) อย่างเห็นได้ชัด

ภายในเวลา 20 ปี เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการทำเรดาร์ ตัวเซนเซอร์ และการสื่อสารในทางทหาร อย่างไรก็ตาม ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมการบริหารความถี่ของสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission : FCC) ได้อนุญาตให้ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ภายใต้กำลังส่งที่จำกัด สำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ของอุปกรณ์ทั่วไปและยังได้รับการวางตำแหน่งในฐานะเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประสิทธิภาพของคลื่นความถี่ได้คุ้มค่าที่สุด ซึ่งได้อนุญาตให้ใช้ในช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยไม่จำเป็นต้องขอใบอนุญาต

เหตุที่เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ถูกดึงเข้ามาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการสื่อสาร เพราะ

- เป็นระบบที่ช่วงความถี่คลื่นมีขนาดใหญ่มาก หมายความว่า เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) สามารถที่จะส่งข้อมูลในอัตราระดับพันล้านบิตต่อวินาที (Gigabit per second)

- ระดับพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารต่ำมากถ้าช่วงความถี่คลื่นที่ 7.5 GHz ถูกนำมาใช้งานพลังงานที่สูงที่สุดสำหรับตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) จะใช้พลังงานเพียงประมาณ 0.5 มิลลิวัตต์เท่านั้น

จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ถูกเริ่มผลักดันให้ใช้ในการสื่อสารภายในห้อง (Indoor Communication) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลในอัตราความเร็วที่สูงๆ สำหรับการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication) เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ก็ถูกนำมาใช้เช่นกัน โดยความเร็วจะอยู่ที่ 100 Mbps - 3 Gbps ในระยะทาง 1-10 เมตร แต่สำหรับระยะที่มากกว่า 20 เมตร อัตราการส่งข้อมูลจะต่ำลงอย่างเห็นชัด ดังนั้นข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) จะมีความสามารถในการส่งข้อมูลอัตราเร็วที่สูงมากในระยะทางสั้น แต่กลับมีอัตราเร็วต่ำลงมากเมื่อระยะทางมากขึ้น

เนื่องจากเป็นคลื่นสัญญาณที่สั้นมากทางโดเมนเวลา (Time Domain) ทำให้ระบบสัญญาณชนิดนี้กลายเป็นระบบที่สามารถนำมารวมกันในด้านการศึกษาติดต่อสื่อสาร (Communications) และการระบุตำแหน่ง (Positioning) จากคุณสมบัติของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ดังกล่าว จึงมีความสนใจในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตรา ไวน์แบนด์แบบมีเส้นสายตา ระหว่างอัลกอริทึมการแยกแยะสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และ อัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm)



## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาหลักการของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ทั้งวิธีการที่ใช้ในด้านการสื่อสาร และการประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณ (Direction of arrival)
- 2) การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางการมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวนด์แบนด์แบบมีเส้นสายตา ระหว่างอัลกอริทึมการแยกแยะสัญญาณหลายสัญญาณและอัลกอริทึมแบบคาปอน

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางการมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวนด์แบนด์แบบมีเส้นสายตา นั่นคือ ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบอัลกอริทึมในการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยอัลกอริทึมการแยกแยะสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และ อัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm) โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึมทั้งสองในการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ

การศึกษามีจะดำเนินไปตามขั้นตอนหลักต่อไปนี้

- 1) ศึกษามาตรฐานและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างและการระบุตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ภายในอาคาร
- 2) ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB
- 3) ทำการทดสอบโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบผลการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณด้วยอัลกอริทึมการแยกแยะสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และ อัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm)
- 5) สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) ได้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ทั้งพื้นฐานเบื้องต้นและความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ
- 2) สามารถทำการประมาณค่าการมาถึงของสัญญาณหลายสัญญาณ
- 3) ได้ข้อสรุปเชิงเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และ อัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm)
- 4) สามารถนำโปรแกรมที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้
- 5) สามารถนำไปขยายผลการวิจัยในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานให้กว้างขึ้นได้

### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะนำเสนอในแต่ละบทเรียงลำดับดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology)

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-Wideband channel model)

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีการระบุตำแหน่ง

บทที่ 5 เป็นการประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ โดยนำเสนออัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และอัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm)

บทที่ 6 เป็นผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบการประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ด้วยอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และอัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm)

บทที่ 7 บทสรุปและคำเสนอแนะ

## บทที่ 2

### เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง

#### (Ultra-Wideband Technology)

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) เป็นการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลแบบพัลส์สั้นๆ (Short pulse) ผ่านคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง ซึ่งต่างจากการส่งผ่านข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุแถบความถี่แคบ (Narrowband) และการส่งผ่านข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุความถี่แบบแผ่สเปกตรัม (Spread-Spectrum) เช่น บลูทูธ (Bluetooth) และ ไว-ไฟ (Wi-Fi) ซึ่งทำให้สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าในระยะเวลาที่เท่ากัน เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตร และความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร และได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a โดยมีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการบริหารความถี่ของสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission : FCC) อยู่ที่ 3.1 – 10.0 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับการสื่อสารผ่านดาวเทียม ทั้งนี้ การกำหนดความถี่ในย่านดังกล่าวจะช่วยป้องกันปัญหาการรบกวนของสัญญาณวิทยุกับเทคโนโลยีสื่อสารภาคพื้นอื่นๆ ที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ด้วยความเร็วในระดับดังกล่าว เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทความบันเทิงภายในบ้าน (Home Entertainment) โดยตัวอย่างที่เราจะเห็นได้จากอนาคตอันใกล้ก็คือ การที่โทรทัศน์สามารถส่งรายการไปยังหน้าจอโทรทัศน์เครื่องอื่นๆ ได้แบบไร้สายโดยไม่มีปัญหาการกระตุกของสัญญาณภาพ และการเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนภาพจากกล้องวิดีโอไปยังคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย รวมถึงการใช้งานภายในสำนักงานเทคโนโลยีนี้ก็สามารถเข้ามาช่วยลดความยุ่งยากในการติดตั้งสายเคเบิลต่างๆ ได้เป็นอย่างมาก คุณลักษณะเด่นสำคัญของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) คือ เนื่องจากใช้สัญญาณพัลส์วิทยุที่มีช่วงความถี่กว้างของพัลส์แคบมากทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก และมีความจุช่องสัญญาณมาก ซึ่งส่งผลให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมากได้ในระยะทางสั้นๆ แต่กลับใช้พลังงานในระดับต่ำเพียง 0.0001 มิลลิวัตต์ต่อเมกะเฮิรตซ์ และด้วยคุณสมบัติของสัญญาณคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณคลื่นพาห้ดังเช่นในการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ จึงทนทานต่อการถูกรบกวนจากสัญญาณ มีความสามารถในการนำมาใช้ในการวัดความ

แตกต่างของระยะทางได้อย่างแม่นยำ เครื่องรับส่งสัญญาณมีความซับซ้อนต่ำ ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารเชิงพาณิชย์โดยเฉพาะกับระบบการสื่อสารไร้สาย นอกจากนี้ภายในระยะทาง 10 เมตร เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ยังสนับสนุนการสร้างพื้นที่โครงข่ายส่วนบุคคลที่เรียกว่า Personal Area Network (PAN) ซึ่งช่วยให้เราสามารถจัดการข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ที่เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างหลากหลาย นอกเหนือจากคุณสมบัติข้างต้นแล้ว เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ยังได้รับการวางตำแหน่งในฐานะเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประสิทธิภาพของคลื่นความถี่ได้คุ้มค่าที่สุด และตั้งความหวังไว้ว่าเทคโนโลยีนี้จะเข้ามาช่วยลดปัญหาความขาดแคลนของช่องสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากการแบ่งสรรช่วงความถี่ในปัจจุบัน จะมีการกำหนดความถี่คลื่นสูงสุดและต่ำสุด และยังคงต้องมีคลื่นความถี่อีกช่วงหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันไม่ให้คลื่นในแต่ละย่านความถี่รบกวนซึ่งกันและกัน ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ทุกครั้งที่มีการจัดสรรย่านความถี่ใหม่ ก็จะมีช่วงความถี่ที่ต้องสูญเสียไปมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีดังกล่าวเคยถูกห้ามนำมาใช้งานในช่วงระยะเวลาหนึ่ง อันเนื่องมาจากในช่วงแรกเทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อการใช้งานในหน่วยงานทางทหารของสหรัฐอเมริกา รวมถึงความกังวลอันเนื่องมาจากความถี่ของสัญญาณคลื่นแถบความถี่กว้างที่แตกต่างจากความถี่วิทยุทั่วไป ซึ่งได้ส่งผลให้หลายฝ่ายกังวลว่า การสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) จะไปรบกวนระบบสื่อสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อย่างระบบการค้นหาพิศัดโลก (Global Positioning System : GPS) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และระบบการบิน เป็นต้น

## 2.1 พื้นฐานเทคนิคการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง

พื้นฐานเทคนิคการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) มีความแตกต่างจากเทคนิคที่ใช้ในการสื่อสารประเภทอื่น โดยการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นั้นใช้สัญญาณพัลส์วิทยุที่มีช่วงความถี่ของพัลส์แคบมากในการส่งและรับสัญญาณซึ่งทำให้สัญญาณที่ส่งมีความถี่ของแถบสัญญาณ (Bandwidth) กว้างมาก ส่งผลให้มีความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก และทนทานต่อการถูกสัญญาณกวนหรือแจมมิง (Jamming)

พื้นฐานการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นั้นมีการทดลองใช้งานครั้งแรกมาตั้งแต่ยุคแรกเริ่มของการสื่อสารไร้สาย โดยในปี ค.ศ. 1901 (พ.ศ. 2444)



มาโคนี (Guglielmo Marconi) ได้ทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อใช้สื่อสารด้วยรหัสมอร์ส (Morse code) ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณหรือ สปาร์กแกป (spark gap generator) ซึ่งทำงานโดยวงจรซึ่งทำให้เกิดแรงดันสูงมากระหว่างช่องว่างของตัวนำสัญญาณซึ่งเรียกว่าช่องว่างการสปาร์ก (spark gap) ทำให้อากาศบริเวณนั้นแตกตัวและกระแสไฟฟ้าสามารถเดินทางผ่านอากาศได้ซึ่งเรียกว่ากระแสสปาร์ก และทำให้เกิดสัญญาณคลื่นวิทยุในลักษณะของพัลส์เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลตัวอักษรในการสื่อสาร ซึ่งเป็นพื้นฐานเทคนิคการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology)

หลังจากนั้นเครื่องส่งสัญญาณที่ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณพัลส์ก็ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในงานด้านการทหารซึ่งการใช้งานโดยทั่วไปจะถูกใช้งานสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารด้วยเรดาร์ (Radar) ซึ่งทำให้สามารถแสดงภาพของวัตถุที่ถูกบดบังด้วยการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีลักษณะเป็นพัลส์ทะลุผ่านอุปสรรคกีดขวางได้เช่น เรดาร์ทะลุพื้นดินหรือจีพีอาร์ (Ground Penetration Radar: GPR) จนกระทั่งเทคโนโลยีทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ก้าวหน้าทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสื่อสารเชิงพาณิชย์โดยเฉพาะในระบบสื่อสารไร้สาย อันเนื่องมาจากความสามารถในการส่งข้อมูลได้เป็นปริมาณมากเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลแบบสื่อประสม (Multimedia communications) ซึ่งต้องการอัตราการส่งข้อมูลสูง มีการใช้พลังงานต่ำและมีราคาต่ำ รวมทั้งการนำไปใช้ในการหาตำแหน่งวัตถุที่มีความแม่นยำสูงและทนทานต่อสัญญาณรบกวน

การสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ (Narrow band communications) ซึ่งนิยมใช้ในการสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (Global System for Mobile communication: GSM) ระบบเครือข่ายเฉพาะที่ไร้สายหรือแลนไร้สาย (Wireless LAN: WLAN) นั้นใช้เทคนิคการผสมสัญญาณของรูปคลื่นสัญญาณวิทยุที่มีความต่อเนื่อง ทางเวลากับสัญญาณคลื่นพาห่ที่มีความถี่ที่กำหนดเพื่อใช้ในการส่งและรับสัญญาณ ทำให้พลังงานของสัญญาณถูกรวมอยู่ในช่วงแถบความถี่ (Bandwidth) แคบๆ ซึ่งสามารถถูกรบกวนและถูกตรวจจับสัญญาณได้ง่าย สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง (Wideband Communication) นั้นจะใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก โดยอยู่ในระดับนาโนวินาที (nanosecond : ns.) หรือที่ระดับพิโควินาที (picoseconds : ps.) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse signal) โดยเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ในการส่งและรับสัญญาณนั้น ไม่ใช้คลื่นพาห่



(Carrierless) ส่วนการผสมสัญญาณเหมือนในกรณีของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ (Narrow band communications) แต่จะเป็นการส่งสัญญาณที่มีรูปคลื่นของพัลส์ที่มีรูปคลื่นซึ่งไม่ต่อเนื่องในทางเวลาด้วยอัตราการส่งพัลส์ในระดับจำนวนหลายร้อยล้านพัลส์ต่อหนึ่งวินาทีในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ “อัลตราไวด์แบนด์” (Ultra-Wideband) อัลตราไวด์แบนด์มิได้ถูกจำกัดเฉพาะกับสัญญาณในรูปแบบอิมพัลส์ที่ครอบคลุมความถี่ช่วงเวลาที่กว้างมากเท่านั้น เทคนิคอัลตราไวด์แบนด์ยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบแถบความถี่เดี่ยว (Single-band approach) และแบบหลายแถบความถี่ (Multiband approach) รวมทั้งใช้เรียกเทคนิคการใช้คลื่นพาห่อย่อยที่ไม่รบกวนกันจำนวนมากในการผสมสัญญาณหรือมอดูเลชัน (Modulation) แบบที่เรียกว่ามัลติแบนด์โอเอฟดีเอ็ม (Multiband OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ซึ่งเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ครอบคลุมการใช้ความถี่เป็นแถบกว้างมาก โดยประยุกต์ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงเช่นเดียวกัน อัลตราไวด์แบนด์แบบอิมพัลส์ (Impulse) และมัลติแบนด์โอเอฟดีเอ็ม (Multiband OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ได้รับการพิจารณาเพื่อนำไปใช้สำหรับมาตรฐานเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) ของกลุ่มความร่วมมือไวมีเดีย (WiMedia Alliance) โดยใช้เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์เชื่อมต่อในรูปแบบยูเอสบีความเร็วสูงไร้สาย (High Speed Wireless Universal Serial Bus (USB) interface)

ตัวส่งสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) จะสร้างพัลส์ TD (time domain) ที่สั้นมาก ซึ่งสามารถแพร่หรือส่งผ่านไปได้อย่างไม่ต้องผสมสัญญาณความถี่วิทยุ (radio frequency) เข้าไปด้วย การผสมสัญญาณความถี่วิทยุนั้นทำได้โดยการนำสัญญาณเบสแบนด์ (baseband signal) นิดเข้าไปยังตัวพาหะนำความถี่หรือแปลงตัวสัญญาณเบสแบนด์ (baseband signal) ให้อยู่ในรูป FD (frequency domain) แต่สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) นั้นจะใช้ความถี่ของสัญญาณตัวเองเป็นคลื่นพาหะ สัญญาณสามารถเคลื่อนที่ได้ดีโดยไม่ต้องการอุปกรณ์ใช้เพิ่มเติม เช่น ตัวแปลงสัญญาณ FDM หรือแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) ซึ่งหมายความว่าสัญญาณ อัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) สามารถที่จะขจัดความซับซ้อนของระบบออกไปได้จึงสามารถลดต้นทุนด้วย เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานสเปกตรัม (Spectrum) ต่ำของสัญญาณที่ส่ง สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) จะทำตัวเหมือนสัญญาณรบกวนซึ่งสามารถตรวจจับได้ยาก จึงเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่เหมาะสมในการนำมาใช้ประยุกต์กับอุปกรณ์ทางการแพทย์ อีกทั้งยังไม่ทำตัวเป็นคลื่นรบกวนต่อสัญญาณวิทยุอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์การรบกวนระหว่างพัลส์ของอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) และคลื่นวิทยุยังเป็นที่ยกเถียงกันอยู่ ระบบ TM (time modulation) ยังสามารถที่จะรองรับการส่งข้อมูลในอัตราที่สูงถึงหลายร้อย Mbps เนื่องจากแบนด์วิดท์ที่ขนาดใหญ่ของสัญญาณสามารถทำให้

รองรับสัญญาณความถี่ที่มีจำนวนมหาศาลได้ และ พัลส์ที่มี TD ที่สั้นมากหมายความว่าสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) จะให้ค่าความแม่นยำทางเวลาที่ดีกว่าจีพีเอส (Global Positioning System : GPS) ซึ่งสามารถระบุพิกัดตำแหน่งได้แม่นยำกว่า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการช่วยเหลือบุคคลเมื่อเราไม่รู้ตำแหน่งที่แน่ชัด และสามารถใช้ในการสำรวจได้อีกด้วย

จากแบนด์วิดท์ขนาด 7.5 GHz จะได้ค่าของคาบเวลาเป็น 133 ps ดังนั้นเมื่อพัลส์เดินทางจากแหล่งกำเนิดถึงจุดอ้างอิงนั้นจะใช้เวลาภายใน 133 ps เท่านั้น จากเวลาดังกล่าวนั้นทำให้เราระบุค่าพิกัดได้ละเอียดไม่ผิดพลาดเกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งหากเป็นระบบที่ดีที่สุดในปัจจุบันนั้นจะมีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 500 MHz ซึ่งจะระบุพิกัดได้ผิดพลาดไม่เกิน 60 เซนติเมตร ซึ่งจะเห็นว่าอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) นั้นสามารถระบุพิกัดได้ละเอียดกว่ามาก

สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) นิยามเป็นครั้งแรกโดยถ้า  $B_f$  มีค่าสูงกว่า 0.25 ให้เรียกว่าสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) [2]

จากอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ 
$$B_f = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L}$$
 โดยที่  $f_L$  เป็นจุดที่ต่ำกว่าและ  $f_H$  เป็นเป็นจุดที่สูงกว่า -3dB ในสเปกตรัม ปัจจุบัน FCC(Federal Communications Commission) ได้นิยามสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) ขึ้นใหม่โดยใช้สมการเดิมโดยให้ขอบเขตของ  $B_f$  มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.2 และต้องมีแบนด์วิดท์อย่างน้อย 500MHz โดยที่  $f_L$  เป็นจุดที่ต่ำกว่าและ  $f_H$  เป็นจุดที่สูงกว่า -10dB จากเดิม -3dB

ดังนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) จึงได้เป็นที่สนใจและเริ่มมีการค้นคว้ากันแพร่หลายอันเนื่องมาจากระบบที่ไม่ซับซ้อน ราคาต่ำ อีกทั้งนอกเหนือจากการส่งสัญญาณยังสามารถใช้ในการระบุพิกัดตำแหน่งได้ด้วย ซึ่งสัญญาณแบนด์วิดท์ที่ต่ำกว่าจะสามารถระบุได้ไม่ละเอียดเท่า อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) สามารถส่งข้อมูลในอัตราเร็วที่สูงมากในระยะทางสั้นๆเท่านั้น แต่จะส่งอัตราที่ช้าเมื่อระยะทางมากขึ้น ซึ่งกำลังพัฒนาให้ดีขึ้นในปัจจุบัน

## 2.2 แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband Channel Model) [1]

ลักษณะของแบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband Channel Model) คือการเกิดเส้นทางในการสื่อสารจำนวนมากในการส่งสัญญาณ (Multi-path rich channel profile) ด้วยช่วงความถี่ของคลื่นวิทยุที่หลาย GHz ซึ่งให้ความละเอียดของเวลาในการรับ-ส่งสัญญาณอยู่ในหลักนาโนวินาที (nanosecond : ns) เมื่อถูกแปลงเป็นพิกัดทางภูมิศาสตร์ จึงเป็นไปได้ที่สามารถแบ่งแยกการสะท้อนของพื้นผิวที่ห่างกันเพียงหน่วยเซนติเมตรได้ โดยปกติเราจะมองเห็นวัตถุโดยการ

สะท้อนของสเปกตรัม (Spectrum) มากมายจนทำให้เกิดองค์ประกอบมัลติพาธ (Multi-path) หรือเกิดเส้นทางการรับส่งสัญญาณหลายเส้นทาง ลักษณะสำคัญอีกอย่างคือให้ความแม่นยำของเวลาในการรับ-ส่งสัญญาณที่สูงมากซึ่งเกิดขึ้นจากสัดส่วนของกำลังงานต่ำๆต่อองค์ประกอบมัลติพาธ (Multi-path)

### 2.2.1 การหาค่าช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-Wideband Channel Model)

การหาค่าช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-wideband Channel Model) นั้นเป็นพื้นฐานในการศึกษาเรื่องการส่งข้อมูลผ่านสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) ได้โดยวิธีที่ใช้วัดช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) มีอยู่ 2 วิธี คือ

1. ช่องสัญญาณสามารถวัดผ่านทาง FD (Frequency Domain) โดยใช้เทคนิค Frequency Sweeping หาผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) โดยใช้ VNA (Vector Network Analyser) วัด
2. ช่องสัญญาณสามารถวัดผ่านทาง TD (Time Domain) หาผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (Channel Impulse Response) โดยใช้ DSO (Digital Sampling Oscilloscope)

### 2.3 มาตรฐานสัญญาณวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Standard)

มาตรฐานเทคโนโลยีเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) หรือมาตรฐาน IEEE 802.15 เป็นเทคโนโลยีการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยอาศัยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง ซึ่งแรกเริ่มนั้นสัญญาณคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างหรืออัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) เป็นเทคโนโลยีที่คิดค้นมาเพื่อใช้งานทางด้านทหารที่สหรัฐอเมริกาใช้ในการสื่อสารระยะสั้นและป้องกันการดักฟัง ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้ผ่านการอนุมัติด้านกฎหมายให้สามารถนำมาใช้เพื่อการค้าหรือเชิงพาณิชย์ได้ภายในสหรัฐอเมริกา โดยคณะกรรมการบริหารความถี่ของสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission : FCC)

เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นั้นแตกต่างจากเทคโนโลยีไร้สายในปัจจุบันที่มีการส่งผ่านแบบสัญญาณวิทยุคลื่นสั้น อย่างเช่น เทคโนโลยีบลูทูธ และมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย 802.11.x ในแง่ความกว้างของช่องสัญญาณ ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) สามารถที่จะส่งข้อมูลได้มากกว่าในช่วงระยะเวลาที่เท่าๆ กันและยังใช้พลังงานต่ำเพียง 0.0001 มิลลิวัตต์ต่อเมกะเฮิรตซ์ โดยที่เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband

Technology) ใช้สัญญาณความถี่ที่ 3.1 GHz – 10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกับการรับส่งภาค สัญญาณดาวเทียม จึงไม่มีการรบกวนของอุปกรณ์สัญญาณวิทยุคลื่นสั้น และอุปกรณ์ที่ใช้ ภาคพื้นดินอื่นๆ โดยที่จะแบ่งแต่ละช่องสัญญาณที่ความกว้างช่องสัญญาณละ 500 MHz และที่สำคัญเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ให้ ประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณสูงถึง 480 Mbps เมื่อเทียบกับเครือข่าย 802.11 g ที่มีความเร็วในการเชื่อมต่อ 54 Mbps แล้ว เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลมากกว่าเกือบ 100 เท่า และมีอำนาจในการทะลุผ่านสิ่ง กีดขวางได้สูง มาตรฐานเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นอกจากจะใช้ประโยชน์ในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงแล้ว ยังมีประโยชน์ในการ ระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำในระดับหน่วยวัดเป็นเซนติเมตร เนื่องด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารด้วย คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้พลังงานต่ำ ทำให้ผู้ผลิตอุปกรณ์สามารถผลิตวงจร CMOS ที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ แถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นี้เองที่จะเข้ามามีบทบาทในการเชื่อมต่อโครงข่าย ไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ในอนาคต พื้นฐานของ อุปกรณ์จะทำงานโดยการส่งคลื่นพัลส์ขึ้นับพันล้านผ่านสเปกตรัมความถี่กว้าง โดยที่อุปกรณ์ตัวรับ สัญญาณจะแปลความหมายของพัลส์สัญญาณไปเป็นข้อมูล ซึ่งระบบเทคโนโลยีการสื่อสารด้วย คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) สมัยใหม่ได้พัฒนาไปใช้เทคนิคการ เข้ารหัสแบบโอเอพีดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) โดยจะสามารถ ใช้ประโยชน์จากแถบความถี่ของคลื่นความถี่กว้างได้อย่างเต็มที่

### 2.3.1 โครงข่ายไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) [7]

องค์กร IEEE ได้เริ่มจัดทำร่างมาตรฐานสำหรับการรับส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายระยะใกล้เมื่อ ปลายปี ค.ศ. 2002 ซึ่งเรียกว่า โครงข่ายไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) โดยมาตรฐานนี้เรียกว่า IEEE 802.15 และมีมาตรฐานย่อยทั้งสิ้นอีก 4 มาตรฐาน ได้แก่

1. IEEE 802.15.1 ศึกษาการร่างมาตรฐานชั้นกายภาพ (Physical Layer) และ Media Access Control (MAC) สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบบลูทูธ (Bluetooth) ที่ใช้กันในปัจจุบัน
2. IEEE 802.15.2 ศึกษาผลกระทบการใช้งานและการทำงานร่วมกันระหว่างโครงข่ายไร้สาย พื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) กับ โครงข่ายไร้สาย (WLAN) และระบบสื่อสารไร้สายอื่นๆ เช่น ระบบโทรศัพท์จีเอสเอ็ม (GSM) CDMA และ ระบบการค้นหาลูกโลก (Global Positioning System : GPS) เป็นต้น



3. IEEE 802.15.3 ศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้นกายภาพ (Physical Layer) และ Media Access Control (MAC) สำหรับโครงข่ายไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงมาก (11 Mbps ถึง 55 Mbps) ที่มีระยะการรับส่งข้อมูลไม่เกิน 20 เมตร และมีการใช้พลังงานประมาณไม่เกิน 0.5 มิลลิวัตต์ (mW) โดยมีการจัดทำร่างมาตรฐานย่อยเรียกว่า IEEE 802.15.3a สำหรับการรับส่งข้อมูลที่มีอัตราสูงมากกว่า 100 Mbps สำหรับโครงข่ายไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ที่มีระยะใกล้กว่า (ไม่เกิน 10 เมตร) ซึ่งร่างมาตรฐานของผู้เสนอหลายรายมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดมากกว่า 1 Gbps การประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a นั้นคาดว่าจะใช้กับโครงข่ายข้อมูลระยะใกล้ เช่น เป็นมาตรฐานของชั้นกายภาพ (Physical Layer) และ Media Access Control (MAC) ของอุปกรณ์เชื่อมต่อในรูปแบบยูเอสบีความเร็วสูงไร้สาย (High Speed Wireless Universal Serial Bus (USB) interface) โครงข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สายภายในบ้านหรือสำนักงานขนาดเล็ก หรือเหมาะสมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการรับส่งข้อมูลในปริมาณที่สูงมาก เช่น เครื่องเล่น DVD โทรศัพท์ที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น
4. IEEE 802.15.4 ศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้นกายภาพ (Physical Layer) และ Media Access Control (MAC) สำหรับโครงข่ายไร้สายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลไม่สูงมากประมาณ 1 ถึง 5 Mbps แต่มีการใช้พลังงานต่ำเป็นพิเศษประมาณ 100 ไมโครวัตต์ (แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานได้หลายเดือนหรือหลายปี) ซึ่งจะเป็มาตรฐานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา และเครื่องเล่นเพลง MP3 เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีร่างมาตรฐานย่อยซึ่งเรียกว่า IEEE 802.15.4a สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลไม่เกิน 1 Mbps แต่มีระยะการส่งไกลมากขึ้นได้ถึง 75 เมตร แต่ยังคงมีอัตราการใช้พลังงานต่ำมาก ถูกออกแบบมาสำหรับโครงข่าย Wireless Sensor Network และโครงข่ายไร้สายสำหรับอุปกรณ์ควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม

ซึ่งแบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวนด์แบนด์ (Ultra-wideband Channel Model) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นร่างมาตรฐานย่อย IEEE 802.15.4a



## 2.4 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องส่งและเครื่องรับอัลตราไวด์แบนด์

ระบบสื่อสารแบบแถบความถี่แคบซึ่งเป็นระบบสื่อสารที่ใช้คลื่นพาห่นั้น สัญญาณข้อมูลจะถูกผสมสัญญาณ (Modulation) กับสัญญาณคลื่นพาห่ที่มีรูปคลื่นต่อเนื่องทางเวลาเพื่อเลื่อนความถี่ของสัญญาณจากความถี่ฐาน (Baseband) ไปยังความถี่ที่สูงขึ้นที่แถบความถี่ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่ง สำหรับอัลตราไวด์แบนด์นั้นเป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห่ (Carrierless) โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกผสมกับสัญญาณพัลส์ของอัลตราไวด์แบนด์ที่ถูกสร้างขึ้นและส่งผ่านสายอากาศโดยไม่ผ่านวงจรผสมสัญญาณ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อกำเนิดสัญญาณคลื่นพาห่และมิกเซอร์ มีจำนวนอุปกรณ์ที่น้อยกว่าระบบสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ ซึ่งส่งผลให้เครื่องรับส่งแบบอัลตราไวด์แบนด์มีราคาถูกลง อย่างไรก็ตามการออกแบบวงจรเครื่องส่งและเครื่องรับจะมีความยุ่งยากเนื่องจากการสื่อสารด้วยการใช้สัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาสั้นมากในระดับนาโนวินาทีหรือต่ำกว่านั้น ซึ่งจะมีผลทำให้ระยะเวลาในการรับข้อมูล (Acquisition time) นานมากขึ้น และจำเป็นต้องใช้เครื่องรับแบบคอร์เรเลเตอร์ (Correlator) ซึ่งเป็นวงจรที่เทียบความคล้ายคลึงของสัญญาณแม่แบบกับสัญญาณที่ได้รับเพื่อทำการตรวจจับจับพลังงานของสัญญาณพัลส์

## 2.5 คุณลักษณะเด่นของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์

การใช้สัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาของพัลส์แคบมากซึ่งใช้ในการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ทำให้เกิดคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างจากการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบดังนี้

### 1. ทนทานต่อปรากฏการณ์สัญญาณหลายเส้นทาง (Multipath phenomenon)

เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการสื่อสารไร้สายที่คลื่นสามารถแพร่กระจายไปได้ทุกทิศทาง เป็นผลให้สัญญาณ โดยเฉพาะแบบแถบความถี่แคบมักจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การเดินทางของคลื่นหลายเส้นทาง (Multipath radio propagation) ซึ่งสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณจะเกิดเป็นสัญญาณหลายชุดเดินทางผ่านช่องสัญญาณด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันก่อนที่จะไปถึงเครื่องรับ และเมื่อถึงเครื่องรับ เฟสและระดับความแรงของสัญญาณบางชุดมักมีการเปลี่ยนแปลง โดยอาจเกิดการเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณในเส้นทางอื่น ทำให้การตรวจจับสัญญาณที่เครื่องรับเป็นไปด้วยความยากลำบาก สำหรับสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์แคบมาก เมื่อแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณหลายเส้นทาง จะทำให้ลูกพัลส์ลูกเดียวกันถูกแยกเป็นหลายพัลส์เมื่อสัญญาณไป

ถึงเครื่องรับ โดยสัญญาณพัลส์หลายชุดที่เดินทางมาถึงเครื่องรับจะมีโอกาสน้อยที่มีการคาบเกี่ยวกันทางเวลาหรือการรบกวนกันของพัลส์เกิดขึ้น เนื่องจากเวลาในการเดินทางผ่านช่องสัญญาณไร้สายมักมีช่วงเวลานานกว่าความกว้างทางเวลาของพัลส์ ทำให้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์เกิดการลดทอนจากปรากฏการณ์หลายเส้นทางน้อยกว่า เมื่อใช้เทคนิคเครื่องรับแบบเรก (Rake receiver) ซึ่งใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access: CDMA) สัญญาณพัลส์ที่ตรวจจับได้จากหลายเส้นทางจะถูกรวมกันเพื่อเพิ่มระดับของคุณภาพการรับของสัญญาณได้มากยิ่งขึ้น

## 2. มีโอกาสถูกตรวจจับและดักสัญญาณต่ำ

สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์นั้นยากต่อการตรวจจับและดักฟังหากไม่ทราบว่าสัญญาณพัลส์นั้นมาปรากฏที่เครื่องรับในช่วงเวลาใด คล้ายคลึงกันกับสัญญาณการแผ่สเปกตรัมที่ใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ หากไม่ทราบรหัสแปรที่ใช้ในการกระจายคลื่นก็จะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้ และเนื่องจากมีการกระจายสัญญาณในช่วงของความถี่ที่กว้าง การทำการแจมมิง (Jamming) สัญญาณในแถบความถี่กว้างมากนั้นกระทำได้ยาก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการสร้างระบบสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยต่อการถูกรบกวนหรือแจมมิง

## 3. มีความสามารถใช้แถบความถี่ซ้อนทับกับระบบอื่นได้

เนื่องด้วยระดับความหนาแน่นของระดับความแรงต่อความถี่ของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีค่าต่ำ (Low power spectral density) ทำให้ระบบสื่อสารที่ใช้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์สามารถทำงานซ้อนทับกับระบบสื่อสารแบบอื่นที่ใช้ความถี่แถบความถี่แคบที่กำลังใช้อยู่ได้ เนื่องจากสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีการรบกวนต่อสัญญาณระบบอื่นต่อ

## 4. มีความสามารถในการวัดพิสัยที่มีความเที่ยงตรงสูง

ด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากในระดับที่ต่ำกว่านาโนวินาที ทำให้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีความละเอียดที่สูงมาก (very high resolution) เท่าที่จะสามารถทำได้สำหรับค่าความถี่กลางหนึ่ง ๆ [๘] ซึ่งความละเอียดดังกล่าวเป็นคุณสมบัติที่นำมาใช้ในการวัดความแตกต่างของระยะทางได้เช่นเดียวกันกับในระบบเรดาร์โดยเมื่อสัญญาณถูกคลื่นพัลส์ของอัลตราไวด์แบนด์สะท้อนกลับมายังเครื่องรับก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางโดยประมาณที่สัญญาณพัลส์ใช้เวลาในการเดินทางได้อย่างเที่ยงตรงมาก

## 5. มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (FCC)

จากข้อกำหนดของกำลังส่งที่อนุญาตให้ใช้ได้ของ FCC ระบบอัลตราไวด์แบนด์จึงมีการใช้พลังงานที่ต่ำมาก ทั้งนี้เพื่อไม่ให้รบกวนระบบสื่อสารอื่น โดยระดับความแรงของสัญญาณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ระดับต่ำกว่า  $-20$  เดซิเบลมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งเมกะเฮิรตซ์

#### 6. มีความซับซ้อนในการสร้างและต้นทุนในการผลิตต่ำ

เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการผสมสัญญาณด้วยการใช้สัญญาณคลื่นพาห์ ทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับมีความซับซ้อนต่ำและมีราคาต่ำ

#### 7. มีความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ดี

โดยการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่ำในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมากของอัลตราไวด์แบนด์จะทำให้สัญญาณสามารถทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่างๆ เช่น วัสดุที่ใช้ในการสร้างอาคาร หรือพื้นดินได้ดีกว่าการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่ใช้คลื่นเฉพาะช่วงความถี่สูงเท่านั้นเป็นสัญญาณที่ส่งออกไป

การนำเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ไปประยุกต์ใช้งานมีอยู่ด้วยกันสี่กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- การส่งข้อมูลความเร็วสูงในระยะใกล้
- การส่งข้อมูลความเร็วต่ำในระยะไกล
- การใช้งานลักษณะเรดาร์
- การใช้งานเกี่ยวกับภาพ

สำหรับการใช้งานสองอย่างหลังนั้นจะมีอัตราการส่งสัญญาณพัลซ์ไม่สูงมากนักอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 Mpulses ต่อวินาที แต่สำหรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงนั้นโดยปกติจะมีอัตราการส่งสัญญาณพัลซ์อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 Gpulses ต่อวินาที ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารด้วยความเร็วสูงขนาด Gbps ในระยะใกล้ สำหรับการส่งสัญญาณโดย (Carrier-based) ที่สามารถลดปัญหา intersymbol interference (ISI) แต่ยังคงหาวิธีจัดการกับการที่สัญญาณแพร่ไปในหลายทิศทาง (Multipath Fading) ซึ่งเป็นอุปสรรคในการออกแบบระบบสื่อสารไร้สายอยู่แล้ว การที่เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงได้ ทำให้หลายคนมองว่าเทคโนโลยีนี้ก็ควรจะถูกจัดเป็น 4G สำหรับการสื่อสารระยะใกล้อีกด้วย

ข้อแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) กับการสื่อสารไร้สายแบบเดิมๆ จากเดิมที่เราคุ้นเคยกับการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันโดย

เปลี่ยนแปลงกำลังส่ง ความถี่ หรือเฟสของคลื่นไซน์ (Sine Wave) แต่สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นั้น การส่งข้อมูลบนคลื่นวิทยุในช่วงเวลาสั้นๆพัลส์ จึงส่งผลให้ครอบคลุมช่องความถี่แถบกว้าง และแยกแยะความแตกต่างของแต่ละข้อมูลด้วยขนาดหรือโพลาริตี (Polarity) ที่แตกต่างกัน ซึ่งรวมถึงการใช้ orthogonal pulses (Orthogonal Pulse) ผู้กำหนดมาตรฐานสากลก็ได้ร่างมาตรฐานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4a

การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) นั้นสามารถใช้ในหลากหลายอย่าง เช่น มอนิเตอร์ไร้สายด้วยความสามารถในการรับส่งข้อมูลขนาดใหญ่จากกล้องดิจิทัลต่อลงจปรืด การส่งภาพที่ต้องการพิมพ์ตรงไปยังเครื่องพิมพ์โดยไม่จำเป็นต้องผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์อีกต่อไป หรือจะเป็นการแลกเปลี่ยนไฟล์ข้อมูล ภาพ เพลงดิจิทัล หรือแม้แต่วีดีโอ ระหว่างมือถือรวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆได้ นอกจากนี้การใช้งานที่เราคุ้นเคยกันอยู่แล้ว การใช้งานที่เหมือนกับมีดาวเทียมที่สามารถมองเห็นวัตถุที่อยู่หลังกำแพงก็เป็นไปได้ด้วยการนำเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) มาใช้เป็นเรดาร์และการประมวลผลภาพ แล้วยังช่วยระบุตำแหน่งได้อย่างถูกต้องอีกด้วย จึงไม่เป็นเรื่องยากเลยที่จะนำเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) มาใช้เป็นอุปกรณ์ติดตาม (Tracking) เทคโนโลยีนี้จึงได้รับความสนใจจากผู้นำในด้านอุตสาหกรรมไฮเทค โดยจะเห็นได้จากการรวมตัวกันในนาม Wimedia Alliance จากที่เคยวุ่นวายกับสายเคเบิลที่ต่อระหว่างเครื่องเล่นดีวีดีกับโทรทัศน์ ปัญหานี้ก็จะหมดไปเมื่อนำเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (Ultra-Wideband Technology) มาช่วย

## 2.6 แอปพลิเคชันต่างๆ ของเทคโนโลยีอัตราเร็วสูง (Ultra-Wideband Technology)

1. โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง (High -Data-Rate-Wireless Personal Area Network : HOR-WPAN) คือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายปาน มีอัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็ว 100-150 Mb/s ภายในระยะ 1-10 เมตร
2. การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wireless Ethernet Interface Link : WEIL) สามารถทำได้ภายในระยะสั้นมาก หรือภายในรัศมี 1-2 M WEIL

3. โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ (Intelligent Wireless Area Network : IWAN) คือ โครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายสูงที่เป็นพื้นที่ภายในหรือพื้นที่สำนักงานทั่วไปภายในระยะ 30 เมตร
4. โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์ (Outdoor Peer-to-Peer Network: OPPN) เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร UWB ที่อยู่บริเวณภายนอก
5. โครงข่ายเซ็นเซอร์ การหาตำแหน่งและการพิสูจน์อุปกรณ์ (Sensor, Positioning, And Identification Network: SPIN) เป็นโครงข่ายของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเช่น เซ็นเซอร์ที่มีความหนาแน่นที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือโรงเก็บสินค้า มีอัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็ว และสามารถส่งสัญญาณข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของตัวอุปกรณ์เพื่อใช้หาตำแหน่งได้ด้วย (มีความแม่นยำในการบอกตำแหน่งผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### บทที่ 3

#### แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband Channel Model)

ลักษณะของแบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband Channel Model) คือการเกิดเส้นทางการสื่อสารจำนวนมากในการส่งสัญญาณ (Multi-path rich channel profile) ด้วยช่วงความถี่ของคลื่นวิทยุที่หลาย GHz ซึ่งให้ความแม่นยำของเวลาในการรับ-ส่งสัญญาณอยู่ในหลักนาโนวินาที (nanosecond) เมื่อถูกแปลงเป็นพิกัดทางภูมิศาสตร์ จึงเป็นไปได้ที่สามารถแบ่งแยกการสะท้อนของพื้นผิวที่ห่างกันเพียงหน่วยเซนติเมตรได้ โดยปกติเราจะมองเห็นวัตถุโดยการสะท้อนของสเปกตรัม (Spectrum) มากมายจนทำให้เกิดองค์ประกอบมัลติพาท (Multi-path) หรือเกิดเส้นทางการรับส่งสัญญาณหลายเส้นทาง ลักษณะสำคัญอีกอย่างคือให้ความแม่นยำของเวลาในการรับ-ส่งสัญญาณที่สูงมากซึ่งเกิดขึ้นจากสัดส่วนของกำลังงานต่ำๆต่อองค์ประกอบมัลติพาท (Multi-path)

#### 3.1 ความกว้างช่องสัญญาณ (Bandwidth) [11]

ความกว้างช่องสัญญาณ หมายถึง ระยะห่างระหว่างคลื่นความถี่สองคลื่น มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ความกว้างของช่องสัญญาณถูกนำมาใช้ในการอธิบายช่วงความถี่คลื่นสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารผ่านสื่อตัวกลางใดๆ ถ้าสมมุติให้สื่อตัวกลางที่ใช้ เช่น สายโทรศัพท์เปรียบเทียบเป็นถนนแล้ว ความกว้างของช่องสัญญาณก็คือ ความกว้างของถนนสายนั้น ซึ่งถ้าเป็นถนนที่กว้างมาก รถยนต์ก็สามารถจะสัญจรไปมาได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้าเป็นถนนแคบ รถยนต์ที่สัญจรไปมาก็ต้องมีจำนวนน้อย มิฉะนั้นจะเกิดปัญหาการติดได้ ความกว้างของสัญญาณมีความสำคัญต่อการสื่อสารมาก เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความเร็วในการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ (Channel) ใดๆ ช่องสัญญาณที่มีความกว้างมากหมายถึงความสามารถในการส่งข้อมูลได้มากกว่าช่องสัญญาณแคบๆ ในเวลาเท่ากัน

#### 3.2 เทคนิคการประมาณช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband Channel

##### Measurement Techniques) [1]

แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband Channel Model) นั้น เป็นพื้นฐานในการศึกษาเรื่องการส่งข้อมูลผ่านสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband : UWB) โดยเทคนิคที่ใช้วัดช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีอยู่ 2 วิธี วิธีแรก เป็นการประมาณช่องสัญญาณทางความถี่ (Frequency Domain : FD) โดยใช้เทคนิคการกวาดความถี่ (Frequency Sweeping

Technique) สำหรับการวัดความถี่ของสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์หรือสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้าง เราก็จะใช้เซตของการวัดความถี่ของสัญญาณแถบความถี่แคบ และผลการตอบสนองของช่องสัญญาณทางความถี่ (Channel Frequency Response) ก็จะถูกบันทึกโดยใช้ Vector Network Analyzer (VNA) ส่วนวิธีที่สองเป็นการประมาณช่องสัญญาณทางเวลา (Time Domain : TD) ซึ่งวิธีนี้จะใช้ Channel Sounder ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานในการรับส่งสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse Transmission) หรือ การเข้าถึงช่องสัญญาณจากผู้ใช้งานหลายคน โดยการแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรง (Direct Sequence Spread Spectrum Signaling) ซึ่งจะนำสัญญาณอิมพัลส์ที่ถูกมอดูเลตมาแผ่สเปกตรัมก่อนการส่งสัญญาณออกไป และจะหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (Channel Impulse Response) โดยใช้อุปกรณ์วัดการสุ่มสัญญาณดิจิทัล (Digital Sampling Oscilloscope)

### 3.2.1 การประมาณช่องสัญญาณทางความถี่ (Frequency Domain Channel Sounding)

เมื่อสัญญาณวิทยุแถบความถี่กว้างถูกส่งมา Vector Network Analyzer (VNA) จะทำหน้าที่รับและสร้างสัญญาณขึ้นมา ซึ่งสัญญาณที่รับเข้ามาจะเป็นเซตของสัญญาณวิทยุแถบความถี่แคบที่กวาดสัญญาณในช่วงแถบความถี่ที่สนใจ วิธีโดเมนทางความถี่จะใช้เสารับสัญญาณแถบความถี่กว้าง (Wideband Antennas) แบบจำลองช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์ (Ultra-wideband Channel Model) จะถูกสร้างขึ้นในช่วงก่อนการประมวลผลข้อมูล และช่องสัญญาณจะมีลักษณะเป็นสแตติก ในขณะที่สัญญาณกำลังแพร่กระจายออกไปเพื่อจะคงไว้ซึ่งเงื่อนไขของช่องสัญญาณ เวลามากที่สุดที่ใช้ในการกวาดของสัญญาณจะถูกจำกัดโดยเวลาที่ใช้ในการกวาดของช่องสัญญาณ ถ้าเวลาในการกวาดไปของสัญญาณมากกว่าเวลาที่ใช้ในการกวาดของช่องสัญญาณแสดงว่า มีการกวาดสัญญาณไปยังช่องสัญญาณอีกช่องหนึ่ง ประสิทธิภาพของแพร่กระจายสัญญาณในโดเมนความถี่จะถูกจำกัดโดยการล่าช้าของช่องสัญญาณ (Channel Delay) ซึ่งขอบเขตบนของความสามารถในการตรวจจับการดีเลย์คือ  $\tau_{max}$  ซึ่งนิยามได้จากจำนวนความถี่ของจุดที่ใช้ต่อการกวาดหนึ่งครั้ง และช่วงแถบความถี่  $B$  (ช่วงของความถี่ที่ถูกกวาดไป) โดยนิยามว่า

$$\tau_{max} = (N_{smp} - 1) / B \quad (3.1)$$

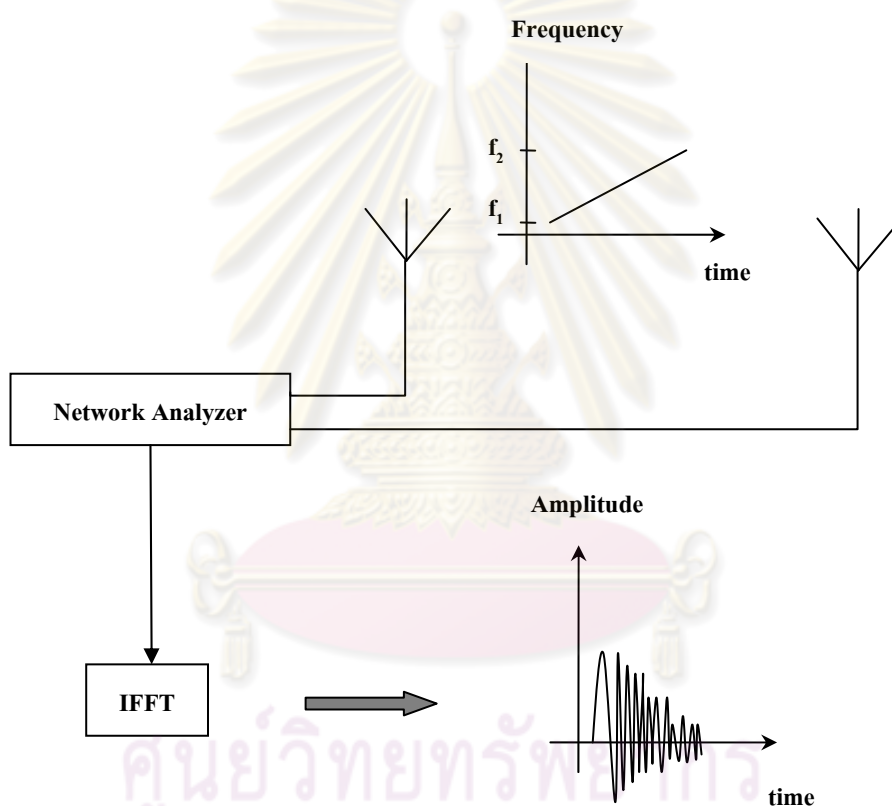
โดย

$N_{smp}$  คือ จำนวนความถี่ของจุด

อีกตัวแปรหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของกระบวนการนี้ก็คือ ความถี่ที่ถูกเลื่อนออกไป (Frequency Shift) ซึ่งเกิดจากการล่าช้าของสัญญาณ (Propagation Delay) เช่น เมื่อสายเคเบิลที่ใช้มีความยาวมาก หรือเมื่อเวลาในการเดินทางไปกลับของสัญญาณนานมาก ในโหมดของการกวาด

ความถี่ สัญญาณที่แพร่ออกไปจะถูกกวาดทั้งแถบความถี่ที่สนใจ ตัวส่งและตัวรับสัญญาณจะถือการกวาดให้อยู่ช่วงแถบความถี่ที่สนใจ การเกิดการล่าช้าของสัญญาณที่นานมากสามารถหาสาเหตุได้โดยตัวรับสัญญาณจะทำการสุ่มตัวอย่างที่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่รับมา ความถี่ที่เลื่อนไป (Frequency Shift)  $\Delta f$  เป็นฟังก์ชันของเวลาในการเดินทางไปกลับของสัญญาณ  $t_{tr}$  ช่วงความถี่ (Frequency Span)  $B$  และเวลาที่ใช้ในการกวาดสัญญาณ  $t_{sw}$

$$\Delta f = t_{tr} \left( \frac{B}{t_{sw}} \right) \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.1 Vector Network Analyzer-based frequency domain channel sounding system

โดยปกติ  $\Delta f$  ต้องมีค่าน้อยกว่า Analyzer IF Bandwidth จากรูป หลังจากที่ได้ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณถูกวัดค่าออกมาแล้ว ก็สามารถแสดงในรูปโดเมนของเวลาหรือในรูปของผลการตอบสนองอิมพัลส์ได้ โดยใช้ Inverse Fourier Transform (IFFT)

### 3.2.1.1 การวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยวิธีอินเวอร์สฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Inverse Fourier Transform)

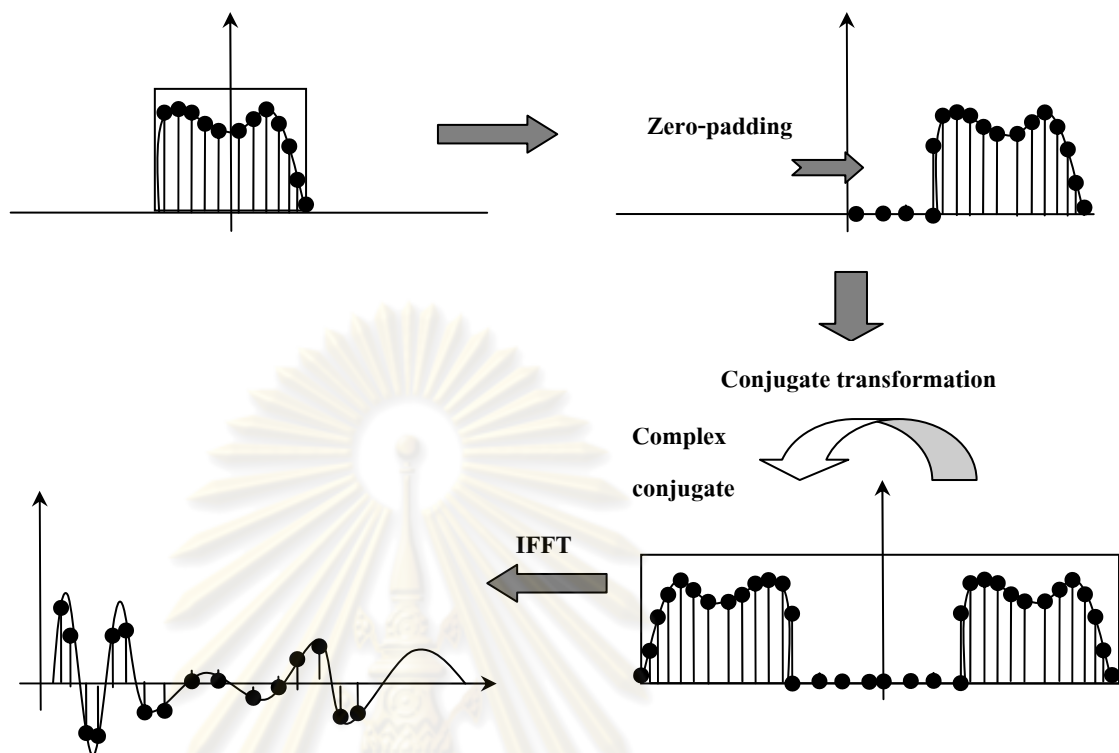
เมื่อใช้ VNA ในการวัดสัญญาณ จะได้ในรูปผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ (Frequency Response of the channel) IFFT จะถูกใช้ในการแปลงค่าที่วัดได้ในโดเมนของความถี่ให้อยู่ในรูปโดเมนของเวลา โดย IFFT จะทำการคำนวณโดยตรงจากข้อมูลดิบของเวกเตอร์ ซึ่งกระบวนการนี้จะเริ่มตั้งแต่ตัวรับสัญญาณหยุดการรับส่งสัญญาณ

นอกจากนี้ ยังมีอีกสองเทคนิคง่ายๆ ในการแปลงสัญญาณกลับในรูปโดเมนทางเวลา ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นการประมาณค่าเหมือนกัน โดยวิธีแรกมีพื้นฐานจาก การประมวลผลสัญญาณแบบเฮร์มีเทียน (Hermitean signal processing) ซึ่งผลที่ได้จะให้รูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ดีขึ้น วิธีที่สองคือวิธีคอนจูเกต (Conjugate Approach) จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีคอนจูเกตเป็นวิธีที่ง่ายกว่าและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในเรื่องของความแม่นยำในการประมาณรูปร่างของสัญญาณพัลส์เดิม

### 3.2.1.2 การประมวลผลสัญญาณแบบเฮร์มีเทียน (Hermitean signal processing)

สำหรับวิธีแบบเฮร์มีเทียน สัญญาณพาสแบนด์ (Pass-band signal) ที่ได้รับจะถูกทำซีโร่แพดดิ้ง (Zero padding) จากความถี่ที่ต่ำที่สุดลงไปจนถึงไฟกระแสดตรง โดยจะทำการหาคอนจูเกตของสัญญาณและเกิดการสะท้อนในด้านความถี่ลบ และผลที่ได้ก็จะนำมาแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนของเวลาด้วยวิธี IFFT ดังรูป 3.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



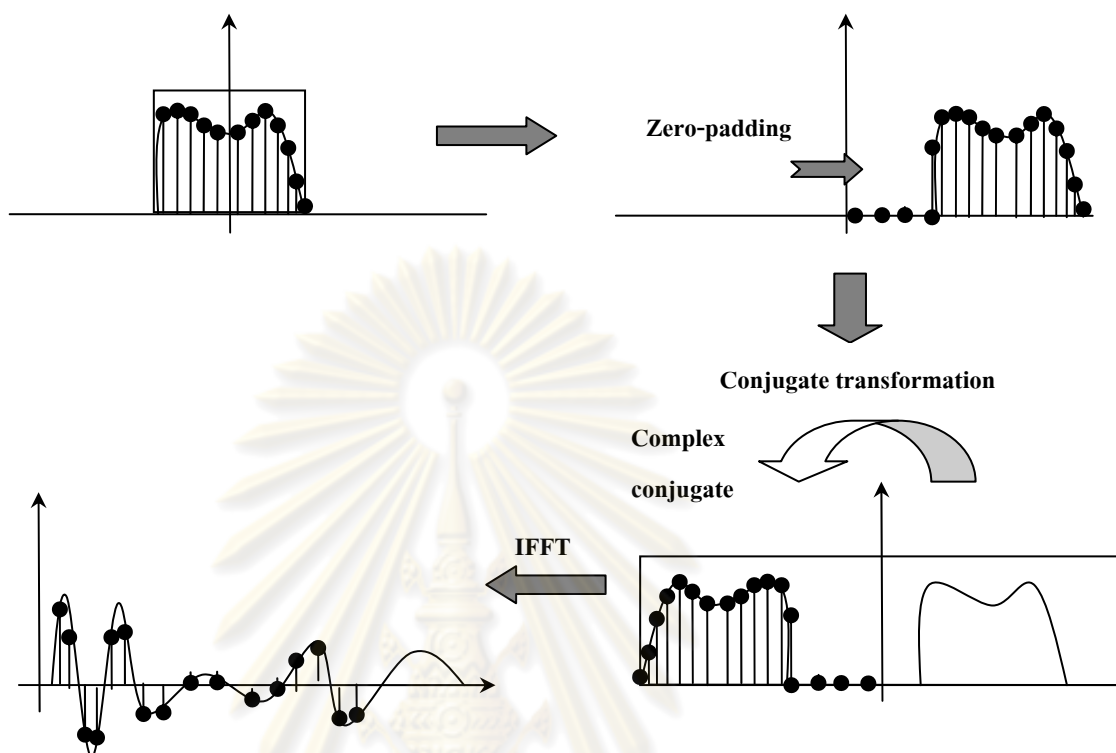
รูปที่ 3.2 การทำคอนจูเกตซีโร่แพดดิ้งและผลตอบสนองอิมพัลซ์

สเปกตรัมของสัญญาณจะมีลักษณะสมมาตรรอบไฟกระแสดตรง ผลที่ได้ ก็จะได้สเปกตรัมที่สอดคล้องกับสัญญาณจริงสองด้าน ความละเอียดของเวลาของสัญญาณที่ได้รับก็จะมากกว่าสองเท่าของการใช้วิธีเบสแบนด์

### 3.2.1.3 วิธีคอนจูเกต (Conjugate Approach)

วิธีคอนจูเกตจะทำการหาค่าการสะท้อนคอนจูเกตของสัญญาณที่ผ่านเข้ามา (pass-band signal) โดยไม่มีการทำซีโร่แพดดิ้ง (Zero Padding) การใช้สัญญาณเฉพาะสเปกตรัมด้านซ้าย สัญญาณที่ถูกแปลงกลับในรูปโดเมนของเวลาด้วยวิธี IFFT ด้วยขนาดของหน้าต่างที่เท่ากับวิธีเฮอรัสมิเทียน ดังรูปที่ 3.3





รูปที่ 3.3 การคอนจูเกตด้วยซีโร่แพดดิ้งและผลตอบสนองอิมพัลส์

ผลของการคอนจูเกตจะเหมือนกับการทำเฮอริมิเทียน โดยไม่ทำซีโร่แพดดิ้ง อย่างไรก็ตาม วิธีคอนจูเกตให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าในด้านความยุ่งยากซับซ้อนในการประมวลผลข้อมูล โดยการคำนวณเมตริกซ์ในช่วงก่อนการประมวลผลจะทำได้ง่ายกว่าmanipulate เพราะจะใช้หน่วยความจำที่น้อยกว่า

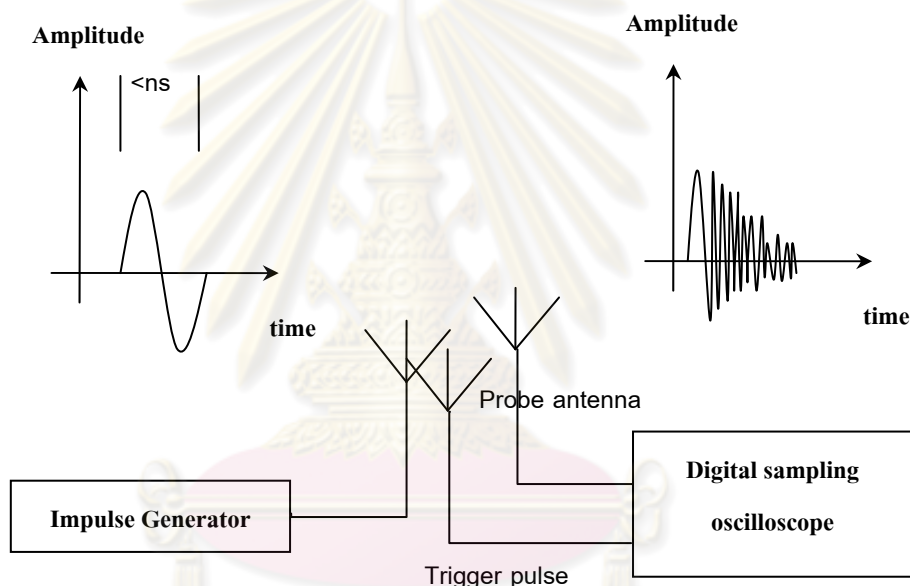
### 3.2.2 การประมาณช่องสัญญาณทางเวลา (Time Domain Channel Sounding)

สำหรับการประมาณค่าทางความถี่ (Frequency Domain Channel Sounding) จะยกเว้นกรณีที่การวัดช่องสัญญาณเป็นแบบนอนสแตชันนารี (Non-Stationary) ดังนั้นการเคลื่อนที่จะถูกรองรับได้ในกรณีที่ทำการประมาณช่องสัญญาณทางเวลา

#### 3.2.2.1 การแพร่กระจายสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse Sounding)

วิธีหนึ่งในการกระจายสัญญาณวิทยุแถบความถี่กว้างคือการใช้สัญญาณพัลส์ที่สั้นมากๆ

สำหรับวิธีนี้ที่ตัวรับสัญญาณ จะต้องใช้อุปกรณ์วัดการสุ่มสัญญาณดิจิทัล (digital sampling oscilloscope) โดยแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่แพร่ออกไปจะขึ้นกับรูปร่างของสัญญาณพัลส์และความกว้างของสัญญาณพัลส์ ถ้าเราเปลี่ยนความกว้างของสัญญาณพัลส์การกระจายของสเปกตรัมก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม รูปร่างของสัญญาณพัลส์แบบธรรมดาที่สามารถที่จะทำการดีคอนโวลูชัน (Deconvolution) ในช่วงก่อนการประมวลผลได้ง่ายกว่า ผลตอบสนองช่องสัญญาณอิมพัลส์จะถูกคำนวณ โดยการถอดรูปแบบของคลื่นพัลส์ที่ถูกส่งมา แบบจำลองช่องสัญญาณสามารถสร้างขึ้นได้อย่างถูกต้อง ถ้ารูปแบบของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการแพร่กระจายสัญญาณออกไปสอดคล้องกับรูปแบบของแอปพลิเคชัน (Application) โครงสร้างหรือโทโพโลยี (Topology) สำหรับการวัดทางเวลาดูได้จากรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Impulse sounder

ระบบการวัดสัญญาณอิมพัลส์พื้นฐานต้องการเสาอากาศ (Antenna) ที่เพิ่มขึ้นมาเพื่อทำการกระตุ้นสัญญาณพัลส์หรือทริกเกอร์ (Triggering) ระยะทางในการแพร่กระจายสัญญาณจะถูกจำกัดด้วยโพรบ (Probe) ของเสาอากาศเมื่อเสาส่งสัญญาณต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดการสุ่มสัญญาณดิจิทัล อย่างไรก็ตาม เฉพาะกับการสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลยาวๆ เท่านั้นที่ต้องทำการกระตุ้นสัญญาณพัลส์ ดังนั้นสำหรับสายเคเบิลคุณภาพดีก็ไม่จำเป็น

### 3.2.2.2 การแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรง (Direct Sequence Spread Spectrum Sounding) [10]

การแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรงมีหลักการทำงานคือ ทำการแทนที่บิตข้อมูลแต่ละบิตที่จะส่งด้วยลำดับของบิตด้วยเวลาเท่ากัน กล่าวอีกอย่างคือ แทนที่จะส่งบิตข้อมูลตามปกติ เช่น ส่งข้อมูลบิต 0 หรือส่งข้อมูลบิต 1 ก็จะเปลี่ยนเป็นการส่งลำดับบิต 0000 หรือส่งลำดับบิต 1111 แทนตามลำดับ โดยส่งให้เร็วขึ้น 4 เท่า เพื่อให้ใช้เวลาเท่าเดิม ทำให้แถบความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณกว้างขึ้น 4 เท่า ซึ่งเป็นการแผ่สเปกตรัมนั่นเอง สังเกตว่าลำดับบิตที่แทนข้อมูลบิต 0 กับลำดับบิตที่แทนข้อมูลบิต 1 นั้นจะตรงข้ามกันบิตต่อบิต หากจะยกตัวอย่างลำดับบิตอื่น ก็ได้แก่ การแทนที่ข้อมูลบิต 0 และ ข้อมูลบิต 1 ด้วยลำดับบิต 0011 กับลำดับบิต 1100 ตามลำดับ เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบที่ใช้การแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรงมักจะใช้การกล้ำสัญญาณทางเฟส เพื่อให้ระบบมีความซับซ้อนต่ำ โดยส่งคลื่นพาห้ตามปกติสำหรับการส่งบิต 0 และส่งคลื่นพาห้กลับเฟสสำหรับการส่งบิต 1 ด้วยการใช้การกล้ำสัญญาณทางเฟสนี้ ที่เครื่องรับสัญญาณ หากบิตที่ส่งเป็นบิต 0 จะแยกสัญญาณออกจากคลื่นพาห้ได้เป็นสัญญาณบวก และหากบิตที่ส่งเป็นบิต 1 จะแยกสัญญาณออกจากคลื่นพาห้ได้เป็นสัญญาณลบ ดังนั้นเครื่องรับสัญญาณจะรับลำดับบิต 0000 ได้เป็นลำดับสัญญาณ + + + และรับลำดับบิต 1111 ได้เป็นลำดับสัญญาณ - - - - จากนั้นเครื่องรับสัญญาณจะต้องแปลงลำดับสัญญาณที่รับได้ กลับไปเป็นข้อมูลบิตตามเดิมด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการกลับเครื่องหมายลำดับสัญญาณที่รับได้ตามลำดับบิตที่ใช้แทนบิต 0 เช่น 0000 หมายถึง ไม่กลับเครื่องหมายเลย แต่ถ้าลำดับบิตที่ใช้แทนบิต 0 เป็น 0011 ก็จะต้องกลับเครื่องหมายลำดับสัญญาณที่รับได้ในสองบิตหลัง เป็นต้น ขั้นตอนที่สองคือการรวมลำดับสัญญาณที่ผ่านการกลับสัญญาณตามขั้นตอนแรกแล้วเข้าด้วยกัน ถ้าผลรวมเป็นบวก ให้ตีความว่าเครื่องส่งสัญญาณส่งข้อมูลบิต 0 แต่ถ้าผลรวมเป็นลบ ให้ตีความว่าเครื่องส่งสัญญาณส่งข้อมูลบิต 1

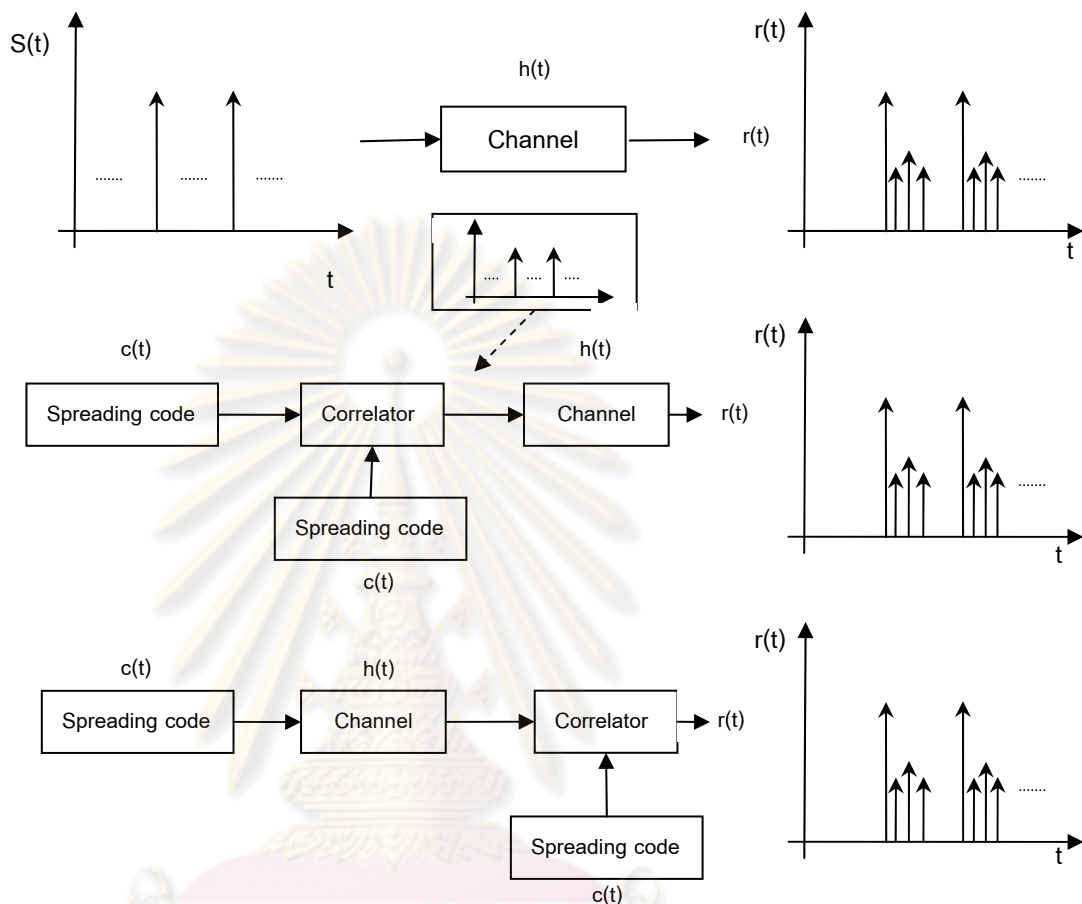
สังเกตว่าเครื่องรับสัญญาณจะแปลงลำดับสัญญาณกลับเป็นข้อมูลบิตได้ จะต้องทราบลำดับบิตที่เครื่องส่งสัญญาณกำลังใช้แทนที่บิต 0 อยู่ โดยเครื่องส่งและเครื่องรับจะต้องตกลงลำดับบิตที่จะใช้กันไว้ล่วงหน้า และจะให้เครื่องดักรับสัญญาณหรือเครื่องส่งสัญญาณรบกวน ทราบลำดับนี้ไม่ได้ หากเครื่องรับสัญญาณไม่ทราบลำดับบิตที่เครื่องส่งสัญญาณกำลังใช้แผ่สเปกตรัมอยู่ ก็จะไม่สามารถแปลงลำดับสัญญาณที่ได้รับกลับเป็นข้อมูลบิตได้ จึงถือว่าเป็นการเข้ารหัสลับอย่างหนึ่ง ดังนั้นประโยชน์อย่างแรกของการแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรงคือการป้องกันการดักรับสัญญาณ เพราะผู้ดักรับสัญญาณไม่ทราบลำดับบิตที่ใช้อยู่ ทำให้ไม่สามารถตีความสัญญาณที่ดักรับมาได้

ลำดับของบิตที่ยกตัวอย่างมานั้นเป็นตัวอย่างลำดับบิตที่สั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจหลักการแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรงลำดับของบิตที่ใช้งานทั่วไปนั้น จะยาวกว่านี้มาก ซึ่งจะแผ่สเปกตรัมได้

กว้างมากจึงเกิดประโยชน์ประการที่สองคือ การส่งสัญญาณรบกวนกระทำได้ยากเพราะแถบความถี่ที่ใช้ที่นั่นกว้างกว่าปกติมาก หากจะส่งสัญญาณรบกวน ให้ครอบคลุมแถบความถี่ที่ใช้ ก็จะเกิดสัญญาณรบกวนที่มีความเข้มต่ำมาก หรือหากสุ่มแถบความถี่แคบๆ เพื่อส่งสัญญาณรบกวนให้ได้ความเข้มสูง เวลาเครื่องรับสัญญาณทำการแปลงลำดับสัญญาณที่ได้รับกลับเป็นข้อมูลบิต ก็จะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนน้อยเช่นกัน เพราะในขั้นตอนที่เครื่องรับสัญญาณ ทำการรวมลำดับสัญญาณที่กลับเครื่องหมายแล้ว สัญญาณรบกวนมักจะหักล้างกัน ทำให้ความเข้มสัญญาณรบกวนลดลง โดยความเข้มสัญญาณรบกวนจะลดลงมากแปรผันตามความยาวของลำดับบิตที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัม

ประโยชน์ที่สำคัญอีกประการของการแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรงคือ การมีส่งข้อมูลมากกว่าหนึ่งรายส่งสัญญาณไปบนแถบความถี่เดียวกันในเวลาเดียวกัน แล้วเครื่องรับสัญญาณสามารถแยกความปะปนนี้ได้ ในการที่จะได้ประโยชน์ในแง่นี้ ลำดับของบิตที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัมของทุกๆ เครื่องส่งสัญญาณที่ส่งสัญญาณออกมาพร้อมกัน จะต้องถูกเลือกให้มีคุณสมบัติพิเศษคือ เมื่อเครื่องรับสัญญาณทำการแปลงลำดับสัญญาณที่ได้รับกลับ ไปเป็นข้อมูลบิตแล้ว สัญญาณส่วนที่มาจากผู้ส่งสัญญาณอื่นๆ ที่ไม่ใช่ผู้ส่งสัญญาณที่ต้องการรับข้อมูลจะหักล้างกันเป็นศูนย์

ยกตัวอย่างเช่น หากมีเครื่องส่งสัญญาณอยู่ 2 เครื่อง และลำดับบิตที่ใช้ในการแผ่สเปกตรัมยาว 4 บิต ก็อาจจะให้เครื่องส่งสัญญาณที่ 1 ใช้ลำดับบิตแทนข้อมูลบิต 0 ด้วย 0000 และให้เครื่องส่งสัญญาณที่ 2 ใช้ลำดับบิตแทนข้อมูลบิต 0 ด้วย 0011 ดังนี้แล้ว เมื่อเครื่องรับสัญญาณจะเลือกรับข้อมูลจากเครื่องส่งสัญญาณที่ 2 ก็จะกลับเครื่องหมายลำดับสัญญาณที่รับได้สองบิตท้ายแล้วค่อยรวมลำดับสัญญาณ ซึ่งหากเครื่องส่งสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูลบิต 0 ปนเข้ามา เครื่องรับสัญญาณจะได้รับลำดับสัญญาณที่เป็น ++++ ปนเข้ามา เมื่อกลับเครื่องหมายสัญญาณสองบิตท้ายเป็น +- - - แล้วรวมเข้าด้วยกัน ก็จะหักล้างเป็นศูนย์ไป หรือหากเครื่องส่งสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูลบิต 1 ปนเข้ามา เครื่องรับสัญญาณจะได้รับลำดับสัญญาณที่เป็น - - - - ปนเข้ามา เมื่อกลับเครื่องหมายสัญญาณสองบิตท้ายเป็น - - + + แล้วรวมเข้าด้วยกัน ก็จะหักล้างเป็นศูนย์ไปอีกเช่นกัน นอกจากนี้การเลือกลำดับบิตอาจจะไม่จำเป็นต้องเลือกให้เกิดการหักล้างอย่างสมบูรณ์แบบก็ได้โดยให้เกิดการหักล้างเกือบสมบูรณ์แบบแทน



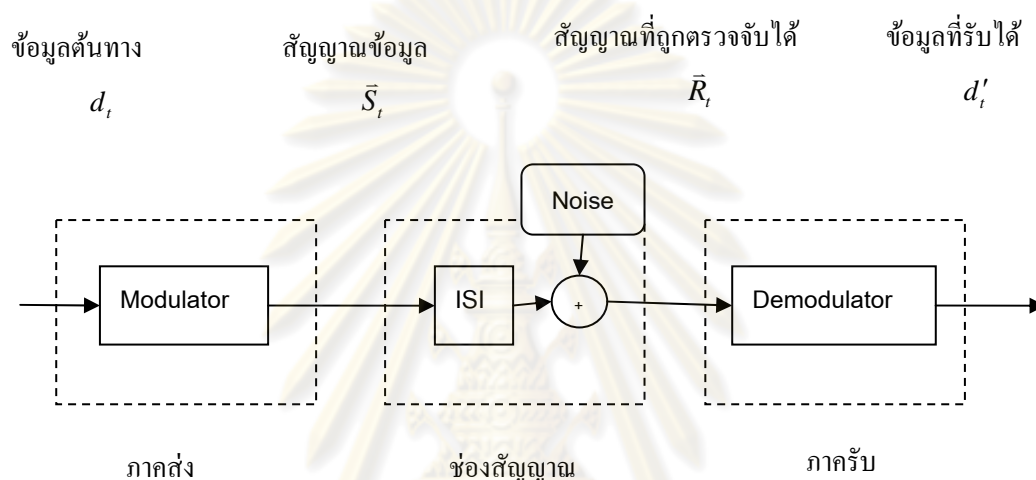
รูปที่ 3.5 Radio channel sounding system based on direct sequence spread spectrum technique

### 3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณวิทยุแถบความถี่กว้าง (UWB Channel Model) [9]

สำหรับการออกแบบและการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อส่งข้อมูลนั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของระบบสื่อสาร เช่น ขนาดแบนด์วิธของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล และ กำลังส่ง เป็นต้น โดยจะต้องมีการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลจะต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต (Modulate) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสารเพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูลที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณ และเมื่อสัญญาณข้อมูลถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ จะถูกนำมาผ่านกระบวนการดีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยจะพบว่า ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากทำงานของภาครับนั้นอาจมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกส่งออกไป



จากภาคส่ง ซึ่งเกิดมาจากผลขององค์ประกอบต่างๆ ในระบบสื่อสาร สำหรับองค์ประกอบหลักที่จะส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสารเกิดความผิดพลาดขึ้นนั้น เกิดมาจากการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนและเกิดจากลักษณะในการส่งข้อมูลที่สัญญาณข้อมูลสามารถเดินทางไปถึงภาครับได้จากหลายทิศทางด้วยกัน โดยที่ในแต่ละเส้นทางอาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณในลักษณะของการทับซ้อนระหว่างสัญญาณขึ้น



รูปที่ 3.6 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย

### 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจำลองลักษณะของช่องสัญญาณ

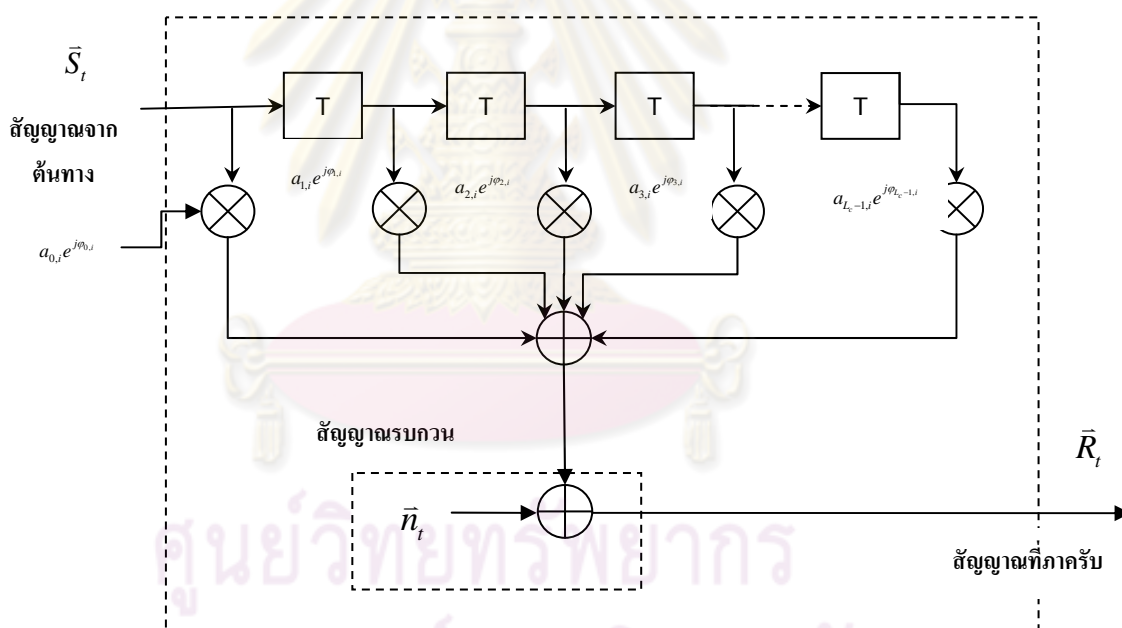
เพื่อแสดงถึงลักษณะของช่องสัญญาณแบบไร้สาย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงถูกนำมาใช้สำหรับแสดงผลกระทบของสัญญาณรบกวนและการทับซ้อนระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ในกรณีที่มีการพิจารณาสัญญาณข้อมูลทุก ๆ คาบเวลา  $T$  พบว่า ลักษณะของสัญญาณข้อมูล  $\bar{R}_i$  ที่ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับ ณ เวลาใด ๆ มีลักษณะความสัมพันธ์กับสัญญาณข้อมูล  $\bar{S}_i$  ที่ถูกส่งออกไปจากต้นทางตามสมการ (3.3)

$$\begin{aligned}\bar{R}_i &= (a_{0,i}e^{j\varphi_{0,i}} \cdot \bar{S}_i + a_{1,i}e^{j\varphi_{1,i}} \cdot \bar{S}_{i-1} + \dots + a_{L_c-1,i}e^{j\varphi_{L_c-1,i}} \cdot \bar{S}_{i-L_c+1}) + \bar{n}_i \\ &= \sum_{k=0}^{L_c-1} (a_{k,i}e^{j\varphi_{k,i}} \cdot \bar{S}_k) + \bar{n}_i\end{aligned}\quad (3.3)$$

โดยตัวแปร  $a_{k,i}$  และ  $\varphi_{k,i}$  เป็นขนาดและเฟสของการจางของสัญญาณในเส้นทางใด ๆ  $L_c$  เป็นจำนวนของสัญญาณข้อมูลทั้งหมดที่ถูกนำมาคำนวณ และ  $\bar{n}_t$  เป็นตัวแปรสุ่มสำหรับแสดงลักษณะของสัญญาณรบกวน เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงข้อมูลแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distribution) ที่มีลักษณะดังสมการ

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}} \tag{3.4}$$

สำหรับ  $\sigma^2$  และ  $\bar{n}$  เป็นตัวแปรที่ถูกนำมาใช้สำหรับกำหนดค่าความแปรปรวน (Variant) และค่าเฉลี่ย (Mean) ของข้อมูลที่ได้จากการสุ่ม ดังนั้น จากสมการที่ (3.3) สามารถนำไปใช้ในการเขียนแบบจำลองสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายได้ดังรูปที่ 3.7



T เป็น คาบเวลาของสัญญาณข้อมูล  
 $a_{x,i}$  และ  $\varphi_{x,i}$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนของขนาดและเฟส ณ เส้นทางใด ๆ

รูปที่ 3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสัญญาณไร้สาย

### 3.4.1 แบบจำลองช่องสัญญาณซาล์-วาเลนซุเอล่า (Modified Saleh-Valenzuela Model)[1]

ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2002 ถึงปี ค.ศ. 2003 มาตรฐาน IEEE 802.15.3 ได้ตัดสินใจใช้แบบจำลองช่องสัญญาณซาล์-วาเลนซุเอล่า (Modified Saleh-Valenzuela Model) เป็นแบบจำลองช่องสัญญาณแถบความถี่กว้างอ้างอิง ค่าของแบบจำลองนี้ได้มาจากการทดลองวัดภายในอาคารในปี ค.ศ. 1987 โดยซาล์และวาเลนซุเอล่า ซึ่งแบบจำลองนี้ใช้การกระจายแบบ log-normal (log-normal distribution) แทนที่จะใช้การกระจายแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh distribution) สำหรับอัตราส่วนขนาดของการเกิดมัลติพาท เรากำหนดให้ในแต่ละคลัสเตอร์ รังสีที่อยู่ภายในคลัสเตอร์สามารถเกิดการลดทอนของสัญญาณได้อย่างอิสระต่อกัน ในแบบจำลองช่องสัญญาณซาล์-วาเลนซุเอล่า (Modified Saleh-Valenzuela Model) เวลาในการเดินทางของทั้งคลัสเตอร์และรังสีจะถูกจำลองให้เป็นอิสระโดยกระบวนการพอยซัน (Poisson processes) เฟสของผลตอบสนองอิมพัลซ์ของช่องสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 ถึงไพ ( $\pi$ ) ดังนั้นแบบจำลองจะไม่มีส่วนประกอบจินตภาพ (imaginary component)

ในปี ค.ศ. 2003 ได้มีการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแบบจำลองนี้โดยโฟร์สเตอร์ (Foerster) ดังนั้นค่าอิมพัลซ์ของช่องสัญญาณในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่องกรณีเกิดมัลติพาท (discrete time multipath channel impulse) สามารถแสดงเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$h_i(t) = X_i \sum_{l=0}^{L_c-1} \sum_{k=0}^{K_l-1} \alpha_{k,l}^i \delta(t - T_l^i - \tau_{k,l}^i) \quad (3.5)$$

โดย  $\alpha_{k,l}^i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมัลติพาทเกน (multipath gain coefficients)

$T_l^i$  คือ ค่าความล่าช้าของคลัสเตอร์ที่  $l$  (the delays of the  $l$ th cluster)

$\tau_{k,l}^i$  คือ ค่าความล่าช้าสำหรับมัลติพาทที่  $k$  ของคลัสเตอร์ที่  $l$  (the delays for the  $k$  th multipath component relative to the  $l$ th cluster arrival time)

$X_i$  คือ การกระจายแบบล็อกนอร์มอล (log-normal distribution)

$i$  คือ  $i$  th realization

$T_l^i$  คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางมาถึงของพาทแรกของคลัสเตอร์ที่  $l$  (the arrival time of the first path of the  $l$  th cluster)

$\tau_{k,l}^i$  คือ ความล่าช้าของพาทที่  $k$  ของรังสีที่อยู่ภายในคลัสเตอร์ที่  $l$  ที่สัมพันธ์กับเวลาในการมาถึงของพาทแรกของคลัสเตอร์ที่  $l$  ( $T_l^i$ ) (the delay of the  $k$  th path within the  $l$  th cluster relative to the first path arrival time)

$\Lambda$  คือ อัตราเวลาการมาถึงของคลัสเตอร์ (cluster arrival rate)

$\lambda$  คือ อัตราเวลาในการมาถึงของรังสี (ray arrival rate) เช่นอัตราเวลาในการมาถึงของพาทที่อยู่ในแต่ละคลัสเตอร์

โดยกำหนดให้  $\tau_{0,l} = 0$  การกระจายของเวลาที่มาถึงของคลัสเตอร์ สามารถแสดงได้ดังสมการคณิตศาสตร์นี้

$$p(T_l | T_{l-1}) = \Lambda \exp[-\Lambda(T_l - T_{l-1})], \quad l > 0 \quad (3.6)$$

และการกระจายของเวลาในการเดินทางมาถึงของรังสี คือ

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})], \quad k > 0 \quad (3.7)$$

สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณนิยามได้โดย

$$\alpha_{k,l} = p_{k,l} \xi_l \beta_{k,l}, \quad (3.8)$$

และ

$$20 \log_{10}(\xi_l \beta_{k,l}) \propto N(\mu_{k,l}, \sigma_1^2 + \sigma_2^2),$$

หรือ

$$|\xi_l \beta_{k,l}| = 10^{(\mu_{k,l} + n_1 + n_2)/20} \quad (3.9)$$

โดยที่

$n_1 \propto N(0, \sigma_1^2)$  และ  $n_2 \propto N(0, \sigma_2^2)$  เป็นอิสระต่อกัน และสอดคล้องกับการจางหายของแต่ละคลัสเตอร์และเรย์ ตามลำดับ

และ

$$E\left[|\xi_l \beta_{k,l}|^2\right] = \Omega_0 e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{k,l}/\gamma}, \quad (3.10)$$

โดยที่  $\Omega_0$  คือ ค่าเฉลี่ยพลังงานของพาทแรกของคลัสเตอร์แรก

$p_{k,l}$  อยู่ในช่วง  $\{-1, +1\}$  และ  $\mu_{k,l}$  คือ

$$\mu_{k,l} = \frac{10 \ln(\Omega_0) - 10 T_l / \Gamma - 10 \tau_{k,l} / \gamma - (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \ln(10)}{\ln(10)} \quad (3.11)$$

ตัวแปรในสมการนี้แสดงถึงเฟดดิ้งหรือการจางหายของสัญญาณที่  $l$  คลัสเตอร์ ( $\xi_l$ ) และเฟดดิ้งของ  $k$  เรย์ของคลัสเตอร์ที่  $l$  ( $\beta_{k,l}$ )

เนื่องจากการกระจายแบบ log-normal ของพลังงานมัลติพาธรวมถูกเก็บไว้ในเทอมของ  $X_i$  พลังงานทั้งหมดจะเก็บไว้ในเทอม  $\{\alpha_{k,l}^i\}$  ซึ่งถูกนอร์มอลไลซ์ให้เป็นหนึ่งสำหรับแต่ละริไลเซชัน

$$20\log_{10}(X_i) \propto N(0, \sigma_x^2)$$

แบบจำลองนี้ก็ได้มาจากพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณที่ได้จากเอาท์พุต ดังนี้

- ค่าเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยกำลังสองของความล่าช้าที่มากเกินไป (mean and root mean square (RMS) excess delays)

- จำนวนองค์ประกอบของมัลติพาธ (number of multipath components)

- กำลังที่ลดต่ำลง (power decay profile)

เพิ่มเติมในส่วนของอัตราเวลาการมาถึงของคลัสเตอร์และเรย์  $\Lambda$  และ  $\lambda$  แฟลคเตอร์ของการลดต่ำลงของอินพุทคลัสเตอร์และเรย์คือ  $\Gamma$  และ  $\gamma$  ตามลำดับ และเทอมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) อยู่ในหน่วยของเดซิเบลสำหรับการจางหายของคลัสเตอร์แบบคลัสเตอร์นอร์มอล (cluster lognormal fading) การจางหายของเรย์แบบคลัสเตอร์นอร์มอล (ray lognormal fading) และเทอมของ lognormal shadowing สำหรับ total multi-path realization คือ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_x$  ตามลำดับ

มีการแบ่งแบบจำลองช่องสัญญาณออกเป็นสี่แบบตามระยะทางเฉลี่ยระหว่างตัวรับส่งสัญญาณและสถานการณของการเดินทางว่ามีสิ่งกีดขวางจนไม่มีเส้นทางการเดินทางโดยตรงหรือไม่ (LOS or not)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 3.1 แบบจำลอง SV แบ่งออกเป็น 4 แบบ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3 ดังนี้ [1]

Target channel characteristics	SV-1	SV-2	SV-3	SV-4
Mean excess delay(nsec) ( $\tau_m$ )	5.05	10.38	14.18	
RMS delay ( $\tau_{rms}$ )	5.28	8.03	14.28	25
$NP_{10dB}$			35	
$NP(85\%)$	24	36.1	61.54	
<b>Model parameters</b>				
$\Lambda$ (1/nsec)	0.0233	0.4	0.0667	0.0667
$\lambda$ (1/nsec)	2.5	0.5	2.1	2.1
$\Gamma$	7.1	5.5	14.00	24.00
$\gamma$	4.3	6.7	7.9	12
$\sigma_1$ (dB)	3.3941	3.3941	3.3941	3.3941
$\sigma_2$ (dB)	3.3941	3.3941	3.3941	3.3941
$\sigma_x$ (dB)	3	3	3	3
<b>Model characteristics</b>				
Mean excess delay(nsec) ( $\tau_m$ )	5.0	9.9	15.9	30.1
RMS delay ( $\tau_{rms}$ )	5	8	15	25
$NP_{10dB}$	12.5	15.3	24.9	41.2
$NP(85\%)$	20.8	33.9	64.7	123.3
Channel energy mean (dB)	-0.4	-0.5	0.0	0.3
Channel energy standard (dB)	2.9	3.1	3.1	2.7

SV-1 : Line of sight (LOS) สำหรับระยะทาง 0-4 เมตร

SV-2 : Non-Line of sight (NLOS) สำหรับระยะทาง 0-4 เมตร

SV-3 : Non-Line of sight (NLOS) สำหรับระยะทาง 4-10 เมตร

SV-4 : Non-Line of sight (NLOS) สำหรับระยะทาง 4-10 เมตร สำหรับกรณีที่เกิด NLOS มัลติพาทของช่องสัญญาณ

NP10dB : จำนวนพาทภายใน 10 เดซิเบลของพีค

NP(85%) : จำนวนพาทที่รวมแล้วมีพลังงาน 85%

### 3.4.2 แบบจำลองมัลติพาทอื่นๆ

แบบจำลองไม่ต่อเนื่องสำหรับเอาต์พุตของความแปรปรวนแปรทางเวลาในการเกิดมัลติพาทเฟดดิ้งแสดงได้ดังสมการคณิตศาสตร์นี้

$$h(t) = \sum_n a_n(t)s(t - \tau_n(t)) , \quad (3.12)$$

โดยที่

$s(t)$  คือ สัญญาณที่รับมา

$a_n(t)$  คือ แอมพลิจูดเกนของมัลติพาทที่  $n$

$\tau_n(t)$  คือ Corresponding excess delay

สำหรับการสื่อสารภายในอาคารโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของ Scattering และยึดตำแหน่งเสาอากาศ  $a_n(t)$  และ  $\tau_n(t)$  จะเป็นค่าคงที่ ในขณะที่รับส่งสัญญาณ ก็จะมีการเก็บตำแหน่งของเสาอากาศเพื่อทำการประมาณค่าสถิติวิสัยของช่องสัญญาณภายในอาคาร และการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างลิงก์ก็จะทำให้เกิดคอปเปลอร์ชิฟท์ (Doppler Shift) ซึ่งจะลดเวลาในการสื่อสารช่องสัญญาณ (Coherence Time) แล้วช่องสัญญาณจะทำการวัดค่า ถ้าเวลาที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า  $T_{coh}$  แล้ว ให้ถือว่าเป็นเวลาที่ถูกต้อง

## บทที่ 4

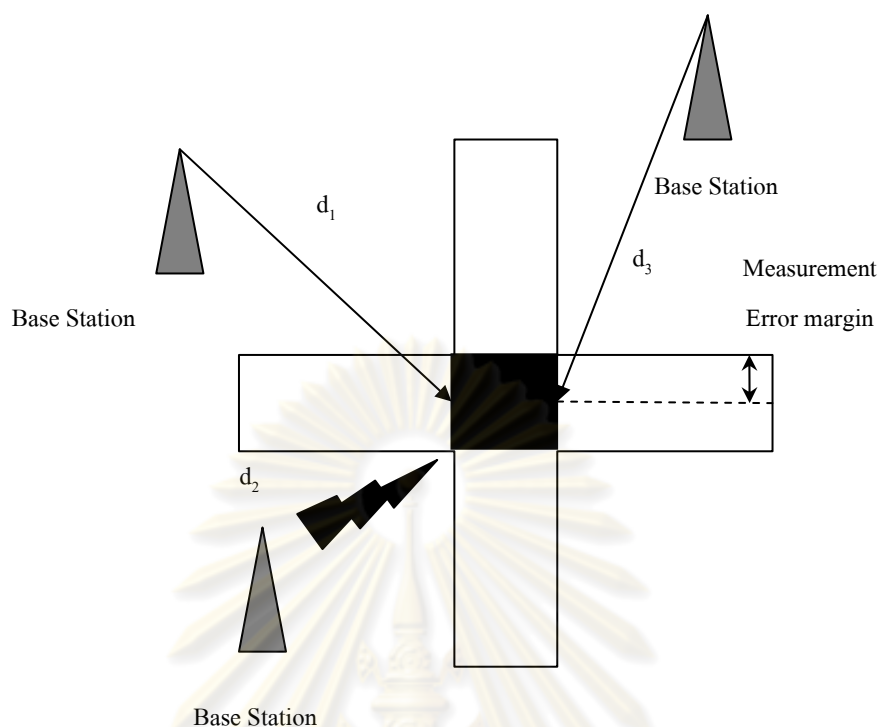
### การระบุตำแหน่ง (Positioning)

**การระบุตำแหน่ง (Positioning)** [1] สำหรับวิธีการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีนั้นก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป สำหรับวิธีต่างๆ การนำมาใช้ก็จะขึ้นอยู่กับสภาพของสถานที่นั้นๆ ว่ามีสิ่งกีดขวางหรือไม่ หรือสัญญาณชัดเจนหรือไม่ วิธีดังกล่าวคือ angle-of-arrival (AOA), time measurements (TOA), time-of-flight and time difference of arrival (TDOA) ซึ่งวิธีทั้งหมดนี้สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ตำแหน่งได้ทั้งสิ้น

วิธีที่ตรงไปตรงมาที่สุดคือการแก้สมการของระบบคาคิเซียนเพื่อที่จะได้ค่าพิกัดในระบบ 3 มิติ เพียงแต่ว่าระบบคาคิเซียนนั้นการแก้สมการจะเป็นได้ง่ายเมื่อมี 4 สมการอันเนื่องมาจากเสาส่ง 4 ต้นเท่านั้น ถ้าหากว่ามีหลายสมการอันเนื่องมาจากหลายเสาส่ง (ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นเช่นนั้น) การแก้สมการจะยุ่งยากมากขึ้น อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) จึงถูกนำมาใช้. การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์รอบจุดใดๆ จะทำให้ค่าเป็นเชิงเส้นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การที่จะทำให้สมการลู่เข้าค่าๆหนึ่ง การใช้ออนุกรมเทย์เลอร์จำเป็นต้องการค่าเริ่มต้นที่ค่อนข้างแม่นยำ ซึ่งหามาได้ยากในบางกรณี.

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาการไม่ลู่เข้าค่าๆหนึ่ง จึงได้มีหลายวิธีที่เสนอเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา เช่น spherical interpolation, the double maximum likelihood และ the hyperbolic positioning methods. ส่วนวิธีอื่นๆที่ใช้สำหรับทฤษฎี non-linear optimization เช่น Gauss-Newton method, Levenberg-Marquardt method และ quasi-Newton method รวมทั้ง DFP formula และ BFGS formula.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 รูปตัวอย่างสถานการณ์การระบุตำแหน่ง

**4.1 Direct Calculation Method** หรือการระบุพิกัดโดยใช้ระบบพิกัดเชิงเส้น (Cartesian) จากรูปที่ 4.1 เราจะได้ระยะทางตัวเซนเซอร์ (หรือตัวส่งสัญญาณ) ตัวที่  $i$  กับพิกัดที่ต้องการหา(tag) ดังนี้ โดยกำหนดให้ใช้ตัวเซนเซอร์ 4 ตัว เมื่อต้องการพิกัดโคออดิเนต  $(x, y, z)$  เพื่อง่ายต่อการคำนวณจะได้สมการพิกัดเชิงเส้นดังนี้

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} = c(t_i - t_0) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $(x, y, z)$  และ  $(x_i, y_i, z_i)$  เป็น โคออดิเนตของตำแหน่งที่ต้องการหา และตัวเซนเซอร์ตามลำดับ  $c$  คือความเร็วแสง

$t_i$  คือ เวลาที่นับตั้งแต่สัญญาณเริ่มส่งจากตัวเซนเซอร์จนกระทั่งตัวเซนเซอร์ได้รับสัญญาณนั้นๆ

$t_0$  คือ เวลาที่ไม่รู้ค่าในการส่งสัญญาณจากพิกัดที่ต้องการหา(tag)มายังตัวเซนเซอร์

จากสมการที่ 4.1 ยกกำลัง 2 ทั้ง 2 ข้างจะได้

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = c^2(t_i - t_0)^2 \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.2)$$

แทนค่า  $i = 1$  แล้วนำไปลบออกจากสมการที่ 4.2 จะได้สมการดังนี้

$$ct_0 = \frac{1}{2}c(t_1 - t_i) + \frac{1}{2c(t_1 - t_i)}\beta_{i1} - 2x_{i1}x - 2y_{i1}y - 2z_{i1}z \quad \text{เมื่อ } i = 2, 3, 4 \quad (4.3)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} x_{i1} &= x_i - x_1 \\ y_{i1} &= y_i - y_1 \\ z_{i1} &= z_i - z_1 \\ \beta_{i1} &= x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \end{aligned}$$

กำหนดให้เวลาจากพิกัดที่ต้องการหามาถึงเซนเซอร์แต่ละตัวมีค่าเวลาต่างกันเป็นสมการดังนี้

$$\square t_{ij} = t_i - t_j$$

กำจัดพจน์  $t_0$  จากสมการที่ 4.3 จะได้สมการ 2 สมการดังนี้

$$a_1x + b_1y + c_1z = g_1 \quad (4.4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= \square t_{12}x_{31} - \square t_{13}x_{21} \\ b_1 &= \square t_{12}y_{31} - \square t_{13}y_{21} \\ c_1 &= \square t_{12}z_{31} - \square t_{13}z_{21} \\ g_1 &= \frac{1}{2}(c^2\square t_{12}\square t_{13}\square t_{32} + \square t_{12}\beta_{31} - \square t_{13}\beta_{21}) \end{aligned}$$

และสมการ

$$a_2x + b_2y + c_2z = g_2 \quad (4.5)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_2 &= \square t_{12}x_{41} - \square t_{14}x_{21} \\ b_2 &= \square t_{12}y_{41} - \square t_{14}y_{21} \\ c_2 &= \square t_{12}z_{41} - \square t_{14}z_{21} \\ g_2 &= \frac{1}{2}(c^2\square t_{12}\square t_{14}\square t_{42} + \square t_{12}\beta_{41} - \square t_{14}\beta_{21}) \end{aligned}$$

รวมสมการที่ 4.4 และ สมการที่ 4.5 จะได้สมการดังนี้

$$x = Az + B \quad (4.6)$$



โดยที่

$$A = \frac{(b_1c_2 - b_2c_1)}{(a_1b_2 - a_2b_1)}$$

$$B = \frac{(b_2g_1 - b_1g_2)}{(a_1b_2 - a_2b_1)}$$

และ

$$y = Cz + D \quad (4.7)$$

โดยที่

$$C = \frac{(a_2c_1 - a_1c_2)}{(a_1b_2 - a_2b_1)}$$

$$D = \frac{(a_1g_2 - a_2g_1)}{(a_1b_2 - a_2b_1)}$$

แทนสมการที่ 4.6 และ สมการที่ 4.7 กลับไปยังสมการที่ 4.3 จะได้สมการดังนี้

$$c(t_1 - t_i) = Ez + F \quad (4.8)$$

โดยที่

$$E = \frac{1}{c \square t_{12}} x_{21}A + y_{21}C + z_{21}$$

$$F = \frac{c \square t_{12}}{2} + \frac{1}{2c \square t_{12}} (2(x_{21}B + y_{21}D) - \beta_{21})$$

แทนสมการที่ 4.6 สมการที่ 4.7 และสมการที่ 4.8 กลับไปยังสมการที่ 4.1 จะได้สมการดังนี้

$$Gz^2 + Hz + I = 0 \quad (4.9)$$

โดยที่

$$G = A^2 + C^2 - E^2 + 1$$

$$H = 2(A(B - x_1) + C(D - y_1) - z_1 - EF)$$

$$I = (B - x_1)^2 + (D - y_1)^2 + z_1^2 - F^2$$

ดังนั้นจะได้คำตอบของสมการที่ 4.9 ดังนี้

$$z = -\frac{H}{2G} \pm \sqrt{\left(\frac{H}{2G}\right)^2 - \frac{I}{G}}$$

คำตอบของค่า  $z$  ที่ได้นั้น(หากสมเหตุสมผล) ให้แทนกลับไปยังสมการที่ 4.6 และสมการที่ 4.7 เพื่อหาค่า  $x$  และ ค่า  $y$  แต่อย่างไรก็ตามเราต้องการเพียงแค่ว่าคำตอบเดียวเท่านั้น เราจึงจะไม่คิดคำตอบ

ของจุดที่ไม่สอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพ เช่น ได้คำตอบออกมาเป็นจำนวนเชิงซ้อน หรืออยู่นอกขอบเขตที่เราต้องการ ถ้าหากได้คำตอบ 2 คำตอบที่ใกล้เคียงกัน และต่างก็ล้วนสมเหตุสมผล ก็อาจจะให้ค่าเฉลี่ยของแต่ละจุดมาเป็นจุดอ้างอิง ถ้าเราต้องการที่คำตอบที่ละเอียดกว่านี้ สามารถทำได้โดยการเพิ่มตัวเซนเซอร์ตัวที่ 5 เข้าไปในระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติ นั้น จะมีตัวเซนเซอร์มากกว่า 5 ตัว

**4.2 Optimization Based Methods** เป็นวิธีการที่สามารถหาค่าได้ดีที่สุด ซึ่งมีหลายวิธีในการแก้ปัญหา non-linear optimization

#### 4.2.1 Objective Function

เนื่องจากเป้าหมายในการหาดำแหน่ง คือเพื่อที่จะได้มาซึ่งตำแหน่งที่มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด หรือได้ค่าประมาณของตำแหน่งที่แม่นยำที่สุด, จึงให้ objective function ของการหาดำแหน่งคือ ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองของทุกตัวเซนเซอร์

$$F(x, y, z, t_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N f_i^2(x_i, y_i, z_i, t_0)$$

โดยที่

$N$  คือ จำนวนเซนเซอร์ที่ใช้งาน

$(x, y, z)$  คือ ตำแหน่งที่ต้องการหา

$t_0$  คือ เวลาที่ไม่รู้ค่าในการส่งสัญญาณจากพิกัดที่ต้องการหาไปยังตัวเซนเซอร์

$t_i$  คือ เวลา TOA โดยประมาณ ที่ตัวเซนเซอร์ที่  $i$

$c$  คือ ความเร็วแสง

ให้  $p = (x, y, z, t_0)^T$

$$f(p) = (f_1(p), f_2(p), \dots, f_N(p))^T$$

จะได้ objective function ในรูปทั่วไปคือ

$$f(p) = \frac{1}{2} \|f(p)\|^2$$

#### 4.2.2 Gauss-Newton Method

เนื่องจาก objective function ที่ได้นั้นเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น ในการวิเคราะห์หาคำตอบของตัวแปร  $(x, y, z, t)$  จึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการพิเศษเพื่อที่จะหาผลเฉลยของระบบสมการได้ คือวิธีการสำหรับหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

พิจารณาสมการตัวแปรเดียว

$$f(x) = 0 \quad (4.10)$$

สมมติ  $x_0$  เป็นค่าเริ่มต้น (Initial condition) และ  $\Delta x = 0$  เป็นผลต่างจากคำตอบที่ถูกต้องของสมการ จะได้ว่า

$$f(x_0 + \Delta x) = 0 \quad (4.11)$$

หากเราทำการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์รอบจุด  $x_0$  ของพจน์ทางซ้ายของสมการ (4.11) จะได้ผลดังนี้

$$f(x_0) + f'(x_0)\Delta x + \frac{f''(x_0)\Delta x^2}{2!} + \dots = 0 \quad (4.12)$$

หากค่าความผิดพลาด  $\Delta x$  มีค่าต่ำพจน์ที่มีค่ากำลังสูงๆ เช่น ตั้งแต่กำลังสองขึ้นไปนั้นจะมีค่าต่ำมากจนเราสามารถละเลยได้ส่งผลให้

$$f(x_0) + f'(x_0)\Delta x \approx 0 \quad (4.13)$$

จะได้

$$\Delta x \approx \frac{-f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (4.14)$$

รวมค่า  $\Delta x$  กับค่าเริ่มต้นที่เรากำหนดตอนแรก

$$x = x_0 + \Delta x \quad (4.15)$$

ทำการคำนวณซ้ำไปจนกว่าค่า  $\Delta x \rightarrow 0$  จะได้ว่า

$$\Delta x_n \approx \frac{-f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (4.16)$$

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x_n \quad (4.17)$$

ดังนั้นเราจะสามารถประมาณสมการไม่เชิงเส้นเป็นสมการเชิงเส้นได้โดยกำหนดให้อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเพียงเล็กน้อยได้

กรณีสมการไม่เชิงเส้นจำนวน  $N$  สมการ และจำนวน  $N$  ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า เราสามารถจัดรูปแบบปัญหาให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = - \left( \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

เราเรียก เมตริกซ์  $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$  ว่า “เมตริกซ์จาโคเบียน” (Jacobian Matrix)

กระจาย objective function ที่ได้มา โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) รอบจุด  $p_k$  แล้ว  
คิดเฉพาะ 3 พจน์แรก จะได้

$$f(p_k + s_k) \approx f(p_k) + g_k^T s_k + \frac{1}{2} s_k^T G(p_k) s_k \quad (4.19)$$

โดยที่

$s_k$  คือ directional vector หรือ increment vector ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการหา

$g_k$  คือ Jacobian matrix เมื่อแทนค่าจุด  $p_k$

$G(p_k)$  คือ Hessian matrix ของ objective function

ทำการประมาณค่าโดยให้

$$G(p_k) s_k = -g_k \quad (4.20)$$

ซึ่งการประมาณค่าดังนั้นก็เพื่อหลีกเลี่ยงในการคำนวณสมการ 2nd-order ใน Hessian matrix,  
ดังนั้นจึงจัดสมการใหม่จะได้

$$J_k^T J_k s_k = -J_k^T f(p_k) \quad (4.21)$$

ดังนั้นจะได้ค่าที่เราต้องการหาคือ

$$s_k = -(J_k^T J_k)^{-1} J_k^T f(p_k) \quad (4.22)$$

อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวเป็นเพียงค่าประมาณ ซึ่งอาจจะมีปัญหาเมื่อพจน์ 2nd-order  
ใน Hessian matrix นั้นไม่ลู่อเข้า ดังนั้นจึงมีวิธีเพื่อแก้ปัญหานี้คือ Levenberg-Marquardt method ซึ่ง  
นิยามสมการดังนี้

$$(J_k^T J_k + \lambda I) s_k = -J_k^T f(p_k) \quad (4.23)$$

โดยที่

$\lambda$  คือ ค่าเมตริกซ์ที่สมาชิกไม่ติดลบ

ในการคำนวณแต่ละรอบของวิธี Gauss-Newton นั้น ค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันที่เราต้องการหา และค่า  $t_0$  จำเป็นที่ต้องใช้ในการคำนวณเพื่อที่จะได้ค่าประมาณของคำตอบที่ดีกว่า ค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันที่เราต้องการหาให้เลือกราคาเฉลี่ยของตำแหน่งเซนเซอร์ทุกตัว หรือค่าเฉลี่ยจากพื้นที่ที่อยู่ในขอบเขตที่สังเกต ส่วนค่า  $t_0$  ค่าแรกนั้น ให้เลือกราคาที่น้อยกว่า  $t_i$  ที่น้อยที่สุดอยู่ประมาณครึ่งหนึ่ง ถ้าใส่ค่าเริ่มต้นที่ดีหรือสมเหตุสมผล ก็จะทำให้ optimization-based methods ได้ผลลัพธ์ที่ดีและรวดเร็วขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

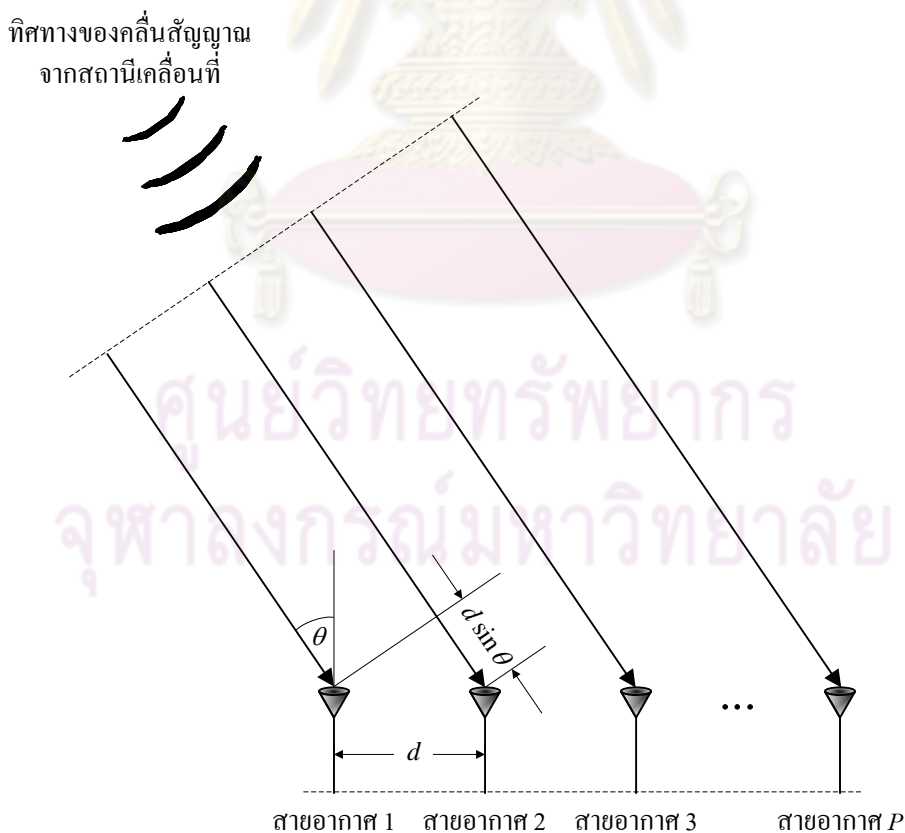


## บทที่ 5

### การประมาณทิศทางการมาถึงของสัญญาณ (Estimation of Direction of Arrival)

#### 5.1 ปัญหาการประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณ

ในการระบุตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station: MS) นั้น สถานีฐานแต่ละแห่ง (อย่างน้อย 2 แห่ง) จะติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ (antenna array) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.1 เพื่อใช้ในการประมาณค่าทิศทางการมาถึง (Direction Of Arrival: DOA) ของสัญญาณจากเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในรูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับที่มีจำนวนสายอากาศ  $P$  ต้น สายอากาศแต่ละต้นถูกจัดเรียงเป็นแถวตรงโดยแต่ละต้นมีระยะห่างเท่า ๆ กันเท่ากับ  $d$  เมตร ดังนั้น สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าเวลาประวิงที่ต่างกัน ในตัวอย่างนี้ คลื่นสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ที่จะเดินทางถึงสายอากาศต้นแรกก่อน และจะตกกระทบสายอากาศต้นที่สอง ต้นที่สาม และต้นอื่น ๆ ในเวลาถัดมาตามลำดับ



รูปที่ 5.1 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับ (antenna array) ของสถานีฐาน  
กรณีที่มีสถานีเคลื่อนที่ 1 สถานี

พิจารณากรณีที่มีสถานีเคลื่อนที่รอบสถานีฐานเพียง 1 สถานี และสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่นั้นมีทิศทางเป็น  $\theta$  จะได้ว่าสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศต้นที่  $p^{\text{th}}$  ของสถานีฐานสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$x_p(t) = a_p(\theta)s(t) + n_p(t) \quad (5.1)$$

โดยที่  $s(t)$  คือ สัญญาณที่มาจากสถานีเคลื่อนที่

$n_p(t)$  คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวกที่สายอากาศต้นที่  $p^{\text{th}}$

$a_p(\theta)$  คือ ตัวประกอบทิศทางของสายอากาศต้นที่  $p^{\text{th}}$

หรือจะเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\mathbf{x} = \mathbf{a}(\theta)\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (5.2)$$

โดย

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_p]^T$$

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j2\pi d \sin \theta / \lambda}, \dots, e^{j2\pi(P-1)d \sin \theta / \lambda}]^T$$

และ

$$\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_p]^T$$

โดยที่  $\mathbf{a}(\theta)$  คือ เวกเตอร์กำหนดทิศทาง (steering vector) ของสายอากาศแถวลำดับ

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่

$\mathbf{n}$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก

$T$  คือ การทรานส์โพส

$N$  คือ จำนวนข้อมูลที่พิจารณา

**กรณีที่มีสถานีเคลื่อนที่  $M$  สถานี**

กรณีที่มีสถานีเคลื่อนที่รอบสถานีฐานมากกว่า 1 สถานี สมมติให้มีทั้งหมด  $M$  สถานี สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศต้นที่  $p^{\text{th}}$  ของสถานีฐานสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$x_p = \sum_{m=1}^M a_p(\theta_m)s_m + n_p \quad (5.3)$$

โดยที่  $s_m$  คือ สัญญาณที่มาจากสถานีเคลื่อนที่  $m$

$n_p$  คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวกที่สายอากาศต้นที่  $p^{\text{th}}$

$\theta_m$  คือ ทิศทางของสัญญาณที่มาจากสถานีเคลื่อนที่  $m$

$a_p(\theta_m)$  คือ ตัวประกอบทิศทางของสายอากาศต้นที่  $p^{\text{th}}$  สำหรับสัญญาณที่มาจากสถานีเคลื่อนที่  $m$

หรือจะเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (5.4)$$

โดย

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1, \dots, x_p]^T \\ \mathbf{s} &= [s_1, \dots, s_M]^T \\ \mathbf{A} &= [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]^T \end{aligned}$$

และ

$$\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_p]^T$$

โดยที่

$\mathbf{x}$  คือ เมทริกซ์ของสัญญาณที่สายอากาศแถวลำดับรับได้ ที่มีขนาด  $P \times 1$

$\mathbf{A}$  คือ เมทริกซ์ของเวกเตอร์กำหนดทิศทางของสัญญาณ ที่มีขนาด  $P \times M$

$\mathbf{s}$  คือ เมทริกซ์ของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ ที่มีขนาด  $M \times 1$

$\mathbf{n}$  คือ เมทริกซ์ของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก ที่มีขนาด  $P \times 1$

## 5.2 วิธีจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC

การใช้วิธีจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC เป็นวิธีหนึ่งในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ จากสถานีเคลื่อนที่ที่มาถึงสายอากาศแถวลำดับวิธีที่ง่ายที่สุดในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณคือ การประมาณค่าทิศทางผ่านค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของข้อมูล โดยกำหนดให้สัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ต้องมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนสายอากาศที่สถานีฐาน ( $M < P$ ) และสัญญาณที่เข้ามาไม่มีความเกี่ยวเนื่องกัน ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าสหสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^H] \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} &= E[(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{n})(\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{n})^H] \\ &= E[\mathbf{A}\mathbf{A}^H \mathbf{s}\mathbf{s}^H + \mathbf{n}\mathbf{n}^H] \\ &= E[\mathbf{A}\mathbf{s}\mathbf{s}^H \mathbf{A}^H] + E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] \\ &= E[\mathbf{A}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Lambda}^H] + E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$= \mathbf{R}_s + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (5.7)$$

โดย

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{A}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Lambda}^H \quad (5.8)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} E[|s_1|^2] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E[|s_2|^2] & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & E[|s_M|^2] \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

โดยที่

$\mathbf{R}$  คือ เมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศขนาด  $P \times P$

$\mathbf{R}_s$  คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่

$\sigma$  คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก

$\mathbf{I}$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์

จะเห็นได้ว่า เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเป็นเมทริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับ  $P \times P$  และเนื่องจากสัญญาณที่มาจกสถานีเคลื่อนที่มีจำนวน  $M$  ค่า ดังนั้น จะมีค่าไอเกนเวกเตอร์จำนวน  $P-M$  ตัวที่มีค่าไอเกนเวกเตอร์เป็นศูนย์

กำหนดให้  $\mathbf{q}_m$  เป็นไอเกนเวกเตอร์ที่มีค่าไอเกนเวกเตอร์เป็นศูนย์

$$\text{จะได้ว่า} \quad \mathbf{R}_s \mathbf{q}_m = \mathbf{A} \mathbf{\Lambda} \mathbf{A}^H \mathbf{q}_m = 0 \quad (5.10)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \mathbf{q}_m^H \mathbf{A} \mathbf{\Lambda} \mathbf{A}^H \mathbf{q}_m = 0 \quad (5.11)$$

$$\text{และ} \quad \mathbf{A}^H \mathbf{q}_m = 0 \quad (5.12)$$

จากสมการที่ (12) จะเห็นได้ว่า ไอเกนเวกเตอร์จำนวน  $P-M$  ( $\mathbf{q}_m$ ) ของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ ( $\mathbf{R}_s$ ) มีค่าไอเกนเวกเตอร์เป็นศูนย์นั้นเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์กำหนดทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ทั้งหมด

กำหนดให้  $\mathbf{Q}_n$  คือเมทริกซ์ของไอเกนเวกเตอร์ตัวที่  $M+1$  จนถึง  $P$  ที่มีขนาดเป็น  $P \times (P-M)$  เราสามารถพลอตกราฟของสเปกตรัมได้จากสมการคณิตศาสตร์นี้

$$\begin{aligned} P_{MUSIC}(\theta_M) &= \frac{1}{\sum_{m=1}^{P-M} |\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{q}_m|^2} \\ &= \frac{1}{\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{Q}_n \mathbf{Q}_n^H \mathbf{A}(\theta)} \\ &= \frac{1}{\|\mathbf{Q}_n^H \mathbf{A}(\theta)\|^2} \end{aligned} \quad (5.13)$$

เนื่องจากไอเกนเวกเตอร์ทำให้  $\mathbf{Q}_n$  เป็นออร์โธโกนอล (Orthogonal) กับเวกเตอร์กำหนดทิศทาง (Steering vectors) ดังนั้นพจน์ตัวหารจากสมการที่ (13) จะกลายเป็นศูนย์เมื่อ  $\theta$  คือทิศทางของสัญญาณ ดังนั้น เราสามารถประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่โดยพิจารณาจาก

สเปกตรัมสูงสุดจำนวน  $M$  ค่า อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติบางสถานการณ์เราไม่สามารถหาค่าเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ ( $\mathbf{R}_S$ ) ได้ แต่เราสามารถประมาณค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณที่สายอากาศได้ ( $\mathbf{R}$ ) ดังนั้น เราจึงสามารถประมาณค่าไอเกนเวกเตอร์  $\mathbf{Q}_n$  ได้จากไอเกนเวกเตอร์ของความแปรปรวนร่วมของสัญญาณที่สายอากาศได้ ( $\mathbf{R}$ )

ถ้ากำหนดให้ไอเกนเวกเตอร์  $\mathbf{q}_m \in \mathbf{Q}$

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad & \mathbf{R}_S \mathbf{q}_m = \lambda_m \mathbf{q}_m \\ \text{จะได้} \quad & \mathbf{R} \mathbf{q}_m = \mathbf{R}_S \mathbf{q}_m + \sigma^2 \mathbf{I} \mathbf{q}_m \\ \text{ดังนั้น} \quad & = (\lambda_m + \sigma^2) \mathbf{q}_m \end{aligned} \quad (5.14)$$

เช่น ถ้าให้ไอเกนเวกเตอร์ใดๆของ  $\mathbf{R}_S$  เป็นไอเกนเวกเตอร์ตัวหนึ่งของความแปรปรวนร่วมของสัญญาณที่สายอากาศได้ ( $\mathbf{R}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับค่าไอเกนแวลูร์  $\lambda_m + \sigma^2$  และกำหนดให้  $\mathbf{R}_S = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^H$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{Q} [\mathbf{\Lambda} + \sigma^2 \mathbf{I}] \mathbf{Q}^H \\ &= \mathbf{Q} \begin{bmatrix} \lambda_1 + \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 + \sigma^2 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_M^2 + \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \sigma^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \sigma^2 \end{bmatrix} \mathbf{Q}^H \end{aligned}$$

หลักการคือการแบ่งค่าไอเกนเวกเตอร์ โดยเราสามารถแบ่งเมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์  $\mathbf{Q}$  ออกเป็น เมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ของสัญญาณ  $\mathbf{Q}_s$  ที่มีขนาด  $M$  คอลัมน์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณจำนวน  $M$  สัญญาณ และเมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวน  $\mathbf{Q}_n$  ที่มีขนาดเท่ากับ  $P - M$  คอลัมน์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวน ( $\sigma^2$ )

ข้อสังเกตคือ  $\mathbf{Q}_n$  เป็นเมทริกซ์ของไอเกนเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ  $P \times (P - M)$  ซึ่งสอดคล้องกับค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวน ( $\sigma^2$ ) ก็เป็นเมทริกซ์ตัวเดียวกันกับเมทริกซ์ไอเกนแวลูร์ของ  $\mathbf{R}_S$  ที่สอดคล้องกับค่าไอเกนแวลูร์ที่เป็นศูนย์ ดังนั้น จึงนิยามให้  $\mathbf{Q}_s$  คือเมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ในปริภูมิย่อยของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ ในขณะที่  $\mathbf{Q}_n$  คือเมทริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ในปริภูมิย่อยของสัญญาณรบกวน จากทั้งหมดนี้ เราจะได้ว่า

- ค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณตัวที่  $m$  ก็คือ  $\lambda_m + \sigma^2 = N |\alpha_m|^2 + \sigma^2$
- ค่าไอเกนแวลูร์ที่น้อยที่สุดของ  $\mathbf{R}$  คือค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวน และทั้งหมดมีค่าเท่ากับ  $\sigma^2$  โดยวิธีหนึ่งในการจะแยกแยะข้อแตกต่างระหว่างค่าไอเกน



แวลูร์ของสัญญาณและค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวน คือทำการหาจำนวนค่าไอเกนแวลูร์น้อยๆที่มีค่าเท่ากัน

- ตามกฎของออร์ทोगอนอลของเมทริกซ์ของไอเกนแวลูร์ ( $\mathbf{Q}$ ) จะได้ว่าเมทริกซ์ไอเกนแวลูร์ในปริภูมิย่อยของสัญญาณ ( $\mathbf{Q}_s$ ) จะตั้งฉากกับเมทริกซ์ไอเกนแวลูร์ในปริภูมิย่อยของสัญญาณรบกวน ( $\mathbf{Q}_n$ ) หรือ  $\mathbf{Q}_s \perp \mathbf{Q}_n$

ถ้าพิจารณาจากสิ่งที่ได้ทั้งสองข้อสุดท้าย เราจะเห็นได้ว่าไอเกนเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนทั้งหมดเป็นออร์ทोगอนอลหรือตั้งฉากกับเวกเตอร์กำหนดทิศทางของสัญญาณ (Steering vectors) ซึ่งนี่คือหลักการพื้นฐานของวิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC เมื่อพิจารณาในฟังก์ชันของ  $\theta$  จะได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการนี้

$$\begin{aligned} P_{MUSIC}(\theta_M) &= \frac{1}{\sum_{m=M+1}^P |\mathbf{q}_m^H \mathbf{A}(\theta)|^2} \\ &= \frac{1}{\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{Q}_n \mathbf{Q}_n^H \mathbf{A}(\theta)} \end{aligned} \quad (5.15)$$

โดยที่  $\mathbf{q}_m$  คือ ไอเกนเวกเตอร์หนึ่งของไอเกนเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนจำนวน  $P-M$  และถ้า  $\theta$  คือทิศทางของสัญญาณหนึ่งของสถานีเคลื่อนที่ จะได้ว่า

$$\mathbf{A}(\theta) \perp \mathbf{q}_m$$

และพจน์ตัวหารมีค่าเป็นศูนย์เหมือนกัน

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า วิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC สามารถประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยค่าสูงสุดของฟังก์ชัน  $P_{MUSIC}(\theta)$

### 5.3 วิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) ในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ (Correlation Matrix) หรือ  $\mathbf{R}$  เป็นเมทริกซ์ที่เราไม่ทราบค่าและต้องถูกประมาณค่าจากข้อมูลของสัญญาณที่รับได้ ดังนั้น ในการประมาณค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ เราจะอาศัยการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลหลายๆข้อมูล เราก็จะได้ค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยตามความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการนี้

$$\mathbf{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H \quad (5.16)$$

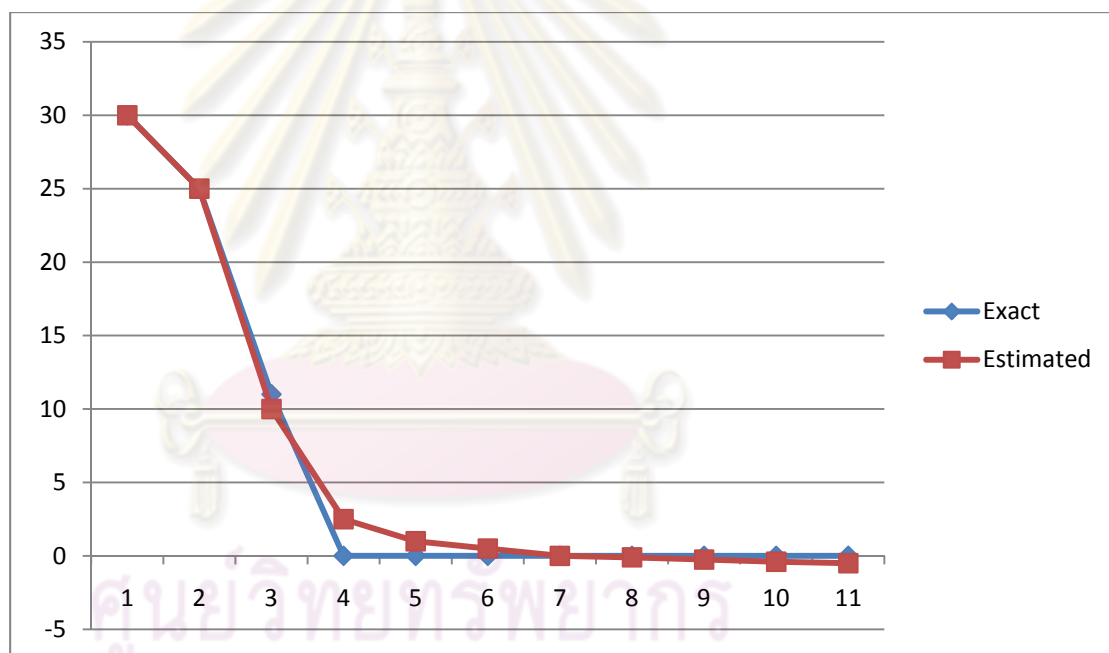
โดยที่

$\mathbf{x}_k$  คือ ข้อมูลของสัญญาณที่  $k$  ที่เรานำมาพิจารณา

$K$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาพิจารณา

ถ้าข้อมูลที่รับได้เป็นข้อมูลแบบเกาส์สีขาวแบบบวก การประมาณค่านี้จะดูเข้าค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์จริง เราจะพบได้ว่า เมทริกซ์สหสัมพันธ์นี้จะถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยีการส่งสัญญาณผ่านตัวต่อประสานอากาศ (air interface)

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการใช้การประมาณค่าของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ก็คือ ค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวนจะมีค่าไม่เหมือนกัน จากรูปที่ 5.2 เป็นการพลอตกราฟแสดงค่าไอเกนแวลูร์ในอุดมคติของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ที่เราทราบค่า และกราฟแสดงค่าไอเกนแวลูร์เมทริกซ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการประมาณค่า จากตัวอย่างในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าเราใช้สายอากาศลำดับแถวที่สถานีฐาน 11 ตัวโดยที่มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ 3 สัญญาณ ในกรณีที่เป็นอุดมคติ ค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวน 8 ค่าจะมีค่าเท่ากันทั้งหมด ส่วนค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณ 3 สัญญาณจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังของสัญญาณ



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าไอเกนแวลูร์ในอุดมคติและค่าไอเกนแวลูร์จากการประมาณค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์

ในความเป็นจริง การที่เราประมาณค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ ค่าไอเกนแวลูร์จะมีความต่อเนื่องกันไป เราจึงไม่สามารถแยกค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณกับค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวนได้อย่างชัดเจน แต่มีข้อสังเกตว่า ค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวนบางตัวจะมีค่ามากกว่าค่าจริงของมัน ในกรณีนี้สถานการณ์มีค่าเรโซรหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนต่ำ ซึ่งเราจะได้

ค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณที่สอดคล้องกับค่า  $(\lambda_M + \sigma^2)$  ไม่แตกต่างกับค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวน  $(\sigma^2)$  มากนัก

ถ้าในกรณีที่เราไม่ทราบจำนวนของสัญญาณ  $(M)$  จะทำให้เราตัดสินใจหาค่าไอเกนแวลูร์ที่เท่ากัน ได้ยากและการประมาณค่าจำนวนของสัญญาณก็ผิดพลาดได้ง่าย แต่ความเท่ากันของค่าไอเกนแวลูร์ของสัญญาณรบกวนสามารถวัดค่าได้ในทางสถิติ

กำหนดให้  $M$  คือจำนวนสัญญาณที่เราทราบค่า ในทางปฏิบัติ ขั้นตอนทางวิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณหรือ MUSIC มีดังต่อไปนี้ คือ

1. ประมาณค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์  $(\mathbf{R})$  โดยใช้สมการที่ (16) และหาค่าไอเกนแวลูร์ที่แยกออกเป็นสองส่วนจาก  $\mathbf{R}_s = \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^H$
2. เนื่องจาก  $\mathbf{Q}_n$  เป็นส่วนประกอบหนึ่งของ  $\mathbf{Q}$  ดังนั้น เราจึงสามารถหาค่า  $\mathbf{Q}_n$  ที่สอดคล้องกับค่าไอเกนแวลูร์ที่น้อยที่สุดของ  $\mathbf{Q}$  จำนวน  $P-M$  ค่า ซึ่งค่า  $\mathbf{Q}_n$  นี้ก็คือปริภูมิย่อยของสัญญาณรบกวน
3. พล็อตกราฟในฟังก์ชันของ  $\theta$  โดยสำหรับฟังก์ชันของ MUSIC ก็คือ  $P_{MUSIC}(\theta)$  ดังสมการที่ (15)
4. ทิศทางของสัญญาณจำนวน  $M$  ค่า ก็คือค่า  $M$  ณ จุดสูงสุดของ  $P_{MUSIC}(\theta)$

#### 5.4 การประมาณค่าทิศทางของการมาถึงของสัญญาณแบบคาปอน (Capon Angle of Arrival)

วิธีการประมาณค่าทิศทางของการมาถึงของสัญญาณแบบคาปอน (Capon angle of arrival) หรือ CAPON AOA เป็นวิธีหนึ่งในการระบุตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่มาถึงสายอากาศแถวลำดับ โดยจะอาศัยการประมาณค่าทิศทางผ่านค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของข้อมูล โดยกำหนดให้สัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ต้องมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนสายอากาศที่สถานีฐาน  $(M < P)$  และสัญญาณที่เข้ามาไม่มีความเกี่ยวเนื่องกัน ซึ่งจะทำการประมาณค่าน้อยที่สุดของการเบี่ยงเบนของสัญญาณรบกวน (Minimum distortionless response) หรือ MVDR ซึ่งเป็นการประมาณค่าความเป็นไปได้มากที่สุด (Maximum likelihood) ของกำลังของสัญญาณที่รับได้เพื่อนำมาประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ ดังนั้น จึงทำการหาค่าเรโซแนนซ์สูงสุดระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Maximize the signal to interference ratio) หรือ SIR ขณะที่สัญญาณผ่านเข้ามาในช่วงเฟสและแอมพลิจูดที่สนใจ โดยกำหนดให้เมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิด (Source correlation matrix) หรือ  $\bar{\mathbf{R}}_{ss}$  มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการนี้

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_n \mathbf{x}_n^H \quad (5.17)$$

โดยที่

$\bar{\mathbf{R}}_{xx}$  คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณที่เสาอากาศที่สถานีฐานรับได้

$\mathbf{x}_n$  คือ ข้อมูลของสัญญาณที่  $n$  ที่รับได้ที่สายอากาศ

$N$  คือ จำนวนข้อมูลที่นำมาพิจารณา

ต่อมาก็ทำการหาค่าสเปกตรัมของสัญญาณโดยอาศัยเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณเพื่อประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ ดังสมการทางคณิตศาสตร์นี้

$$\mathbf{P}_{CAPON}(\theta) = \frac{1}{\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{R}}_{xx}\bar{\mathbf{A}}^H + \bar{\mathbf{R}}_{nn}} \quad (5.18)$$

โดย

$$\bar{\mathbf{R}}_{nn} = \sigma_n^2 \mathbf{I}$$

โดยที่

$\bar{\mathbf{R}}_{nn}$  คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก

$\sigma$  คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก

$\mathbf{I}$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์

จากวิธีการประมาณค่าทิศทางของการมาถึงของสัญญาณแบบคาปอน (Capon angle of arrival) เราสามารถประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยค่าสูงสุดของฟังก์ชัน  $\mathbf{P}_{CAPON}(\theta)$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ผลการทดลองการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึม

#### MUSIC และ CAPON

##### 6.1 การทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยอัลกอริทึม

##### MUSIC และ CAPON

เราได้จำลองการทดลองเพื่อทำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่เพื่อระบุตำแหน่ง โดยอาศัยอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) และอัลกอริทึมแบบคาปอน (Capon angle of arrival algorithm) แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้มาระหว่างสองอัลกอริทึม ซึ่งทำการศึกษาเฉพาะกรณีที่มีแพร่กระจายของสัญญาณ (Propagation Model) เป็นการสื่อสารทิศทางตรง (Line of sight) เสมอ

ในการทดลองนี้จะทดลองในกรณีที่มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่หลายสัญญาณเริ่มจาก 4 สัญญาณ 8 สัญญาณ ตามลำดับ โดยจะทำการทดลองกรณีละ 200 ครั้งเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแต่ละวิธี

โดยกำหนดให้

ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 0.005 เมตร

##### วิธีการทดลอง

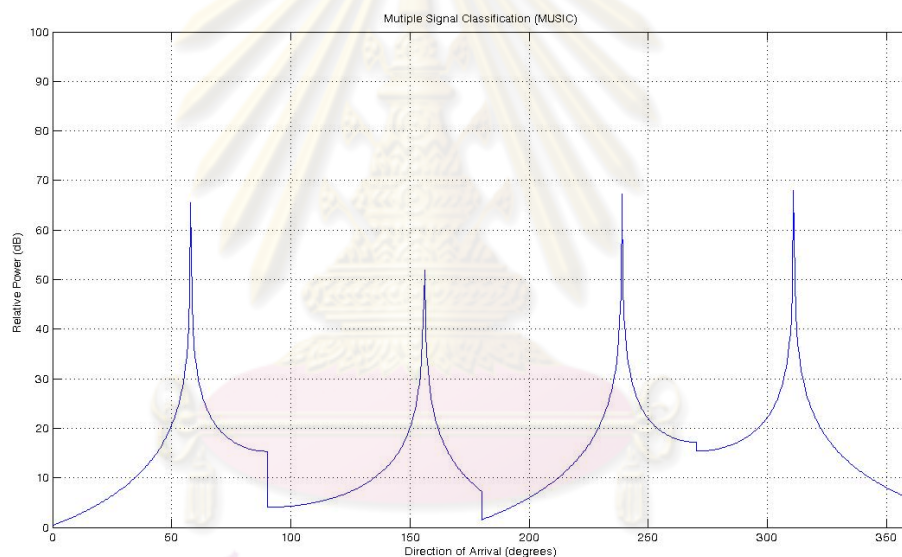
1. สุ่มตัวอย่างค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ในหน่วยขององศา
2. นำค่าทิศทางที่สุ่มตัวอย่างมาสร้างสัญญาณขึ้น โดยเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวกเข้าไปด้วย
3. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 2. มาเข้ากระบวนการวิธีของ MUSIC
4. พล็อตกราฟสเปกตรัมของสัญญาณและประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC
5. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 2. มาเข้ากระบวนการวิธี CAPON AOA
6. พล็อตกราฟสเปกตรัมของสัญญาณและประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี CAPON
7. นำค่าทิศทางที่ประมาณได้จากสองวิธีมาเปรียบเทียบกันพร้อมทั้งหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของทั้งสองวิธี



8. ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ผลการทดลองที่ 6.1.1 ทำประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ด้วยอัลกอริทึม MUSIC และ CAPON โดยกำหนดให้มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่จำนวน 4 สัญญาณ และมีสายอากาศแบบแถวลำดับ (antenna array) จำนวน 12 ต้น โดยทำการทดลองซ้ำกัน 500 ครั้ง แล้วทำการเปรียบเทียบผลดูความแม่นยำในการประมาณค่าของสองอัลกอริทึม

ตัวอย่างผลการทดลองที่ 6.1.1

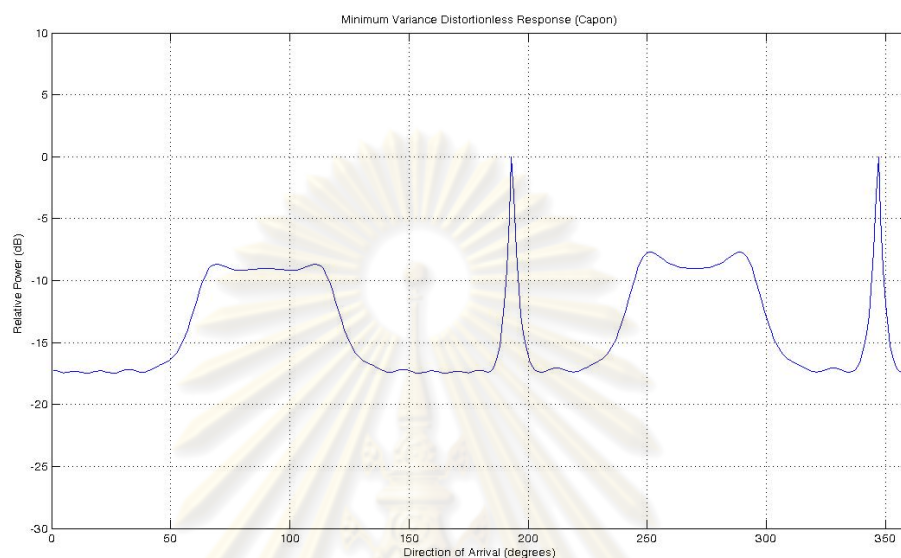


รูปที่ 6.1 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC โดยมี

สัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 4 สัญญาณ

จากรูปที่ 6.1 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงสเปกตรัมของสัญญาณ ณ มุมต่างๆ ที่แสดงผลการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ โดยอาศัยอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC จากหลักการของ MUSIC ค่ามุม ณ จุดสูงสุดของสเปกตรัมของสัญญาณคือทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่า และเนื่องจากสัญญาณ

ที่เราป้อนเข้ามามีจำนวน 4 สัญญาณ ดังนั้นจากรูปจะเห็นได้ว่า จะมีจำนวนจุดสูงสุดของสัญญาณ 4 จุดเหมือนกัน



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี CAPON โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 4 สัญญาณ

จากรูปที่ 6.2 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงสเปกตรัมของสัญญาณ ณ มุมต่างๆ ที่แสดงผลการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ โดยอาศัยอัลกอริทึมการประมาณทิศทางของสัญญาณแบบ CAPON ซึ่งหลักการการประมาณทิศทางก็เหมือนกับวิธี MUSIC คือ ค่ามุม ณ จุดสูงสุดของสเปกตรัมของสัญญาณคือทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ 4 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON

$\theta_{\text{rand}}$ (องศา)	$\theta_{\text{MUSIC}}$ (องศา)	$\theta_{\text{CAPON}}$ (องศา)	$\%error_{\text{MUSIC}}$	$\%error_{\text{CAPON}}$
$\theta_1 = 58$	58.05	53.00	0.0005	0.0500
$\theta_2 = 156$	156.15	127.00	0.0015	0.0123
$\theta_3 = 239$	238.95	205.00	0.0005	0.3400
$\theta_4 = 311$	310.95	335.00	0.0005	0.2400

โดย

$\theta_{\text{rand}}$  คือ ค่าทิศทางของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง ในหน่วยองศา

$\theta_{\text{MUSIC}}$  คือ ค่าทิศทางของสัญญาณที่ประมาณค่าได้ด้วยวิธี MUSIC

$\theta_{\text{CAPON}}$  คือ ค่าทิศทางของสัญญาณที่ประมาณค่าได้ด้วยวิธี CAPON

$\%error_{\text{MUSIC}}$  คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของวิธี MUSIC

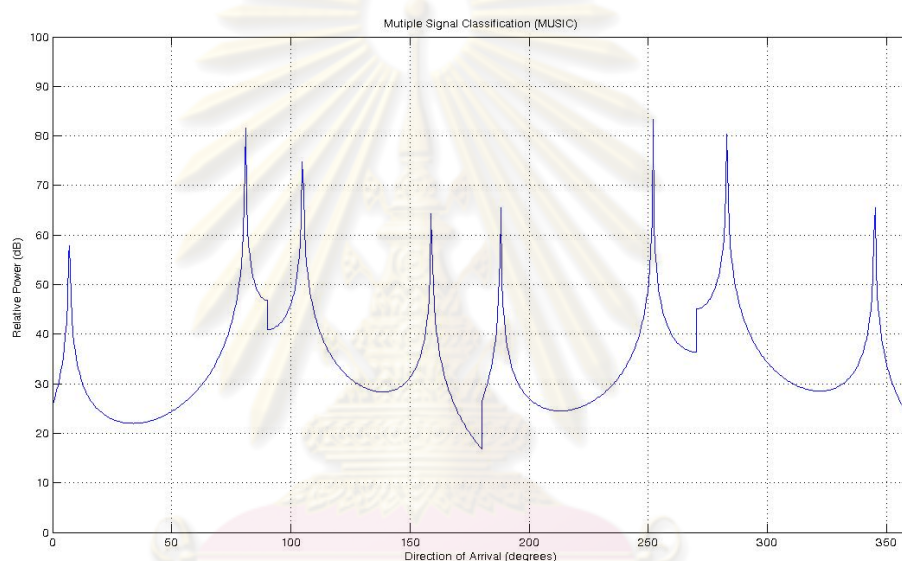
$\%error_{\text{CAPON}}$  คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของวิธี CAPON

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ 4 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON

วิธีค่าความแม่นยำ	ค่าเฉลี่ย %Error	ค่าเฉลี่ย RMS(องศา)
MUSIC	0.213%	0.1276
CAPON	43%	29.78

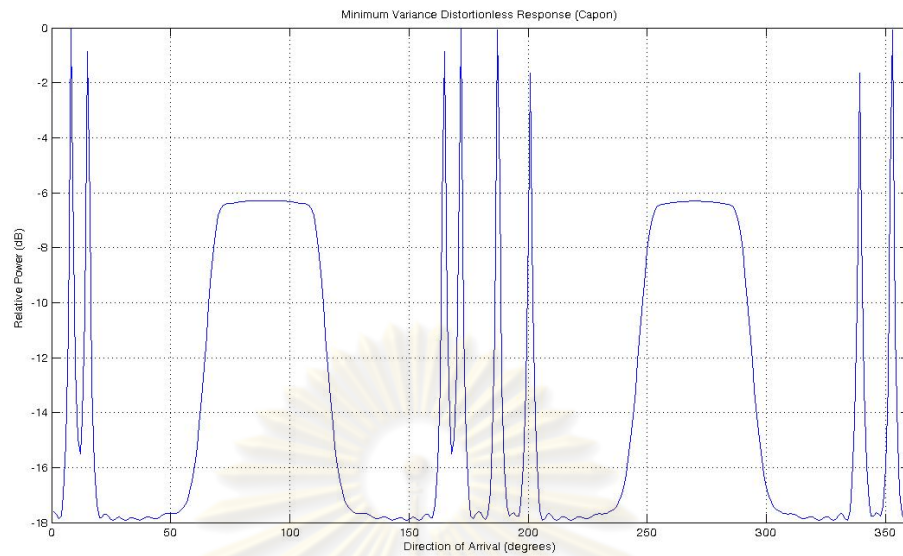
ผลการทดลองที่ 6.1.2 ทำประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ด้วยอัลกอริทึม MUSIC และ CAPON โดยกำหนดให้มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่จำนวน 8 สัญญาณ และมีสายอากาศแบบแถวลำดับ (antenna array) จำนวน 24 ต้น โดยทำการทดลองซ้ำกัน 500 ครั้ง แล้วทำการเปรียบเทียบผลดูความแม่นยำในการประมาณค่าของสองอัลกอริทึม

### ตัวอย่างผลการทดลองที่ 6.1.2



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 8 สัญญาณ

จากรูปที่ 6.3 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงสเปกตรัมของสัญญาณ ณ มุมต่างๆ ที่แสดงผลการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ โดยอาศัยอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC จากหลักการของ MUSIC ค่ามุม ณ จุดสูงสุดของสเปกตรัมของสัญญาณคือทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่า และเนื่องจากสัญญาณที่เราป้อนเข้ามามีจำนวน 8 สัญญาณ ดังนั้นจากรูปจะเห็นได้ว่า จะมีจำนวนจุดสูงสุดของสัญญาณ 8 จุดเหมือนกัน



รูปที่ 6.4 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดลองกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี CAPON โดยมีสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าทิศทาง 8 สัญญาณ

จากรูปที่ 6.4 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงสเปกตรัมของสัญญาณ ณ มุมต่างๆ ที่แสดงผลการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ โดยอาศัยอัลกอริทึมการประมาณทิศทางของสัญญาณแบบ CAPON ซึ่งหลักการการประมาณทิศทางก็เหมือนกับวิธี MUSIC คือ ค่ามุม ณ จุดสูงสุดของสเปกตรัมของสัญญาณคือทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ 8 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON

$\theta_{\text{rand}}$ (องศา)	$\theta_{\text{MUSIC}}$ (องศา)	$\theta_{\text{CAPON}}$ (องศา)	$\%error_{\text{MUSIC}}$	$\%error_{\text{CAPON}}$
$\theta_1 = 41$	40.95	18.00	0.0005	0.2300
$\theta_2 = 59$	58.95	76.00	0.0005	0.1700
$\theta_3 = 124$	124.20	104.00	0.0020	0.2000
$\theta_4 = 169$	169.20	162.00	0.0020	0.0070
$\theta_5 = 198$	198.00	191.00	0.0000	0.0070
$\theta_6 = 251$	251.10	237.00	0.0010	0.1400
$\theta_7 = 274$	274.05	303.00	0.0005	0.2900
$\theta_8 = 318$	318.15	350.00	0.0015	0.3200

โดย

$\theta_{\text{rand}}$  คือ ค่าทิศทางของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง ในหน่วยองศา

$\theta_{\text{MUSIC}}$  คือ ค่าทิศทางของสัญญาณที่ประมาณค่าได้ด้วยวิธี MUSIC

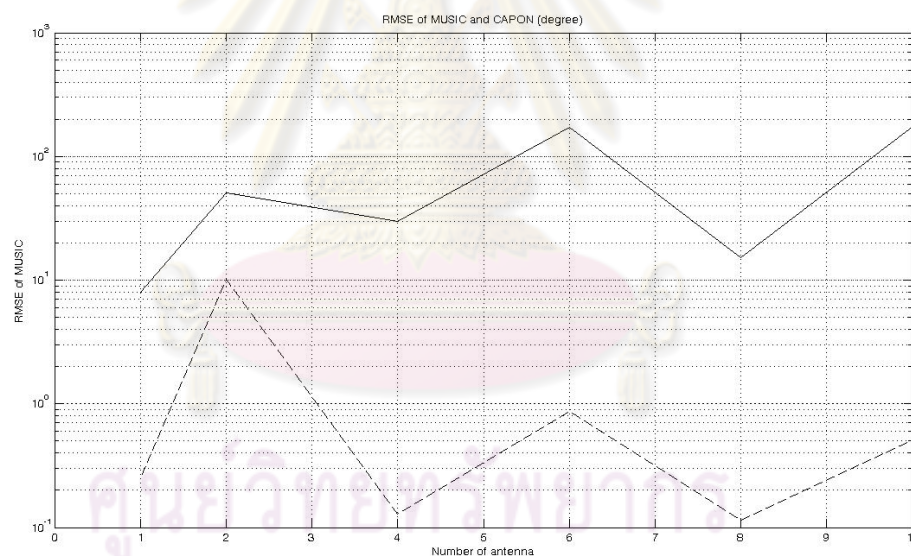
$\theta_{\text{CAPON}}$  คือ ค่าทิศทางของสัญญาณที่ประมาณค่าได้ด้วยวิธี CAPON

$\%error_{\text{MUSIC}}$  คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของวิธี MUSIC

$\%error_{\text{CAPON}}$  คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของวิธี CAPON

ตารางที่ 6.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการประมาณค่าทิศทางของ  
สัญญาณ 8 สัญญาณ ด้วยอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึม CAPON

วิธีค่าความแม่นยำ	ค่าเฉลี่ย %Error	ค่าเฉลี่ย RMS(องศา)
MUSIC	0.16%	0.1153
CAPON	16.3985%	15.0988



รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบแสดงค่า Root mean square ของความผิดพลาดในการประมาณค่าทิศทาง  
ของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC และ CAPON

จากรูปที่ 6.5 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบแสดงความแม่นยำหรือค่า Root mean square ของความผิดพลาดในการประมาณทิศทางของสัญญาณด้วยอัลกอริทึม MUSIC และอัลกอริทึม CAPON จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางแล้ว

อัลกอริทึม MUSIC ให้ผลการประมาณค่าที่แม่นยำมากกว่าวิธี CAPON โดยเมื่อเปรียบเทียบผลกันแล้ว อัลกอริทึม MUSIC มีความแม่นยำมากกว่าวิธี CAPON ประมาณ 100 เท่า



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.2 ผลการทดลองศึกษาจำนวนเสาอากาศที่มีผลต่อความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยอัลกอริทึม MUSIC

เราได้จำลองการทดลองเพื่อทำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่เพื่อระบุตำแหน่ง โดยอาศัยอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) โดยกำหนดให้มีสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่าจำนวน 1 สัญญาณ แล้วทำการเพิ่มจำนวนเสาสัญญาณจาก 1-10 เสา เพื่อดูผลกระทบต่อค่าความแม่นยำหรือเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ

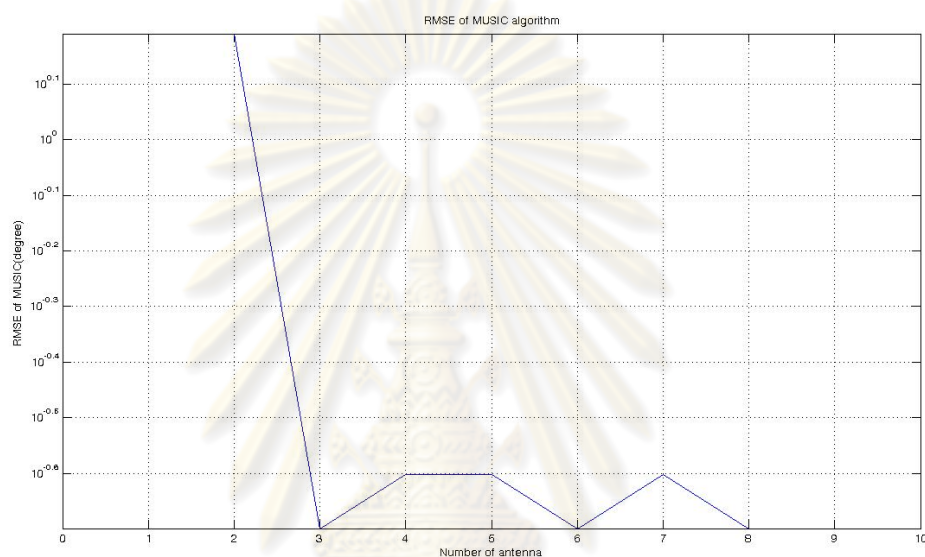
ในการทดลองนี้จะทดลองในกรณีที่มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ 1 สัญญาณ โดยจะทำการทดลอง 500 ครั้งเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประมาณค่า โดยกำหนดให้

สัญญาณของสถานีเคลื่อนที่มีจำนวน 1 สัญญาณ  
ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 0.005 เมตร

### วิธีการทดลอง

1. กำหนดค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ในหน่วยขององศา
2. นำค่าทิศทางที่สุ่มตัวอย่างมาสร้างสัญญาณขึ้น โดยเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวกเข้าไปด้วย
3. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 2. มาเข้ากระบวนการวิธีของ MUSIC
4. พล็อตกราฟแสดงสเปกตรัมของสัญญาณและประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC
5. เพิ่มจำนวนเสาอากาศจาก 1-10 เสา แล้วนำไปเข้ากระบวนการวิธี MUSIC
6. ดูผลกระทบความแม่นยำของการประมาณค่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนเสาอากาศ
7. ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ผลการทดลองที่ 6.2 ทำประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ด้วยอัลกอริทึม MUSIC โดยกำหนดให้ มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่จำนวน 1 สัญญาณ และทำการเปลี่ยนจำนวนสายอากาศโดยเริ่มจาก มีสายอากาศแบบแถวลำดับ (antenna array) จำนวน 1-10 ต้น แล้วพิจารณาความแม่นยำในการประมาณค่า



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงค่า Root mean square error ในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเสาอากาศ

จากรูปที่ 6.6 เป็นกราฟแสดงค่า Root mean square error ในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเสาอากาศจากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มจำนวนเสาอากาศมากขึ้น ความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณก็มากขึ้นด้วย โดยเมื่อเสาอากาศเพิ่มเป็น 3 เสาสัญญาณ ค่าความผิดพลาดก็จะน้อยที่สุดและหลังจากนั้น ค่าความผิดพลาดจะมีค่าเกือบคงที่ จากการทดลอง สรุปได้ว่า ความแม่นยำในการประมาณค่าจะมีความแม่นยำสูงมากเมื่อจำนวนเสาอากาศมีจำนวนมากกว่าจำนวนสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่า ประมาณ 3 เท่า และหลังจากนั้น ค่าความผิดพลาดจะคงที่



### 6.3 ผลการทดลองศึกษาค่าความยาวคลื่นที่มีผลต่อความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยอัลกอริทึม MUSIC

เราได้จำลองการทดลองเพื่อทำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่เพื่อระบุตำแหน่ง โดยอาศัยอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification algorithm) โดยกำหนดให้มีสัญญาณที่เราต้องการประมาณค่าจำนวน 1 สัญญาณ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่น เพื่อดูผลกระทบต่อค่าความแม่นยำหรือเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่

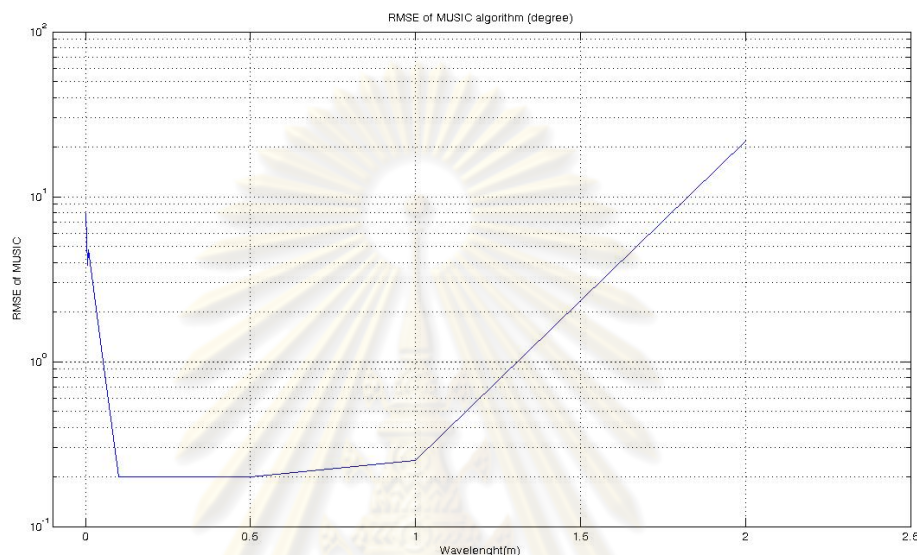
ในการทดลองนี้จะทดลองในกรณีที่มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ 1 สัญญาณ โดยจะทำการทดลอง 500 ครั้งเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประมาณค่า โดยกำหนดให้

สัญญาณของสถานีเคลื่อนที่มีจำนวน 1 สัญญาณ  
จำนวนเสาอากาศมีจำนวน 3 เสา

#### วิธีการทดลอง

8. กำหนดค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ในหน่วยขององศา
9. นำค่าทิศทางที่สุ่มตัวอย่างมาสร้างสัญญาณขึ้น โดยเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวกเข้าไปด้วย
10. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 2. มาเข้ากระบวนการวิธีของ MUSIC
11. พล็อตกราฟแสดงสเปกตรัมของสัญญาณและประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC
12. เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นจาก แล้วนำไปเข้ากระบวนการวิธี MUSIC
13. ดูผลกระทบความแม่นยำของการประมาณค่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนเสาอากาศ
14. ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ผลการทดลองที่ 6.3 ทำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ด้วยอัลกอริทึม MUSIC โดยกำหนดให้มีสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ 1 สัญญาณ และทำการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น เพื่อพิจารณาผลกระทบที่มีต่อความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ



รูปที่ 6.7 กราฟแสดง Root mean square error ในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

จากรูปที่ 6.7 เป็นกราฟแสดงค่า Root mean square error ในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณก็จะเปลี่ยนไปด้วย โดยค่าที่ให้ความแม่นยำในการประมาณค่าสูงสุดคือ ค่าความยาวคลื่นในช่วง 0.1-0.5 ซึ่งค่าความยาวคลื่นมีผลกับค่าระยะห่างระหว่างเสาอากาศแบบลำดับตรง โดยระยะห่างระหว่างเสาอากาศควรมีค่าเท่ากับ 1 ความยาวคลื่นหรือมากกว่าเป็นจำนวนเท่าของค่าความยาวคลื่น

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับการทดลองที่ 6.1 เป็นการเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณระหว่างอัลกอริทึม MUSIC กับอัลกอริทึมแบบ CAPON ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม MUSIC ให้ความถูกต้องแม่นยำสูงกว่าการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึมแบบ CAPON และจากผลการทดลอง ค่าความผิดพลาดของอัลกอริทึมแบบ MUSIC ถือว่าน้อยมาก นั่นคือ อัลกอริทึมแบบ MUSIC สามารถที่จะนำมาใช้ในการประมาณทิศทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ด้วยสื่อสารคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้าง (UWB) ซึ่งศึกษาในกรณีที่สถานการณ์ในการส่งสัญญาณมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางตรง (Direct path) หรือแบบมีเส้นสายตา (Line-of-sight)

การทดลองที่ 6.2 เป็นการพิจารณาจำนวนเสาสัญญาณที่สถานีฐาน คือทำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ โดยเพิ่มจำนวนเสาสัญญาณ (Antenna) แล้วดูค่าความแม่นยำในการประมาณค่าของวิธี MUSIC ซึ่งจากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนเสาสัญญาณ เราสามารถประมาณค่าทิศทางของสัญญาณได้แม่นยำขึ้น โดยจากการทดลองหลายๆครั้ง ได้ผลสรุปว่า ถ้าจำนวนเสาสัญญาณมีจำนวนมากกว่าสัญญาณที่ต้องการประมาณค่าประมาณ 3 เท่า จะได้ความแม่นยำในการประมาณค่าสูงมาก

การทดลองที่ 6.3 เป็นการพิจารณาความยาวคลื่นที่เสาอากาศลำดับตรง โดยทำการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณด้วยวิธี MUSIC โดยเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นไปเรื่อยๆ แล้วดูสเปกตรัมของสัญญาณ จะได้ว่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่เหมาะสมจะให้ค่าความแม่นยำในการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณได้ดีกว่า ซึ่งค่าความยาวคลื่นมีผลกับค่าระยะห่างระหว่างเสาอากาศแบบลำดับตรง โดยระยะห่างระหว่างเสาอากาศควรมีค่าเท่ากับ 1 ความยาวคลื่นหรือมากกว่าค่าความยาวคลื่นเป็นจำนวนเท่า

สำหรับการประมาณค่าทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการหาทิศทางการมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์แบบมีเส้นสายตา (A comparative study of direction of arrival algorithms for line-of-sight ultrawideband channels) โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification) หรือ MUSIC และอัลกอริทึมการประมาณ

ค่าทิศทางของสัญญาณแบบ CAPON โดยข้อกำหนดของอัลกอริทึมสองแบบนี้ก็คือ ในการประมวลผลแต่ละครั้งจำนวนสายอากาศของสถานีฐานจะต้องมีจำนวนมากกว่าจำนวนสถานีเคลื่อนที่ที่ต้องการระบุตำแหน่ง โดยเราจะทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบในด้านความแม่นยำ (accuracy) ในประมาณค่าทิศทางของสัญญาณ ซึ่งทั้งสองอัลกอริทึมจะพิจารณาทิศทางของสัญญาณจากทิศทางที่ให้กำลังของสเปกตรัมสูงสุด โดยอาศัยค่าสหสัมพันธ์ของสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้นั้น จะเห็นได้ว่าค่าอัลกอริทึม MUSIC มีความแม่นยำสูงมาก ความผิดพลาดถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และแม่นยำกว่าอัลกอริทึม CAPON

แต่ด้วยหลักการของอัลกอริทึมนี้ก็ยังมีข้อจำกัดหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็น จำนวนสถานีเคลื่อนที่ที่ต้องการประมาณค่าทิศทางต้องมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนสายสัญญาณ และประมาณทิศทางของสัญญาณจะแม่นยำมาก ๆ ในกรณีที่มีสายสัญญาณจำนวนมากว่าจำนวนสถานีเคลื่อนที่ประมาณ 3 เท่า ดังนั้นถ้าต้องการประมาณค่าทิศทางของสัญญาณเคลื่อนที่หลายๆสัญญาณพร้อมๆกัน เราจึงต้องใช้สายอากาศจำนวนมากในการประมวลผล เพราะเมื่อจำนวนสายอากาศมีจำนวนน้อย ทำให้สามารถวิเคราะห์ตำแหน่งกำลังของสัญญาณมากที่สุดได้ยาก แต่ในการที่ต้องใช้จำนวนสายอากาศมากก็ทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการติดตั้งและราคาก็สูงขึ้นด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Ian Oppermann, Matti Hamalainen, Jari Inatti. All of CWC, University of Oula, Finland. UWB Theory and Applications. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO 19 8SQ, England : John Wiley & Sons, Ltd,
- [2] Kazimierz Siwiak, Debra Mckeown. Both of TimeDerivative Inc., USA. Ultra-Wideband Radio Technology. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO 19 8SQ, England : John Wiley & Sons, Ltd,
- [3] Andreas F. Molisch, Jeffrey R. Foerster. December 2003. Channel Model for Ultra wideband Personal Area Networks. IEEE Wireless Communication TR2004-071.
- [4] Andreas F. Molisch. 2006. Ultra-wide-bandwidth wireless channels-Propagation aspects and interaction with system design. Mitsubishi Electric Research Labs Cambridge, MA, USA Department of Electrosience, Lund University, Lund, Sweden., Tsinghua University.
- [5] D. Cassioli, M.Z. Win, and A.F. Molish. The ultra-wide bandwidth indoor channel from statistical model to simulation. IEEE Journal on Selected Areas Communications Vol. 20 (2002), 1247-1257.
- [6] J. Kunisch and J. Pamp. Measurement results and modeling aspects for UWB radio channel. IEEE Conference Ultra Wideband Systems and Technologies (May 2002): 19-23.
- [7] J. Foerster, Evan Green, Srinivasa Somayazulu, David Leeper. Ultra-wide-band Technology for short or medium Range Wireless Communications. Intel Technology Journal 2th Quarter (2001).
- [8] C. -C. Chong, Y. Kim and S. -S. Lee. UWB Channel Model for Indoor Residential Environment. IEEE 802.15-04-0452-01-004a(Sep. 2004).
- [9] ดิศพล จำเริญกุล. การพัฒนาและประยุกต์รหัสเทอร์โบร่วมกับการปรับแต่งสัญญาณล่วงหน้าสำหรับการสื่อสารไร้สาย=Development and application of turbo codes with

pre-equalization for wireless communications. วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.) ภาควิชาวิศวกรรม  
สารสนเทศ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,  
2546.

[10] ชีรภัทร สงวนกชกร. พื้นฐานการแผ่สเปกตรัมสำหรับการสื่อสาร. สารานุกรม  
โทรคมนาคมไทย : สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคมและ  
สารสนเทศ พรบ. ลิขสิทธิ์ , พ.ศ. 2527

[11] มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. ระบบการสื่อสารข้อมูล. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ :  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, 2008.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอิสริยา ไทยนิยม เกิดวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ในปี พ.ศ. 2546 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2548



ศูนย์วิทยพักร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย