



## การศึกษาความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย



นายพิสิษฐ์ พรหมบุตร รหัสนักศึกษา

B5206780

นายปฏิจ ฉางदानุช รหัสนักศึกษา

B5214129

นายประสิทธิ์ สมพงษ์ รหัสนักศึกษา

B5218912

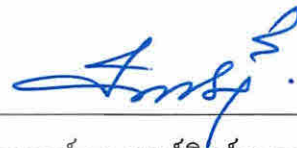
รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการนักศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2555

## การศึกษาความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

คณะกรรมการสอบโครงการงาน




(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)  
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2555

โครงการ	การศึกษาถึงความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในระบบการก่อรูปลำคลื่นใน เครือข่ายแบบกระจาย	
จัดทำโดย	นายพิสิษฐ์ พรหมบุตร รหัส	B5206780
	นายปฏิจ สแดงคานู รหัส	B5214129
	นายประสิทธิ์ สมหงษ์ รหัส	B5218912
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม	
ภาคการศึกษาที่	1/2555	

## บทคัดย่อ

## (Abstract)

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communication) มีความสามารถในการใช้งานที่หลากหลาย จึงได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ไปใช้งานในหลายๆด้าน แต่ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมีข้อจำกัดสำคัญที่ตัวลูกข่าย มีความสามารถในการส่งกำลังสัญญาณที่จำกัดซึ่งส่งผลให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลต่ำลง ซึ่งกรณีนี้มักเกิดขึ้นบริเวณในอาคารหรือจุดบริเวณที่ห่างจากสถานีฐานมากๆ ซึ่งส่งผลให้สัญญาณส่งหรือรับลดทอนอย่างมาก โดยปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการติดตั้งสายอากาศแถวบนตัวลูกข่ายเพื่อขยายกำลังสัญญาณ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดที่การติดตั้งสายอากาศแถวลำดับต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากขึ้น อีกทั้งสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเพิ่มขึ้น

ดังนั้นเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย (distributed beamforming) ได้ถูกนำมาพิจารณาใช้กับระบบการสื่อสารแบบไร้สายเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะช่วยขยายกำลังสัญญาณได้โดยอาศัยเทคนิคของสายอากาศแถวลำดับแบบสุ่ม (random antenna array theory) โดยตัวลูกข่ายในเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจะส่งสัญญาณเดียวกันที่ได้รับการเข้าจังหวะ (synchronization) สัญญาณกันแล้วทั้งทางเฟสและความถี่ เทคนิคการเข้าจังหวะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือแบบระบบเปิดและแบบระบบปิดวิธีแบบระบบปิดจะต้องสัญญาณป้อนกลับจากสถานีฐานขณะที่แบบระบบเปิดต้องข้อมูลตำแหน่งของตัวลูกข่ายเท่านั้นซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำมาจากระบบจีพีเอสโดยตรงได้ แต่ในการทำงานจริงระบบจีพีเอสมีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งซึ่งได้รับผลมาจากหลายๆกรณี ดังนั้นโครงการชิ้นนี้จึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งจากระบบจีพีเอส ว่าส่งผลต่อความสำเร็จในการก่อรูปลำคลื่นอย่างไร

## กิตติกรรมประกาศ

### (Acknowledgement)

จากการที่คณะจัดทำโครงการได้รับมอบหมายให้ทำโครงการเรื่อง การศึกษาความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในการก่อรูปลำดับชั้นแบบกระจายส่งผลให้คณะผู้จัดทำรายงานได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆเกี่ยวกับการทำโครงการในครั้งนี้เป็นอย่างมาก ทั้งที่ได้จากการปฏิบัติจริง การเรียนรู้จากบุคคลต่างๆ โดยการทำรายงานนี้ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้โปรแกรม MATLAB (matrix laboratory) ในการจำลองผล บัดนี้โครงการดังกล่าวพร้อมทั้งรายงานได้สำเร็จลงแล้ว ทั้งนี้ได้รับความร่วมมือและสนับสนุนจากบุคคลต่างๆ ดังนี้

1. ผศ.ดร.มนต์ทิพย์ภา อูทธารสกุล (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)
2. นายพงษ์นรินทร์ ศรีพลอย (นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม)

ข้าพเจ้า ไคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้ความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานการใช้งานโปรแกรม ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายปฏิจ ฉางदानุช  
นายประสิทธิ์ สมหงษ์  
นายพิสิษฐ์ พรหมบุตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ .....	ก
กิตติกรรมประกาศ .....	ข
สารบัญ .....	ค
สารบัญภาพ .....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ขั้นตอนการทำงาน .....	2
1.4 ขอบเขตการทำงาน .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	3
2.1 กล่าวนำ .....	3
2.2 สายอากาศแฉดลำดับ .....	3
2.2.1 สายอากาศแฉดลำดับจำนวนสองอีลิเมนต์.....	3
2.2.2 แฉดลำดับจำนวน <i>n</i> อีลิเมนต์แบบแอมพลิจูดและระยะของอีลิเมนต์	
<b>สมำเสมอ</b> .....	7
2.3 สายอากาศแฉดลำดับวงกลม.....	8
2.4 สายอากาศแฉดลำดับเชิงระนาบ....	10
2.4.1 ตัวประกอบแฉดลำดับของแฉดลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	11
2.5 เครือข่ายเส้นเซอร์ไร้สาย.....	16
2.5.1 วิวัฒนาการของเครือข่ายเส้นเซอร์ไร้สาย.....	17
2.5.2 เครือข่ายเส้นเซอร์ยุคปีพ.ศ.2550.....	17
2.5.3 ภาพรวมสถาปัตยกรรมเครือข่ายเส้นเซอร์ไร้สาย.....	18
2.6 การก่อรูปลำคลื่น.....	19
2.7 การกระจายตัวของการก่อรูปลำคลื่น.....	21
2.8 ประสิทธิภาพของการกระจายลำคลื่นของเฟสที่ไม่สมบูรณ์.....	23
2.9 กล่าวสรุป .....	25

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
<b>บทที่ 3 ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก</b>	26
3.1 กล่าวนำ	26
3.2 ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก	26
3.3 องค์ประกอบและส่วนต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก	28
3.4 ความผิดพลาดในระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก	32
3.5 ประโยชน์และการประยุกต์เพื่อนำไปใช้งาน	35
3.6 กล่าวสรุป	36
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม</b>	36
4.1 กล่าวนำ	36
4.2 สายอากาศแฉวลำดับวงกลม	36
4.2.1 การก่อรูปลำคลื่น	39
4.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การก่อรูปลำคลื่น	41
4.3.1 รัศมีของวง	41
4.3.2 จำนวนสายอากาศ	43
4.4 กล่าวสรุป	45
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง</b>	46
5.1 กล่าวนำ	46
5.2 ความผิดพลาดของรัศมี	46
5.3 ความผิดพลาดของเฟส	52
5.4 ความผิดพลาดของรัศมีและเฟส	58
5.5 กล่าวสรุป	63
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	64
6.1 สรุปผลโครงการ	64
6.2 ข้อเสนอแนะ	64
ประวัติผู้จัดทำ	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก (ก) โค้ด โปรแกรม MATLAB	67

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2-1	การจำลองรูปแบบของแกลวลำดับจำนวนสองอีลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ .....4
2-2	การประมาณระยะทางระหว่างจุดสังเกตของสนามกับตัวสายอากาศโดยใช้คุณสมบัติของบริเวณระยะไกลเทียบกับขนาดของสายอากาศ..... 4
2-3	แบบจำลองของแกลวลำดับจำนวน $N$ อีลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสนามรวม .....7
2-4	สายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่องค์ประกอบลำดับที่ $N$ .....10
2-5	แกลวลำดับขนาดหลายองค์ประกอบที่มีขนาดแอมพลิจูดที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน.....11
2-6	แบบรูปแอมพลิจูดสามมิติของแกลวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก $5 \times 5$ องค์ประกอบที่ไม่เกิดพุกคลื่น แกรตติ้ง แต่ละองค์ประกอบมีแอมพลิจูดเท่ากัน ระยะห่าง $d = \lambda/4$ และความต่างเฟส $\beta_x = \beta_y = 0$ .....15
2-7	แบบรูปแอมพลิจูดสามมิติของแกลวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก $5 \times 5$ องค์ประกอบที่ไม่เกิดพุกคลื่น แกรตติ้ง แต่ละองค์ประกอบมีแอมพลิจูดเท่ากัน ระยะห่าง $d = \lambda/2$ และความต่างเฟส $\beta_x = \beta_y = 0$ .....16
2-8	เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ..... 18
2-9	การใช้สายอากาศหลายต้น (Antenna Array) ร่วมกับระบบการก่อรูปช่วยให้สายอากาศกลายเป็นระบบสายอากาศแก่ง Smart Antenna ที่จะปรับความแรงของสัญญาณตามทิศทางต่างๆได้ .....20
2-10	รูปแบบของระบบและรูปแบบของลำคลื่น.....21
3-1	ส่วนประกอบต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก 1 .....28
3-2	ส่วนประกอบต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก 2.....28
3-3	รูปแบบความผิดพลาดต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก .....32
3-4	ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนไปมาของคลื่นสัญญาณ .....33
3-5	ความคลาดเคลื่อนของ Selective Availability.....33
4-1	สายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่องค์ประกอบลำดับที่ $N$ .....39

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-2	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 10, a = 1\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....40
4-3	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 10, a = 1\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ 4 GHz.....41
4-4	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 10, a = 2\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....42
4-5	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 10, a = 5\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....42
4-6	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 10, a = 1\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....43
4-7	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 15, a = 1\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = 45^\circ, \phi_0 = 0^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....44
4-8	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 20, a = 1\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....44
4-9	แบบรูปตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับวงกลมสมำเสมอขนาด $N = 50, a = 1\lambda$ เมื่อ $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ \phi_0 = 45^\circ$ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....45
5-1	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.1 .....46
5-2	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.2 .....47
5-3	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.3 .....47
5-4	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.4 .....48
5-5	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.5 .....48
5-6	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.6 .....49
5-7	แสดงการก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่ 0.7 .....49





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายมีความสารที่ช่วยขยายกำลังรับและส่งของสัญญาณให้กับระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้โดยอาศัยเทคนิคสายอากาศแกลวลำดับแบบสุ่ม โดยที่สัญญาณมีส่งจากลูกข่ายแต่ละตัวต้องมีการเข้าจังหวะสัญญาณกันแล้วทั้งทางเฟสและความถี่ ซึ่งการจะเข้าเข้าจังหวะสัญญาณได้สำเร็จนั้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของลูกข่ายในระบบเพื่อที่จะเข้าจังหวะสัญญาณได้อย่างถูกต้อง ซึ่งตำแหน่งของลูกข่ายอาจสามารถหาได้จากระบบจีพีเอสโดยตรง แต่ระบบจีพีเอสมีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งซึ่งได้รับผลมาจากหลายๆกรณี ดังเช่น

- ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (Satellite Clock) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 1.5 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนในวงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 2.5 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศรอบนอกและชั้นบรรยากาศภายใน (Ionosphere and Troposphere) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 5.5 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสะท้อน (Multi path distortion) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 0.6 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณรบกวนในเครื่องรับ (Receiver Errors) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 0.3 เมตร

ดังนั้น โครงการฉบับนี้จึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งจากระบบจีพีเอสว่าส่งผลต่อเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายอย่างไร และค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่าไรที่ระบบสามารถยอมรับได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ
2. เพื่อศึกษาเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย
  3. เพื่อศึกษาระบบจีพีเอสและความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบจีพีเอส
4. เพื่อศึกษาและเข้าใจเกี่ยวกับการใช้งาน โปรแกรม Matrix Laboratory (MATLAB)
5. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบจีพีเอสต่อเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

## 1.3 ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้น
2. เขียนโครงการและเสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา
3. ศึกษาและออกแบบการใช้งาน โปรแกรม MATLAB
4. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล GPS และ Wireless sensor network เพิ่มเติม
5. ทำการจำลองผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน
7. นำเสนอโครงการ

## 1.4 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม
2. ศึกษาเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย
3. ศึกษาจีพีเอสและความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบจีพีเอส
4. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB
5. สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
6. ทดลองจากแบบ แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ วิเคราะห์และสรุปผล

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

สายอากาศแถว ลำดับ (antenna array) เป็นระบบที่นำเอาสายอากาศมาวางเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยอาจมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ตัวสายอากาศต้นเดียวหรือหลายต้นเพื่อแผ่กระจายคลื่นออกไป ระบบสายอากาศแถวจำเป็นที่จะต้องให้สายอากาศในรูปแบบแถวลำดับเท่านั้นจึงจะสามารถหันพู่คลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและหันจุดศูนย์ (nulls) และพู่รอง (sidelobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดด้วยกระบวนการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้นซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป สายอากาศแถวลำดับจะมีการวางตัวหลายรูปแบบเช่น แบบเส้น แบบวงกลม และแบบเชิงระนาบ

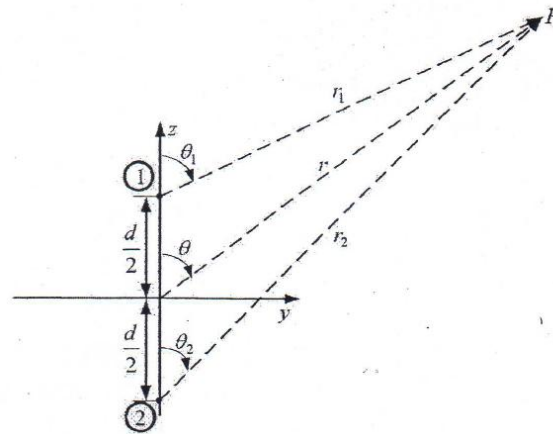
#### 2.2 สายอากาศแถวลำดับ

##### 2.2.1 สายอากาศแถวลำดับจำนวนสองอีลิเมนต์

จากรูปที่ 2-1 เป็นการชี้แจงรูปแบบของแถวลำดับเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ โดยแถวลำดับดังรูปประกอบด้วยสองอีลิเมนต์วางเป็นแนวเส้นตรงอย่างสมมาตรในแกน  $z$  ซึ่งสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละอีลิเมนต์สามารถแสดงได้โดยสมการ

$$\vec{E}_1 = M_1 E_{n1}(\theta_1, \varphi_1) \frac{e^{-j(kr_1 - \frac{\beta}{2})}}{r_1} \hat{\rho}_1 \quad (2-1)$$

$$\vec{E}_2 = M_2 E_{n2}(\theta_2, \varphi_2) \frac{e^{-j(kr_2 - \frac{\beta}{2})}}{r_{12}} \hat{\rho}_2 \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-1 การจำลองรูปแบบของแฉวลำดับจำนวนสองอิลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์

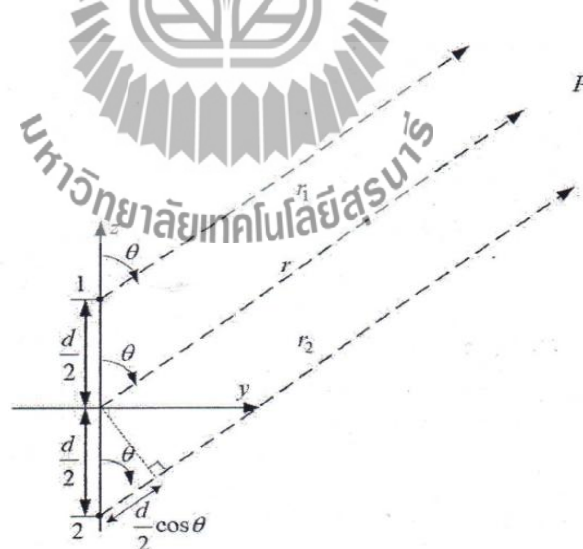
โดยที่  $M_1, M_2$  คือ ขนาดของสนาม(ที่ยังไม่ได้รวมเทอม  $1/r$  เข้าไป)

$E_{n1}, E_{n2}$  คือ แบบรูปของสนามนอร์แมลไลซ์

$r_1, r_2$  คือ ระยะระหว่างจุดสังเกต  $P$  ไปยังอิลิเมนต์ที่ 1 และ 2

$\beta$  คือ ความแตกต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้อิลิเมนต์แต่ละตัวของแฉวลำดับ

$\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$  คือ เวกเตอร์การโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าระยะไกล



รูปที่ 2-2 การประมาณระยะทางระหว่างจุดสังเกตของสนามกับตัวสายอากาศโดยใช้

คุณสมบัติของบริเวณระยะไกลเทียบกับขนาดของสายอากาศ

จากรูปที่ 2-2 เป็นวิธีการประมาณระยะทางระหว่างจุดสังเกตของสนามกับตัวสายอากาศ โดยใช้คุณสมบัติของบริเวณระยะไกล (far zone) ซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่งของสายอากาศมากๆ เมื่อเทียบกับขนาดที่กว้างที่สุดของแฉกลำดับ จนสามารถประมาณได้ว่า เส้น  $r_1, r_2$  และ  $r$  ของระยะห่างระหว่างจุดสังเกตกับแฉกลำดับวางขนานกันอยู่ จึงประมาณได้ว่ามุม  $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta_3$  จากรูปที่ 2-1 เพื่อให้สามารถคำนวณค่าโดยประมาณของสนามระยะไกลที่เกิดจากแฉกลำดับจำนวนสองอิลิเมนต์ได้ โดยเงื่อนไขที่ต้องกำหนดในหัวข้อนี้ ก็คือ

1. อิลิเมนต์ของแฉกลำดับจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน ซึ่งจะทำให้

$$E_{n1}(\theta, \varphi) = E_{n2}(\theta, \varphi) = E_{n3}(\theta, \varphi) \quad (2-3)$$

2. ทุกอิลิเมนต์จะต้องหันอยู่ในทิศทางเดียวกันในอากาศอิสระและต้องมีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันซึ่งจะทำให้

$$\hat{\rho}_1 = \hat{\rho}_2 = \hat{\rho}_3 \quad (2-4)$$

3. การกระตุ้นกระแสให้กับแต่ละอิลิเมนต์จะต้องมีแอมพลิจูดที่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้

$$M_1 = M_2 = M \quad (2-5)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นจากแฉกลำดับ จำนวนสองอิลิเมนต์ จะหาได้จาก

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2-6)$$

เมื่อนำสมการ (2-1) และ (2-2) แทนค่าลงในสมการ (2-6) จะได้

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \hat{\rho} M E_n(\theta, \varphi) \frac{1}{r} \left[ e^{-jk \left( r - \frac{d}{2} \cos \theta \right) + j \frac{\beta}{2}} + e^{-jk \left( r + \frac{d}{2} \cos \theta \right) - j \frac{\beta}{2}} \right] \\ &= \hat{\rho} \frac{M}{r} e^{-jkr} E_n(\theta, \varphi) \left[ e^{j \left( \frac{kd}{2} \cos \theta + \frac{\beta}{2} \right)} + e^{-j \left( \frac{kd}{2} \cos \theta + \frac{\beta}{2} \right)} \right] \end{aligned}$$

ซึ่งสรุปเป็นคำตอบสุดท้ายในรูปของสมการได้ คือ

$$\vec{E} = \hat{\rho} M \frac{e^{-jkr}}{r} E_n(\theta, \varphi) \times \underbrace{2 \cos \left( \frac{kd \cos \theta + \beta}{2} \right)}_{AF} \quad (2-7)$$

จากสมการ (2-7) ซึ่งเป็นคำตอบของสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากแฉวลำดับจำนวนสองอิลิเมนต์จะมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากอิลิเมนต์หนึ่งตัวที่ใช้เป็นแฉวลำดับซึ่งเรียกว่า ปัจจัยอิลิเมนต์ และ ถูกวางอยู่ที่จุดกำเนิดของระบบพิกัดคูณกับอีกเทอมหนึ่งซึ่งเรียกว่า ปัจจัยแฉวลำดับ ซึ่งสามารถนำไปพล็อตเป็นแบบรูปทางกราฟฟิกได้เช่นกัน จะมีค่าเท่ากับ

$$AF = 2 \cos\left(\frac{kd \cos \theta + \beta}{2}\right) \quad (2-8)$$

และเมื่อนำไปทำเป็นปัจจัยแฉวลำดับนอร์มัลไลซ์ จะได้

$$AF_n = \cos\left(\frac{kd \cos \theta + \beta}{2}\right) \quad (2-9)$$

ดังนั้นเมื่อนำไปหาคำตอบของแบบรูปของสนามไฟฟ้านอร์มัลไลซ์ โดยการนำสมการสนามไฟฟ้า นอร์มัลไลซ์ซึ่งเกิดจากอิลิเมนต์เดียว  $E_n(\theta, \varphi)$  คูณกับปัจจัยแฉวลำดับนอร์มัลไลซ์จากสมการ (2-9) ก็จะได้

$$f_n(\theta, \varphi) = E_n(\theta, \varphi) \times AF_n(\theta, \varphi) \quad (2-10)$$

จากหลักการที่ได้แสดงในสมการ (2-10) นั้นได้ถูกเรียกว่า กฎของการคูณแบบรูปการแผ่คลื่น ซึ่งกฎนี้จะใช้ได้ถูกต้องต่อเมื่ออิลิเมนต์ทุกตัวที่นำมาประกอบเป็นแฉวลำดับต้องเป็นชนิดเดียวกัน ขณะที่ขนาดของกระแสที่ใช้กระตุ้น การเลื่อนเฟสระหว่างอิลิเมนต์และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปแบบการแผ่คลื่นรวมที่ออกมาจากแฉวลำดับจึงสามารถควบคุมได้ที่แบบรูปการแผ่คลื่นที่ออกมาจากอิลิเมนต์เพียงตัวเดียว นั่นคือ  $E_n(\theta, \varphi)$  หรือควบคุมที่ปัจจัยแฉวลำดับก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าของแฉวลำดับจะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิลิเมนต์ รูปแบบการจัดวางอิลิเมนต์ของแฉวลำดับ ขนาดของกระแสและเฟสที่ป้อนให้กับแต่ละอิลิเมนต์

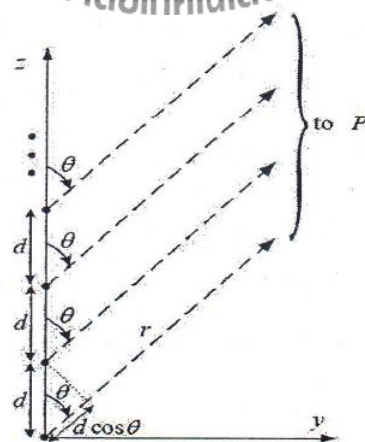
## 2.2.2 แฉวลำดับจำนวน $N$ อีลิเมนต์แบบแอมพลิจูดและระยะของอีลิเมนต์สม่ำเสมอ

ในกรณีของแฉวลำดับที่จะได้อธิบายต่อไปนี้จะเป็นการเพิ่มอีลิเมนต์ให้มีจำนวนเท่ากับ  $N$  อีลิเมนต์โดยยังคงใช้เงื่อนไขที่กำหนดให้แอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละอีลิเมนต์มีค่าเท่ากันทั้งหมดและมีระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ทุกๆตัวมีขนาดที่เท่ากัน

ปัจจัยลำดับของแฉวลำดับกรณีนี้ จะหาได้จากการพิจารณาอีลิเมนต์แต่ละตัวให้เป็นแหล่งกำเนิดแบบจุดหรือแบบไอโซทรอปิก ดังนั้นถ้ามีการนำอีลิเมนต์ใดๆที่มีแบบรูปการแผ่คลื่นเฉพาะตัวมาประกอบให้เป็นแฉวลำดับ สนามรวมที่เกิดจากแฉวลำดับนี้ก็จะหาได้จากการนำค่าของปัจจัยแฉวลำดับที่ได้จากแหล่งกำเนิดแบบจุดที่กล่าวไปแล้วคูณกับค่าของแบบรูปสนามนอร์แมลไลซ์ของที่นำมาใช้เป็นแฉวลำดับนั่นเอง

จากรูปที่ 2-3 เป็นการจำลองแบบของแฉวลำดับจำนวน  $N$  อีลิเมนต์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสนามรวมที่เกิดขึ้นโดยค่าปัจจัยแฉวลำดับแบบเส้นตรงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแบบจุดจำนวน  $N$  อีลิเมนต์จะเท่ากับ

$$AF = 1 + e^{j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2-11)$$



รูปที่ 2-3 แบบจำลองของแฉวลำดับจำนวน  $N$  อีลิเมนต์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสนามรวม



เทอมที่เป็นเฟสของสนามที่เกิดขึ้นจากแต่ละอีลิเมนต์ จะเท่ากับ

$$1^{st} \rightarrow e^{-jkr}$$

$$2^{nd} \rightarrow e^{-jkr} (e^{-d \cos \theta})$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kdcos\theta + \beta)}$$

....

$$N^{th} \rightarrow e^{-jk(r-(N-1)d\cos\theta)}$$

ดังนั้นจากสมการ (2-11) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kdcos\theta + \beta)} \quad (2-12)$$

จากสมการที่ (2-12) จะเห็นได้ชัดว่าค่าปัจจัยแอมพลิจูดของแอมพลิจูดแบบสม่ำเสมอที่เป็นเส้นตรงนี้ สามารถควบคุมค่าของมันได้โดยจัดการที่ความต่างเฟส  $\beta$  ที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างอีลิเมนต์

### 2.3 สายอากาศแอมพลิจูดวงกลม

สายอากาศแอมพลิจูดแบบวงกลม เป็นแอมพลิจูดที่มีองค์ประกอบทั้งหมดจะถูกจัดเรียงตลอดทิศทางของมุม  $\phi$  ในระบบพิกัดทรงกระบอกซึ่งอยู่ในรูปวงกลม โดยค่าของสนามไฟฟ้าออร์แมลไลซ์สามารถเขียนได้ในรูปของสมการผลรวม

$$E(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (2-13)$$

โดยที่

$$R_n = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos\phi_n} \quad (2-14)$$

โดยกรณีที่  $r \gg a$  จะทำให้สมการ (4.1) ลดรูปลงเหลือ

$$R_n \simeq r - a \cos\phi_n \simeq r - a(\hat{a}_{\rho_n} \cdot \hat{r}) \quad (2-15)$$

และจากความสัมพันธ์ของระบบพิกัดทรงกลมและระบบพิกัดฉาก

$$\hat{a}_{\rho_n} = \hat{x} \cos \phi_n + \hat{y} \sin \phi_n \quad (2-16)$$

$$\hat{r} = \hat{x} \sin \theta \cos \phi_n + \hat{y} \sin \theta \sin \phi_n + \hat{z} \cos \theta \quad (2-17)$$

ดังนั้นสมการ (4.3) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_n = r - a \sin \theta (\cos \phi_n \cos \phi + \sin \phi_n \sin \phi) \quad (2-18)$$

สุดท้ายค่าของ  $R_n$  ในเทอมของเฟส จะสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากสมการข้างต้น และค่าของ  $R_n$  ในเทอมของแอมพลิจูด จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$$\frac{1}{R_n} \approx \frac{1}{r} \quad \text{ในทุกๆค่าของ } n \text{ ที่เกิดขึ้น} \quad (2-19)$$

หากสมมุติว่าค่าโดยประมาณของสมการ (4.6) และ (4.7) เป็นค่าที่ถูกต้อง จะทำให้สมการของสนามไฟฟ้าไกลที่เกิดขึ้นจากแอมพลิจูดในสมการที่ (4.1) เขียนได้ใหม่เป็น

$$E(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N a_n e^{jk a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (2-20)$$

ขณะที่  $a_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของแอมพลิจูดละเฟสที่ป้อนให้แก่องค์ประกอบ

$$\phi_n = \frac{2\pi}{N} n \text{ คือ ตำแหน่งเชิงมุมขององค์ประกอบลำดับที่ } n$$

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดค่าของแอมพลิจูดและเฟสสำหรับป้อนให้แก่องค์ประกอบนั้น สามารถแสดงได้ในรูปของสมการ

$$a = I_n e^{j a_n} \quad (2-21)$$

โดยที่  $I_n$  เป็นเทอมของแอมพลิจูด และ  $a_n$  เป็นเทอมของเฟสที่ใช้ป้อนให้แก่องค์ประกอบลำดับที่  $n$  ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบของแอมพลิจูดที่ถูกเลือกให้มีของเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สมการของสนามไฟฟ้าไกลเท่ากับ

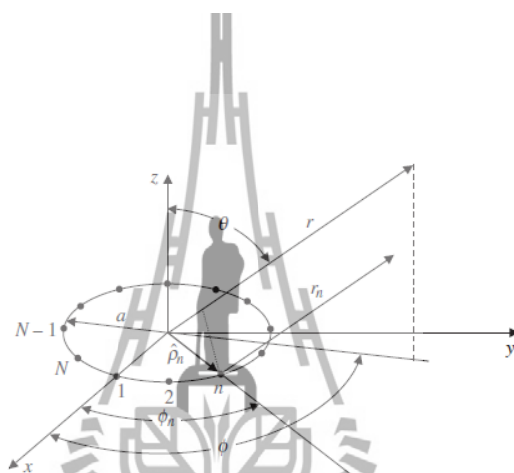
$$E(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + a_n]}$$

(2-22)

ดังนั้นจากสมการ (4.10) จึงสามารถแยกเทอมหลังให้เป็นตัวประกอบลำดับได้ นั่นคือ

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + a_n]}$$

(2-23)



รูปที่ 2-4 สายอากาศแถวลำดับวงกลม ที่องค์ประกอบลำดับที่  $N$

## 2.4 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

ปัจจุบันสายอากาศแถวลำดับระนาบได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารหลายประเภท เช่น สายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ติดตามเป้าหมาย ระบบตรวจจับระยะไกล และระบบสื่อสารต่างๆไป เนื่องจากจะให้รูปแบบการแผ่กำลังที่มีลักษณะสมมาตรและมีระดับของพหุคูณข้างต่ำ ให้ความกว้างครึ่งกำลังของพหุคูณใหญ่ที่แคบกว่าซึ่งทำให้เกิดสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้นตามมาอีกด้วย และที่สำคัญสามารถออกแบบให้พหุคูณใหญ่กวาดไปในทิศทางใดๆตามที่ต้องการได้ ลักษณะของแถวลำดับระนาบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-4 โดยกำหนดให้องค์ประกอบทั้งหมดจำนวน  $N$  องค์ประกอบวางอยู่ระหว่างระนาบ  $x$ - $y$  อย่างสมมาตร และจุดสังเกตของสนามทำมุม  $\theta$  กับแกน  $z$  และทำมุม  $\phi$  กับแกน  $x$  ตามลำดับ

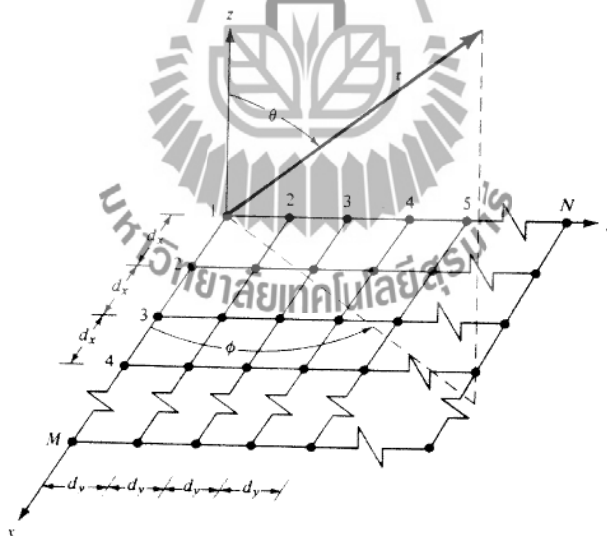
### 2.4.1 ตัวประกอบแวลำดับของแวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

จากรูปที่ 2-4 หากพิจารณาเช่นเดียวกับกรณีของแวลำดับแบบเส้น จะเห็นว่าตัวประกอบแวลำดับจำนวน  $M$  องค์ประกอบที่วางอยู่บนแกน  $x$  สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$AF_{x_1} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(k d \sin \theta \cos \phi + \beta_x)}$$

(2-24)

โดยที่  $\sin \phi \cos \phi = \cos \gamma_x$  คือ ฟังก์ชันโคไซน์สำหรับบอกทิศทางของแวลำดับที่อ้างอิงกับแกน  $x$  โดยสมมุติว่าทุกองค์ประกอบจะมีระยะห่างที่เท่ากันด้วยระยะ  $d_x$  และความต่างเฟส  $\beta_x$  ที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบจะเป็นแบบเฟสลดหน้า ส่วน  $I_{m1}$  จะแทนค่าของแอมพลิจูดที่ป้อนให้แก่องค์ประกอบที่ตำแหน่งของพิกัด  $x = (m-1)d_x$  และ  $y = 0$  ซึ่งในรูปที่ 2-5 ก็คือ องค์ประกอบที่อยู่ในแถว  $m$  และในคอลัมน์ที่ 1 ของแวลำดับนั่นเอง



รูปที่ 2-5 แวลำดับขนาดหลายขององค์ประกอบที่มีขนาดแอมพลิจูดที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน

จากนั้นถ้านำองค์ประกอบจำนวน  $N$  องค์ประกอบวางเรียงต่อกันในทิศทาง  $y$  ก็จะทำให้เกิดลักษณะของแวลำดับระนาบขึ้นมา ซึ่งขั้นตอนต่อไปก็คือ ต้องสมมุติอีกครั้งหนึ่งว่าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในแนวแกน  $y$  มีค่าเท่ากันและมีค่าเท่ากับ  $d_y$  โดยมีความต่างเฟส  $\beta_y$  (แบบเฟส

รูดหน้า)ที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีค่าต่างกันอย่างเป็นลำดับด้วย นอกจากนี้ต้องสมมติให้การแสดงรูปกระแสนอร์แมลไลซ์ที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบตลอดแนวแกน  $x$  มีค่าเหมือนกันแต่ค่าที่แท้จริงจะสอดคล้องกับตัวประกอบของ  $I_{1n}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) ดังนั้นตัวประกอบแถวลำดับที่เกิดขึ้นจากแถวลำดับทั้งหมดทุกองค์ประกอบจึงเท่ากับ

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[ \sum_{m=1}^N I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \quad (2-25)$$

หรือ

$$AF = S_{xM} \times S_{yN} \quad (2-26)$$

โดยที่

$$S_{xM} = AF_{x1} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)}$$

$$S_{yN} = AF_{1y} = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)}$$

จากตัวประกอบแถวลำดับ  $AF_{x1}$  และ  $AF_{1y}$ ข้างบนนี้เมื่อใช้ความสัมพันธ์ของ

$$\sin\theta \cos\phi = \hat{x} \cdot \hat{r} = \cos\gamma_x \quad (2-27)$$

$$\sin\theta \sin\phi = \hat{y} \cdot \hat{r} = \cos\gamma_y \quad (2-28)$$

แบบรูปการแผ่กำลังของแถวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้จะได้จากผลคูณของตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับแบบเส้นในแนวทิศทาง  $x$  และ  $y$  นั่นเอง

ในกรณีของแถวลำดับระนาบสม่ำเสมอซึ่งมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ  $d_x$  และ  $d_y$  เท่ากัน และ แอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากันนั่นคือ  $I_{m1} = I_{1n} = I_0$  สำหรับทุกค่า

$$AF = I_0 \sum_{n=1}^N e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \times \sum_{n=1}^N e^{j(m-1)(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y)} \quad (2-29)$$

เมื่อนำความสัมพัทธ์ของออยเลอร์มาเปลี่ยนรูปสมการ (2-29) แล้วหารด้วยค่าสูงสุดก็จะได้สมการของตัวประกอบแถวลำดับนอร์มัลไลซ์

$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M\psi_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2-30)$$

ขณะที่  $\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x$  และ  $\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y$  โดยเทอมที่แสดงพหุนามใหญ่ซึ่งมีค่าของสนามสูงสุดและพหุนามเล็กของเทอม

$$S_{xM} = \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M\psi_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \quad (2-31)$$

และ

$$S_{yN} = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \quad (2-32)$$

จะถูกวางอยู่ที่ตำแหน่ง

$$kd_x \sin\theta_m \cos\phi_m + \beta_x = \pm 2m\pi, \quad m = 0, 1, \dots \quad (2-33)$$

$$kd_y \sin\theta_n \sin\phi_n + \beta_y = \pm 2n\pi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2-34)$$

โดยค่าสูงสุดของสนามที่ปรากฏขึ้นในพหุนามใหญ่จะอยู่ที่ค่า  $m = 0$  และ  $n = 0$

โดยทั่วไปแล้วค่าของ  $\beta_x$  และ  $\beta_y$  จะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน แต่ถ้าเราต้องการให้พหุนามใหญ่ของ  $S_{xM}$  และ  $S_{yN}$  ตัดกัน (ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นเสมอ) ดังนั้นพหุนามใหญ่ที่เกิดขึ้นร่วมกันจึงอยู่ในทิศทาง

$$\theta = \theta_0 \text{ และ } \phi = \phi_0 \text{ โดยที่ } m = n = 0 \quad (2-35)$$

และถ้าค่าสูงสุดของพหุคูณใหญ่ได้ถูกกำหนดโดย  $\theta_0$  และ  $\phi_0$  ดังนั้นความต่างเฟส  $\beta_x$  และ  $\beta_y$  จะต้องมีค่าเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 \quad (2-36)$$

$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \sin\phi_0 \quad (2-37)$$

จากสมการทั้งสองข้างบนนี้เมื่อกำหนดค่าของความต่างเฟสให้กับ  $\beta_x$  และ  $\beta_y$  ทิศทางของพหุคูณใหญ่ก็จะสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$\tan \phi_0 = \frac{\beta_y d_x}{\beta_x d_y} \quad (2-38)$$

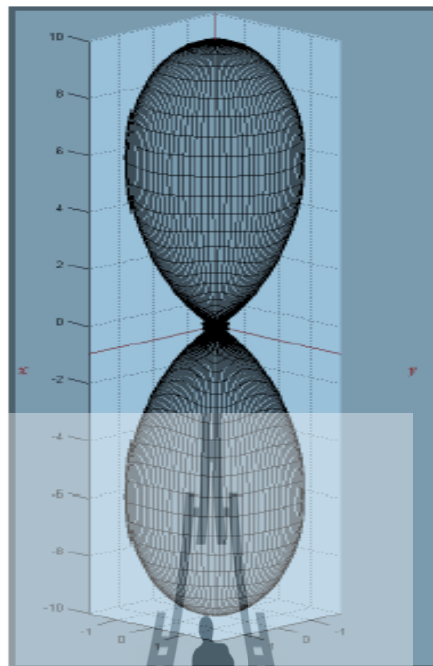
$$\sin \theta_0 = \pm \sqrt{\left(\frac{\beta_x}{kd_x}\right)^2 + \left(\frac{\beta_y}{kd_y}\right)^2} \quad (2-39)$$

ส่วนพหุคูณเล็กหรือพหุคูณแกรตติ้งนั้นสามารถหาทิศทางได้เช่นเดียวกัน โดยการแทนสมการ (2-36) และ (2-37) ลงในสมการ (2-33) และ (2-34) ก็จะได้

$$\tan \phi_{mn} = \frac{\sin \theta_0 \sin \phi_0 \pm n\lambda/d_y}{\sin \theta_0 \cos \phi_0 \pm m\lambda/d_x} \quad (2-40)$$

$$\sin \theta_{mn} = \frac{\sin \theta_0 \cos \phi_0 \pm m\lambda/d_x}{\cos \phi_{mn}} = \frac{\sin \theta_0 \sin \phi_0 \pm n\lambda/d_y}{\sin \phi_{mn}} \quad (2-41)$$

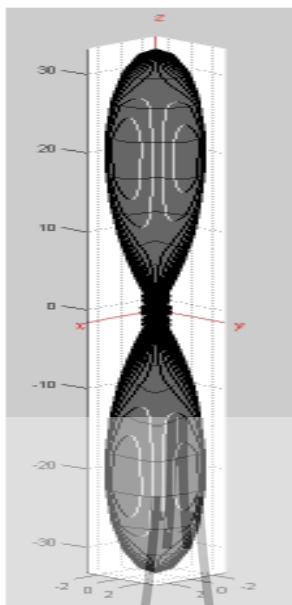
และเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดพหุคูณแกรตติ้ง ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบจะต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งความยาวคลื่น ( $d_y < \lambda$  และ  $d_x < \lambda$ ) หากพหุคูณแกรตติ้งปรากฏขึ้นจริง ทั้งสมการ (2-40) และ (2-41) จะต้องมีคำตอบเป็นจำนวนจริง โดยในรูปที่ 2-6 ได้แสดงตัวอย่างของรูปแบบการแผ่กำลังในรูปแบบสามมิติซึ่งเกิดจากแถวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากสม่ำเสมอขนาด  $5 \times 5$  องค์ประกอบ



รูปที่ 2-6 แบบรูปแอมพลิจูดสามมิติของแถวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก  $5 \times 5$  องค์ประกอบที่ไม่เกิดพุดคลื่น แกร์ดิ่ง แต่ละองค์ประกอบมีแอมพลิจูดเท่ากัน ระยะห่าง  $d = \lambda/4$  และความต่างเฟส  $\beta_x = \beta_y = 0$

เมื่อปรับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบให้มีความมากขึ้น โดยกำหนดให้  $d = \lambda/2$  ส่วนเงื่อนไขอื่นๆของแถวลำดับยังคงไว้เช่นเดิม จะทำให้รูปแบบการแผ่กำลังจากเดิมที่ปรากฏในรูปที่ 2-6 เปลี่ยนไปและเกิดพุดคลื่นแกร์ดิ่งมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-7 อย่างไรก็ตามความกว้างของลำคลื่นกรังกำลังที่ได้จะมีขนาดที่แคบกว่าเดิม





รูปที่ 2-7 แบบรูปแอมพลิจูดสามมิติของแถวลำดับระนาบรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก  $5 \times 5$   
องค์ประกอบที่ไม่เกิดพุดคลื่นแกรตติ้ง แต่แต่ละองค์ประกอบมีแอมพลิจูดเท่ากัน ระยะห่าง  $d = \lambda/2$   
และความต่างเฟส  $\beta_x = \beta_y = 0$

## 2.5 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

จากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ประกอบด้วย เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ ที่มีขนาดเล็กและความแม่นยำในการวัดสูง เทคโนโลยีหน่วยประมวลผลที่มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ และประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารไร้สายที่ส่งข้อมูลได้ถูกต้องและใช้พลังงานต่ำ รวมถึงขนาดของเสาอากาศและอุปกรณ์ต่อเชื่อมที่มีขนาดเล็ก การรวมกันของสามเทคโนโลยีนี้ทำให้เกิดหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่มีราคาถูก ขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ วัดค่าและเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงได้อย่างถูกต้อง ประมวลผลได้ด้วยตัวเอง และติดต่อสื่อสารถึงกันแบบไร้สาย

หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ขนาดเล็กจำนวนมากฝังตัวในบริเวณที่ต้องการวัดข้อมูล ข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งผ่านระบบเครือข่าย ซึ่งเครือข่ายนี้สร้างจากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์แต่ละตัวในเครือข่ายทำงานร่วมกันในการส่งข้อมูล โดยการส่งข้อมูลอาจเป็นการส่งระหว่างหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่อยู่ในระยะติดต่อสื่อสารโดยตรง หรือในกรณีที่หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ค้นหาและปลายทางไม่อยู่ในระยะ

ติดต่อสื่อสารได้โดยตรง ข้อมูลจะส่งผ่านหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่อยู่ระหว่างหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ด้านทางและปลายทาง ระบบการเก็บข้อมูลแบบนี้เรียกว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

### 2.5.1 วิวัฒนาการของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ในยุคแรกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสงคราม ในช่วงสงครามเย็น Sound Surveillance System (SOSUS) ใช้ในมหาสมุทรเพื่อตรวจจับเรือดำน้ำของสหภาพโซเวียตโดยใช้ระบบแถวเซ็นเซอร์ไฮโดรโฟน (hydrophone array) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้าใต้น้ำและส่งข้อมูลด้วยสายเคเบิลใต้น้ำ ในช่วงเวลาเดียวกัน ระบบเครือข่ายเรดาร์ทางอากาศ (networks of air defense radars) ได้รับการพัฒนาเพื่อป้องกันภาคพื้นสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ในยุคแรกระบบเครือข่ายมีรูปแบบเป็นลำดับชั้น (hierarchical) การประมวลผลจะทำตามลำดับชั้นและใช้มนุษย์เป็นหลักในการประมวลผลและทำงาน

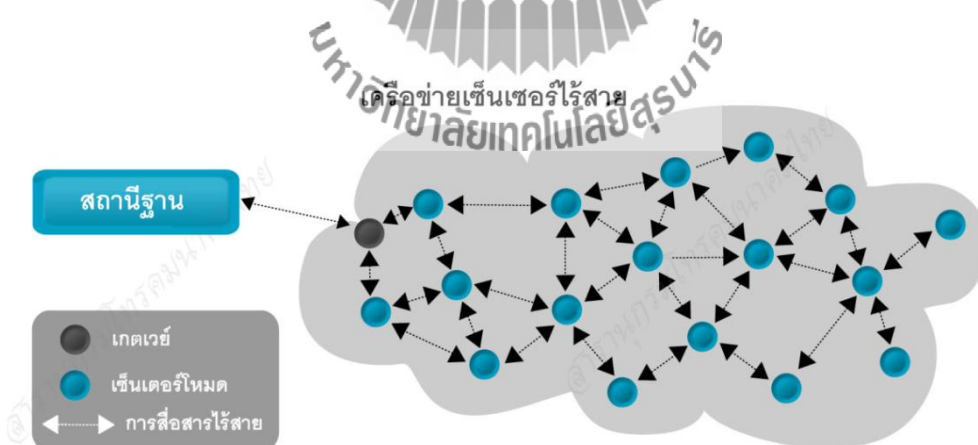
ยุคที่สอง เกิดขึ้นหลังจากการพัฒนาอินเทอร์เน็ตประมาณ พ.ศ.๒๕๒๓ เป็นยุคของการพัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบกระจายตัว (Distributed Sensor Network) เป็นโครงการวิจัยของ Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) โดยเน้นที่การพัฒนาการประมวลผลข้อมูลแบบกระจายตัว การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) การติดตามวัตถุเครือข่ายใช้โปรโตคอลสื่อสารระดับสูง แต่ด้วยเทคโนโลยีในยุคนั้นทำให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีขนาดใหญ่และถูกออกแบบให้เป็นรถเซ็นเซอร์เพื่อเป็นหน่วยร่วมเซ็นเซอร์แบบเคลื่อนที่ได้

### 2.5.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ยุคปี พ.ศ.2550

เทคโนโลยีการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาถึงระดับที่สามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และประหยัดพลังงาน ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างหน่วยประมวลผล และหน่วยส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์ไร้สาย และด้วยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลจุลภาค การสร้างเซ็นเซอร์ขนาดเล็กและวงจรมินิอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นได้จริง ทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายยุคนี้เข้าใกล้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในจินตนาการของนักวิจัยยุคก่อนๆ อย่างไรก็ตามเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนี้ยังมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง

### 2.5.3 ภาพรวมสถาปัตยกรรมเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

สถาปัตยกรรมเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วยสาม ส่วนได้แก่ หน่วยร่วมเซ็นเซอร์เกตเวย์ และสถานีฐาน ( base station) ดังรูปที่ 2-8 หน่วยร่วมเซ็นเซอร์จำนวนมากฝังตัวในสภาพแวดล้อมเพื่อเก็บข้อมูล โดยแต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ติดต่อสื่อสารแบบไร้สายกับหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ข้างเคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับส่งแบบไร้สาย แต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ควบคุมและจัดการงานของตัวเอง ( self-organize) ทุกๆ หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่ติดต่อถึงกันทำงานร่วมกัน( collaboration)เป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้แต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลไปหากันได้แม้ว่าหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ปลายทางไม่สามารถติดต่อกับหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ต้นทางได้โดยตรงโดยให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ระหว่างทางช่วยส่งข้อมูลต่อกันตั้งแต่ต้นทางถึงปลายทาง วิธีการส่งแบบนี้เรียกว่าการส่งแบบมัลติฮอป ( multi-hop) เกตเวย์ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยเกตเวย์อาจเป็นหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ธรรมดาหรือเป็นหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ ที่มีความสามารถพิเศษในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สถานีฐานทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่วัดได้จากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ควบคุมการทำงานและติดต่อกับผู้ใช้งานหรืออาจติดต่อกับเครือข่ายอื่นๆเช่นอินเทอร์เน็ต



รูปที่ 2-8เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เนื่องจากการทำงานแบบไร้สายทำให้แต่ละหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ใช้แหล่งพลังงานภายในหน่วยร่วมเซ็นเซอร์เองหรือในบางกรณีอาจใช้แหล่งกำเนิดพลังงานเพื่อให้หน่วยร่วมเซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ทำให้เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์อาจหยุดทำงานเพราะพลังงานหมดหรือกลับขึ้นมาทำงานได้อีกครั้งเมื่อมีพลังงานเพียงพอ รวมไปถึงในบางเครือข่ายที่มีหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ที่เคลื่อนที่ได้ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์นั้นมีผลต่อโครงสร้าง (topology) ของเครือข่าย และส่งผลถึงเส้นทางการส่งข้อมูลของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ โดยเส้นทางการส่งข้อมูล ในแต่ละโครงสร้างนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการหาเส้นทาง (routing algorithm) ซึ่งวิธีการหาเส้นทางในแต่ละเครือข่าย จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของเครือข่ายนั้นๆ

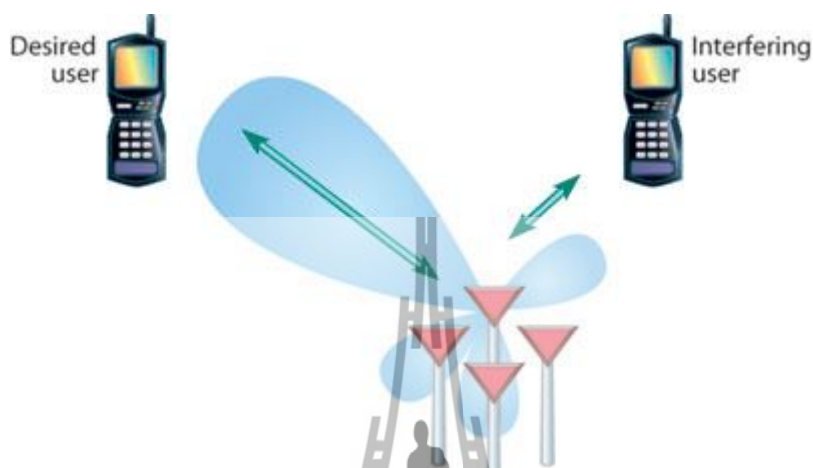
## 2.6 การก่อรูปลำคลื่น

การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) เป็นเทคโนโลยีในแบบ วงปิด (closed-loop) ที่จะนำมาเสนอในที่นี้ก็คือ การก่อรูปลำคลื่น ที่ใช้สายอากาศหลายๆตัวในการจัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (radiation pattern) ของสัญญาณวิทยุในรูปแบบที่ต้องการจากทฤษฎีสายอากาศนั้นเมื่อเราทำการเรียงสายอากาศในจำนวนต่างๆกันที่ความถี่ต่างๆและมีกำลังส่งแตกต่างกันออกไปจะทำให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ของสัญญาณวิทยุที่แตกต่างกันออกไปหลายๆรูปแบบในแต่ละรูปแบบก็จะมีทั้งมุมและทิศทางที่มีสัญญาณที่ตีรวมทั้งมุมและทิศทางของสัญญาณที่ไม่ดีซึ่งปกติการออกแบบสายอากาศและการใช้งานสายอากาศนั้นเราจำเป็นต้องพิจารณาถึงรูปแบบการแผ่กระจายสัญญาณเหล่านี้ด้วย

สำหรับเทคโนโลยีแบบ วงปิดจะใช้เทคนิค สายอากาศเก่ง (smart antenna) ที่จะทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการแผ่กระจายสัญญาณวิทยุเหล่านี้ในรูปแบบแตกต่างกันไปเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมต่างๆผู้ใช้งาน (user) และสัญญาณรบกวนที่กระจายตัวกันออกไปซึ่งเราจะเรียกว่า การก่อรูปแบบปรับตัวได้ (adaptive beamforming) โดยจะปรับเปลี่ยนจากข้อมูลที่ได้รับจา ภาครับของอุปกรณ์ไวแมกซ์ที่เรียกว่า uplink sounding response มาคำนวณเพื่อทำการปรับเปลี่ยนเฟสและแอมพลิจูดในอุปกรณ์ส่งสัญญาณแต่ละตัวเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ที่ต้องการ

การทำงานนั้นไม่ยากกล่าวคือจะมีสายอากาศอย่างน้อยสองต้นที่จะส่งสัญญาณวิทยุออกไปพร้อมๆกันหากสัญญาณนี้ไปถึงปลายทางแล้วมีเฟส ตรงกันก็จะเสริมกันแต่ถ้าสัญญาณจากสายอากาศตัวที่ 1 และสายอากาศตัวที่ 2 ไปถึงช้าเร็วต่างกันสัญญาณนั้นก็เกิดปรากฏการณ์

หักล้างกันทำให้สัญญาณที่ได้ต่ำกว่าปกติการทำงานของระบบก็คือการปรับเฟสของสัญญาณที่ส่งให้เหมาะสมกับฝั่งด้านรับจะทำให้สัญญาณแรงขึ้นแต่ขบวนการ การก่อรูปทั้งหมดนี้จะต้องอาศัยการทำงานของภาคส่งร่วมกับภาครับในการแจ้งว่าสัญญาณแรงหรืออ่อนอย่างไรด้วยดังรูปที่ 2-9



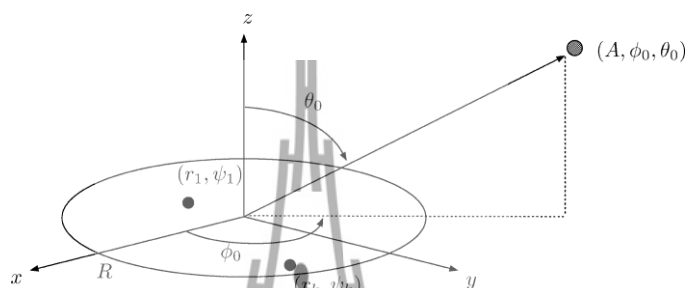
รูปที่2-9 การใช้สายอากาศหลายต้น (Antenna Array) ร่วมกับระบบ การก่อรูปช่วยให้อาสาอากาศกลายเป็นระบบสายอากาศเก่งที่จะปรับความแรงของสัญญาณตามทิศทางต่างๆได้

โดยรูปแบบที่ต้องการนั้นจะเน้นให้บีบวิศร์ (beamwidth) หลักพุ่งตรงไปที่ผู้ใช้งานเพื่อให้ได้กำลังส่งความแรงของสัญญาณและความไว (sensitivity) ของด้านรับที่ตรงไปยังผู้ใช้นั้นออกมาดีที่สุดในขณะที่จะจัดให้ทิศทางของแหล่งรบกวนสัญญาณนั้นไม่มีการกระจายสัญญาณเพื่อรับและส่งสัญญาณแต่อย่างใดจึงทำให้สัญญาณที่ได้รับมีความแรงกมช่วยลดการรบกวนของสัญญาณลงได้มากได้ค่า SNR ที่สูงเพื่อที่จะได้ throughput และประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่สูงไปด้วยซึ่งขั้นตอนต่างๆที่ว่ามานี้ในปัจจุบันสามารถกระทำได้สำเร็จในเวลาเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงไม่มีปัญหาในการใช้งานแต่อย่างใด

## 2.7 การกระจายตัวของการก่อรูปลำคลื่น

เพื่อที่จะพิจารณาและอธิบายถึงความบกพร่อง เราจะพิจารณาในสองสถานการณ์ คือ วงปิด และวงเปิด โดยวงปิดจะอธิบายได้จาก แต่ละ โหนดอิสระประมาณ หนึ่งตัวเองเพื่อที่จะส่งไปยัง โหนดปลายทาง และปรับระยะไปยังทิศทางของปลายทาง

### รูปแบบของระบบและรูปแบบของลำคลื่น



รูปที่ 2-10 รูปแบบของระบบและรูปแบบของลำคลื่น

จากรูปที่ 2-10k คือตำแหน่งของโหนด โดยเขียนพิกัดได้จาก  $(r_k, \Psi_k)$  ตำแหน่งของระยะเป้าหมายปลายทาง กำหนดพิกัดได้เป็น  $(A, \Phi_0, \theta_0)$  ระยะในแนวตั้ง(ตั้งรูป)มีมุม เป็น  $\Phi_0 \in [-\pi, \pi]$  ระยะในแนวระนาบ(ตั้งรูปที่ 2-10) มีมุมเป็น  $\theta_0 \in [0, \pi]$  มีรัศมีหรือขอบเขต เท่ากับ R ใช้  $d_k$  แทนระยะทางระหว่าง โหนด  $k$ th และตำแหน่งอ้างอิงโดยสามารถเขียนได้เป็น

$$d_k(\Phi, \theta) = \sqrt{A^2 + r_k^2 - 2r_k A \sin \theta \cos(\phi - \phi_k)} \quad (2-42)$$

ถ้าเฟสเริ่มต้นของโหนด  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$  จำได้เป็น

$$\Psi_k = -\frac{2\pi}{\lambda} d_k(\phi_0 - \theta_0) \quad (2-43)$$

และกำหนดแฟกเตอร์อาร์เรย์ต่างๆ และให้ตำแหน่งพิกัดของโหนด ได้เป็น  $r = [r_1, r_2, \dots, r_N] \in [0, R]^N$

และ  $\psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N] \in [-\pi, \pi]^N$  เขียนสมการได้เป็น

$$\begin{aligned}
 F(\phi, \theta | r, \psi) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\psi_k} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_k(\phi, \theta)} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} [d_k(\phi, \theta) - d_k(\phi_0 - \theta_0)]}
 \end{aligned}$$

(2-44)

เมื่อ  $N$  แทนจำนวนของโหนดเซนเซอร์ และ  $\lambda$  แทนความยาวของคลื่นความถี่ที่ใช้  
 ในที่นี้ จะสนใจรูปแบบของการแผ่รังสีในระยะไกลและสามารถที่จะรวมข้อมูลได้ ถ้า  $A \gg r_k$   
 ระยะ  $d_k(\phi, \theta)$  ใน (1) จะสามารถประมาณได้ว่า

$$d_k(\phi, \theta) \approx A - r_k \sin \theta \cos(\phi - \psi_k) \quad (2-45)$$

รูปแบบของลำคลื่นในระยะไกลจะประมาณได้เป็น

$$\begin{aligned}
 F(\phi, \theta | r, \psi) &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_k [\sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \psi_k) - \sin \theta \cos(\phi - \psi_k)]} \\
 &= F^*(\phi, \theta | r, \psi)
 \end{aligned} \quad (2-46)$$

อีกอย่างเมื่อแทนค่า  $\psi_k$  ใน (2) จะได้เป็น

$$\psi_k = -\frac{2\pi}{\lambda} r_k \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \psi_k) \quad (2-47)$$

จะสามารถเขียนสมการเปรียบเทียบอาร์เรย์แฟกเตอร์ได้เป็น

$$F(\phi, \theta | r, \psi) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\psi_k} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_k(\phi, \theta)}$$

$$\begin{aligned} &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[A-r_k \sin \theta \cos(\phi-\psi_k)+r_k \sin \theta_0 \cos(\phi_0-\psi_k)]} \\ &= e^{j\frac{2\pi}{\lambda}A} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_k[\sin \theta_0 \cos(\phi_0-\psi_k) - \sin \theta \cos(\phi-\psi_k)]} \end{aligned}$$

$$\triangleq \mathcal{F}^t(\phi, \theta | r, \psi)$$

(2-48)

มีข้อแตกต่างที่ระหว่าง  $\triangleq \mathcal{F}^{\sim}(\phi, \theta | r, \psi)$  กับ  $\triangleq \mathcal{F}^t(\phi, \theta | r, \psi)$  คือการมีค่าชดเชยเฟสกับไม่มีค่าชดเชยเฟส  $(\frac{2\pi}{\lambda})A$  ส่วนรูปแบบบีบจะเหมือนกันทั้งสองระบบ และการรับสัญญาณจะไม่มีข้อที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

ดังนั้นการขึ้นรูป ลำคลื่น จะมีอยู่สองแบบคือ วิธีแรกคือการแบบใช้วงปิด (2-43) แต่วิธีนี้มีความรู้ในด้านระยะความสัมพันธ์และความยาวคลื่นระหว่างโหนดปลายทางอย่างถูกต้อง หรือจะใช้ (2-47) แต่ต้องรู้ตำแหน่งของโหนดและระยะจุดอ้างอิงซึ่งวิธีนี้จะคล้ายกรณีลูปวงเปิด ดังนั้นจะต้องทราบถึงทิศทางต่างๆรวมทั้งการทำงานของทั้งสองกรณี ซึ่งจะเป็นสิ่งสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอื่นๆ

## 2.8 ประสิทธิภาพของการกระจายลำคลื่นของพลาสมาเปิด

จะคิดในกรณีของลูปเปิด

ในกรณีของลูปเปิด จากรูปแบบใน ( 2-43) ด้วย  $\theta_0 = \pi/2$  และถ้าถ้ามีข้อผิดพลาดจากที่ตั้งของพารามิเตอร์  $r_k, \psi_k$  ระยะแรกจะถูกแทนที่ด้วย

$$\begin{aligned} \Psi_k^\dagger &= \frac{2\pi}{\lambda}(r_k + \delta r_k) \cos(\phi_0 - (\psi_k + \delta \psi_k)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}r_k \cos(\phi_0 - (\psi_k + \delta \psi_k)) + \frac{2\pi}{\lambda}\delta r_k \cos(\phi_0 - (\psi_k + \delta \psi_k)) \end{aligned}$$

(2-49)



เมื่อ  $\delta r_k$  และ  $\delta \psi_k$  คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการสุ่ม โดยแต่ละชุดจะถือว่าเป็น i.i.d. เช่นเดียวกับ  $r_k, \psi_k$  เพื่อความง่าย กับระยะที่ไกลออกไป โดย

$$\begin{aligned} & \frac{2\pi}{\lambda} d_k \left( \phi, \frac{\pi}{2} \right) + \Psi_k^\dagger \\ & \approx \frac{2\pi}{\lambda} \{ A - r_k [\cos(\phi - \psi_k) - \cos(\phi_0 - \psi_k - \delta \psi_k)] + \delta r_k \cos(\phi_0 - (\psi_k + \delta \psi_k)) \} \\ & = \frac{2\pi}{\lambda} A + \frac{4\pi}{\lambda} r_k \times \left[ \sin \left( \psi_k - \frac{\phi_0 + \phi - \delta \psi_k}{2} \right) \sin \left( \frac{\phi_0 + \phi - \delta \psi_k}{2} \right) \right] + \frac{2\pi}{\lambda} \delta r_k \cos(\psi_k - (\phi_0 - \delta \psi_k)) \end{aligned} \quad (2-50)$$

โดย  $\Psi_k \triangleq \psi_k - \frac{(\phi + \phi_0 - \delta \psi_k)}{2}$  จากนั้น คำนวณมือ ของ (2-50) หาได้จาก

$$\frac{2\pi}{\lambda} A - \frac{4\pi}{\lambda} r_k \sin \Psi_k \sin \frac{(\phi - \phi_0 - \delta \psi_k)}{2} + \frac{2\pi}{\lambda} \delta r_k \cos \left( \Psi_k + \frac{(\phi - \phi_0 + \delta \psi_k)}{2} \right) \quad (2-51)$$

และจากผลของ (2-46) จะถูกกำหนดโดย (2-52)

$$F^\dagger(\phi|r, \psi, \delta \psi, \delta r) = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} A} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} r_k \sin \Psi_k \sin \frac{(\phi - \phi_0 - \delta \psi_k)}{2} + j \frac{2\pi}{\lambda} \delta r_k \cos \left( \Psi_k + \frac{(\phi - \phi_0 + \delta \psi_k)}{2} \right)} \quad (2-52)$$

และรูปแบบของลำดับที่แสดงคือ

$P(\phi|z, v, \delta \psi)$

$$= \frac{1}{N} + \frac{1}{N^2} \times \sum_{k=1}^N \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N e^{-j 4\pi R \left\{ z_k \sin \frac{(\phi - \phi_0 - \delta \psi_k)}{2} \right\} - z_l \sin \frac{(\phi - \phi_0 - \delta \psi_l)}{2}} \times e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (v_k - v_l)} \quad (2-53)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 z_k &\triangleq \frac{r_k}{R} \sin \Psi_k \\
 &= R_k \sin\left(\psi_k + \frac{\delta\psi_k}{2} - \frac{\phi + \phi_0}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2-54}$$

$$\begin{aligned}
 v_k &\triangleq \delta r_k \cos\left(\Psi_k + \frac{\phi + \delta\psi_k}{2}\right) \\
 &= \delta r_k \cos(\psi_k + \delta\psi_k - \phi_0)
 \end{aligned}
 \tag{2-55}$$

ภายใต้เงื่อนไข  $\phi, \phi_0, \delta\psi_k$ , มุม  $\Psi_k$  จะมองเห็นเป็นตัวแปรสุ่มกระจายสม่ำเสมอ

## 2.9 กล่าวสรุป

สายอากาศแถวลำดับ สามารถแบ่งออกตามรูปแบบการใช้งานได้ 3 แบบ คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น, สายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม และสายอากาศเชิงระนาบ ในแต่ละวิธีจะมีการวางตัวของสายอากาศแต่ละต้นแตกต่างกันไปตามแต่ละแบบ แต่ในโครงการครั้งนี้เราจะใช้ทฤษฎีของสายอากาศแบบวงกลม เพื่อมาใช้ในการศึกษาในการส่งข้อมูลจากโหนดหลายๆ โหนดไปถึงเครื่องรับปลายทาง การส่งข้อมูลไปถึงปลายทางนี้ปลายทางอาจจะรับข้อมูลได้ถูกต้องบ้าง ผิดเพี้ยนบ้าง ในที่นี้จะต้องคำนึงถึงการระบุตำแหน่งของตัวโหนดเอง ว่าการระบุตำแหน่งนั้นมีความแม่นยำขนาดไหน ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทถัดไป

## บทที่ 3

### ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก

#### 3.1 กล่าวนำ

การศึกษาเกี่ยวกับ ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System : GPS) คือ การศึกษาและเรียนรู้ถึงการกำหนดระยะ พิกัดตำแหน่งต่างๆบนโลก โดยใช้ดาวเทียมเป็นอุปกรณ์ ในการช่วงกำหนดตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจากระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกนี้ก็จะมีส่วนประกอบต่างๆ ค่าความผิดพลาดต่างๆที่จะเกิดขึ้นกับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกเองด้วย ในการศึกษาเพื่อที่จะ นำประโยชน์ของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์หรือซอฟต์แวร์ โปรแกรมเพื่อให้ทราบถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

#### 3.2 ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก

ระบบการค้นหาตำแหน่งและนำทางด้วยดาวเทียม เป็นเทคโนโลยีที่ใช้บอกพิกัดบนพื้น โลกโดยใช้ดาวเทียมที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นระบบเดียวในปัจจุบัน ที่สามารถแสดงตำแหน่งที่ อยู่ที่แน่นอนว่าอยู่ ณ ตำแหน่งใดบนพื้นโลกได้ทุกเวลา ทุกสภาพอากาศ ประกอบด้วยดาวเทียม จำนวน 24 ดวงหมุนอยู่รอบโลก อยู่สูงขึ้นไป 14,000 ไมล์อากาศ หรือประมาณ 20,200 กิโลเมตร จากพื้นโลก ดาวเทียมหมุนรอบโลก แบ่งเป็น 6 ระนาบ ระนาบละ 4 ดวง โดยทำมุมเอียง 55 องศา โคจรรอบโลกวันละ 2 รอบ ทำให้เครื่องรับสัญญาณมองเห็นดาวเทียมไม่น้อยกว่า 4 ดวงบนท้องฟ้า ไม่ว่าจะอยู่ที่ใดบนพื้นผิวโลก เป็นผลทำให้สามารถนำข้อมูลการรับสัญญาณจากระบบกำหนด ตำแหน่งบนโลกไปคำนวณหาตำแหน่งได้ตลอดเวลา 24 ชั่วโมงในทุกสภาพอากาศและทุกหนทุก แห่งบนพื้นผิวโลกหรือที่ระดับเหนือขึ้นไป โดยอัตโนมัติ และดาวเทียมทั้งหมดจะได้รับการ ควบคุมดูแล จากสถานีภาคพื้นดินทั่วโลกตลอดเวลา

ปัจจุบันโลกของเรามี 2 โครงข่าย คือ

- 1) ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) ระบบกาลิเลโอกลุ่มประเทศภาคพื้นยุโรป

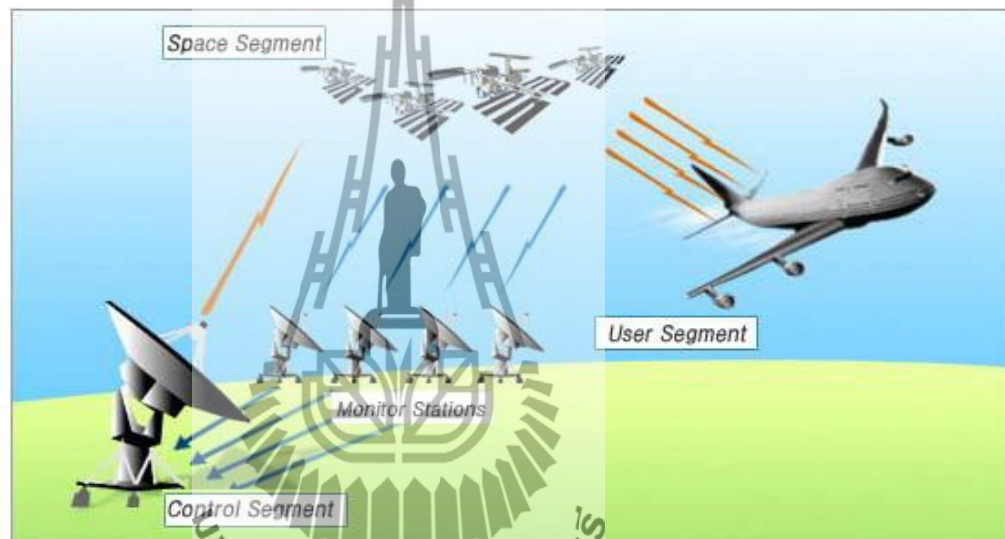
1) ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกอันแรกของโลกกระทรวงกลาโหมประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ดำเนินการโครงการ Global Positioning System หรือ “GPS” ขึ้น โดยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก จะใช้ดาวเทียมชื่อ NAVSTAR โคจรอยู่ในระดับสูงที่พ้นจากคลื่นวิทยุรบกวนของโลกและใช้วิธีการที่สามารถให้ความถูกต้องเพียงพอที่จะใช้บอกตำแหน่งได้ทุกแห่งบนโลกตลอดเวลา 24 ชั่วโมงจากการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถผลิตเครื่องรับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ที่มีขนาดเล็กลงและมีราคาถูกลงกว่าเครื่องรับในระบบเดิมเป็นอันมาก

2) ระบบ GALILEO ของกลุ่มประเทศภาคพื้นยุโรป เริ่มก่อตั้งโครงการเมื่อปี 2004 โดย Council Regulation (EC) ของกลุ่มประเทศภาคพื้นยุโรป (European Union & European Space Agency) จากความต้องการที่จะมีระบบติดตามตำแหน่งหรือทิศทางเป็นของตนเองเนื่องจากหากต้องขึ้นอยู่กับ ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ของสหรัฐอเมริกาเพียงระบบเดียว เมื่อเกิดปัญหาในประเทศที่ทางสหรัฐฯ จำเป็นต้องปิดระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ลงชั่วคราวเพื่อความปลอดภัย ก็อาจก่อให้เกิดปัญหากับการใช้งานระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ทั่วโลกได้ เช่น การเดินเรือทาง EU/ESA จึงก่อตั้งระบบที่มีชื่อว่า “กาลิเลโอ” (Galileo) ซึ่งเป็นระบบติดตามตำแหน่งหรือทิศทางผ่านดาวเทียมของยุโรป (European Satellite Navigation) หรือ “Global Navigation Satellite Infrastructure -GNSS” ระบบ Galileo ดังกล่าว จะช่วยเสริมกับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกปัจจุบัน โดยมีโครงข่ายครอบคลุมทั่วโลกจากนโยบายของกลุ่ม EU ระบบกาลิเลโอ จะไม่มีวันหยุดการใช้งานหรือปิดระบบ เนื่องจากเหตุผลทางการทหาร ระบบกาลิเลโอ ประกอบด้วย ดาวเทียมทั้งหมด 30 ดวง และระบบภาคพื้นดินที่จะให้ข้อมูลตำแหน่งทิศทางแก่ผู้ใช้งาน โดยดาวเทียมดวงแรกได้ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรเมื่อปลายปี 2005 ระบบกาลิเลโอ จะเริ่มให้บริการได้ในปี 2008 และทั้งระบบจะเสร็จสมบูรณ์ในปี 2010 โดยจะให้ข้อมูลที่ชัดเจนกว่าระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกของสหรัฐฯ คือสามารถให้ข้อมูลในตำแหน่งจริง ณ เวลานั้น (real-time) และให้ตำแหน่งที่แม่นยำกว่า โดยอาจคลาดเคลื่อนไปประมาณ 3 ฟุต (1 เมตร) ในขณะที่ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกปัจจุบัน มีความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่ถูกต้องถึงกว่า 16 ฟุต (ประมาณ 5 เมตร) สามารถให้บริการสำหรับระบบขนส่ง (ติดตามรถยนต์ หาเส้นทาง การเดินทาง , ตรวจจับความเร็ว , ระบบนำร่อง ,

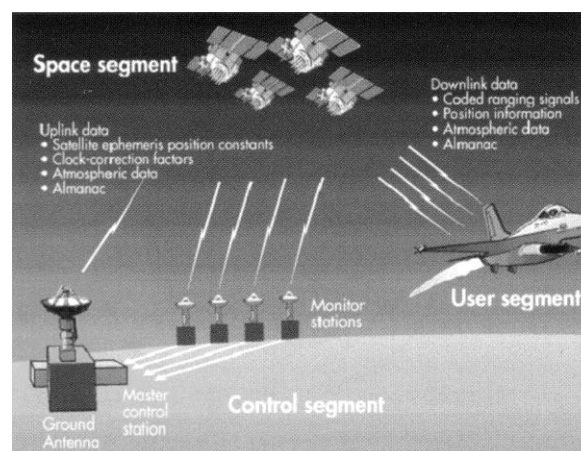
บริการสังคม (เช่น ช่วยบุคคลทุพพลภาพ หรือคนชรา) , บริการสำหรับศาลหรือตรวจคนเข้าเมือง (หาที่อยู่ของผู้ต้องสงสัย, ค้นตรวจตามชายแดน), งานสาธารณะ (ระบบข้อมูลทางภูมิศาสตร์), การค้นหาหรือช่วยเหลือผู้ประสบภัย , หรือเพื่อการพักผ่อน (เช่น ค้นหาสถานที่ตั้งของทะเลหรือภูเขา) แสดงตำแหน่งและการโคจรของดาวเทียมระบบกำหนดตำแหน่งรอบโลก

### 3.3 องค์ประกอบและส่วนต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก

มี 3 ส่วน ประกอบด้วย โดยจะแสดงส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3-1 และรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-1 ส่วนประกอบต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก 1



รูปที่ 3-2 ส่วนประกอบต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก 2

1. ส่วนอวกาศ( space segment ) ประกอบด้วยดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โคจรรอบโลก ที่ระยะ 11,000 ไมล์ อากาศประกอบด้วยดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โคจรรอบโลก ที่ระยะ 11,000 ไมล์ อากาศ จากพื้นโลก ใช้เวลา 12 ชม ในการ โคจรรอบโลกหนึ่งรอบโดยดาวเทียมจำนวน 21 ดวงจะใช้ในการบอกค่าพิกัด ส่วนที่เหลือ 3 ดวงจะสำรองเอาไว้ ดาวเทียมทั้ง 24 ดวงนี้จะมียังโคจรอยู่ 6 วง โคจรด้วยกัน โดยแบ่งจำนวนดาวเทียมวงโคจรละ 4 ดวง และมีรัศมีวงโคจรสูงจากพื้นโลกประมาณ 20,200 กิโลเมตร (12,600 ไมล์) วงโคจรทั้ง 6 จะเอียงทำมุมกับเส้นศูนย์สูตร ( Equator) เป็นมุม 55 องศา การวางวงโคจรเช่นนี้ทำให้ เราสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียม ได้คราวละถึง 6 ดวง ดาวเทียมติดตั้งนาฬิกาที่เที่ยงตรงมากๆ ถึง 3 nanoseconds ( ความเที่ยงตรง 0.000000003 ของวินาที หรือ  $3 \times 10^{-9}$ ) ความเที่ยงตรงมีความสำคัญมาก สำหรับเครื่องรับ เพราะเครื่องรับจำเป็นต้องทราบเวลาที่เที่ยงตรง แน่แน่นอน ว่าระยะเวลาเท่าไร ที่สัญญาณคลื่นจากดาวเทียมเดินทาง ถึงเครื่องรับ ดาวเทียมแต่ละดวง มีเชื้อเพลิง และเครื่องยนต์ขนาดเล็ก ซึ่งสามารถที่จะ ปรับแต่งดาวเทียม ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ในวงโคจร ถ้าดาวเทียมเกิดเคลื่อนออกจาก ตำแหน่ง ที่กำหนด ดาวเทียม แต่ละดวงมีนาฬิกาอะตอมอีก 4 อัน นาฬิกานี้มีความเที่ยงตรงถึงหนึ่งในหนึ่งพันล้าน ของวินาที หรือ nanosecond ดาวเทียม แต่ละดวง จะส่งคลื่นสัญญาณออกมาสองคลื่นสัญญาณ หนึ่งคลื่นสำหรับการทหาร และอีกคลื่นหนึ่งสำหรับพลเรือน

#### คุณลักษณะบางอย่างของดาวเทียม

- น้ำหนัก 930 kg.(in orbit)
- ขนาดSize 5.1 m.
- ความเร็ว ใน การโคจร 4 km/sec
- สัญญาณที่ส่ง 1575.42 MHz and 1227.60 MHz
- เครื่องรับ สัญญาณ 1783.74 MHz
- นาฬิกา 2 Cesium and 2 Rubidium
- อายุการใช้งาน 7.5 year (later model blockIIR 10 years)

**2. สถานีควบคุม (control segment)** สถานีควบคุม ประกอบด้วย 5 สถานีย่อยกระจายอยู่ทั่วโลก ทำหน้าที่คอยติดต่อสื่อสาร (tracking) กับดาวเทียม ทำการคำนวณผล (computation) เพื่อบอกตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวง และส่งข้อมูลที่ไประยะดาวเทียมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ข้อมูลที่ไประยะเป็นข้อมูลที่ทันสมัยอยู่เสมอ ควบคุมดาวเทียมประกอบด้วย

- **Master Control Station : สถานีควบคุมแม่ข่าย** มีอยู่ 1 สถานี ทำหน้าที่รับผิดชอบในการจัดการทั่วไป และบริการสถานีลูกข่าย เป็น ศูนย์กลางที่ให้การสนับสนุนการทำงาน เครื่องแม่ข่าย จะคำนวณตำแหน่ง และ นาฬิกาความคลาดเคลื่อน ของดาวเทียมแต่ละดวง จากสถานีลูกข่ายภาคพื้น และ ส่งคำสั่งแก้ไข กลับไปยังสถานีลูกข่าย เพื่อส่งไปยังดาวเทียมดวงนั้นๆ

- **Monitor Stations : สถานีควบคุมลูกข่าย** มีอยู่ 4 สถานี จะทำการตรวจสอบ ความสูง , ตำแหน่ง , ความเร็ว, และวงจรรอบของดาวเทียม สถานีควบคุมนี้ ตรวจสอบดาวเทียม ได้ ครั้งละ 11 ดวง การตรวจสอบนี้ แต่ละสถานีกระทำวันละ 2 ครั้ง เมื่อดาวเทียมโคจรรอบโลก

**3. ผู้ใช้ (user segment)** ประกอบด้วย 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มพลเรือน (civilian) และกลุ่มทหาร (military) ในส่วนของผู้ใช้จะมีหน้าที่พัฒนาเครื่องรับสัญญาณ (receiver) ให้ทันสมัยและสะดวกแก่การใช้งาน สามารถที่จะใช้ได้ทุกแห่งในโลก และให้ค่าที่มีความถูกต้องสูง

**หลักการการทำงานของเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก**

เครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ทำหน้าที่รับสัญญาณจากดาวเทียมแล้วนำสัญญาณดังกล่าวมาประมวลผลเพื่อหาพิกัด ปัจจุบัน ซึ่งภายในเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

- ภาค RF ทำหน้าที่รับสัญญาณอนาล็อกจากดาวเทียมระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งไปประมวลผลในภาค baseband
- ภาค baseband ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณที่รับมาจากภาค RF เพื่อที่จะนำข้อมูลต่างๆ ไปคำนวณหาพิกัดตำแหน่งต่อไป
- ส่วน microprocessor ทำหน้าที่ติดต่อกับภาค baseband เพื่อประมวลผลหาพิกัดตำแหน่ง และติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น

หลักการของเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ การคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ซึ่งจะต้องใช้ระยะทางจากดาวเทียมอย่างต่ำ 3 ดวง เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่แน่นอน ซึ่งเมื่อเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ 3 ดวงขึ้นไปแล้ว จะมีคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมถึงเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก โดยจากสูตรคำนวณทางฟิสิกส์คือ

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} \times \text{เวลา}$$

$$S = VT \tag{3-1}$$

โดยดาวเทียมทั้ง 3 ดวงจะส่งสัญญาณที่เหมือนกันมายังเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก โดยความเร็วแสง (186,000 ไมล์ต่อวินาที) แต่ระยะเวลาในการรับสัญญาณได้จากดาวเทียมแต่ละดวงนั้นจะไม่เท่ากัน เนื่องจากระยะทางไม่เท่ากัน เช่น

**ดาวเทียม 1:** ระยะเวลาในการส่งสัญญาณจากดาวเทียมดวงแรกถึงเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ 0.10 วินาที ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ 18,600 ไมล์ (186,000 ไมล์ต่อวินาที \* 0.10 วินาที = 18,600 ไมล์) ฉะนั้นตำแหน่งปัจจุบันก็จะสามารถเป็นจุดใดก็ได้ในวงกลมที่มีรัศมี 18,600 ไมล์ ซึ่งจะทำให้เห็นว่าดาวเทียมเพียงดวงเดียวยังไม่สามารถบอกตำแหน่งที่แน่นอนได้

**ดาวเทียม 2:** ระยะเวลาในการส่งสัญญาณจากดาวเทียมดวงแรกถึงเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ 0.08 วินาที ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ 13,200 ไมล์ (186,000 ไมล์ต่อวินาที \* 0.08 วินาที = 13,200 ไมล์) ฉะนั้นตำแหน่งปัจจุบันก็จะสามารถเป็นจุดใดก็ได้ในจุด Intersect ระหว่างวงกลมจากดาวเทียมดวงแรกกับดาวเทียมดวงที่ 2

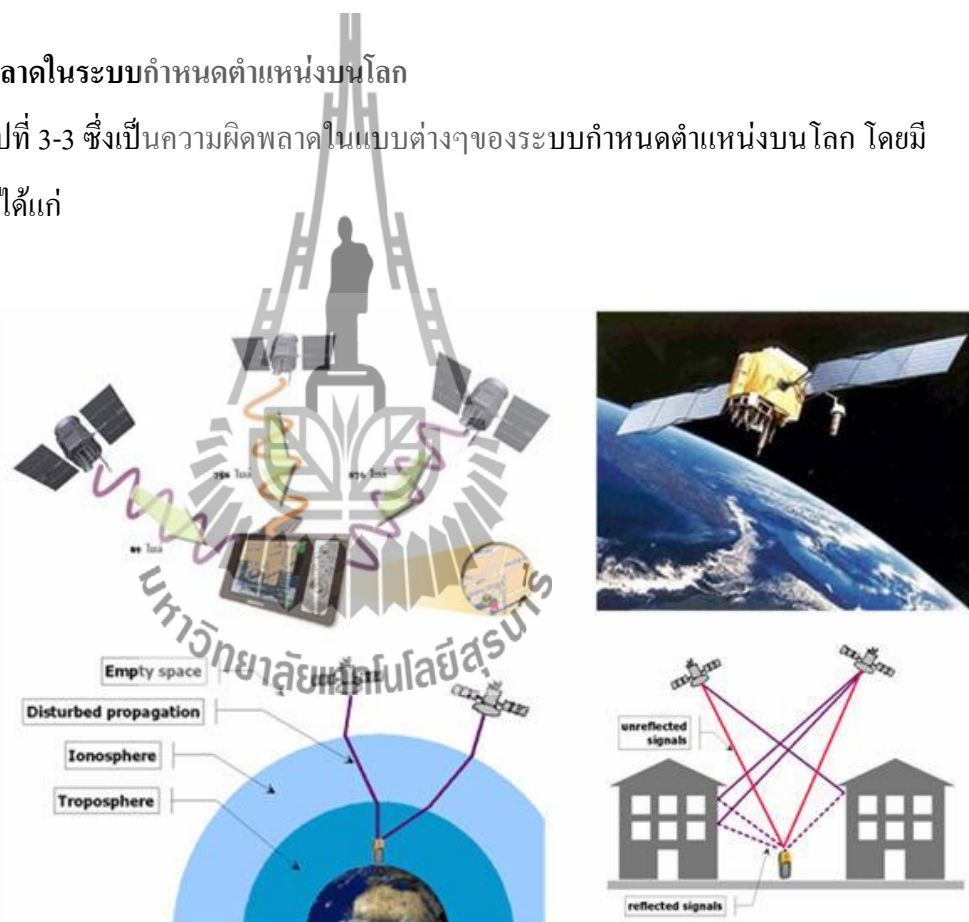
**ดาวเทียม 3:** ระยะเวลาในการส่งสัญญาณจากดาวเทียมดวงแรกถึงเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ 0.06 วินาที ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก คือ 11,160 ไมล์ (186,000 ไมล์ต่อวินาที \* 0.06 วินาที = 11,160 ไมล์) ฉะนั้นตำแหน่งปัจจุบันก็จะสามารถเป็นจุดใดก็ได้ในจุด Intersect ระหว่างวงกลมจากดาวเทียมทั้ง 3 ดวง



จะเห็นได้ว่าจะเหลือตำแหน่งอยู่ 2 จุดที่บริเวณวงกลมทั้ง 3 ตัดกันคือตำแหน่งที่อยู่ในอวกาศ ซึ่งแน่นอนว่าเราไม่สามารถไปอยู่ในอวกาศได้ตำแหน่งนี้จะถูกตัดทิ้งอัตโนมัติโดยเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก อีกตำแหน่งคือตำแหน่งบนพื้นโลกซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราขึ้นถือเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก อยู่นั่นเอง ซึ่งความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งก็ขึ้นกับจำนวนดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้ในขณะนั้นหากมีมากกว่า 3 ดวงก็จะละเอียดมากขึ้น และก็ขึ้นกับคุณภาพของเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ด้วย

### 3.4 ความผิดพลาดในระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก

จากรูปที่ 3-3 ซึ่งเป็นความผิดพลาดในแบบต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก โดยมีด้วยกัน 5 แบบได้แก่

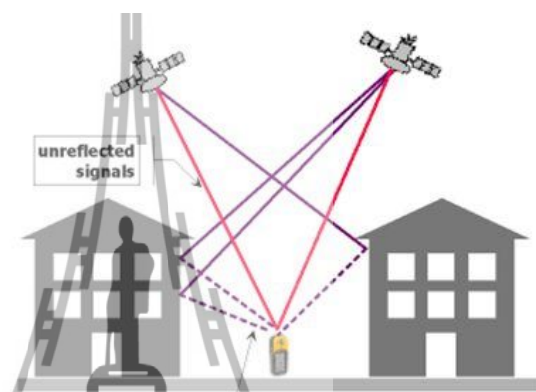


รูปที่ 3-3 รูปแบบความผิดพลาดต่างๆของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก

1. Satellite errors ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากดาวเทียมระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกนั่นเอง คือ ตำแหน่งวงโคจรดาวเทียม และ นาฬิกาอะตอมมิก (atomic clock) ที่ใช้ในระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก

2. Atmosphere ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการ delay ของสัญญาณเมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ ความเร็วไม่เท่าความเร็วแสงในสุญญากาศ และผลกระทบจากโมเลกุลชั้นบรรยากาศ ionosphere และ atmospheric

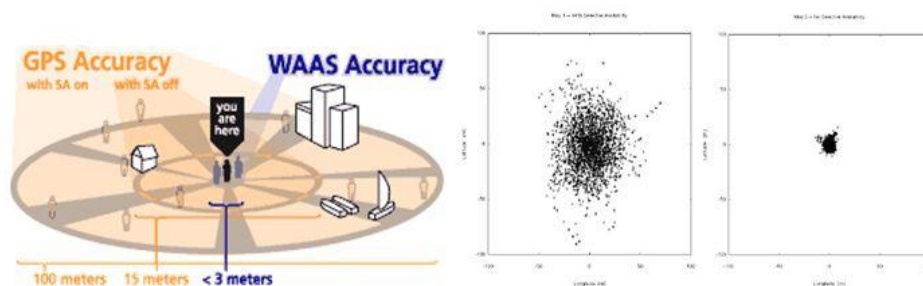
3. Multi-path distortion ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนไปมาของคลื่นสัญญาณ ในบริเวณข้างเคียงกลายเป็นสัญญาณรบกวนดังดูได้ในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนไปมาของคลื่นสัญญาณ

4. Receiver error ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก receiver clock หรือ internal noise

5. Selective Availability (SA) รูปที่ 3-5 จะแสดงถึงความคลาดเคลื่อนจาก SA



รูปที่ 3-5 ความคลาดเคลื่อนของ Selective Availability

ถ้าจะกล่าวถึงเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ที่ทำงานโดยอาศัยสัญญาณ GPS ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าตำแหน่งพิกัด ที่มีความถูกต้อง อยู่ในระยะประมาณ 25 เมตร และความถูกต้องของความเร็วอยู่ในระยะประมาณ 5 เมตรต่อวินาที (แต่ถ้าเป็นเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ของ Magellan นั้นจะมีความสามารถในการคำนวณค่าตำแหน่งพิกัด ที่มีความถูกต้องอยู่ในระยะประมาณ 15 เมตร) และเนื่องจากค่าความถูกต้องที่ได้มานี้เอง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับนโยบายของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา ที่เรียกว่า Selective Availability (SA) เพื่อเป็นการรักษาความมั่นคงทางทหาร โดยสัญญาณ SA นี้จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นกับข้อมูล Ephemeris ที่ส่งกระจายมาจากดาวเทียมระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ที่ส่งผลให้ค่าความผิดพลาด ของค่าตำแหน่งพิกัดที่ได้ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นระยะประมาณ 100 เมตร โดยในการใช้งานทั่วไปแล้วก็คือว่า ค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 100 เมตรนี้ก็ดีเพียงพอ สำหรับการใช้งานที่ต้องการ แต่ถ้าเราต้องการความถูกต้องที่มากกว่านี้ ก็สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค Differential เพื่อทำการกำจัดผลของ SA ซึ่งทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นนั่นเอง(แต่ปัจจุบันนี้รัฐบาลสหรัฐอเมริกา ปิด SA แล้ว ในสมัยประธานาธิบดี Clinton เมื่อ May 2, 2000)

**ความคลาดเคลื่อนโดยประมาณจากแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อนต่างๆ**

- ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (satellite clock) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 1.5 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนในวงโคจรดาวเทียม (satellite orbit) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 2.5 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศรอบนอกและชั้นบรรยากาศภายใน (ionosphere and troposphere) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 5.5 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหักเหหลายเส้นทาง (multi path distortion) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 0.6 เมตร
- ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณรบกวนในเครื่องรับ (receiver errors) จะเกิดค่าความผิดพลาดในระยะประมาณ 0.3 เมตร

### 3.5 ประโยชน์และการประยุกต์เพื่อนำไปใช้งาน

- การนำร่องจากที่หนึ่งไปยังอื่นๆ ตามต้องการ การติดตามการเคลื่อนที่ของคนและสิ่งของต่าง ๆ
- การสำรวจรังวัดและการทำเป็นที่
- การประยุกต์ใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ในการควบคุมเครื่องจักรกล เช่น เครื่องจักรกลในการทำการเกษตรกรรม เครื่องจักรกลที่ใช้ในการขนส่งบริเวณท่าเรือ
- การประยุกต์ใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก กับระบบการจราจรและการขนส่ง (Intelligent Transport Systems; ITS) ในการแก้ปัญหาจราจร การปรับปรุงความปลอดภัย การเพิ่มประสิทธิภาพระบบคมนาคมขนส่ง และการใช้ระบบการประกันรถยนต์ (L-commerce)
- การประยุกต์ใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก กับการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างวิศวกรรมปรี่อเปลือกโลก การใช้อ้างอิงการวัดเวลาที่เที่ยงตรงที่สุดในโลก
- การประยุกต์ใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ในการออกแบบเครือข่ายคำนวณตำแหน่งที่ตั้งด้านโทรคมนาคมและด้านพลังงาน เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบน้ำมัน
- การประยุกต์ใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การติดตามตรวจสอบด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อม
- การประยุกต์ใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ในด้านอื่น ๆ เช่น การเงิน การธนาคาร

### 3.6 กล่าวสรุป

จากระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกซึ่งมีความผิดพลาดอยู่ 5 ชนิด แต่แยกเป็น 6 แบบ โดยทั้ง 6 แบบประกอบไปด้วย 1.satellite error มีค่าความผิดพลาดประมาณ 1.5 เมตร 2.satellite clock มีค่าความผิดพลาดประมาณ 2.5 เมตร 3.atmosphere มีค่าความผิดพลาดประมาณ 5.5 เมตร 4.multi-path distortion มีค่าความผิดพลาดประมาณ 0.6 เมตร 5.receiver error มีค่าความผิดพลาดประมาณ 0.3 เมตร 6.selective availability มีค่าความผิดพลาดประมาณ 100 เมตร แต่ selective availability รัฐบาลของสหรัฐอเมริกาได้ทำการประกาศยกเลิกแล้ว ในยุคของประธานาธิบดีบิลล์ คลินตันเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ.2543 โดยการทำให้โปรแกรมในครั้งนี้ จะนำค่าความผิดพลาดของทั้งหมดมาคิดโดยใช้การสุ่มค่าจะทั้งหมดมาคิดความผิดพลาด เพื่อนำไปชดเชยในการส่งลำคลื่นต่อไป



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับวงกลม

#### 4.1 กล่าวนำ

ในโครงการนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศแถวลำดับวงกลม (Circular Array Antenna) เนื่องจากการสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communication) มักจะติดตั้งในพื้นที่และกระจายตัวแบบไม่เป็นรูปร่างที่แน่นอน โดยในการศึกษาครั้งนี้ เราได้จำลองระบบออกมาในรูปแบบของการกระจายตัวในรัศมีที่เราต้องการ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับสายอากาศแถวลำดับวงกลม แต่ในความเป็นจริงจะไม่นับเป็นวงกลมอย่างที่คิด เราจึงต้องมีการชดเชยเฟสเพื่อให้การก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการดังจะกล่าวในบทต่อไป และสายอากาศลำดับวงกลมจึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปใช้ต่อไป

#### 4.2 สายอากาศแถวลำดับวงกลม

สายอากาศแถวลำดับแบบวงกลมเป็นแถวลำดับที่มีองค์ประกอบทั้งหมดจะถูกจัดเรียงตลอดทิศทางของมุม  $\phi$  ในระบบพิกัดทรงกระบอกซึ่งอยู่ในรูปวงกลม (0 ถึง  $2\pi$ ) โดยค่าของสนามไฟฟ้าแอมพลิจูดสามารถเขียนได้ในรูปของผลรวม

$$E(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \frac{e^{-jk R_n}}{R_n} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $E$  คือ สนามไฟฟ้า  $N$  คือ จำนวนสายอากาศและ  $R_n$  คือ ระยะระหว่างสายอากาศที่ใกล้ที่สุดถึงตำแหน่งของภากรับ

โดยที่

$$R_n = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos\phi_n} \quad (4-2)$$

โดยกรณีที่  $r \gg a$  จะทำให้สมการ (4-1) ลดรูปลงเหลือ

$$R_n \simeq r - a \cos \varphi_n \simeq r - a(\hat{a}_{\rho_n} \cdot \hat{r}) \quad (4-3)$$

และจากความสัมพันธ์ของระบบพิกัดทรงกลมและระบบพิกัดฉาก

$$\hat{a}_{\rho_n} = \hat{x} \cos \varphi_n + \hat{y} \sin \varphi_n \quad (4-4)$$

$$\hat{r} = \hat{x} \sin \theta \cos \varphi_n + \hat{y} \sin \theta \sin \varphi_n + \hat{z} \cos \theta \quad (4-5)$$

ดังนั้นสมการ (4.3) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_n = r - a \sin \theta (\cos \varphi_n \cos \theta + \sin \varphi_n \sin \theta) \quad (4-6)$$

สุดท้ายค่าของ  $R_n$  ในเทอมของเฟส จะสามารถกำหนดค่าโดยประมาณได้จากสมการข้างต้น และค่าของ  $R_n$  ในเทอมของแอมพลิจูด จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$$\frac{1}{R_n} \simeq \frac{1}{r} \quad \text{ในทุกๆค่าของ } n \text{ ที่เกิดขึ้น} \quad (4-7)$$

หากสมมุติว่าค่าโดยประมาณของสมการ (4-6) และ (4-7) เป็นค่าที่ถูกต้อง จะทำให้สมการของสนามไฟฟ้าไกลที่เกิดขึ้นจากแถวลำดับในสมการที่ (4.1) เขียนได้ใหม่เป็น

$$E(r, \theta, \varphi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N a_n e^{jk a \sin \theta \cos \varphi \cos(\varphi - \varphi_n)} \quad (4-8)$$

ขณะที่  $a_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของแอมพลิจูดละเฟสที่ป้อนให้แก่ละองค์ประกอบ

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{N} n \text{ คือ ตำแหน่งเชิงมุมขององค์ประกอบลำดับที่ } n$$

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดค่าของแอมพลิจูดและเฟสสำหรับป้อนให้แก่ละองค์ประกอบนั้น สามารถแสดงได้ในรูปของสมการ

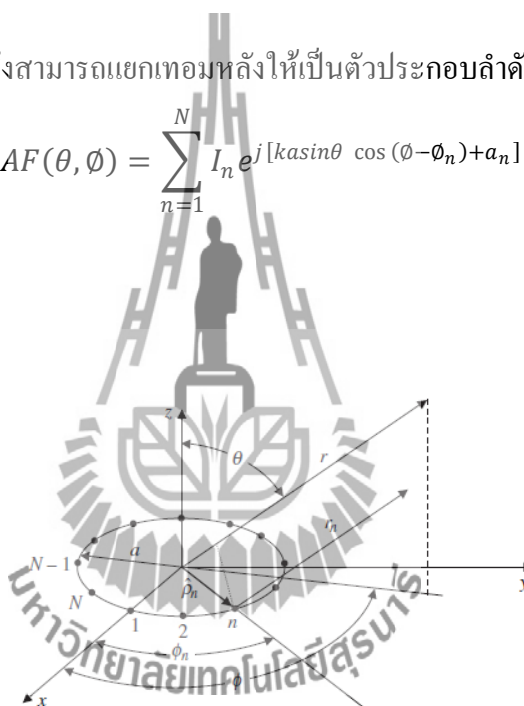
$$a = I_n e^{j a_n} \quad (4-9)$$

โดยที่  $I_n$  เป็นเทอมของแอมพลิจูด และ  $a_n$  เป็นเทอมของเฟสที่ใช้ป้อนให้แก่องค์ประกอบลำดับที่  $n$  ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบของแฉวลำดับที่ถูกเลือกให้มีของเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สมการของสนามไฟฟ้าไกลเท่ากับ

$$E(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N I_n e^{j[kasin\theta \cos(\phi - \phi_n) + a_n]} \quad (4-10)$$

ดังนั้นจากสมการ (4-10) จึงสามารถแยกเทอมหลังให้เป็นตัวประกอบลำดับได้ นั่นคือ

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[kasin\theta \cos(\phi - \phi_n) + a_n]} \quad (4-11)$$



รูปที่ 4-1 สายอากาศแฉวลำดับวงกลม ที่องค์ประกอบลำดับที่  $N$

#### 4.2.1 การก่อรูปลำคลื่น

จากสมการที่ (4-11) เป็นการแสดงตัวประกอบแฉวลำดับวงกลมที่มีจำนวนขององค์ประกอบเท่ากับ  $N$  วางเรียงกันเป็นรูปวงกลมด้วยระยะห่างที่เท่ากัน โดยค่าสูงสุดของตัวประกอบแฉวลำดับจะปรากฏขึ้นเมื่อเทอมของเฟสทุกๆเทอมในสมการที่ (4-11) มีค่าเท่ากับหนึ่งหรือเท่ากับ

$$kasin\theta \cos(\phi - \phi_n) + a_n = 2m\pi \text{ โดยเมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ที่ทุกๆค่าของ } n \quad (4-12)$$



ค่าสูงสุดของพหุนามใหญ่ที่  $m = 0$  จะถูกกำหนดโดยทิศทางของมุม  $\theta_n$  และ  $\phi_n$  โดยที่

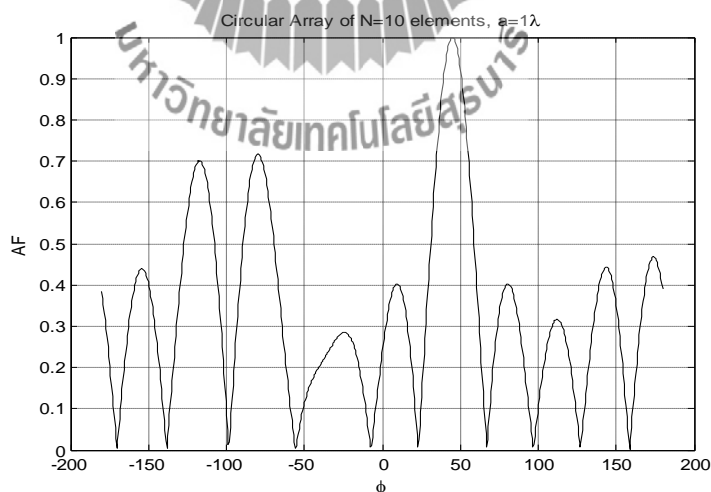
$$\alpha_n = -k a \sin \theta \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad \text{โดยที่ } n = 1, 2, \dots, N \quad (4-13)$$

ถ้าต้องการกำหนดให้แถวลำดับวงกลมมีการแผ่กำลังสูงสุดในทิศทาง  $\theta_0$  และ  $\phi_0$  ดังนั้นเฟสของแหล่งกำเนิดที่ป้อนให้กับทุกองค์ประกอบจะต้องถูกแทนลงไปในสมการ (4-13) ให้ครบถ้วน นั่นคือตัวประกอบแถวลำดับจะเท่ากับ

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{-jka [\sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]} \quad (4-14)$$

โดยที่  $AF$  คือตัวประกอบแถวลำดับ  $I_n$  คือแอมพลิจูดคือ ค่าคงที่ และ  $a$  คือ รัศมีของวง

เมื่อตัวอังกประกอบ  $N$  เป็นตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด 10 องค์ประกอบ ซึ่งกำหนดให้  $a = 1\lambda$  ความถี่ที่ใช้คือ 2.4 GHz มาพล็อตเป็นแบบรูปการแผ่กำลัง ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 แบบรูปตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 10, a = 1\lambda$

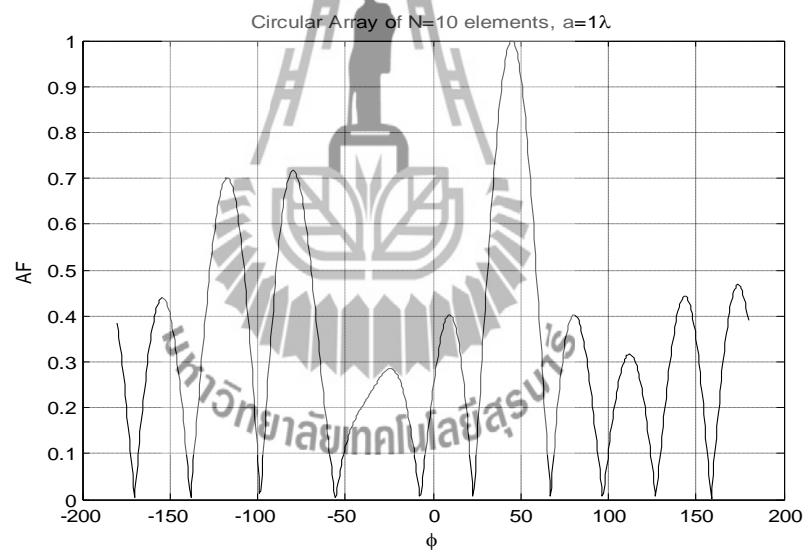
เมื่อ  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ$   $\phi_0 = 45^\circ$  ที่ความถี่ 2.4 GHz

### 4.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการก่อรูปลำคลื่น

ในการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลมนั้น จะมีปัจจัยที่ทำให้ผลของการก่อรูปลำคลื่นออกมาในรูปแบบต่างๆเช่น ขนาดของลำคลื่นกว้าง หรือแคบมากๆ เป็นต้น พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขึ้นรูปลำคลื่นสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ รัศมีของวงและจำนวนสายอากาศ

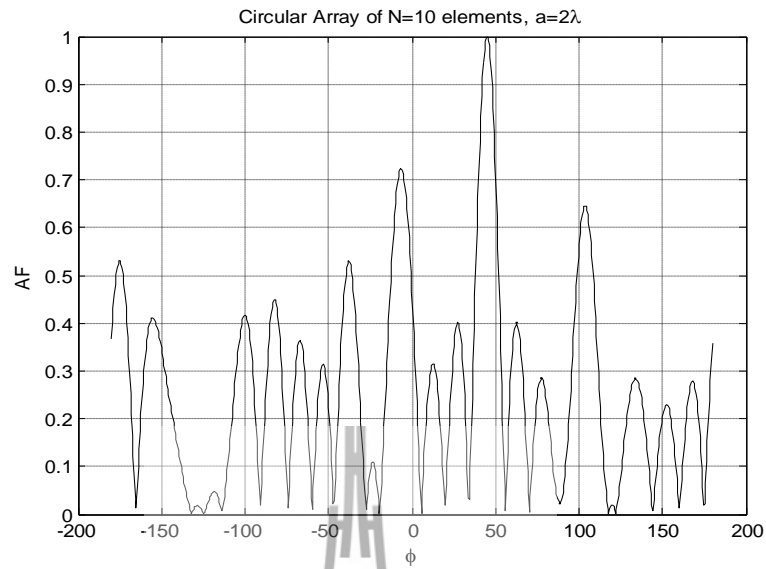
#### 4.3.1 รัศมีของวง

เมื่อพิจารณารัศมี  $a$  จากรูปที่ 4-1 ของแถวลำดับแบบวงกลมจะพบว่ายิ่งมีรัศมีมากขึ้น ลักษณะของการก่อรูปลำคลื่นจะมีรูปแบบที่แคบลง เมื่อใช้จำนวนองค์ประกอบ  $N$  ที่เท่ากัน คาบที่เท่ากัน ดังที่แสดงในรูปที่ 4-3 ที่ใช้  $a = 1\lambda$  รูปที่ 4.4 ที่ใช้  $a = 2\lambda$  โดยทั้งสามรูปนี้ จะใช้  $\theta_0 = 45^\circ$   $\phi_0 = 0^\circ$  ที่ความถี่ 2.4 GHz



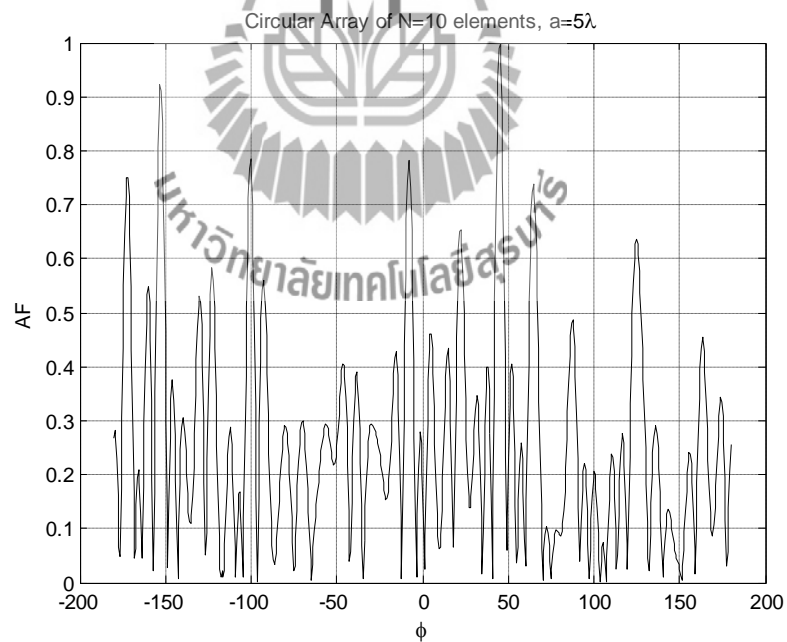
รูปที่ 4-3 แบบรูปตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 10, a = 1\lambda$

$$\text{เมื่อ } \theta_0 = \frac{\pi}{2} \text{ } \phi_0 = 45^\circ \text{ ที่ } 4 \text{ GHz}$$



รูปที่ 4-4 แบบรูปตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 10, a = 2\lambda$

เมื่อ  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ$   $\phi_0 = 45^\circ$  ที่ความถี่ 2.4 GHz



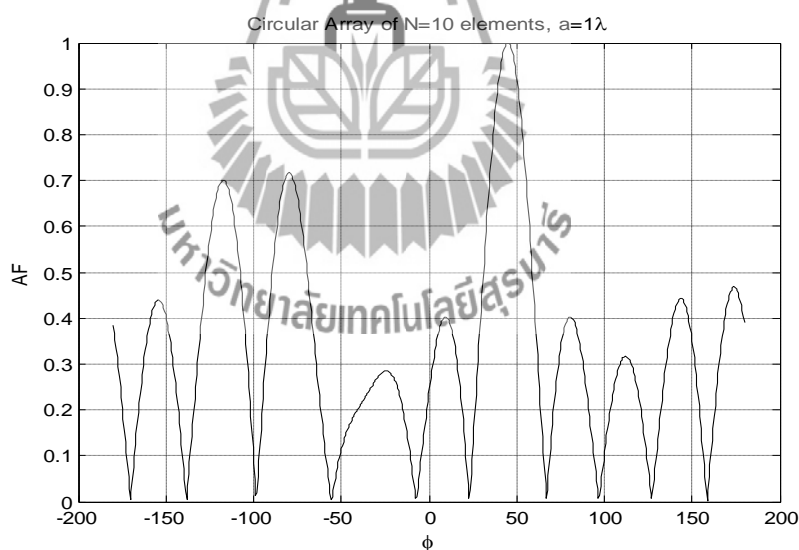
รูปที่ 4-5 แบบรูปตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 10, a = 5\lambda$

เมื่อ  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ$   $\phi_0 = 45^\circ$  ที่ความถี่ 2.4 GHz

จาก รูปที่ 4-3 รูปที่ 4-4 และรูปที่ 4-5 จะเห็นได้ว่าลักษณะของลำคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามรัศมี เมื่อรัศมีของวงมีค่ามากขึ้นลำคลื่นก็จะแคบลงหรือเล็กลงนั่นเอง

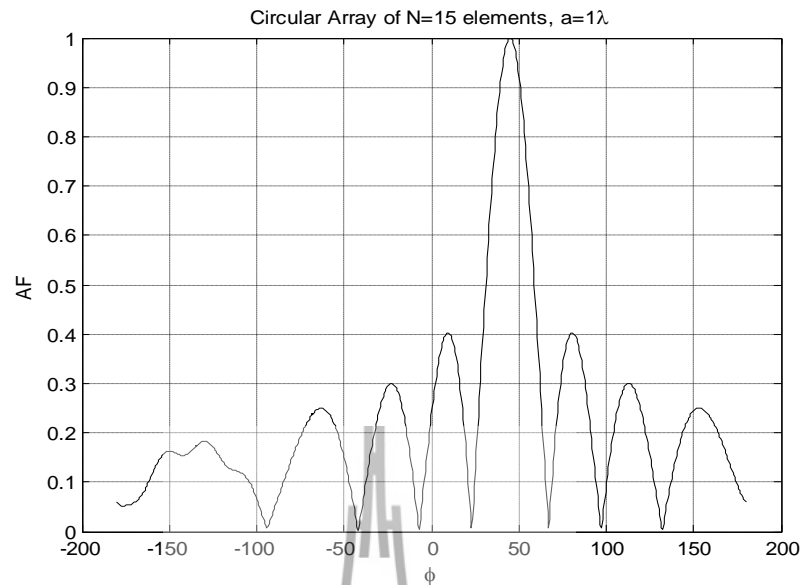
#### 4.3.2 จำนวนสายอากาศ

เมื่อพิจารณาที่องค์ประกอบ  $N$  หรือจำนวนสายอากาศที่ใช้ในแถวลำดับวงกลมจะพบว่าเมื่อจำนวนสายอากาศเพิ่มขึ้น ขนาดพูข้าง (side lobe) และพูคลื่นเล็ก (minor lobe) มีขนาดเล็กลงทำให้การกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปในทิศทางที่กำลังมีมากขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4-6 รูปที่ 4-7 รูปที่ 4-8 และรูปที่ 4-9 และจะเห็นได้ว่าเมื่อ จำนวนสายอากาศเพิ่มไปถึง 20 และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ลักษณะของพูข้างและพูคลื่นเล็กจะมีลักษณะเหมือนเดิม ซึ่งหมายความว่าเมื่อจำนวนสายอากาศมากขึ้นจะทำให้ พูข้างและพูคลื่นเล็กลดลงนั่นเอง



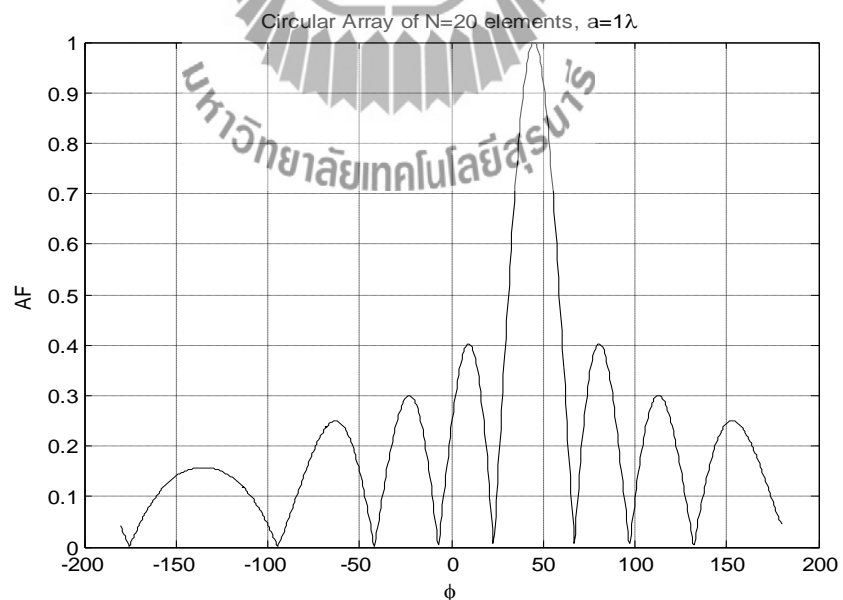
รูปที่ 4-6 แบบรูปตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 10, a = 1\lambda$

$$\text{เมื่อ } \theta_0 = \frac{\pi}{2} \circ \phi_0 = 45^\circ \text{ ที่ความถี่ } 2.4 \text{ GHz}$$



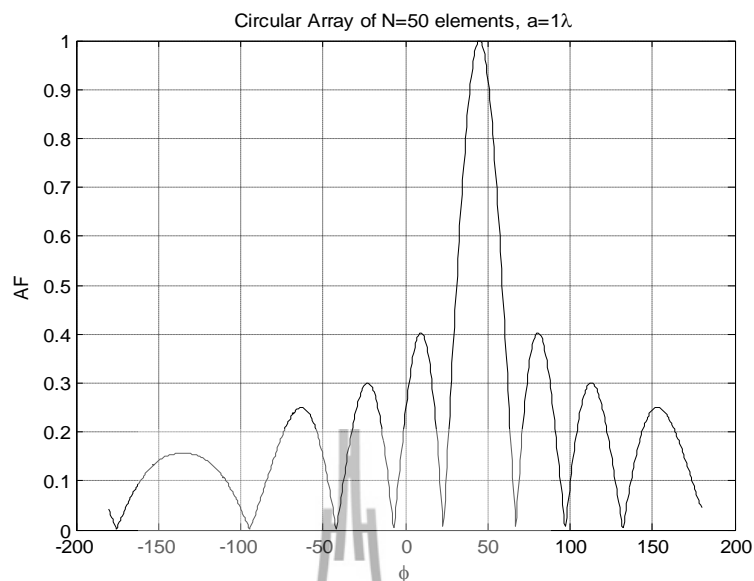
รูปที่ 4-7 แบบรูปตัวประกอบแอมพลิจูดของแอมพลิจูดวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 15, a = 1\lambda$

เมื่อ  $\theta_0 = 45^\circ, \phi_0 = 0^\circ$  ที่ความถี่ 2.4 GHz



รูปที่ 4-8 แบบรูปตัวประกอบแอมพลิจูดของแอมพลิจูดวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 20, a = 1\lambda$

เมื่อ  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}^\circ, \phi_0 = 45^\circ$  ที่ความถี่ 2.4 GHz



รูปที่ 4-9 แบบรูปตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับวงกลมสม่ำเสมอขนาด  $N = 50, a = 1\lambda$

$$\text{เมื่อ } \theta_0 = \frac{\pi}{2} \text{ } \phi_0 = 45^\circ \text{ ที่ความถี่ } 2.4 \text{ GHz}$$

#### 4.4 กล่าวสรุป

การก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับวงกลมนี้จะขึ้นอยู่กับว่าต้องการได้ลำคลื่นแบบไหนถ้าต้องการลำคลื่นที่มีลักษณะแคบเรียว จะทำให้สัญญาณส่งได้ไกลขึ้น จะต้องใช้รัศมีของวงที่กว้าง หรือถ้าต้องการลำคลื่นที่กว้างและมีพื้นที่ครอบคลุมมาก ก็ต้องใช้รัศมีของวงที่แคบลง และในทางเดียวกันถ้าต้องการลดพู่ข้างและพู่คลื่นเล็กเพื่อให้ใช้พลังงานในการส่งได้เต็มที่ก็ต้องใช้จำนวนสายอากาศมากขึ้นนั่นเอง

สายอากาศแถวลำดับวงกลมมีความจำเป็นและพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่ง ที่จะทำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย (distributed beamforming) ต่อไป

## บทที่ 5

### ผลการจำลองแบบ

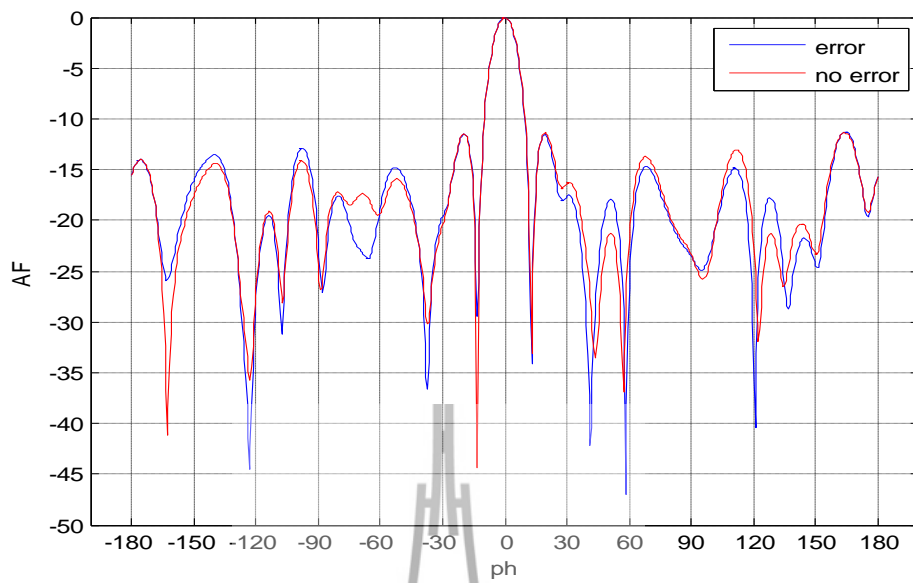
#### 5.1 กล่าวนำ

ผลการทดลองนี้จะเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการระบุตำแหน่งผิดพลาดซึ่งการระบุตำแหน่งของสายอากาศแต่ละต้นจะมีพารามิเตอร์ที่ระบุตำแหน่งคือรัศมีและเฟส ( $r, \Psi$ ) โดยจะเริ่มทดลองในเรื่องความผิดพลาดของรัศมี ความผิดพลาดของเฟส และความผิดพลาดทั้งรัศมีและเฟส

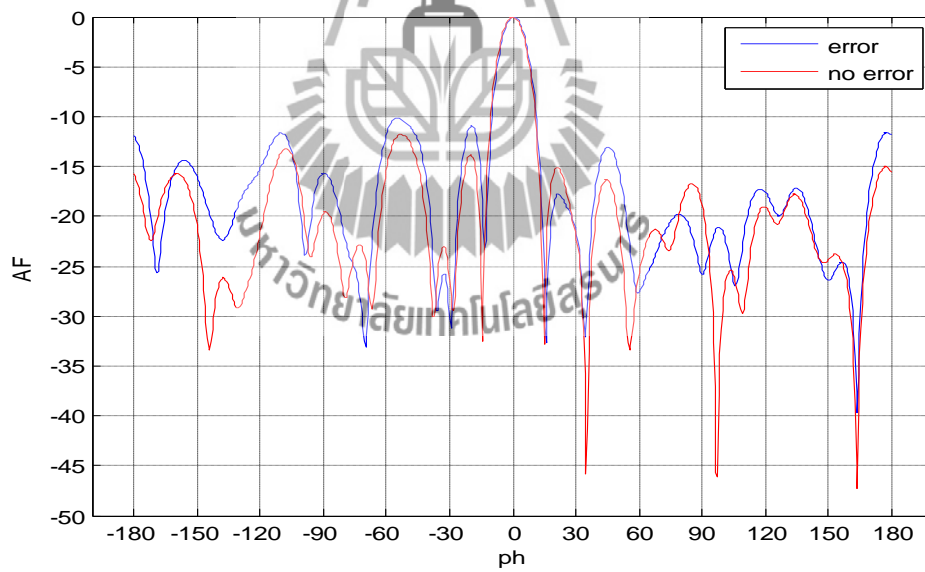
จากการศึกษาถึงความผิดพลาดของระบบระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก จะพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน และเมื่อนำค่าที่ได้มารวมจะได้ค่าความผิดพลาดของการระบุตำแหน่ง ประมาณ  $83.2 \lambda$  หรือ ประมาณ 10.4 เมตร จะเห็นได้ว่า ค่าความผิดพลาดเป็นค่าที่สูงมาก ซึ่งในความเป็นจริงนั้น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง (ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมีการกำหนดขอบเขตการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่  $0.1 \lambda$  ถึง  $1.0 \lambda$  เพื่อให้เห็นผลของความผิดพลาดที่ชัดเจน และง่ายต่อการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น เพราะถ้าความผิดพลาดมีมากเกินไป จะทำให้เห็นผลของความผิดพลาดที่ไม่ชัดเจน

#### 5.2 ความผิดพลาดของรัศมี

ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าในความผิดพลาดของรัศมีตั้งแต่  $0.1 \lambda$  ถึง  $1.0 \lambda$  และกำหนดให้ค่าความผิดพลาดของเฟสไม่มีความผิดพลาด โดยใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้ คือให้จำนวนสายอากาศทั้งหมด 64 ต้น ความถี่ที่ใช้คือ 2.4 GHz ทิศทางในการก่อลำคลื่นในทิศ 0 องศา

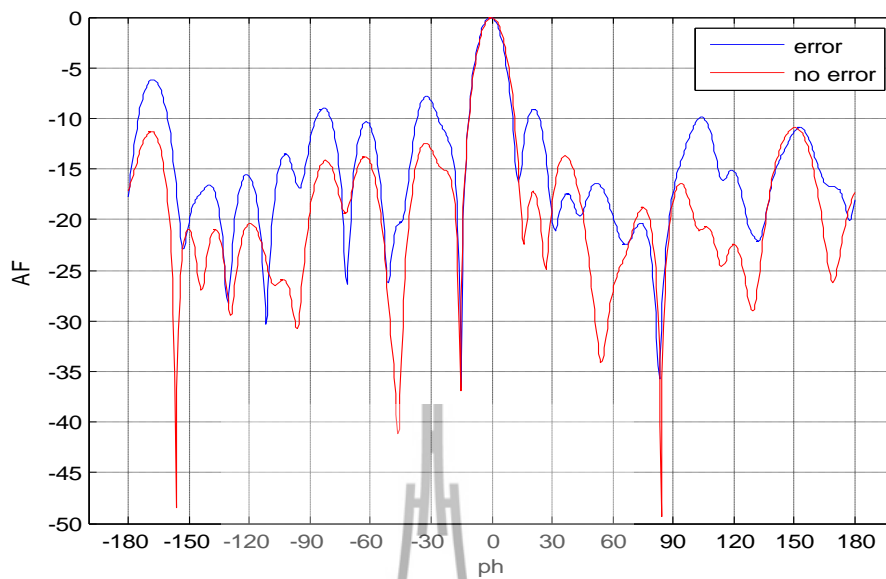


รูปที่ 5-1 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุน้ศมีผิดพลาดที่  $0.1\lambda$

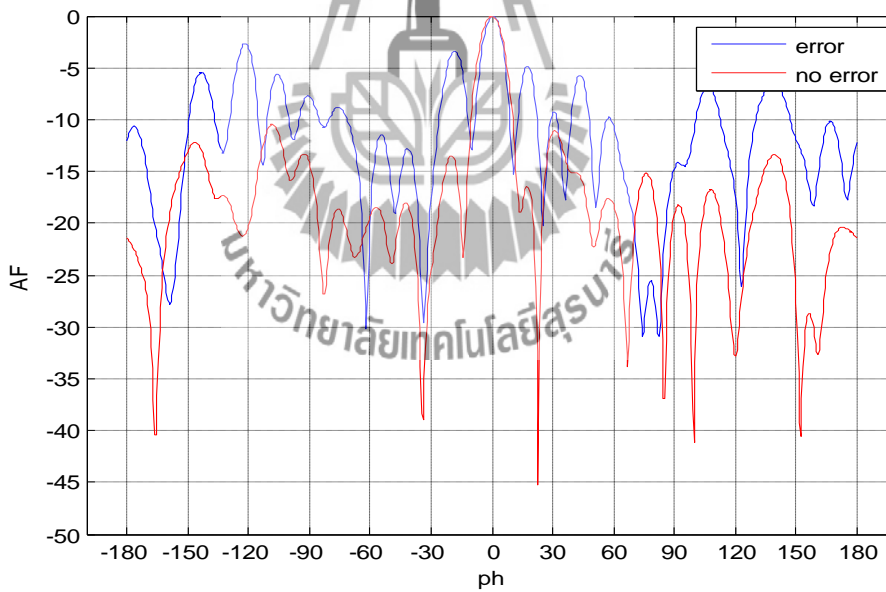


รูปที่ 5-2 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุน้ศมีผิดพลาดที่  $0.2\lambda$

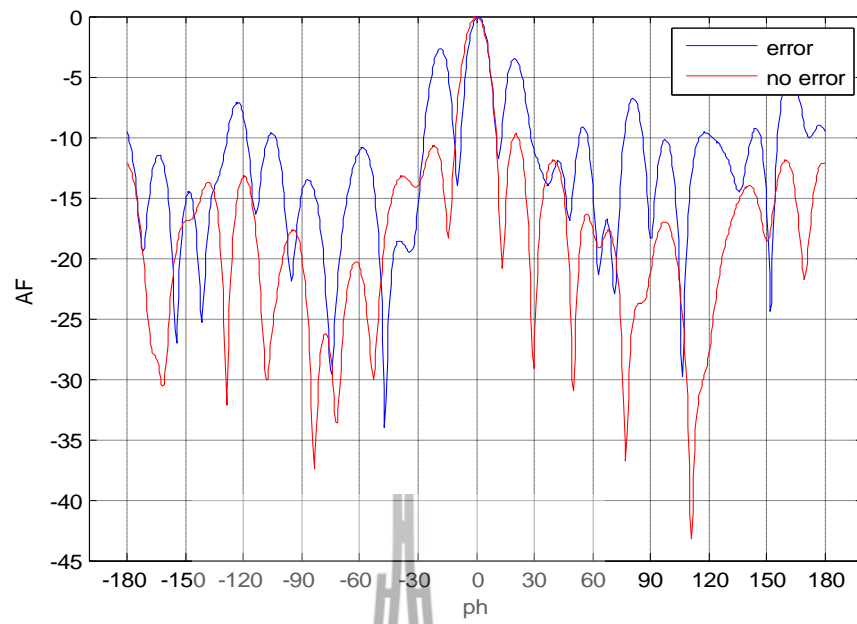




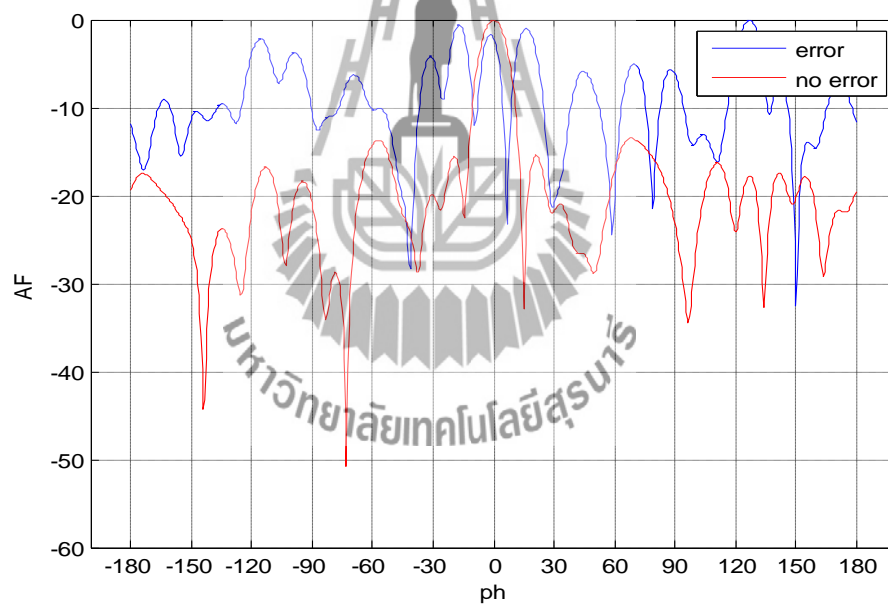
รูปที่ 5-3 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรัศมีผิดพลาดที่  $0.3\lambda$



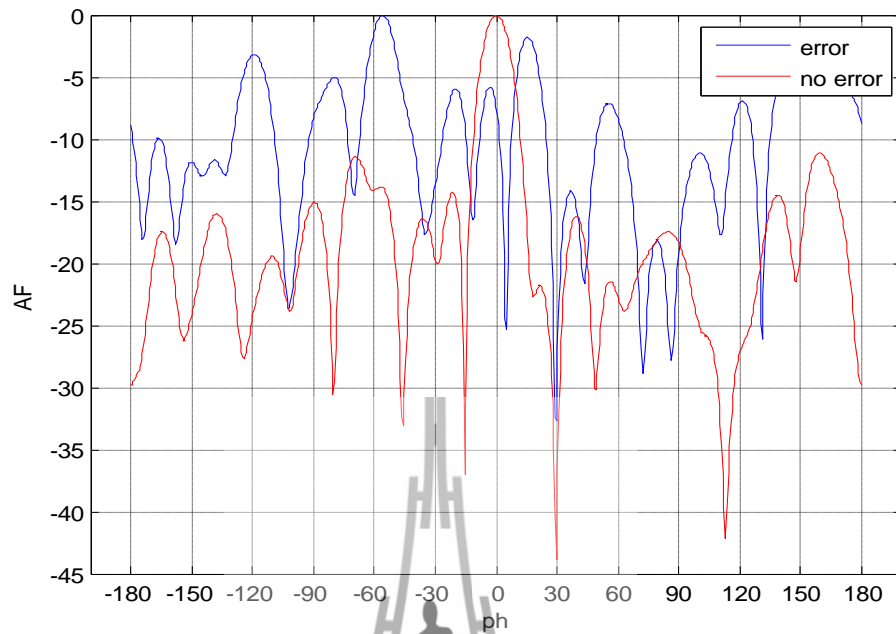
รูปที่ 5-4 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรัศมีผิดพลาดที่  $0.4\lambda$



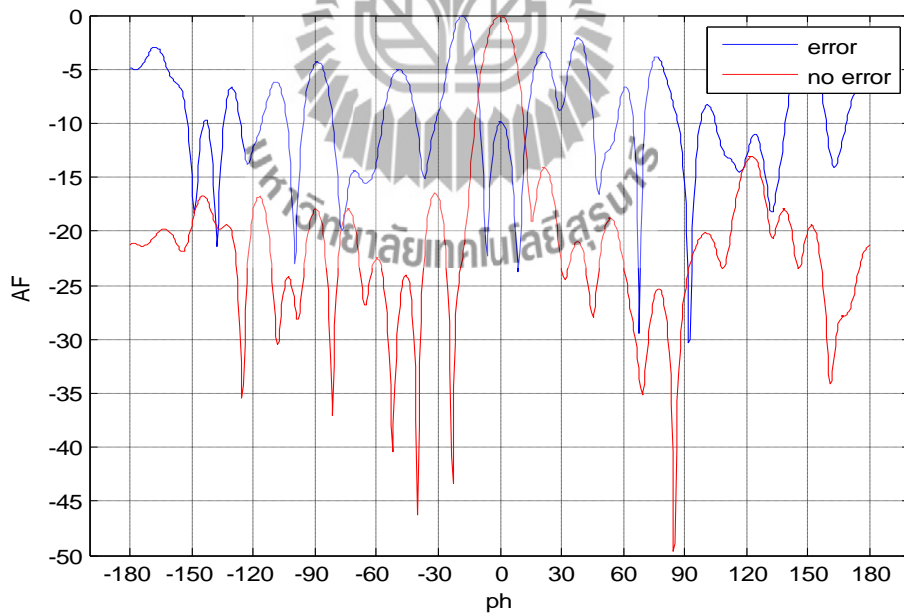
รูปที่ 5-5 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่  $0.5\lambda$



รูปที่ 5-6 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมีผิดพลาดที่  $0.6\lambda$

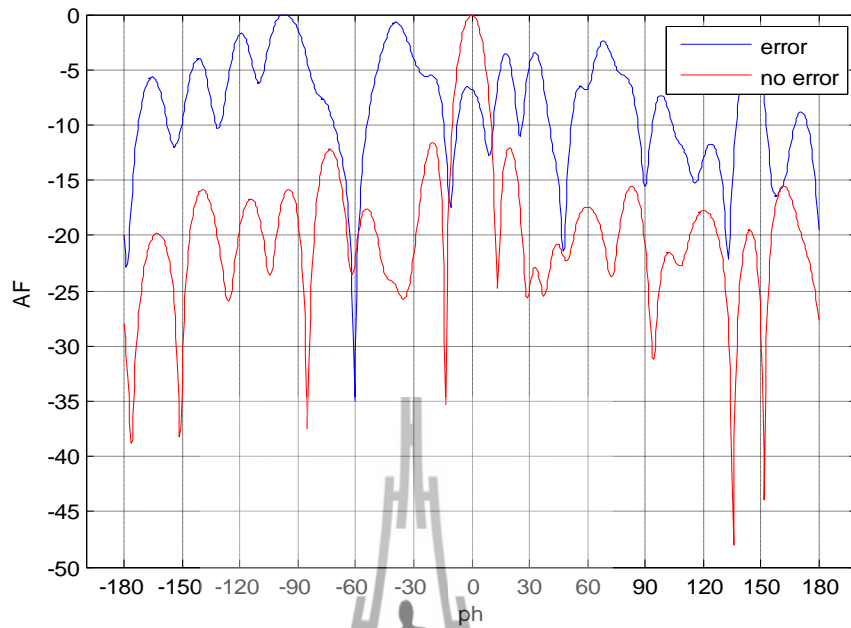


รูปที่ 5-7 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุงมีผิดพลาดที่  $0.7\lambda$

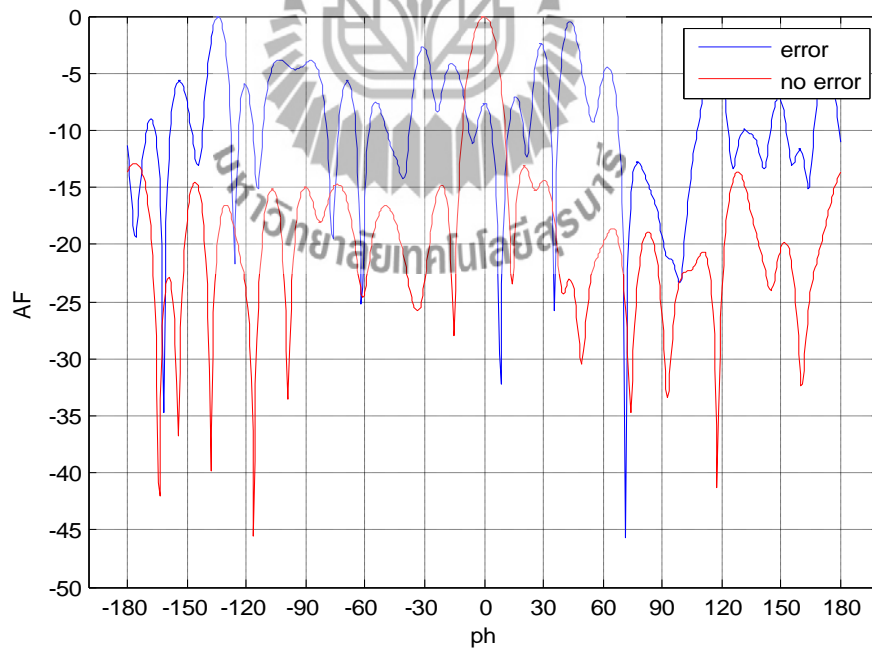


ที่ 5-8 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุงมีผิดพลาดที่  $0.8\lambda$

รูป



รูปที่ 5-9 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุงค์มีผิดพลาดที่  $0.9\lambda$

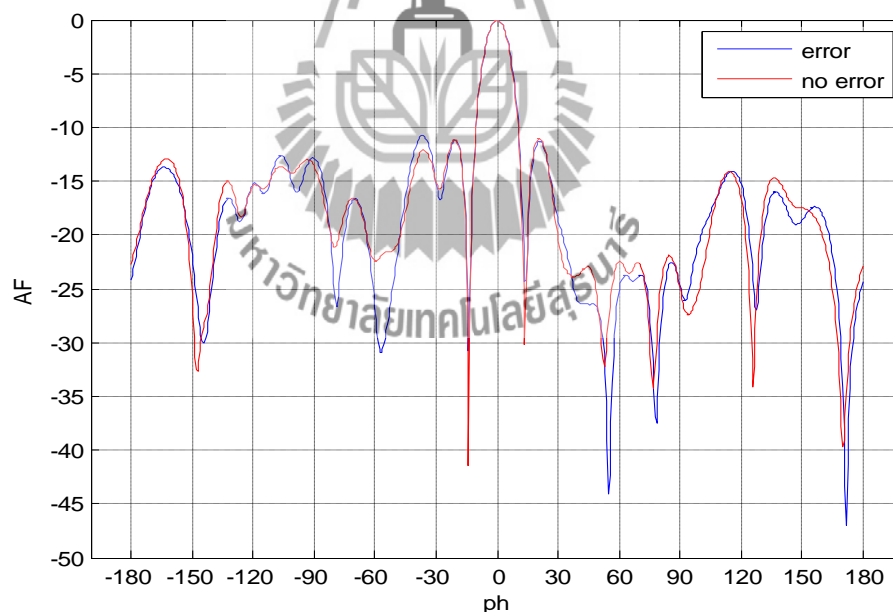


รูปที่ 5-10 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุงค์มีผิดพลาดที่  $1.0\lambda$

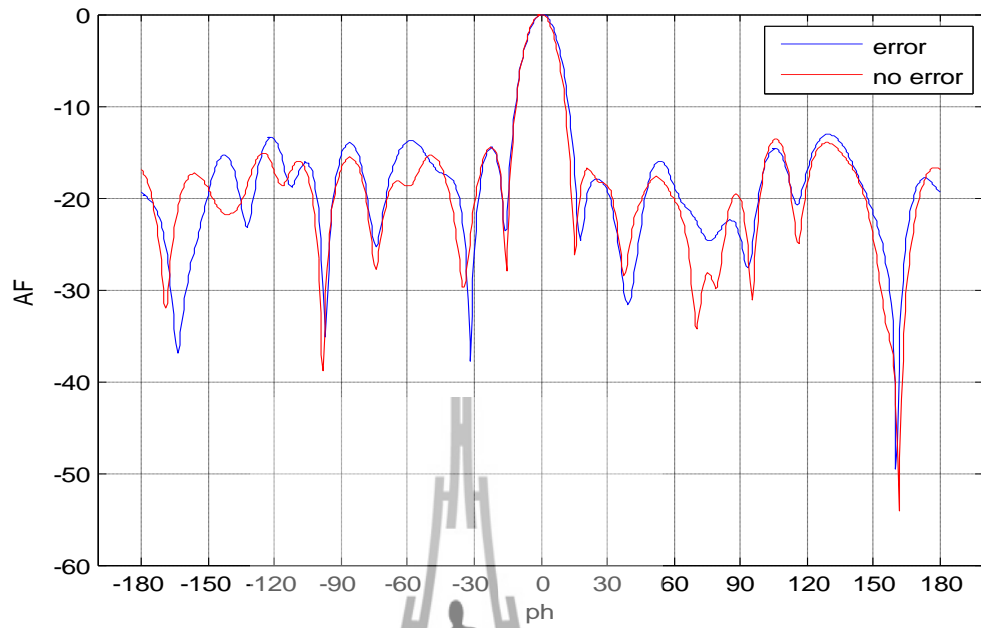
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากราฟจะใช้การระบุตำแหน่งผิดพลาดเริ่มตั้งแต่  $0.1\lambda$  ถึง  $1.0\lambda$  โดยที่รูปที่ 5-1 ถึง รูปที่ 5-5 เป็นการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่  $0.1\lambda$  ถึง  $0.5\lambda$  ค่าความผิดพลาดของกราฟในการก่อรูปลำคลื่น จะมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยซึ่งยังไม่ส่งผลต่อการก่อรูปลำคลื่นมากนัก แต่เมื่อเพิ่มค่าความผิดพลาดตามรูปที่ 5-6 ถึง รูปที่ 5-10 ที่มีการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่  $0.6\lambda$  ถึง  $1.0\lambda$  ตามลำดับกราฟที่ได้จะมีความผิดพลาดในการก่อรูปลำคลื่นมากขึ้น จะเห็นได้ว่าขนาดของพู่ข่างจะเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของลำคลื่นในทิศทางที่เรากำลังจะเล็งลง

### 5.3 ความผิดพลาดของเฟส

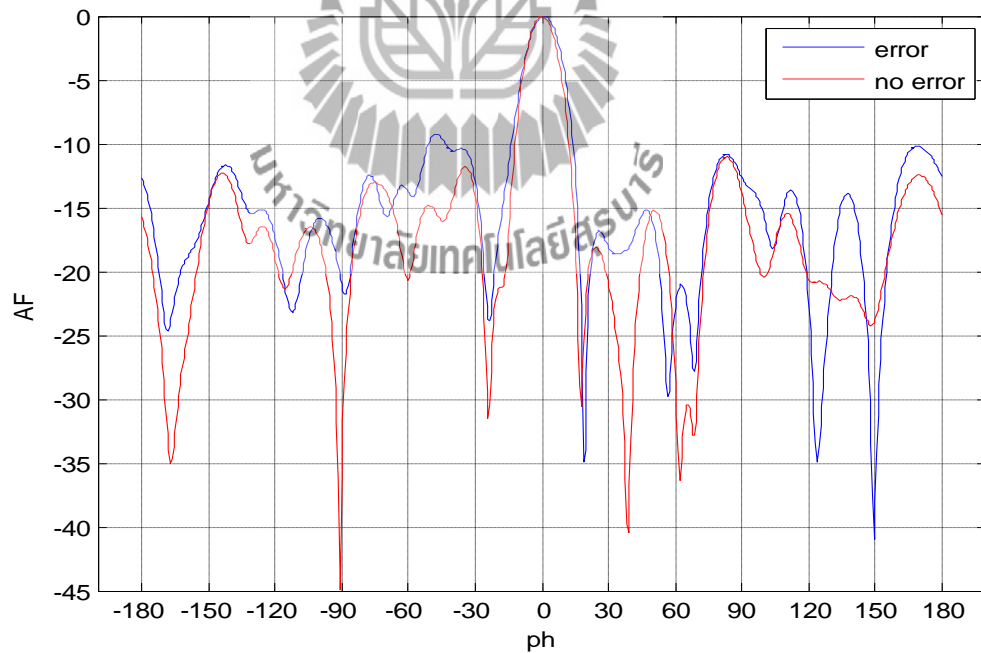
ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าในความผิดพลาดของเฟสตั้งแต่  $0.1\text{rad}$  ถึง  $1.0\text{ rad}$  และกำหนดให้ค่าความผิดพลาดของเฟสไม่มีความผิดพลาด โดยใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้ คือให้จำนวนสายอากาศทั้งหมด 64 ต้น ความถี่ที่ใช้คือ  $2.4\text{ GHz}$  ทิศทางในการก่อลำคลื่นในทิศ  $0$  องศา



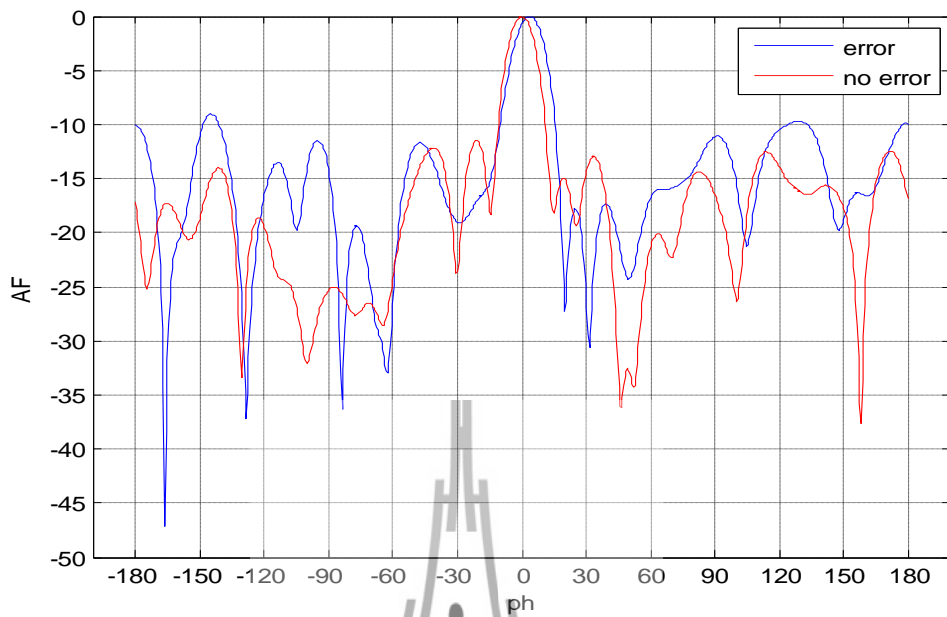
รูปที่ 5-11 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่  $0.1\text{rad}$



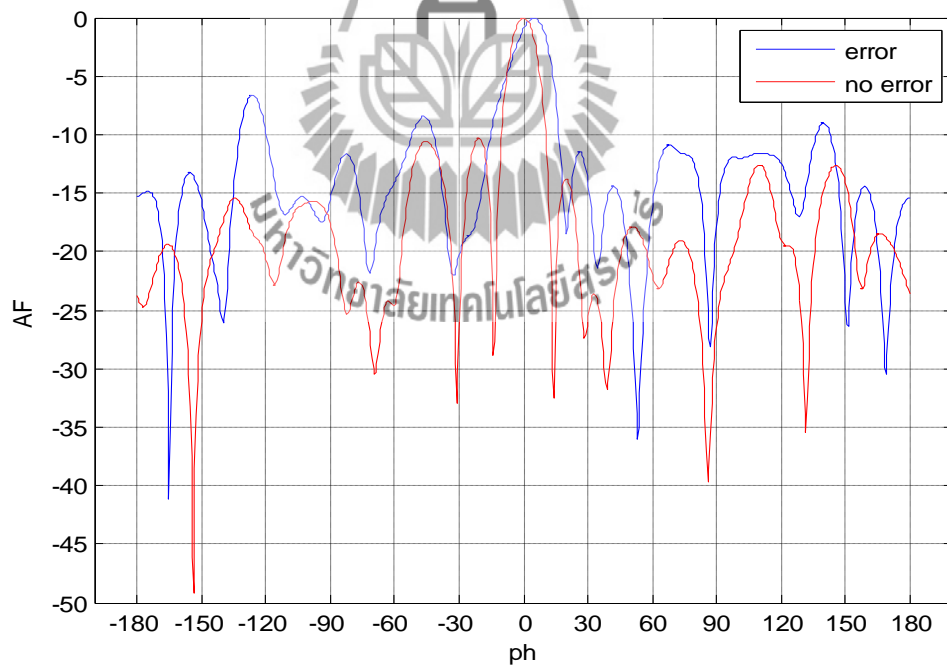
รูปที่ 5-12 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.2rad



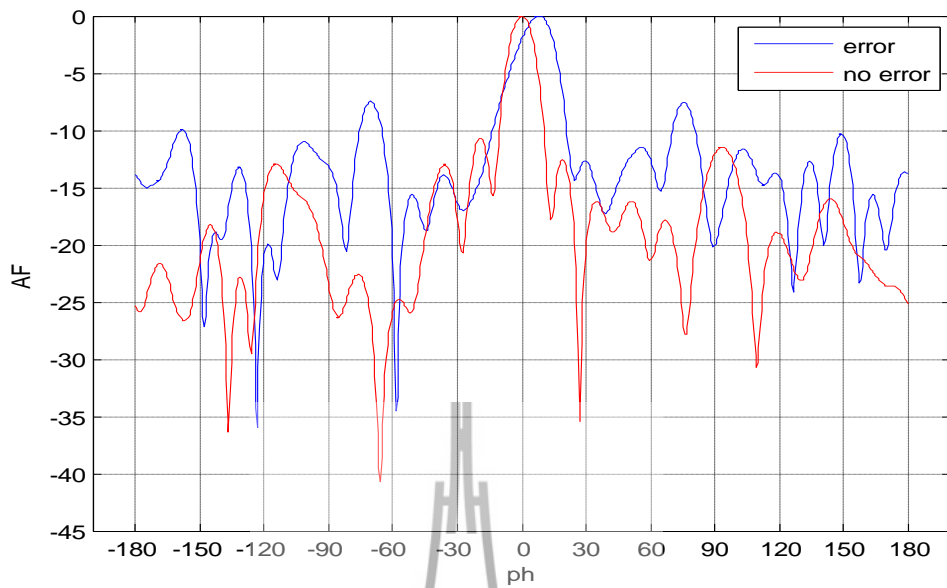
รูปที่ 5-13 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.3rad



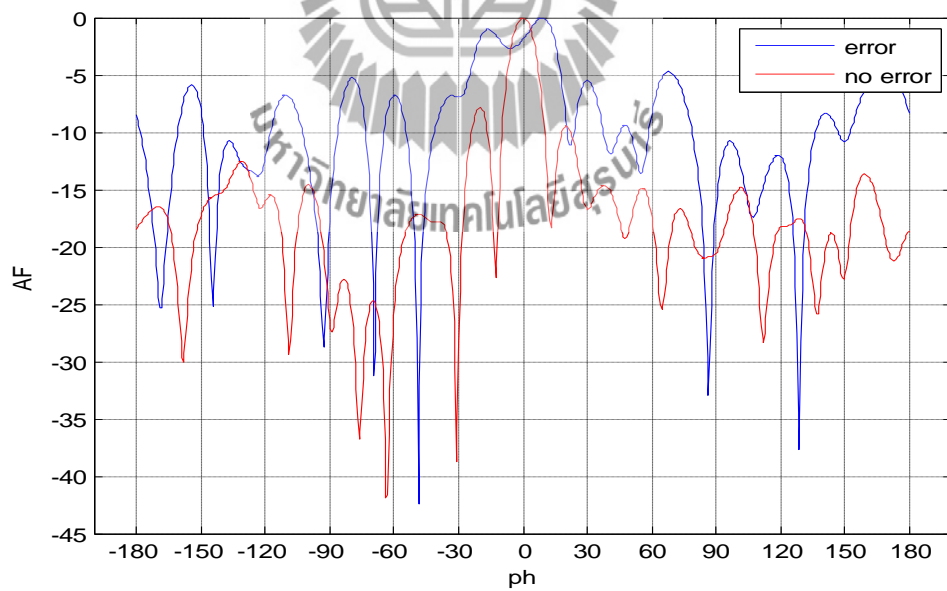
รูปที่ 5-14 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.4rad



รูปที่ 5-15 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.5rad

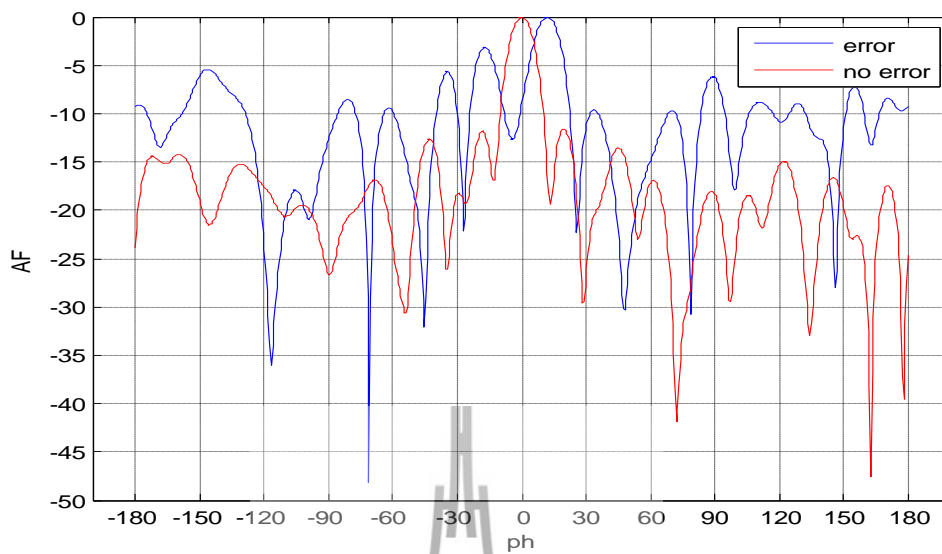


รูปที่ 5-16 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.6rad

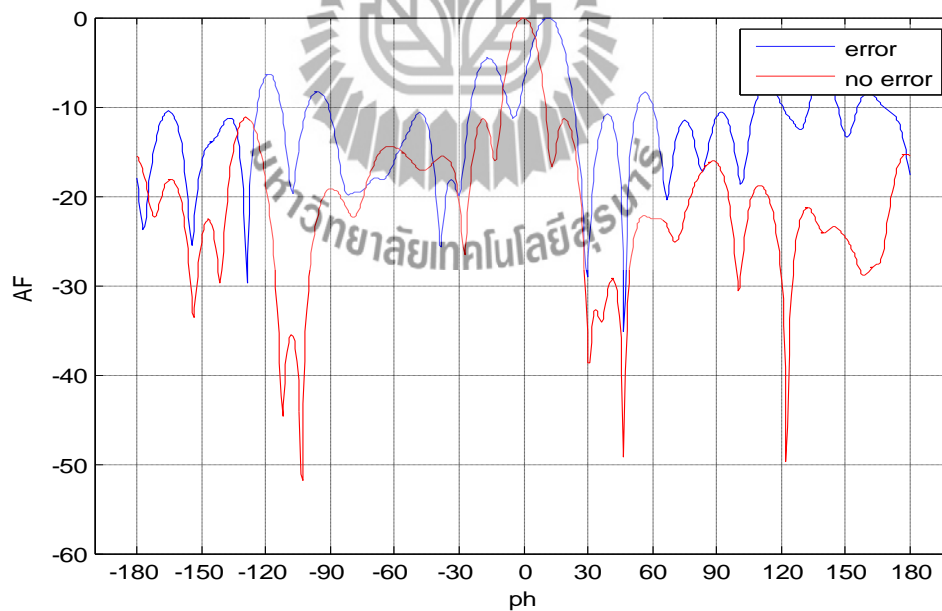


รูปที่ 5-17 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.7rad

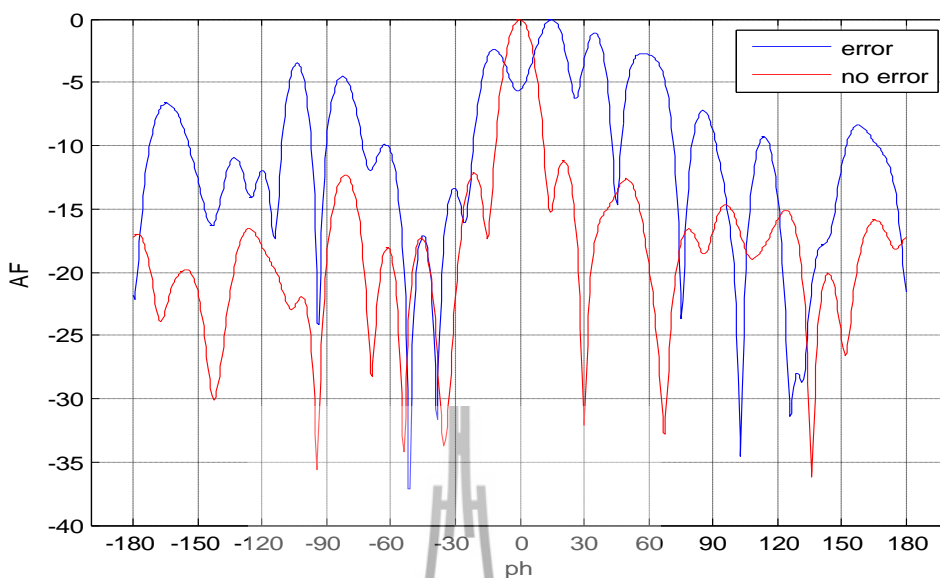




รูปที่ 5-18 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.8rad



รูปที่ 5-19 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 0.9rad

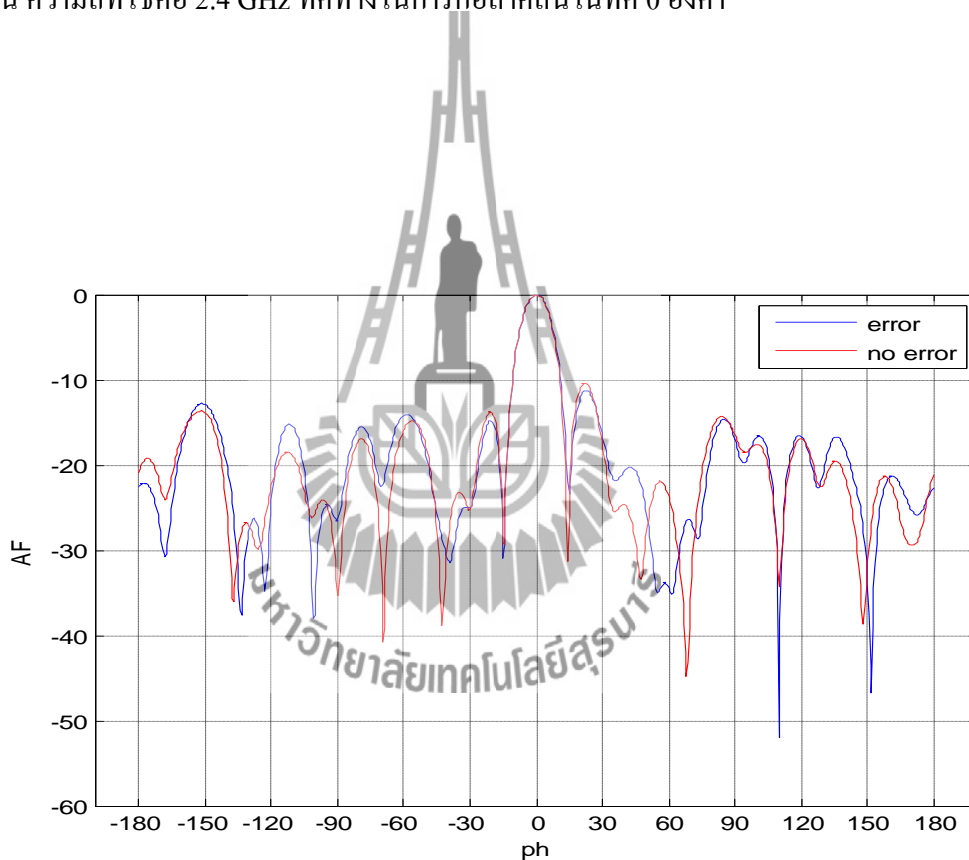


รูปที่ 5-20 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุเฟสผิดพลาดที่ 1.0rad

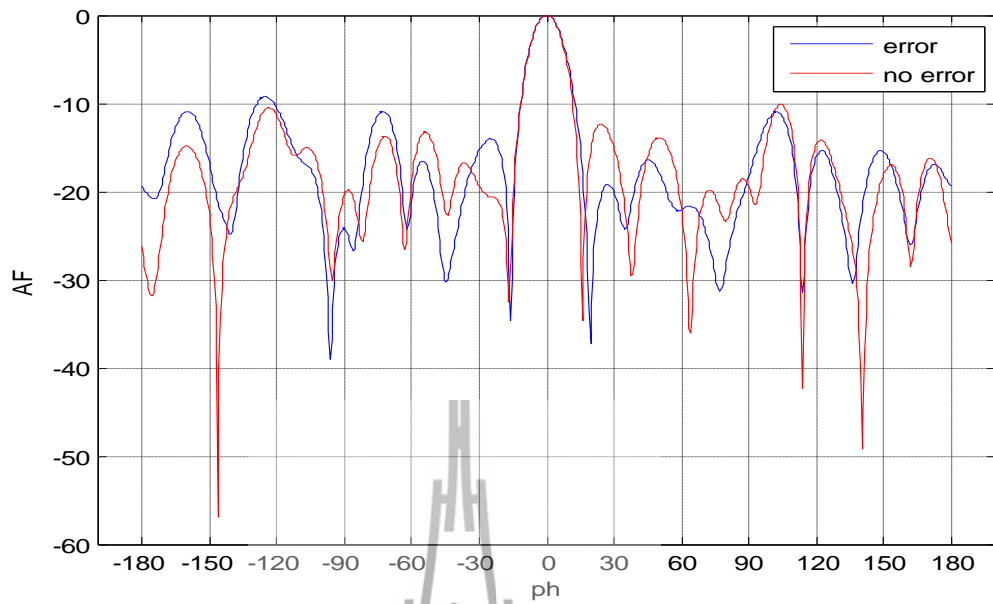
จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าการระบุเฟสผิดพลาดทำให้การก่อรูปลำคลื่นมีทิศทางที่ผิดพลาดไปด้วย โดยที่รูปที่ 5-11 รูปที่ 5-12 และรูปที่ 5-13 เป็นการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่ 0.1rad 0.2rad และ 0.3rad ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าความผิดพลาดของกราฟในการก่อรูปลำคลื่น จะมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยซึ่งยังไม่ส่งผลต่อการก่อรูปลำคลื่นมากนัก และเมื่อเพิ่มค่าความผิดพลาดตามรูปที่ 5-14 ถึง รูปที่ 5-20 ซึ่งเป็นการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่ 0.4 rad ถึง 1.0 rad จะพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นลำคลื่นมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นค่าความผิดพลาดที่ผิดพลาดนั้นจะเป็นลบหรือบวก ถ้าเป็นลบ ลำคลื่นก็เบี่ยงเบนไปด้านซ้าย และถ้าเป็นบวกลำคลื่นก็จะเบี่ยงเบนไปด้านขวานั้นเอง

#### 5.4 ความผิดพลาดของรัศมีและเฟส

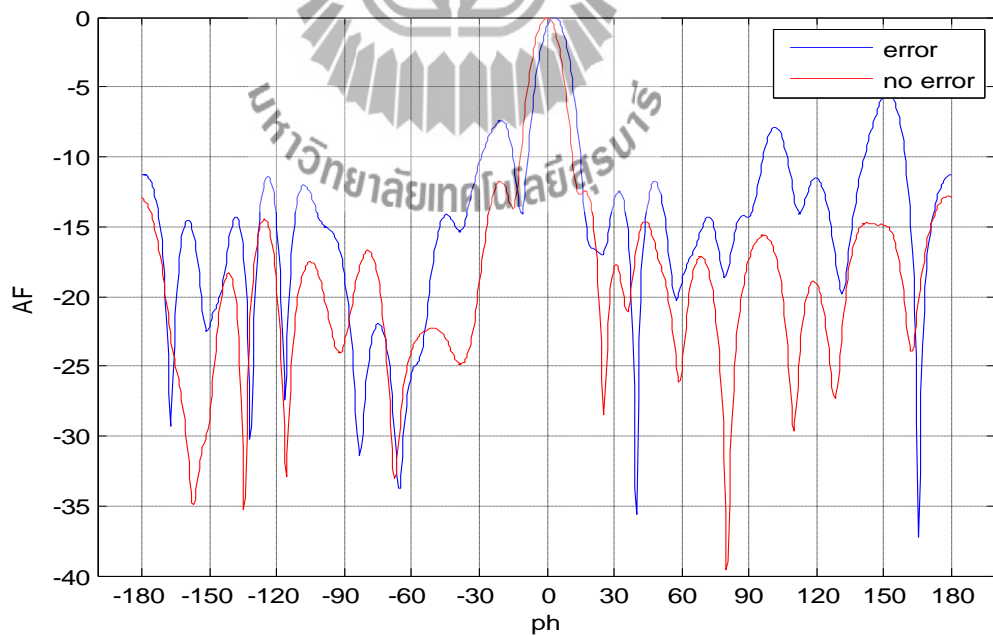
จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นเพียงการทดสอบที่ละเอียดเพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากพารามิเตอร์ทั้งสองตัว แต่ในหัวข้อนี้จะเป็นการรวมทั้งสองหัวข้อที่ผ่านมาไว้ในผลการทดลองเดียวกันเพื่อให้เห็นกราฟที่ชัดเจนมากขึ้น โดยจะเริ่มให้การระบุตำแหน่งผิดพลาดทั้งรัศมีเริ่มที่ 0.1  $\lambda$  และเพิ่มไปเรื่อยๆจนถึง 1.0  $\lambda$  และเฟส เริ่มที่ 0.1 rad และเพิ่มไปเรื่อยๆจนถึง 1.0 rad (รูปที่ 5-21 ถึง รูปที่ 5-30) โดยใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้ คือให้ จำนวนสายอากาศทั้งหมด 64 ต้น ความถี่ที่ใช้คือ 2.4 GHz ทิศทางในการก่อลำคลื่น ในทิศ 0 องศา



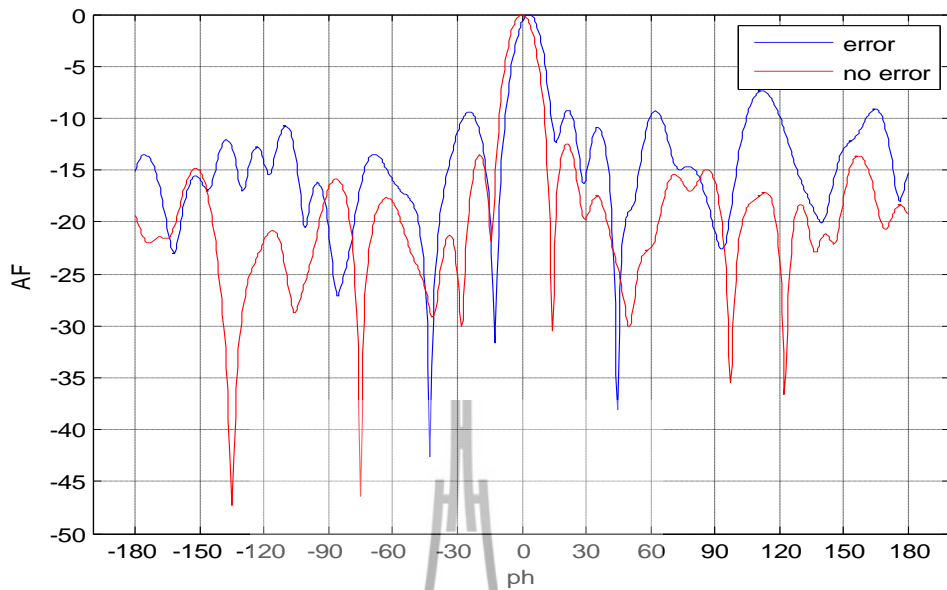
รูปที่ 5-21 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุรัศมี 0.1  $\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่ 0.1 rad



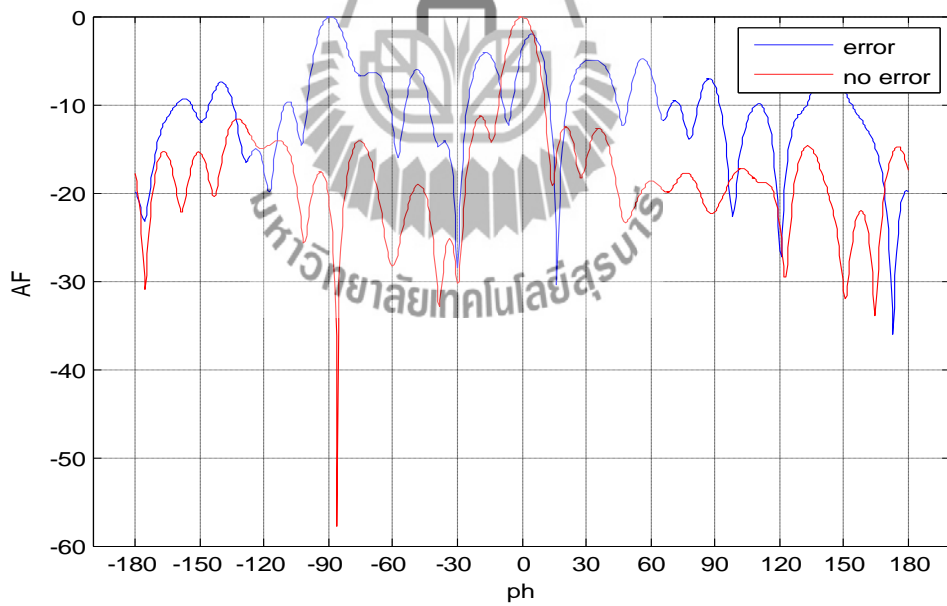
รูปที่ 5-22 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุรัศมี  $0.2\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.2 \text{ rad}$



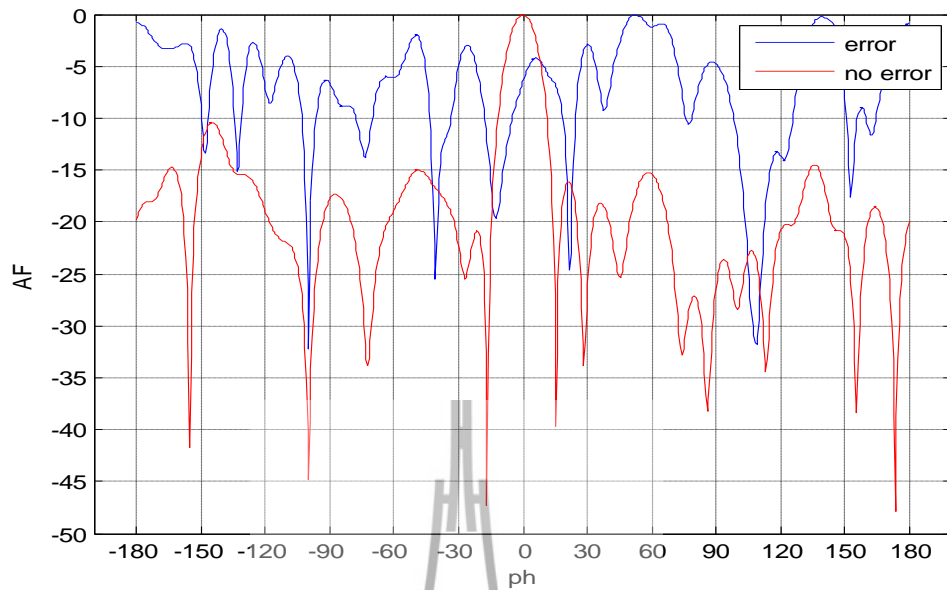
รูปที่ 5-23 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุรัศมี  $0.3\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.3 \text{ rad}$



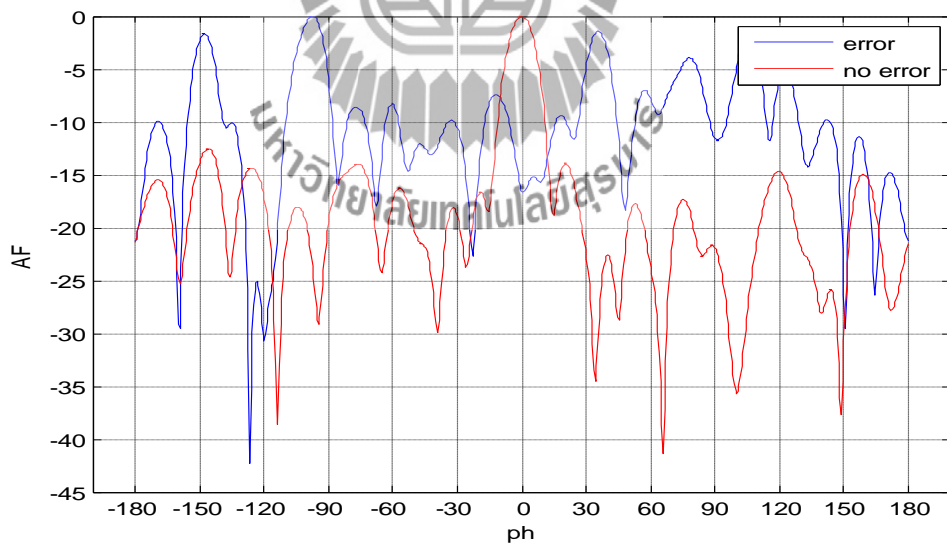
รูปที่ 5-24 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุรัศมี  $0.4\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.4 \text{ rad}$



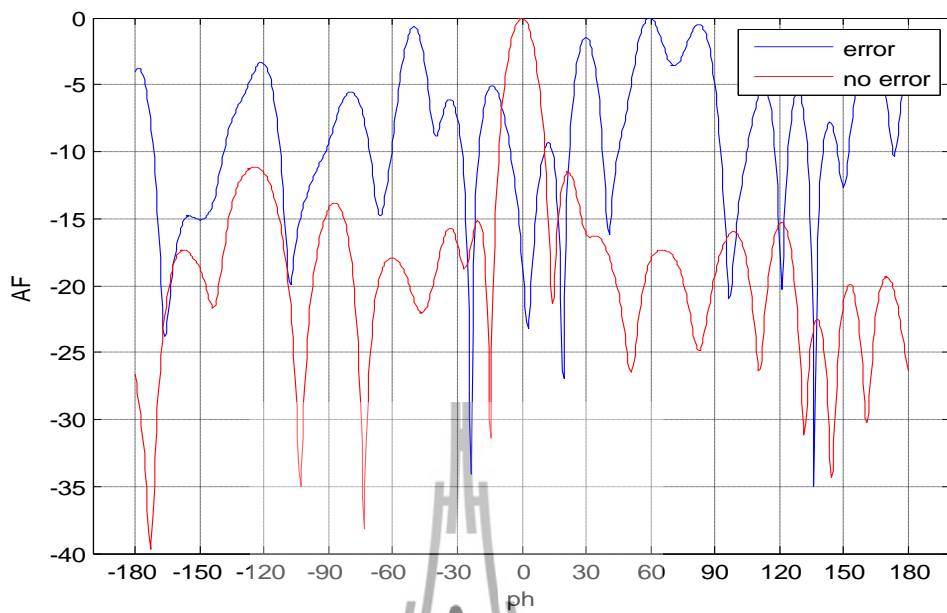
รูปที่ 5-25 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุรัศมี  $0.5\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.5 \text{ rad}$



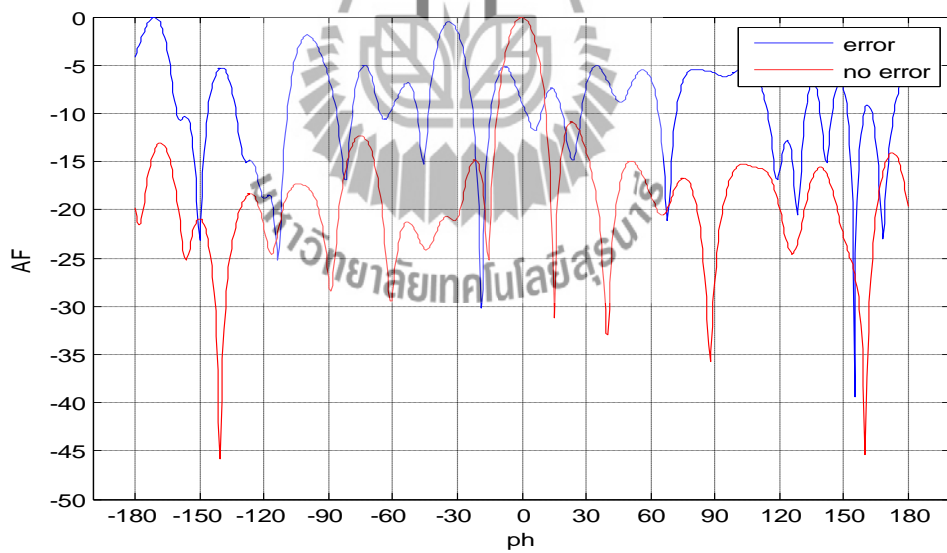
รูปที่ 5-26 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุที่มี  $0.6\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.6 \text{ rad}$



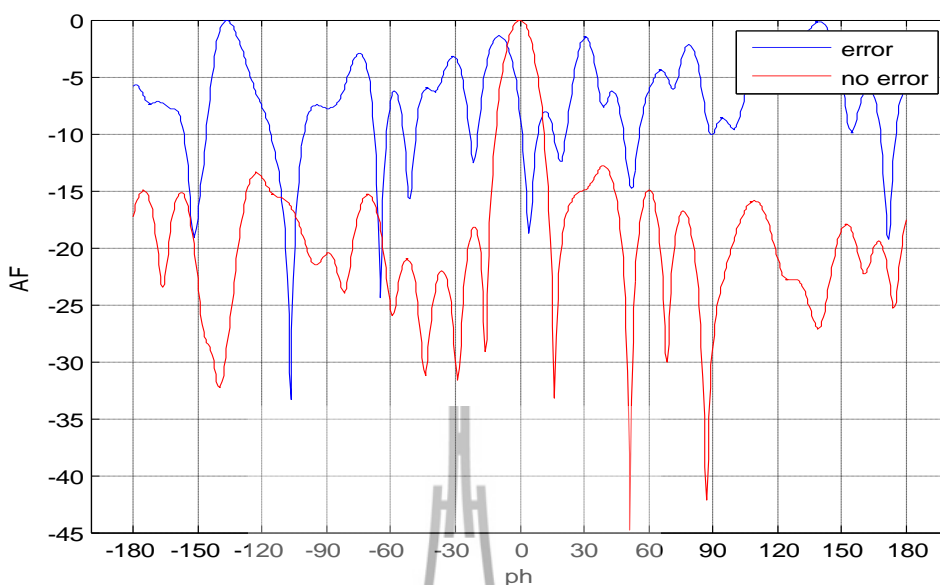
รูปที่ 5-27 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุที่มี  $0.7\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.7 \text{ rad}$



รูปที่ 5-28 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุงมี  $0.8\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.8 \text{ rad}$



รูปที่ 5-29 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบุงมี  $0.9\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $0.9 \text{ rad}$



รูปที่ 5-30 การก่อรูปลำคลื่นที่เกิดจากการระบรูศมี  $1.0\lambda$  และเฟสผิดพลาดที่  $1.0 \text{ rad}$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ลักษณะของผลที่ได้จะเหมือนกับการทดลองทั้งสองที่ผ่านมา คือเมื่อมีการเพิ่มการระบรูศมีที่ผิดพลาดขนาดของลำคลื่นก็จะเล็กลง และเมื่อเพิ่มการระบรูเฟสผิดพลาดทิศทางของลำคลื่นก็จะเลื่อน โดยถ้าเพิ่มทั้งการระบรูตำแหน่งที่ผิดพลาดทั้งรัศมีและเฟสก็จะทำให้ลำคลื่นมีขนาดที่ลดลงและทิศทางที่ผิดพลาดมากขึ้นไปด้วยนั่นเอง

### 5.5 กล่าวสรุป

ในบทนี้เป็นส่วนของผลการทดลอง โดยที่การทดลองจะเน้นไปที่การศึกษาถึงความผิดพลาดที่ทำให้การก่อรูปลำคลื่นผิด นั่นคือการระบรูตำแหน่งของสายอากาศ นั่นเอง ซึ่งในการระบรูตำแหน่งของสายอากาศนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบรูตำแหน่งอยู่สองตัวคือ รัศมีและเฟส จากการทดลองพบว่า การระบรูรัศมีผิดพลาดทำให้ ขนาดของลำคลื่นที่ได้เล็กลง และในการระบรูเฟสผิดพลาดก็จะทำให้ทิศทางของลำคลื่นผิดพลาด ขึ้นอยู่กับว่าจะผิดพลาดไปในด้านไหนถ้าเลื่อนไปทางซ้ายแสดงว่าค่าเฟสผิดพลาดเป็นลบ และถ้าเลื่อนไปด้านขวาแสดงว่าค่าเฟสผิดพลาดเป็นบวก



## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลโครงการ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ผลกระทบที่ทำให้การก่อรูปลำคลื่นมีความผิดพลาด คือการระบุตำแหน่งของโหนดที่ผิดพลาด ซึ่งการระบุตำแหน่งนั้นจะมีพารามิเตอร์สองตัวในการกำหนดตำแหน่งคือรัศมีและเฟส ( $r_k, \Psi_k$ ) ซึ่งในการระบุตำแหน่งที่ผิดพลาดนั้นเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 แต่ในการศึกษานั้นเราใช้ค่าความผิดพลาดของรัศมีเริ่ม ตั้งแต่  $0.1 \lambda$  ถึง  $1.0 \lambda$  และความผิดพลาดของเฟสเริ่ม ตั้งแต่  $0.1 \text{ rad}$  ถึง  $1.0 \text{ rad}$  เพื่อให้เห็นผลที่เกิดจากความผิดพลาดที่ชัดเจน จากการทดลองพบว่ารัศมีมีผลต่อขนาดของลำคลื่น และเฟสมีผลต่อทิศทาง โดยที่ความผิดพลาดของรัศมี จะส่งผลกระทบต่อขนาดและกำลังส่ง เมื่อความผิดพลาดมากขึ้น ขนาดและกำลังส่งก็จะลดลงซึ่งส่งผลทำให้พู่ขามีขนาดเพิ่มขึ้น และความผิดพลาดของเฟส จะส่งผลกระทบต่อทิศทางของลำคลื่น เมื่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบ ทิศทางของลำคลื่นจะเลื่อนไปทางซ้าย และถ้าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นบวก ทิศทางของลำคลื่นจะเลื่อนไปทางขวา ซึ่งทิศทางจะผิดพลาดมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าที่ผิดพลาดจะมากหรือน้อยแค่ไหน

#### 6.1 ข้อเสนอแนะ

ในการเพิ่มกำลังส่งของสัญญาณ โดยทั่วไปจะมีการเพิ่มอยู่ 2 วิธี คือการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ (gain) และการทำสายอากาศแถวลำดับ (antenna array) ซึ่งการสร้างสายอากาศแถวลำดับนั้น ในพื้นที่ที่มีขนาดเล็กหรือพื้นที่ที่จำกัด การติดตั้งสายอากาศแถวลำดับจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงมีการเอา การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย มาแก้ปัญหาตรงจุดนี้ แต่การใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายนั้น จะต้องมีการระบุตำแหน่งที่แน่นอน ซึ่งสามารถรับข้อมูลตำแหน่งจากจีพีเอสในการระบุตำแหน่งของแต่ละโหนด แต่จีพีเอสนั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ซึ่งจากผลที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่า ความผิดพลาดของจีพีเอสเพียงเล็กน้อย มีผลต่อประสิทธิภาพของ การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายดังนั้นการนำจีพีเอสมาใช้กับระบบต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก

## ประวัติผู้จัดทำ



นายปฎิจุจ แสงदानุช เกิดเมื่อวันที่ 3 เดือน ตุลาคม พ.ศ.2533 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลเทพารักษ์ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนลาซาลกรุงเทพฯ เขตบางนากรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นายประสิทธิ์ สมหงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 11 เดือนมกราคม พ.ศ. 2533 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลหนองแวง อำเภอศรีณรงค์ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนสังขะ อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ เมื่อปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นายพิสิมรุ์ พรหมบุตร เกิดเมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ.253 4 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลนอกเมือง อำเภอเมือง จังหวัด สุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนสุรวิทยาคาร อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ เมื่อปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บรรณานุกรม

รังสรรค์ วงศ์สรรค์วิศวกรรมสายอากาศพิมพ์ครั้งที่ 2 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Frank Gross, **Smart Antenna for Wireless Communications With MATLAB**, New York :McGraw  
Hill,

[http://www.thaitelcomkm.org/TTE/topic/attach/Wireless\\_Sensor\\_Network/index.php](http://www.thaitelcomkm.org/TTE/topic/attach/Wireless_Sensor_Network/index.php)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_array\\_\(electromagnetic\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_array_(electromagnetic))

[arxiv.org/pdf/cs/0505022](http://arxiv.org/pdf/cs/0505022)

<http://www.sahavicha.com/?name=knowledge&file=readknowledge&id=2691>

<http://wara.com/article-885.html>

<http://www.geopnru.com/?p=175>



## ภาคผนวก

### 1. โค้ดโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการทำโครงการทั้งหมด

#### 1.1 สายอากาศแถวลำดับ

```
clear all; clc; close all;
```

```
A=1; %Amplitude
```

```
f = 1.8*10^9; %frequency
```

```
c = 3*10^8;
```

```
lamb = c/f; %lambda
```

```
d = lamb*0.5; %array spacing
```

```
k = (2*pi)/lamb; %wave number
```

```
theta = -90:90;
```

```
thetad = theta*pi/180;
```

```
input('input desired seta ')
```

```
seta = ans*pi/180; %desired direction
```

```
x = d*sin(thetad);
```

```
xx = d*sin(seta);
```

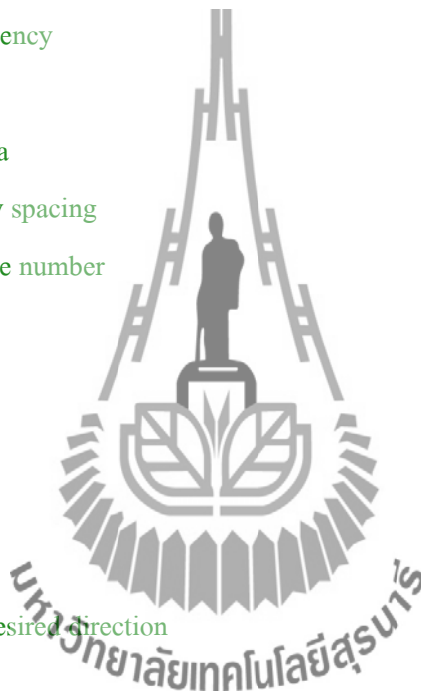
```
input('Number of antenna element: ')
```

```
N = ans; %number of antennas N element
```

```
for n = 0:(N-1)
```

```
index=n+1;
```

```
index_w=n+1;
```



```
w(index_w,:) = A*exp(i*k*xx*n); %Array factor weighted
sg(index,:) = A*exp(i*k*x*n); %Array linear array
end
```

```
w_t= w';
```

```
sg_w = w_t*sg;
```

```
summ=sum(sg_w);
```

```
sg_abs=abs(sg_w);
```

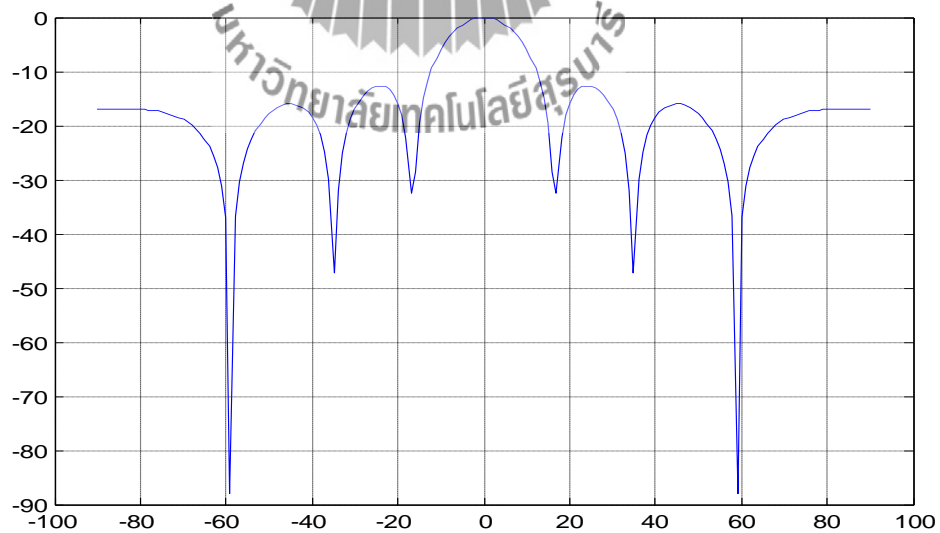
```
sg_dB=20*log10(sg_abs);
```

```
maxsg_dB=max(sg_dB);
```

```
out_normalized=sg_dB-maxsg_dB;
```

```
figure;
```

```
plot(theta,out_normalized); grid on
```



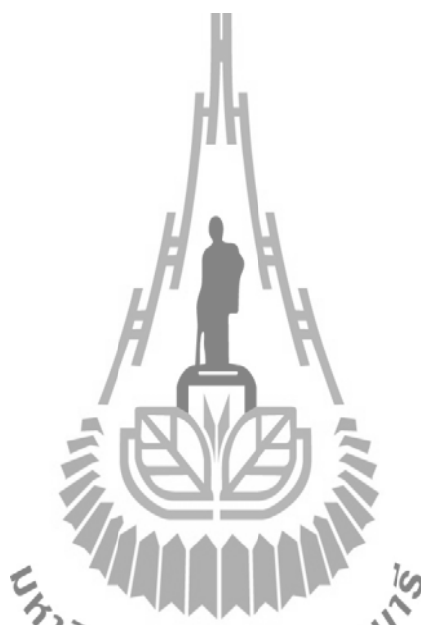
รูปที่ ก. ผลที่ได้จากการจำลองผลสายอากาศแถวลำดับ

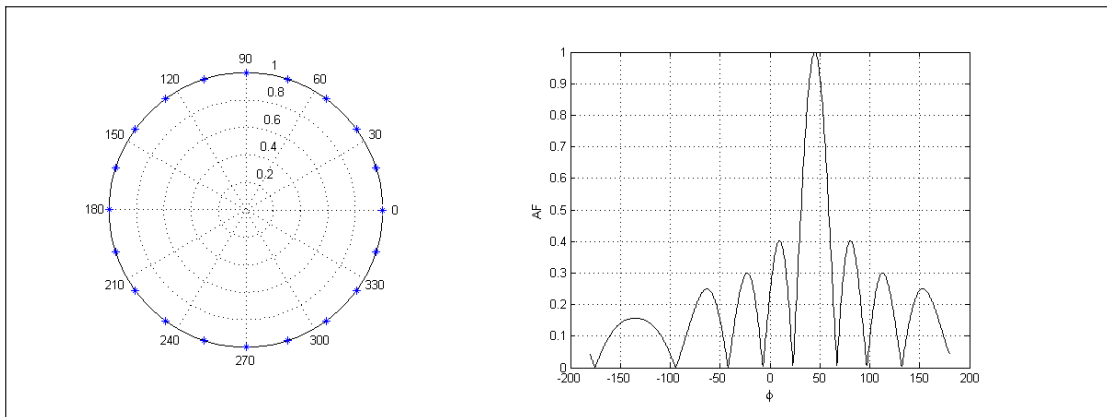
## 1.2 สายอากาศแถวลำดับวงกลม

```

clearall; clc; close all;
f=2.4*10^9; c=3*10^8;
lambda=c/f;
a=1;
N=20;
n=1:N;
pinc=2*pi/N;
th=-pi:0.01:pi;
ph=-pi:0.01:pi;
th0=pi/2;
ph0=45*pi/180;
r=ones(1,length(n))*a;
figure;
xx=(n-1)*pinc;
polar(xx,r,'*'); grid on;
AF=zeros(1,length(ph));
for n=1:N
AF=AF+exp(-1j*2*pi*a*(sin(th0)*cos(ph-(n-1)*pinc)-sin(th0)*cos(ph0-(n-1)*pinc)));
end
maxx=max(AF);
figure;
plot(ph*180/pi,abs(AF)/maxx,'k'); grid on
xlabel('\phi')
ylabel('AF')

```





รูปที่ ข. ผลที่ได้จากการจำลองผลสายอากาศแถวลำดับวงกลม

### 1.3 การก่อรูปลำคลื่นของการกระจายตัวแบบกระจายตัว

#### 1.3.1 ระบุตำแหน่งผลิตผล

```
clear all; clc; close all;
A=1;
N=64;
n=1:N;
f = 2.4*10^9; %frequency
c = 3*10^8; %light speed
lamp=c/f; %lampda
k = (2*pi)/lamp;
th=-pi:0.01:pi;
phi=-pi:0.01:pi;
th0 = pi/2;
phi0=00*pi/180;
% r=ones(1,length(n))*a;
```



```

r = 3*lampr;

xx = random('unif', -r, r, 1, N);
yy = random('unif', -r, r, 1, N);
rk = sqrt((xx.^2)+(yy.^2));
phinx = atan2(yy, xx);

figure;
polar(phinx, rk, '*'); grid on;

ph_max = 0.5*lampr/r; %phi error max
r_max = 0.5*lampr; %rk error max
ephinx = [random('unif', -ph_max, ph_max, 1, N)]; %phi error
erk = [random('unif', -r_max, r_max, 1, N)]; %rk error

AF = zeros(1, length(phi));
for n = 1:N;

phinxx = (phinx(n) - ((phi + phi0 - ephinx(n))/2));
AF = AF + exp((-1i.*((4*pi)/lampr).*rk(n).*(sin(phinxx).*sin((phi - phi0 -
ephinx(n))/2)))) + (1i.*k.*erk(n).*cos(phinxx - (phi - phi0 + ephinx(n))/2));

end

maxx = max(AF);

figure;
plot(phi*180/pi, abs(AF)/maxx, 'k'); grid on

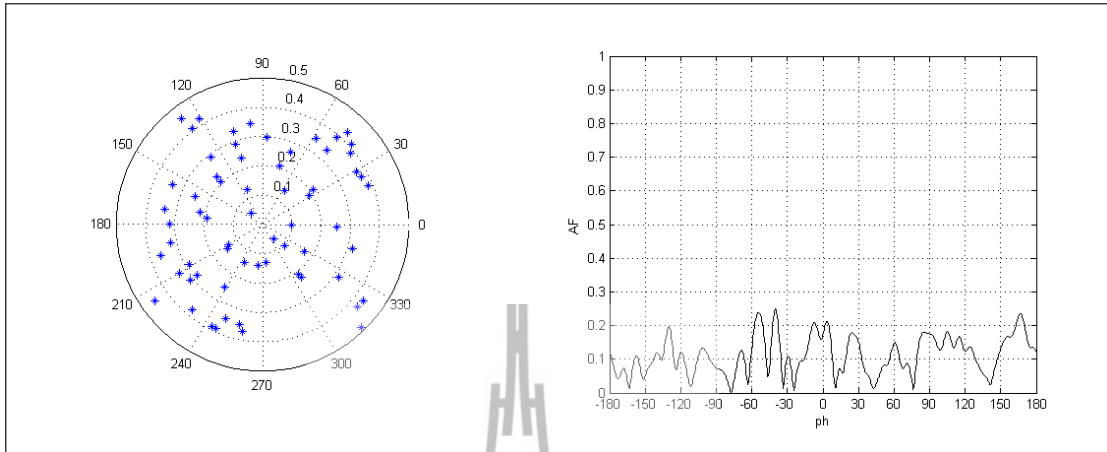
axis([-180 180 0 1])

xlabel('ph')

```



ylabel('AF')



รูปที่ ค. ผลที่ได้จากการจำลองผลการก่อรูปลำคลื่นของการกระจายตัวแบบ  
กระจายตัว โดยการระบุตำแหน่งผิดพลาด

### 1.3.2 ระบุตำแหน่งผิดพลาดและมีการชดเชยแล้ว

```
clear all; clc; close all;
A=1;
N=64;
n=1:N;
f = 2.4*10^9; %frequency
c = 3*10^8; %light speed
lamp=c/f; %lampda
k=(2*pi)/lamp;
th=-pi:0.01:pi;
phi=-pi:0.01:pi;
th0 = pi/2;
phi0=0*pi/180;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

r = 2*lampp ;

xx=random('unif',-r,r,1,N);

yy=random('unif',-r,r,1,N);

rk=sqrt((xx.^2)+(yy.^2));

phinx =atan2(yy,xx);

figure;

polar(phinx,rk, '*'); grid on;

ph_max=1.0*lampp/r ;%phi error max
r_max=1.0*lampp;      %rk error max
ephinx=[random('unif',-ph_max,ph_max,1,N)]; %phi error
erk=[random('unif',-r_max,r_max,1,N)]; %rk error

AF=zeros(1,length(phi));
AFe=zeros(1,length(phi));

for n=1:N;

phinxx=(phinx(n)-((phi+phi0-ephinx(n))/2));

AFe= AFe+exp((-1i.*((4*pi)/lampp).*rk(n).*(sin(phinxx).*sin((phi-phi0-
ephinx(n))/2)))+(1i.*k.*erk(n).*cos(phinxx-(phi-phi0+ephinx(n))/2)));

AF=AF+exp(1i*k*rk(n)*(sin(th0)*cos(phi0-phinxx)-sin(th0)*cos(phi-phinxx)));

end

summ_AFe=sum(AFe);      %normalized_AF error

AFe_abs=abs(AFe);

AFe_dB=20*log10(AFe_abs);

```

```

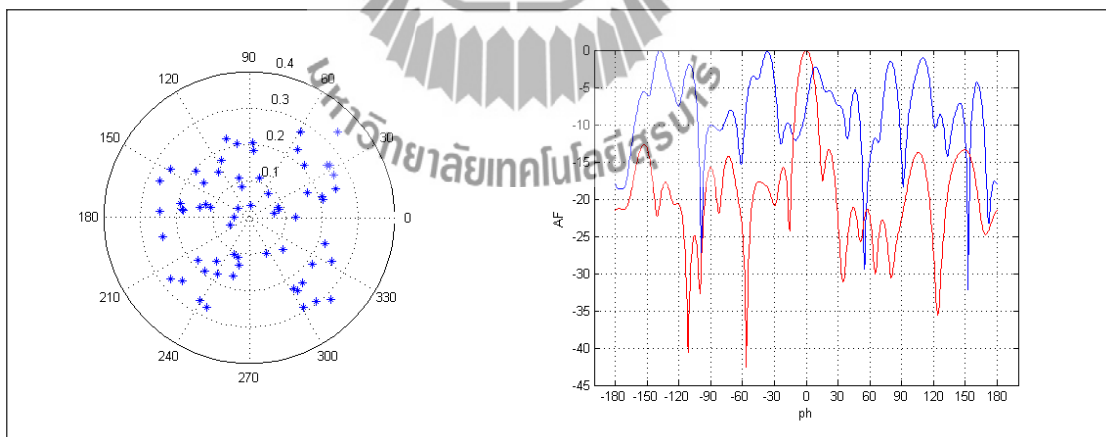
maxAFe_dB=max(AFe_dB);
out_normalized_AFe=AFe_dB-maxAFe_dB;

summ_AF=sum(AF);    %normalized_AF

AF_abs=abs(AF);
AF_dB=20*log10(AF_abs);
maxAF_dB=max(AF_dB);
out_normalized_AF=AF_dB-maxAF_dB;

figure;
plot(phi*180/pi,out_normalized_AFe,'b',phi*180/pi,out_normalized_AF,'r'); grid on
xlabel('ph')
ylabel('AF')
set(gca,'xTick',[-180:30:180])

```



รูปที่ ๓. ผลที่ได้จากการจำลองผล การก่อรูปลำคลื่นของการกระจายตัวแบบ  
กระจายตัว โดยการระบุตำแหน่งผิดพลาดและมีการชดเชยแล้ว