



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง สายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง

Direction Adjustable Antenna for UHF RFID Reader

นามผู้วิจัย นายอนุกุล น้อยไม้

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่นชัย วรเสวต, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร จงบุรี, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ละออ โควาวิสารัช, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง

Direction Adjustable Antenna for UHF RFID Reader

โดย

นายอนุกุล น้อยไม้

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2552

อนุกุล น้อยไม้ 2552: สายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี
ในย่านความถี่สูงยิ่ง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่นชัย วรเสวต, Ph.D. 115 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการนำเสนอการพัฒนาสายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็ก โดยเป็นการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับ (Array antenna) ซึ่งทำการทดลองลดขนาดของสายอากาศแถวลำดับลงโดยใช้หลักการเลือกวัสดุที่มาประติษฐ์เป็นสายอากาศที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) สูง ซึ่งจะทำให้ขนาดของแพทช์ (Patch) ของสายอากาศแถวลำดับนั้นเล็กลง และจะทำให้ขนาดของสายอากาศแถวลำดับมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองเลือกใช้วัสดุพีเอ็มเอ็มเอ (PMMA: Polymethylmethacrylate) มาประติษฐ์เป็นสายอากาศ ซึ่งได้ทำการเริ่มการออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ เช่น ค่า S_{11} , อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR: Voltage standing wave ratio) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) เป็นต้น โดยได้เริ่มทำการจำลองค่าในโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศที่มีเพียงองค์ประกอบเดียว หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาทำการจำลองเป็นสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ ซึ่งเมื่อได้ผลออกมาตรงตามที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว จึงทำการประติษฐ์สายอากาศแถวลำดับออกมา โดยในส่วนของ การประติษฐ์สายอากาศแถวลำดับนั้น จะใช้วงจรแบบบัทเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) ในการควบคุมการส่งพลังงานคลื่นความถี่วิทยุและความต่างของเฟสของพลังงานที่ส่งให้กับแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ หลังจากนั้นจึงได้นำสายอากาศแถวลำดับที่ประติษฐ์ขึ้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งผลจากการทดสอบนั้น สายอากาศแถวลำดับ มีค่าอัตราขยาย (Gain) 9.27 dBi แต่ถ้ารวมพลังงานสูญเสีย (Loss) ที่เกิดขึ้นภายในสายอากาศแถวลำดับจะสามารถหาอัตราขยายได้ 12.26 dBi ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่สายอากาศแถวลำดับนี้ยังมีพลังงานสูญเสียอยู่ภายใน ซึ่งถ้าสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ก็จะทำให้สายอากาศแถวลำดับนี้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

Anukool Noymai 2009: Direction Adjustable Antenna for UHF RFID Reader.
Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering,
Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor
Denchai Worasawate, Ph.D. 115 pages.

This thesis presents the development of the array antenna for UHF RFID reader for the steel industry. To reduce the size of the array antenna, a high dielectric material is chosen for the antenna. In this thesis, the PMMA (Polymethylmethacrylate) is utilized as the antenna material.

The development of the array antenna was initially done with simulation software to determine the properties of the antenna such as S_{11} , VSWR (Voltage standing wave ratio) and radiation pattern. At first, the simulation was conducted on a single element of the array antenna, and then the simulation on all 4-element array antenna was done. When the results of the simulation meet the requirements, the array antenna is constructed. The Butler matrix circuit is used to control power transmission and phase of each element in the array antenna.

The fabricated array antenna is tested. The measured maximum gain is 9.27 dBi in one of the patterns. The measured gain is lower than the simulated one of 12.26 dBi because of the loss of the devices used to construct the Butler matrix. The measured loss of the matrix is 2.99 dB. If the loss of the matrix were included in the simulation, the measured gain is comparable to the simulated one.

/ /

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. เด่นชัย วรเสวต ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชีระ จงบุรี และดร.ละออ โควาวิสารัช กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการทำ วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ชีรสิทธิ์ เกษตรเกษม ประธาน การสอบและ ดร.พรอนงค์ พงษ์ไพบูลย์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไข ข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ชัยชนะ มิตรพันธ์ และ ดร.พศิน อิศรเสนา ณ อยุธยา ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้ศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมจนสำเร็จ การศึกษา

ขอขอบพระคุณ ดร.ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ ผู้จัดการฝ่ายสนับสนุนทางเทคนิค ศูนย์ทดสอบ ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการ ทดสอบสายอากาศ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ความถี่สูงยิ่ง สำหรับอุตสาหกรรมเหล็ก ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและเงินทุนในการ พัฒนาสายอากาศ (รหัสโครงการ RD5106)

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาโดยทุนส่งเสริมและสนับสนุนของสถาบันวิจัย และพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ เอื้อเฟื้อเครื่องมือวัด

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อนุกุล น้อยไม้
กันยายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	95
ผล	95
วิจารณ์	111
สรุปและข้อเสนอแนะ	112
สรุป	112
ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	113
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบมาตรฐานระหว่าง ISO/IEC และ EPC	19
2	เปรียบเทียบระยะการอ่านแต่ละคลื่นความถี่ของอาร์เอฟไอดี	21
3	ข้อแตกต่างของอาร์เอฟไอดี ระบบต่างๆ	21
4	สัญญาณเอทพุทที่ได้จากอุปกรณ์คัปเปอร์	33
5	เอทพุทของแบตเตอรี่เมทริกซ์แบบ 4 ล้อคลื่น	34
6	แสดงค่าระดับพลังงานที่วัดได้ที่พอร์ทเอทพุทแต่ละพอร์ท	99
7	ค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในบอร์ดสวิทช์แต่ละพอร์ท	100
8	ค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในบอร์ดแบตเตอรี่เมทริกซ์	101
9	ค่าความต่างของมุมของแต่ละพอร์ทเอทพุทที่อยู่ติดกัน	101
10	ค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในบอร์ดคัปเปอร์	103
11	ค่าความต่างของมุมเอทพุทในบอร์ดคัปเปอร์	103

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เซอร์โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ วัตสัน-วัตต์ กับเครื่องเรดาร์ในยุคแรก	5
2 ระบบอาร์เอฟไอดี	7
3 องค์ประกอบทั่วไปของป้าย	8
4 สถาปัตยกรรมภายในไมโครชิปของป้ายแบบแพสซีฟ	9
5 ป้ายแบบแอ็กทีฟ	10
6 โครงสร้างภายในเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี	11
7 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำแบบพกพา	12
8 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำแบบติดตั้ง	12
9 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำแบบประตู	13
10 สนามแม่เหล็กจากกระบวนการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ	14
11 หลักการทำงานของอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ต่างๆ	15
12 ตัวอย่างการเข้ารหัส แบบต่างๆ	16
13 การกล้ำสัญญาณแบบ ASK	17
14 ตัวอย่างของอัลกอริทึมในการป้องกันการชนของข้อมูลในป้าย	18
15 แสดงความถี่ย่านที่ระบบอาร์เอฟไอดีถูกใช้งาน	20
16 แสดงรายละเอียดในภาคจัดการคลื่นความถี่วิทยุ	23
17 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	24
18 รูปแบบของแพทช์ของสายอากาศไมโครสตริป	25
19 การป้อนสายอากาศโดยสายส่งไมโครสตริป	25
20 การป้อนสัญญาณแบบ โพรบ	26
21 การป้อนสัญญาณแบบ L-probe	27
22 การป้อนสัญญาณแบบ T-probe	27
23 การป้อนสัญญาณแบบ F-probe	27
24 แสดงการหาค่าความถี่เรโซแนนซ์	29
25 การจัดเรียงสายอากาศจำนวน N ส่วน (N-element array)	31
26 การทำงานของคัปเปอร์	33
27 วงจรบัทเทอร์เมทริกซ์ แบบ 4 ลำคลื่น	34

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
28 แสดงขนาดของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว	38
29 ผลการจำลองค่า S_{11} ของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว	39
30 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศแบบ ของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว	40
31 ผลการจำลองค่าแบบรูปการการแผ่ในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์ ของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว	40
32 การจัดเรียงสายอากาศแบบแถวลำดับ	41
33 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.25$	42
34 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.25$	43
35 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.25$	43
36 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.25$	44
37 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.3$	45
38 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.3$	46
39 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.3$	46
40 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.3$	47
41 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.35$	48
42 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.35$	49
43 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.35$	49
44 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.35$	50
45 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.4$	51
46 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.4$	52
47 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.4$	52
48 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.4$	53
49 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา ที่ระยะ $d = 0.45$	54
50 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.45$	55
51 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.45$	55
52 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา ที่ระยะ $d = 0.45$	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
53 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.5$	57
54 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.5$	58
55 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.5$	58
56 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.5$	59
57 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.55$	60
58 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.55$	61
59 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.55$	61
60 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.55$	62
61 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.6$	63
62 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.6$	64
63 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.6$	64
64 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.6$	65
65 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.65$	66
66 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.65$	67
67 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.65$	67
68 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.65$	68
69 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.7$	69
70 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.7$	69
71 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.7$	70
72 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.7$	70
73 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ ที่ระยะ $d = 0.6$, $\beta = 45$ องศา	72
74 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ ที่ระยะ $d = 0.6$, $\beta = -45$ องศา	73
75 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ ที่ระยะ $d = 0.6$, $\beta = 135$ องศา	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
76 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ ที่ระยะ $d = 0.6$, $\beta = -135$ องศา	73
77 แสดงขนาดของลายวงจรของแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านบน ของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม	75
78 แสดงขนาดของลายวงจรของแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านล่าง ของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม	76
79 แสดงขนาดของลายวงจรของแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านบน ของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม	77
80 แสดงขนาดของลายวงจรของแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านล่าง ของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม	78
81 แสดงการจัดลำดับชั้นของการประกอบสายอากาศที่มี การโพลาไรซ์แบบวงกลม	79
82 แสดงแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านบน ของสายอากาศที่มี การโพลาไรซ์แบบวงกลม	79
83 แสดงแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านล่างของสายอากาศที่มี การโพลาไรซ์แบบวงกลม	80
84 แสดงแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านบน ของสายอากาศที่มี การโพลาไรซ์แบบวงกลม	80
85 แสดงแผ่น วงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านล่างของสายอากาศที่มี การโพลาไรซ์แบบวงกลม	80
86 แสดงด้านหน้าของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม	81
87 แสดงด้านหลังของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม	81
88 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ	82
89 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดสวิตช์ ด้านบน	83
90 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดสวิตช์ ด้านล่าง	83
91 แสดงบอร์ดสวิตช์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	83
92 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดบัทเทอร์เมทริกซ์ ด้านบน	84

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
93 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดบัทเลอรีเมทริกซ์ ด้านล่าง	85
94 แสดงบอร์ดบัทเลอรีเมทริกซ์ ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	85
95 แสดงการต่อบอร์ดสวิทซ์ กับ บอร์ดแสดงบอร์ดบัทเลอรีเมทริกซ์ ด้านบน	86
96 แสดงการต่อบอร์ดสวิทซ์ กับ บอร์ดแสดงบอร์ดบัทเลอรีเมทริกซ์ ด้านล่าง	87
97 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดคัปเปอร์ ด้านบน	88
98 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดคัปเปอร์ ด้านล่าง	88
99 แสดงบอร์ดคัปเปอร์ ด้านบน	89
100 แสดงบอร์ดคัปเปอร์ ด้านล่าง	89
101 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นบน ด้านบน	90
102 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นบน ด้านล่าง	91
103 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นล่าง ด้านบน	92
104 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นล่าง ด้านล่าง	93
105 แสดงจุดป้อนพลังงานของสายอากาศ	94
106 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว ที่มีการโพลาริซแบบวงกลมที่วัดได้จริง	96
107 แสดงอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการ โพลาริซแบบวงกลมของพอร์ท 1 เมื่อทิศโพลาริซของสายอากาศภาครับ และภาคส่งต่างกัน 0° และ 90°	96
108 แสดงอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการ โพลาริซแบบวงกลมของพอร์ท 2 เมื่อทิศโพลาริซของสายอากาศภาครับ และภาคส่งต่างกัน 0° และ 90°	97
109 แสดงอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการ โพลาริซแบบวงกลมในทิศการโพลาริซแนวตั้งและแนวนอน	98
110 บอร์ดสวิทซ์	99
111 บอร์ดบัทเลอรีเมทริกซ์	100
112 สายนำสัญญาณ	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
113 บอร์ดคัปเปอร์	102
114 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 1 พอร์ตที่ 1	104
115 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 1 พอร์ตที่ 2	104
116 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 2 พอร์ตที่ 1	104
117 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 2 พอร์ตที่ 2	105
118 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 3 พอร์ตที่ 1	105
119 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 3 พอร์ตที่ 2	105
120 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 4 พอร์ตที่ 1	106
121 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศองค์ประกอบเดียว ชุดที่ 4 พอร์ตที่ 2	106
122 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศแถวลำดับ	107
123 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 00	108
124 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 01	108
125 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 10	109
126 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 11	109
127 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ	110
128 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับกับสายอากาศที่มีเพียง 1 องค์ประกอบ	110

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASK	=	Amplitude Shift Keying
EPC	=	Electronic Product Code
HF	=	High Frequency
ID	=	Identification
LF	=	Low Frequency
TDMA	=	Time Division Multiple Access
RFID	=	Radio Frequency Identification
UCC	=	Uniform Code Council
UHF	=	Ultra High Frequency
WORM	=	Write-Once Read-Many

สายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง

Direction Adjustable Antenna for UHF RFID Reader

คำนำ

เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (RFID) เป็นเทคโนโลยีการระบุข้อมูลที่แสดงเอกลักษณ์ของวัตถุหรือบุคคลด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังเข้ามามีบทบาทต่อการบริหารจัดการธุรกิจรูปแบบใหม่และอำนวยความสะดวกต่อการดำเนินชีวิตเป็นอย่างมาก โดยสามารถนำเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีไปใช้งานได้หลายด้าน เช่น ระบบการจัดการร้านค้า ระบบควบคุมการเข้า-ออกพนักงานภายในอาคาร ระบบการจัดการคลังสินค้า เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยนั้น ได้มีการทำการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 และได้เริ่มมีการใช้งานจริงหรือการทดสอบการใช้งานเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีกันบ้างแล้ว ได้แก่ บัตรโดยสารรถไฟฟ้าใต้ดิน การทดสอบอาร์เอฟไอดีในเรื่องการตรวจสอบย้อนกลับในอุตสาหกรรมอาหาร (Food tracability) การใช้อาร์เอฟไอดีในการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง และการกระจายสินค้า ซึ่งจะเห็นได้ว่า อาร์เอฟไอดีเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มขีดการแข่งขันของประเทศเป็นอย่างมาก

แต่การพัฒนาในด้านต่างๆของอาร์เอฟไอดี ในประเทศไทยนั้น โดยส่วนใหญ่ยังเป็นการนำเข้าอุปกรณ์มาจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด ซึ่งทำให้ประเทศไทยเสียงบประมาณในส่วนนี้ไปเป็นจำนวนมาก จึงได้มีการริเริ่มพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้งานได้เองในประเทศไทย ซึ่งเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีนั้น มีการใช้งานอยู่หลายย่านความถี่ด้วยกัน แต่ย่านความถี่ที่เป็นที่ต้องการในตลาดเป็นอย่างมาก คือ ย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่สามารถอ่านข้อมูลได้จากระยะไกลเมื่อเทียบกับย่านความถี่อื่นๆ และต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก เพราะมีขั้นตอนการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่งนั้น จะแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนภาคควบคุม ส่วนภาคจัดการคลื่นความถี่ และส่วนภาคสายอากาศ

โดยในงานวิจัยนี้ จะเป็นการพัฒนาในส่วนภาคสายอากาศ โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ (Array antenna) จำนวน 4 องค์ประกอบ (Element) ซึ่งได้ทำการทดลองลดขนาดของสายอากาศลงโดยใช้วัสดุพีเอ็มเอ็มเอ (PMMA :Polymethylmethacrylate) ซึ่งมีค่าคงที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่สูงกว่าอากาศเป็นตัวกลาง (Substrate) และได้ใช้วงจรบัทเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) แบบ 4 ลำคลื่น ทำหน้าที่เป็นวงจรที่ใช้แบ่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุไปที่สายอากาศแต่ละองค์ประกอบให้มีขนาดและเฟสตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular polarization) หลังจากนั้นจึงได้นำสายอากาศไปทำการวัดค่าอัตราขยาย (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน

วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและพัฒนาสายอากาศแบบแถวลำดับคู่ที่มี 4 องค์ประกอบ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยเลือกใช้วัสดุพีเอ็มเอ็มเอ (PMMA :Polymethylmethacrylate) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าอากาศเป็นตัวกลาง (Substrate) เพื่อทำการลดขนาดของสายอากาศลง และใช้วงจรบัทเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) แบบ 4 ลำคลื่น ทำหน้าที่เป็นวงจรที่ใช้แบ่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุไปที่สายอากาศแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งสามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ได้ 4 แบบ และมีอัตราขยาย (Gain) ที่สูงกว่าสายอากาศทั่วไปที่มีเพียงองค์ประกอบเดียว ซึ่งจะทำให้สายอากาศที่ได้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

การตรวจเอกสาร

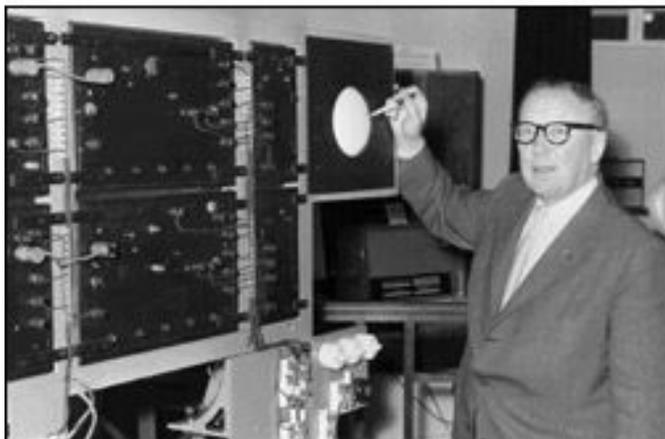
1. เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (RFID)

1.1 ประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (RFID)

RFID ย่อมาจาก Radio Frequency Identification (Finkenzeller, 2003) เป็นเทคโนโลยีการระบุข้อมูลที่แสดงเอกลักษณ์ของวัตถุหรือบุคคลด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้ถูกพัฒนามาในยุค ค.ศ. 1970s (Finkenzeller, 2003) เพื่อวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการบ่งชี้วัตถุในระยะไกลได้ โดยมีจุดเด่นคือสามารถอ่านข้อมูลจากป้าย (Tag) ได้หลายๆ ป้ายแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แร้งสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และสามารถจะอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในป้าย ในปัจจุบันได้มีการนำอาร์เอฟไอดีไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ นอกเหนือจากนำมาใช้ทดแทนระบบรหัสแท่งแบบเดิม ได้แก่ การใช้งานในบัตรชนิดต่างๆ เช่น บัตรประจำตัวพนักงาน (ID card) บัตรโดยสาร บัตรสำหรับผ่านเข้าออกห้องพัก บัตรที่จอดรถตามศูนย์การค้าต่างๆ ป้ายสำหรับติดกระเป๋า เดินทาง ป้ายสำหรับติดสินค้า หนังสือหรือฉลากยา บางครั้งเราอาจพบเห็นอยู่ใน รูปของป้ายสินค้าซึ่งมีขนาดเล็กจนสามารถแทรกกลางระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือเป็นแค่ปลุขขนาด เล็กฝังเอาไว้ในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติต่างๆ เป็นต้น

ประวัติการเริ่มต้นของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีนั้น ย้อนกลับไปถึงสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 (Finkenzeller, 2003) ซึ่งประเทศในกลุ่มพันธมิตร และกลุ่มอักษะได้มีการใช้เรดาร์ ซึ่งถูกค้นพบ โดย เซอร์โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ วัตสัน-วัตต์ ดังภาพที่ 1 ในปี ค.ศ. 1935 ใช้ในการตรวจจับและเตือนเครื่องบินที่กำลังเข้ามา แต่ปัญหาของการใช้เรดาร์ในยุคนั้นคือไม่สามารถแยกแยะ ระหว่างเครื่องบินรบว่าเป็นของฝ่ายไหน ทางฝั่งเยอรมันได้ค้นพบว่าเมื่อนักบินบินหมุนตัวแล้ว จะทำให้มีการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ที่เปลี่ยนไป ทำให้ทราบว่าเป็นของฝ่ายเยอรมัน ซึ่ง เป็นจุดกำเนิดของอาร์เอฟไอดี แบบที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุก็ได้ เมื่อเทคโนโลยีเรดาร์มีการพัฒนาขึ้น นักบินสามารถที่จะสื่อสารระหว่างเครื่องบินกับสถานีภาคพื้นดิน หรือระหว่างนักบินด้วยกัน ที่เราเรียกว่าระบบแยกแยะระหว่างมิตรกับศัตรูหรือ IFF (Identification Friend or Foe) โดยที่เมื่อเครื่องบินได้รับสัญญาณเรดาร์จากภาคพื้นดินหรือว่าระหว่างเครื่องบิน ตัว

เครื่องบินจะส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ตอบกลับไป ทำให้ทราบว่าเป็น เครื่องบินของฝ่ายไหน ซึ่งถือว่าเป็นการสื่อสารอาร์เอฟไอดีแบบที่วัตถุส่งสัญญาณจากตัวเองไปยังผู้ถามหรือแบบแอ็กทีฟ



ภาพที่ 1 เซอร์โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ วัตสัน-วัตต์ กับเครื่องเรดาร์ในยุคแรก

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

ยุคเริ่มแรกของการใช้อาร์เอฟไอดี ในเชิงพาณิชย์ได้แก่ระบบกันขโมย (EAS: Electric Article Surveillance) ในห้างสรรพสินค้า ซึ่งตัวสินค้าจะมีการติด อาร์เอฟไอดีแบบ 1 บิต ซึ่งจะมีค่าเป็น '0' หรือ '1' เมื่อสินค้ามีการชำระเงินตัวบิตจะถูกตั้งค่าเป็น '0' ทำให้สามารถนำออกจากร้านได้ ในกรณีที่ไม่มีชำระสินค้า เมื่อนำสินค้าผ่านประตูเครื่องตรวจป้ายกันขโมย เมื่ออ่านค่าจากวัตถุในถุงของลูกค้ามีค่าเป็น "1" ก็จะมีสัญญาณเตือนขึ้นมา

1.2 วิวัฒนาการของระบบอาร์เอฟไอดี

อย่างที่ได้อ่านมาข้างต้น จุดเริ่มต้นของอาร์เอฟไอดี มีมาตั้งแต่ยุคสงครามโลกครั้งที่ 2 (Finkenzeller, 2003) ทางด้านการพัฒนาได้มีการให้สิทธิบัตรของอเมริกาเกี่ยวกับอาร์เอฟไอดี อันแรกให้กับ Mario W. Cardullo เป็นสิทธิบัตรเกี่ยวกับป้ายแบบแอ็กทีฟ เมื่อวันที่ 23 มกราคม ค.ศ. 1973 และในปีเดียวกันได้มีการมอบสิทธิบัตรเกี่ยวกับป้ายแบบ แพสทีฟแก่ Charles Walton โดยประยุกต์ใช้งานสำหรับการเปิดล็อกประตู และ Charles Walton ได้อนุญาตสิทธิให้บริษัท Schlage เป็นผู้ผลิต

ในช่วงปี ค.ศ. 1970 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับอาร์เอฟ-ไอดี เหมือนกันที่ ศูนย์วิจัยแห่งชาติลอส อลามอส (Los Alamos National Laboratory) มลรัฐนิวเม็กซิโก ใช้สำหรับการติดตามวัตถุนิวเคลียร์ให้กับกระทรวงพลังงาน โดยใช้อาร์เอฟไอดีติดกับรถบรรทุก และเครื่องอ่านที่ประตูทางเข้าออก และเมื่อทีมนักวิทยาศาสตร์ของศูนย์วิจัยแห่งนี้ ได้ออกมาตั้งบริษัทและพัฒนาเป็นระบบเก็บค่าทางควอนตัมอโนมิติ

ในขณะเดียวกันกระทรวงเกษตรของสหรัฐมีความต้องการป้ายแบบ แพลสทิฟชนิดความถี่ 125 กิโลเฮิร์ตซ์ สำหรับติดวัว เพื่อใช้แยกแยะว่าวัวตัวไหนมีการฉีควัคซีนแล้วหรือไม่ ทางศูนย์วิจัยแห่งชาติลอส อลามอส ได้พัฒนาอาร์เอฟไอดีความถี่ 125 กิโลเฮิร์ตซ์ สำหรับฝังใต้ผิวหนังของวัว อาร์เอฟไอดีความถี่ 125 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ในหลายรูปแบบ และต่อมาได้มีการพัฒนาไปที่ความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์

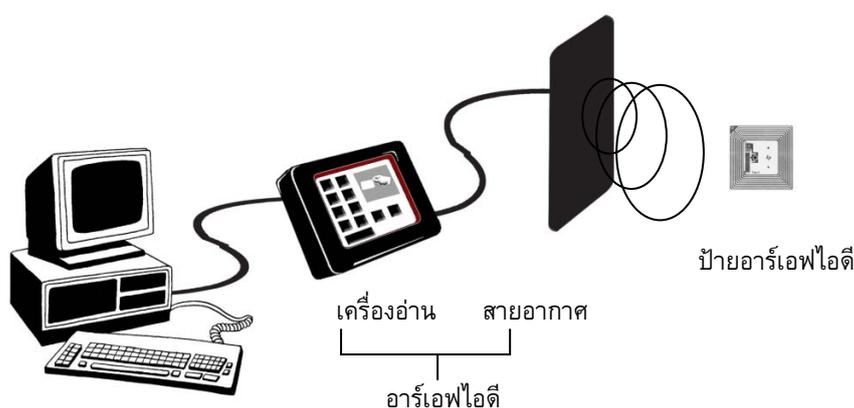
ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1990 บริษัทไอบีเอ็มได้พัฒนาและจดสิทธิบัตร อาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) แต่เมื่อไอบีเอ็มมีปัญหาการเงินได้ขายสิทธิบัตรเกี่ยวกับอาร์เอฟไอดีให้กับบริษัท Intermec ในช่วงกลาง ค.ศ. 1990 ในช่วงนั้นการใช้งานยังไม่แพร่หลายนักเนื่องจากอุปกรณ์ยังมีราคาแพงมาก

อาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง ได้แจ้งเกิดอีกครั้งในปี ค.ศ. 1999 เมื่อ UCC (Uniform Code Council) EAN International บริษัท Procter & Gamble และบริษัท Gillette ได้ร่วมกันก่อตั้งศูนย์ Auto-ID ขึ้นที่สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (MIT) ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อพัฒนาแนวทางการใช้อาร์เอฟไอดีในห่วงโซ่อุปทาน (supply chain) ในช่วงปี ค.ศ. 1999 - 2003 Auto-ID ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทเอกชนจำนวนมาก และได้มีการขยายศูนย์ Auto-ID ไปยังประเทศออสเตรเลีย อังกฤษ สวิตเซอร์แลนด์ ญี่ปุ่น และจีน ได้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่เรียกว่า รหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ EPC (Electronic Product Code) และในปี ค.ศ. 2003 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกขายให้กับ UCC ซึ่งได้ร่วมกับ EAN ตั้งบริษัท EPCglobal เพื่อพัฒนา EPC ในเชิงพาณิชย์ ส่วนศูนย์ Auto-ID ได้ปิดตัวลงอย่างเป็นทางการ ยังคงเหลือเฉพาะส่วนปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา (Auto-ID Lab) ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2004 ทาง EPCglobal ได้รับรองมาตรฐาน EPC Gen2

ส่วนการใช้งานในนั้นบริษัทใหญ่ๆ เช่น Tesco และ Walmart หรือแม้แต่กระทรวงกลาโหมสหรัฐ ได้วางแผนที่จะใช้ EPC สำหรับติดตามสินค้าที่ส่งในสายโซ่อุปทานของตนเอง

1.3 ส่วนประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี

ในระบบอาร์เอฟไอดี จะมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่วนแรกคือ ทรานสปอนเดอร์ หรือ ป้าย (Transponder/Tag) ที่ใช้ติดกับวัตถุต่างๆ ที่เราต้องการ โดยป้ายนั้นจะประกอบด้วยสายอากาศและไมโครชิปที่มีการบันทึกหมายเลข (ID) หรือข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้นๆ ส่วนที่สองคือเครื่องสำหรับอ่าน/เขียน ข้อมูลภายในป้าย (Interrogator/Reader) ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ถ้าเปรียบเทียบกับระบบรหัสแท่ง ป้ายในระบบอาร์เอฟไอดี เปรียบได้กับตัวรหัสแท่งที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านในระบบอาร์เอฟไอดี คือเครื่องอ่านรหัสแท่ง (Scanner) โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบอาร์เอฟไอดี จะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่าน/เขียน ส่วนระบบรหัสแท่งจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบรหัสแท่ง คือการอ่าน (สแกน) เป็นการใช้แสงในการอ่านรหัสแท่ง ซึ่งจะต้องไม่มีสิ่งกีดขวางหรือต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และสามารถอ่านได้ที่ละรหัสในระยยะใกล้ๆ แต่ระบบอาร์เอฟไอดี มีความแตกต่างโดยสามารถอ่านรหัสจากป้ายได้โดยไม่ต้องเห็นป้าย หรือป้ายนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุ และไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวเส้นตรงกับคลื่น เพียงอยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านป้ายในระบบอาร์เอฟไอดี ยังสามารถอ่านได้ที่หลายๆ ป้ายในเวลาเดียวกัน โดยระยะในการอ่านข้อมูลได้ไกลกว่าระบบรหัสแท่งอีกด้วยส่วนที่สาม ได้แก่ ระบบประยุกต์ใช้งานทั้งนี้รวมถึงระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ประยุกต์ใช้งาน หรือระบบฐานข้อมูล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบการใช้งานที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบข้อมูลสินค้า ระบบบริหารงานบุคคล ฯลฯ

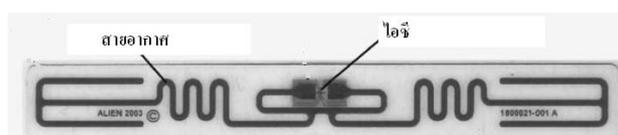


ภาพที่ 2 ระบบอาร์เอฟไอดี

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

1.3.1 ป้าย (Tag/Transponders)

โครงสร้างภายในของป้ายจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังภาพที่ 3 ได้แก่ ส่วนของ ไมโครชิป (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุเช่นรหัสสินค้า และขนาดของตัว และขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป โดยทั่วไปตัวป้ายอาจอยู่ในรูปแบบที่เป็นกระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่างๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาใช้ผลิต และมีหลายรูปแบบ เช่น บัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล หรือป้าย เป็นต้น ทั้งนี้เราสามารถแบ่งป้ายที่มีใช้งานกันอยู่ได้เป็น 3 ชนิด ใหญ่ๆ ได้แก่ ป้ายแบบแอสทิฟ ป้ายแบบกึ่งแอสทิฟ และ ป้ายแบบแอ็กทิฟ โดยแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงาน



ภาพที่ 3 องค์ประกอบทั่วไปของป้าย

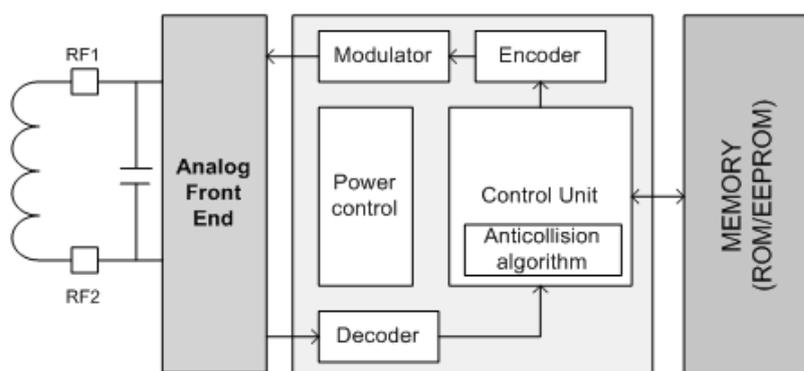
นอกจากการแบ่งจากชนิดที่ว่ามาแล้ว สามารถที่จะแบ่งประเภทของป้ายจากรูปแบบการอ่านและหรือบันทึกข้อมูลได้เป็น 3 แบบ คือ ป้ายชนิดที่สามารถถูกอ่านและเขียนข้อมูลได้หลายครั้ง (Read-Write) ป้ายชนิดที่เขียนได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นแต่อ่านได้อย่างหลายครั้ง (Write-Once Read-Many หรือ WORM) และป้ายชนิดอ่านได้เพียงอย่างเดียว (Read-Only) หรือเรายังสามารถแบ่งชนิดของป้ายตามความถี่ของการใช้งาน เช่นป้ายย่านความถี่ต่ำ (LF) 125-134 กิโลเฮิร์ตซ์ ป้ายย่านความถี่สูง (HF) 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ ป้ายย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) 433 และ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และป้ายย่านไมโครเวฟ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์

ก. ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอสทิฟ

ป้ายชนิดนี้ทำงานได้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ เพราะภายในป้ายจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ระยะอ่านสูงสุดประมาณ 1 เมตร ขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่

วิทยุที่ใช้ โดยปกติป้ายชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก โดยทั่วไปประมาณ 16 - 1,024 ไบต์ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ราคาต่อหน่วยต่ำ

ไมโครชิปหรือไอซีของป้ายชนิดแอสซิมป์ที่มีการผลิตออกมาจะมีทั้งขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แบบแท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปโครงสร้างภายในส่วนที่เป็นไอซีของป้ายนั้นก็จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนของควบคุมการทำงานของภาครับส่งสัญญาณวิทยุ (Analog Front-End) ส่วนควบคุมภาคลอจิก (Digital Control Unit) ส่วนของหน่วยความจำ (Memory) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สถาปัตยกรรมภายในไมโครชิปของป้ายแบบแอสซิมป์

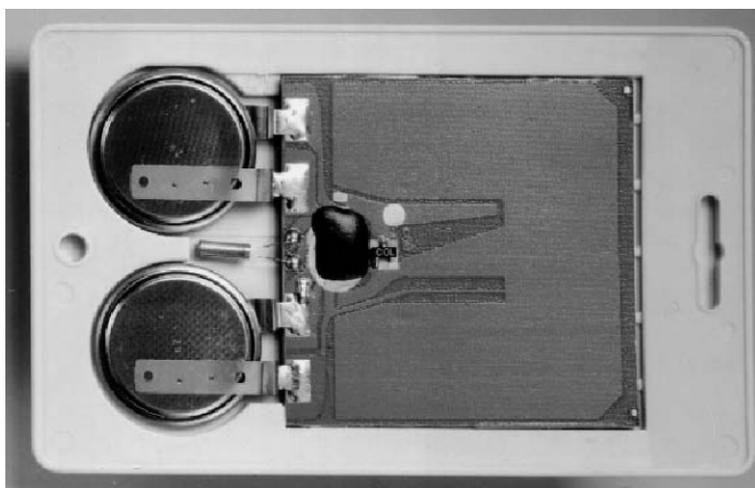
ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

ข. ป้ายอาร์เอฟไอดีแบบกึ่งแอสซิมป์

ป้ายชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ระยะไกลกว่าป้ายแบบแอสซิมป์ ป้ายเองไม่สามารถเป็นผู้เริ่มต้นส่งสัญญาณการสื่อสารได้ ตัวป้ายเองจะรอรับสัญญาณกระตุ้นให้ทำงานจากเครื่องอ่านได้อย่างเดียวซึ่ง โดยมีส่วนของแบตเตอรี่ประกอบอยู่ภายในด้วยซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ไกลมากขึ้นเมื่อเทียบกับป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแอสซิมป์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากมีราคาที่ยังสูงจึงทำให้ความนิยมลดลงไป

ค. ป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแอ็กทิฟ

ป้ายชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก ดังภาพที่ 5 เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน โดยป้ายแบบนี้สามารถมีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่ได้ถึง 1 เมกะไบต์ และสามารถอ่านได้ในระยะไกลสูงสุดประมาณ 100 เมตร (ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ [เนคเทค] , 2549) ข้อเสียของป้ายแบบนี้คือ มีราคาต่อหน่วยสูง มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีอายุการใช้งานที่จำกัดตามอายุของแบตเตอรี่ซึ่งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 3 - 7 ปี (เนคเทค, 2549)

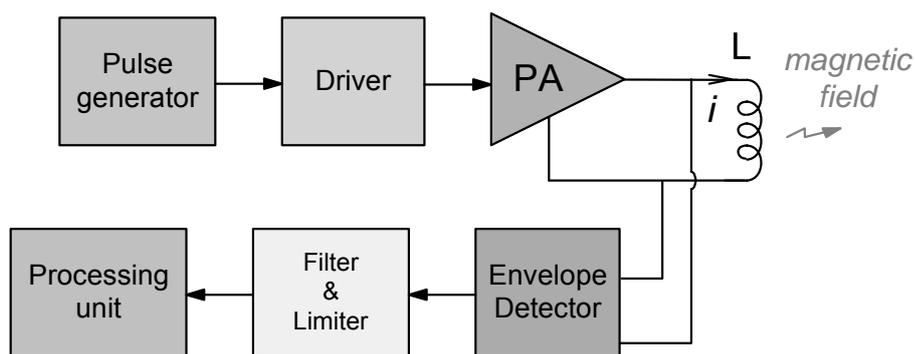


ภาพที่ 5 ป้ายแบบแอ็กทิฟ

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

1.3.2 เครื่องอ่าน (Reader)

โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านก็คือ การเชื่อมต่อเพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูลลงในป้าย ด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ภายในเครื่องอ่านจะประกอบด้วยเสาอากาศที่ทำจากขดลวดทองแดง เพื่อใช้รับส่งสัญญาณ ภาครับและภาคส่งสัญญาณวิทยุ และวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูลซึ่งมักจะเป็นวงจรจำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างภายในเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

เครื่องอ่านจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- ก. ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ (Transceiver)
- ข. ภาครสร้างสัญญาณพาหะ (Carrier)
- ค. ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna)
- ง. วงจรจูนสัญญาณ (Tuner)
- จ. หน่วยประมวลผลข้อมูล และภาคติดต่อกับคอมพิวเตอร์ (Processing Unit)

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (decoding) ที่ได้รับ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะ ขนาด และ รูปร่างของเครื่องอ่านจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็ก ดังภาพที่ 7 หรือ แบบติดผนัง ดังภาพที่ 8 จนไปถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) ดังภาพที่ 9 เป็นต้น



ภาพที่ 7 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำ แบบพกพา

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)



ภาพที่ 8 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำ แบบติดตั้ง

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)



ภาพที่ 9 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง แบบประตู

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

1.4 ระยะในการรับ-ส่งข้อมูล

ระยะในการอ่านของเครื่องอ่าน จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ กำลังส่งของเครื่องอ่าน และชนิดของป้าย ในการใช้งานทั่วไปป้ายความถี่ต่ำ (LF) มีระยะในการอ่านประมาณ 10-30 เซนติเมตร ความถี่สูง (HF) มีระยะในการอ่านประมาณ 15-100 เซนติเมตร ป้ายชนิดความถี่สูงยิ่ง (UHF) มีระยะในการอ่านถึง 15 เมตร หรือถ้าเป็นแบบแอ็กทิฟ จะอ่านได้ถึง 100 เมตร (เนคเทค, 2006)

1.5 การป้องกันการชนกันของข้อมูล (Anti-collision)

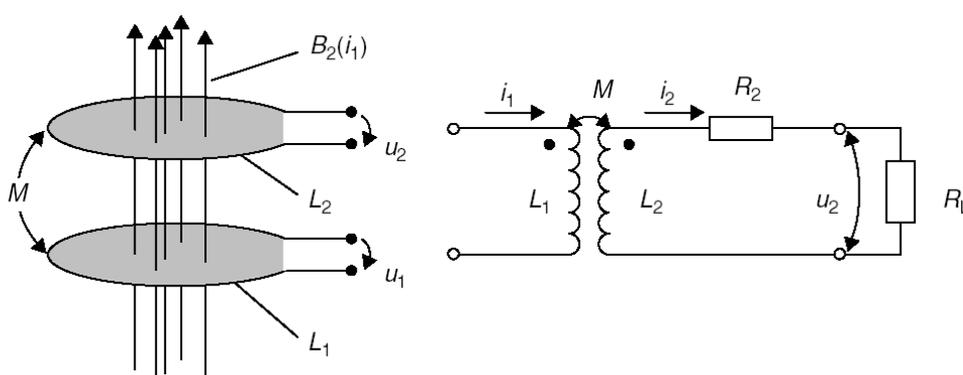
เมื่อมีป้ายหลายๆ อันเข้ามาอยู่ใกล้เครื่องอ่าน เมื่อป้ายมีพลังงานเพียงพอ ป้ายแต่ละอัน จะพยายามส่งข้อมูลของตัวเองมาที่เครื่องอ่านพร้อมๆ กัน ทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถแยกแยะข้อมูลที่ส่งมาได้ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การชนกันของข้อมูล (Collision) วิธีการแก้ไขโดยการทำการเพิ่มฟังก์ชันป้องกันการชนกันบนป้ายและเครื่องอ่าน (Anti-collision) ซึ่งจะมีหลายเทคนิค เช่น จัดคิวการอ่านป้ายโดยทำเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อป้ายโดนอ่านแล้วจะไม่มี การอ่านซ้ำอีก เช่น เทคนิค SDMA : Space Division Multiple Access TDMA, FDMA, CDMA หรือเทคนิคขั้นสูง จะใช้ FTDMA และการกระโดดความถี่ (frequency hopping) เข้าช่วย

1.6 หลักการการทำงานของอาร์เอฟไอดี

1.6.1 การทำงานของป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟ

ป้ายชนิดนี้ทำงานได้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ โดยทั่วไปการทำงานของป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟ ในย่านความถี่ต่ำและสูง (LF และ HF) จะใช้หลักการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ดังภาพที่ 10 ซึ่งเกิดจากการอยู่ใกล้กันขดลวดจากเครื่องอ่านที่กำลังทำงานและสายอากาศของป้าย ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากเครื่องอ่านไปยังไมโครชิปในป้ายผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อไมโครชิปได้รับพลังงานก็จะทำงานตามลักษณะเฉพาะของข้อมูลรหัสประจำตัว ปฏิกริยาของไมโครชิปดังกล่าวเครื่องอ่านจะรับรู้ได้ผ่านสนามแม่เหล็กและจะทำการตีความเป็นข้อมูลดิจิทัลแสดงถึงรหัสประจำตัว ที่ส่งมาจากป้ายได้ ลักษณะเงื่อนไขในการทำการเหนี่ยวนำแบบชักราทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก โดยทั่วไประยะอ่านสูงสุดจะประมาณ 1 เมตรขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้

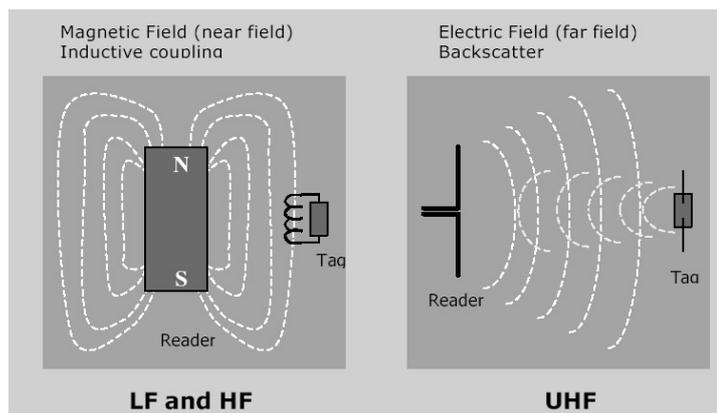
โดยปกติป้ายชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก โดยทั่วไปประมาณ 16 -1,024 ไบต์ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ราคาต่อหน่วยต่ำ ไมโครชิปหรือไอซีของป้าย ชนิดพาสซีฟที่มีการผลิตออกมาจะมีทั้งขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แบบแท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดการใช้งานที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 10 สนามแม่เหล็กจากกระบวนการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

ส่วนในระบบความถี่สูงยิ่ง (UHF) แทนที่จะใช้การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้การ คู่ควมแบบแผ่กระจาย (Propagation coupling) ดังภาพที่ 11 โดยที่สายอากาศของเครื่องอ่านจะทำการส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปคลื่นวิทยุออกมา ซึ่งเมื่อป้ายได้รับสัญญาณผ่านสายอากาศของตน ป้ายก็จะทำงานโดยการสะท้อนกลับคลื่นที่ได้รับซึ่งถูกปรับค่าตามรหัสประจำตัวของตนไปยังเครื่องอ่าน (backscattering)



ภาพที่ 11 แสดงหลักการการทำงานของอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ต่างๆ

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

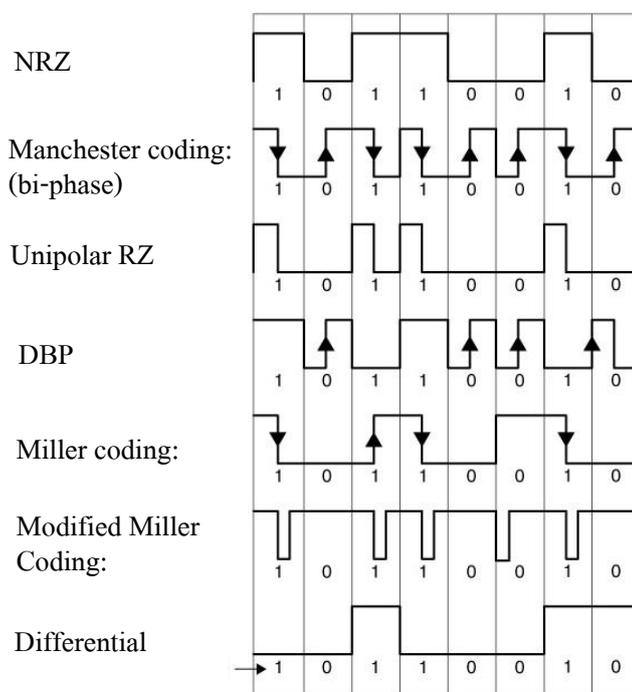
ทั้งนี้การทำงานในย่านความถี่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติการทะลวงต่างกัน รวมทั้งประสิทธิภาพโดยรวมจะขึ้นกับเงื่อนไขอื่นๆ ด้วยเช่น ขนาดของสายอากาศ หรือสัญญาณรบกวน อีกด้วย

1.6.2 การทำงานของป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแอ็กทีฟ

ป้ายชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน โดยหลักใหญ่อาจสามารถแบ่งตามหลักการทางานได้เป็น ทรานสปอนเดอร์แบบแอ็กทีฟ ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลออกก็ต่อเมื่อได้รับสัญญาณจากเครื่องอ่านและแบบเครื่องบอกตำแหน่งหรือเบคอน (Beacon) ซึ่งสัญญาณจะถูกปล่อยออกมาเป็นระยะๆ ตลอดเวลา การใช้งานของป้ายหรือทรานสปอนเดอร์แบบแอ็กทีฟนั้น อาจพบได้ในระบบเช่น ระบบจ่ายเงินในทางด่วน หรือด่านตรวจ ขณะที่เบคอนอาจพบได้ในระบบที่ต้องการการบ่งชี้พิกัดแบบเวลาจริง (Real-time locating system, RTLS) เช่นการจัดการการขนส่งสินค้า เป็นต้น

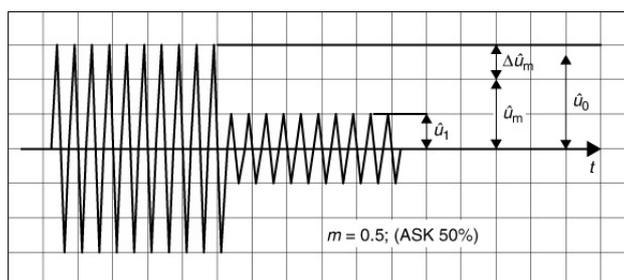
1.6.3 หลักการและเทคนิคเบื้องต้นในการรับและส่งข้อมูลระหว่างป้ายและเครื่องอ่าน

กระบวนการส่งสัญญาณระหว่างอาร์เอฟไอดีและเครื่องอ่านโดยทั่วไป เป็นไปตามกระบวนการทางด้านการสื่อสารระบบดิจิทัล นั่นคือ การเตรียมข้อมูลดิจิทัลที่จะส่งผ่าน โดยการเข้ารหัสให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการส่งผ่านช่องสัญญาณ (channel) คำว่าเหมาะสม หมายถึงว่าสัญญาณมีโอกาสจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน (noise) โดยมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งวิธีการเข้ารหัสนั้นมีได้หลายแบบโดยการเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่จะส่งผ่าน ตัวอย่างเทคนิคการเข้ารหัส เช่น การเข้ารหัสสัญญาณแบบ NRZ การเข้ารหัสแบบ Manchester การเข้ารหัสแบบ Miller การเข้ารหัสแบบ Differential ดังภาพที่ 12 เป็นต้น



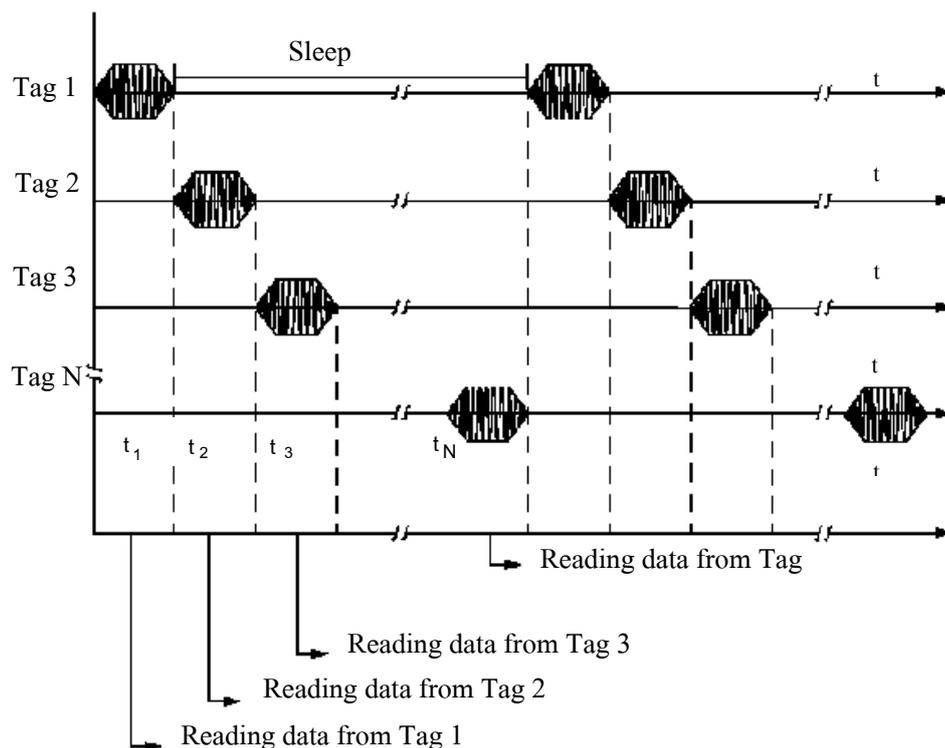
ภาพที่ 12 ตัวอย่างการเข้ารหัส แบบต่างๆ

ซึ่งหลังจากการเข้ารหัสสัญญาณแล้ว สัญญาณจะถูกทำการกล้ำสัญญาณ (Modulation) กับคลื่นพาหะย่านที่สูงกว่าเพื่อทำการส่งรับข้อมูลในย่านนั้นๆ การกล้ำสัญญาณ หมายถึงการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ของคลื่นพาหะซึ่งเป็นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แอมพลิจูด เฟส หรือ ความถี่ ตามค่าของข้อมูลที่จะส่ง ตัวอย่างเช่น ในการกล้ำสัญญาณแบบ ASK (Amplitude Shift Keying) ดังภาพที่ 13 ค่าแอมพลิจูดของคลื่นพาหะจะถูกเปลี่ยนอยู่ระหว่างค่าสองค่าซึ่งขึ้นกับค่าไบนารีของสัญญาณที่ถูกเข้ารหัส



ภาพที่ 13 การกล้ำสัญญาณแบบ ASK (Amplitude Shift Keying)

นอกจากนี้ ข้อดีอีกส่วนหนึ่งของระบบอาร์เอฟไอดี คือการอ่านข้อมูลจากป้ายได้หลายๆ ป้ายในเวลาเดียวกัน โดยระบบการป้องกันการชนกันของสัญญาณข้อมูล (Anti-Collision) ซึ่งจะทำให้การอ่านข้อมูลของป้ายจำนวนมากทำได้อย่างรวดเร็วพร้อมๆ กัน ตัวอย่างการทำการป้องกันการชนกันเช่นการใช้เทคนิค TDMA (Time Division Multiple Access) ซึ่ง จะเป็นการจัดลำดับการอ่านค่าจากป้ายในเวลาที่แตกต่างกันไปทำให้สามารถอ่านได้ครบทุกป้าย ดังภาพที่ 14 เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นอาร์เอฟไอดียังมีกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับ เช่นการทำผลรวมตรวจสอบ เป็นต้น



ภาพที่ 14 ตัวอย่างของอัลกอริทึมในการป้องกันการชนของข้อมูลในป้าย

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

1.7 มาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอดี

โดยมาตรฐานระหว่างประเทศสำหรับการใช้งานอาร์เอฟไอดี มีอยู่ 2 หน่วยงานหลัก ได้แก่ International Organization of Standard หรือ ISO และ EPC Global โดยที่มาตรฐานของอาร์เอฟไอดี มีการกำหนดไว้ 4 ด้านดังนี้

- ก. มาตรฐานด้านเทคโนโลยี (Technology)
- ข. มาตรฐานรูปแบบของข้อมูล (Data format)
- ค. มาตรฐานวิธีการทดสอบ (Conformance)
- ง. มาตรฐานการใช้งาน (Applications)

ทั้งนี้ทั้งสองหน่วยงานได้มีการกำหนดมาตรฐานต่างๆ ดังตารางที่ 1

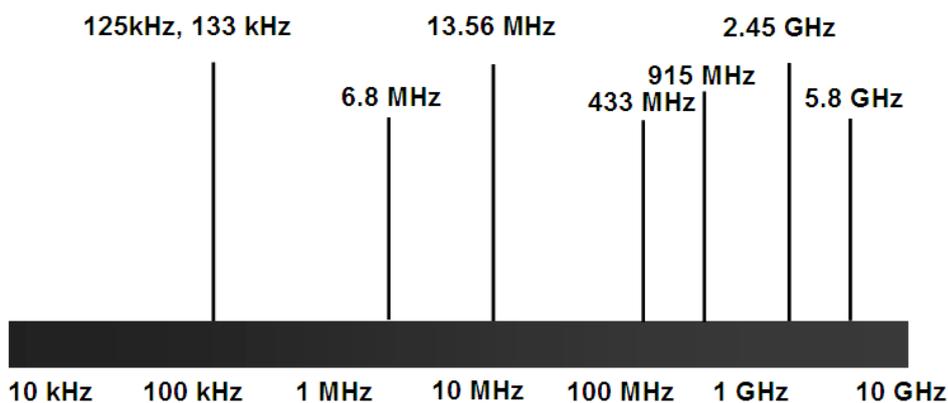
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบมาตรฐานระหว่าง ISO/IEC และ EPC

	ISO/IEC	EPC	
Technology	Part 2 - < 135 kHz	Class I-V	
	Part 3 - 13.56 MHz	Class 0/Class I:	
	Part 4 - 2450 MHz	Class II tags:	
	Part 6 - 860 - 960 MHz	Class III tags:	
	Part 7 - 433.92 MHz	Class IV tags:	
	(active)	Class V tags :	
Data protocol	ISO/IEC 15418 - Application Identifiers & Data Identifiers	EPC Class 0 - 64 bits Class 1 - 96 bits	
	ISO/IEC 15434 - Syntax	Class 1 G2 - 128/256 bits	
	ISO/IEC 15459 - Transport License Plate	Class 2 - Class 1 with larger memory and	
	ISO/IEC 15961 - Data Protocol: Application Interface	read/write Class 3 - Class 2 with sensors (semi-passive)	
	ISO/IEC 15962 - Data Protocol: Data Encoding Rules and Logical Memory Functions	Class 4 – passive tags	
	Testing	ISO/IEC 18047 - RFID device conformance test methods	-

1.8 ย่านความถี่ในการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดี

ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบอาร์เอฟไอดี จะอยู่ในย่านความถี่ พลเรื่อน ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงการแพทย์ วิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไป โดยมี 4 ย่านความถี่ใช้งาน คือสำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบอาร์เอฟไอดี อาจแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านใหญ่ๆ ดังแสดงในภาพที่ 15 (เนคเทค, 2549) ได้แก่

- ก. ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) ต่ำกว่า 150 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)
- ข. ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) 13.56/27.125 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)
- ค. ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) 433/868/915 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)
- ง. ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) 2.45/5.8 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz)



ภาพที่ 15 แสดงความถี่ย่านที่ระบบอาร์เอฟไอดีถูกใช้งาน

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

ถ้าเปรียบเทียบคลื่นความถี่ที่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่ในด้านของระยะการอ่าน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบระยะการอ่านแต่ละคลื่นความถี่

ความถี่	ระยะที่อ่านได้
125 – 134 กิโลเฮิร์ตซ์	น้อยกว่า 1 เมตร (10 เซนติเมตร)
13.56 เมกะเฮิร์ตซ์	น้อยกว่า 1.5 เมตร (~1 เมตร)
860 – 960 เมกะเฮิร์ตซ์	2 – 5 เมตร (ป้ายแบบแพสซีฟ) 1 – 100 เมตร (ป้ายแบบแอ็กทีฟ)
2.45 กิกะเฮิร์ตซ์	น้อยกว่า 1 เมตร (ป้ายแบบแพสซีฟ) 1 – 15 เมตร (ป้ายแบบแอ็กทีฟ)

ในการใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับงานที่มีระยะการสื่อสาร ข้อมูลในระยะใกล้ โดยย่านความถี่ต่ำ (LF) 125 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 134 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งนิยมใช้สำหรับควบคุมการเข้าออกสถานที่และการลงทะเบียนสัตว์ ส่วนย่านความถี่สูง (HF) 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ นิยมใช้ในบัตรเอนกประสงค์แบบไร้สัมผัสและหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสาร ข้อมูลในระยะไกล (UHF ระยะอ่านประมาณ 2-5 เมตร) เช่น ระบบเก็บค่าบริการทางด่วน ระบบขนส่งสินค้า เป็นต้น

ตารางที่ 3 ตารางแสดงข้อแตกต่างของอาร์เอฟไอดี ระบบต่างๆ

พารามิเตอร์	ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง	ความถี่สูงยิ่ง	ไมโครเวฟ
ความถี่	125-134 กิโลเฮิร์ตซ์	13.56 เมกะเฮิร์ตซ์	868-915 เมกะเฮิร์ตซ์	2.45-5.8 กิกะเฮิร์ตซ์
ส่วนแบ่งตลาด	74%	17%	6%	3%
ระยะในการอ่าน	ถึง 1.2 เมตร	0.7-1.2 เมตร	> 4 เมตร	> 15 เมตร
ความเร็วในการอ่าน	ไม่เร็วมาก	เร็วมาก	เร็ว	เร็วมาก
สถานะที่ขึ้น	ไม่มีผลกระทบ	ไม่มีผลกระทบ	มีผลกระทบ	มีผลกระทบ

2. เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง

เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยส่วนใหญ่ จะแบ่งส่วนประกอบที่สำคัญ ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนภาคควบคุม ส่วนภาคจัดการคลื่นความถี่ และส่วนภาคสายอากาศ โดย ส่วนภาคควบคุม และส่วนภาคจัดการคลื่นความถี่นั้นจะรวมอยู่ในตัวเครื่องเดียวกัน ส่วนภาคสายอากาศนั้น ถ้าเป็นเครื่องอ่านที่มีขนาดใหญ่ และต้องการอ่านข้อมูลได้ปริมาณมากๆ ในเวลาพร้อมๆ กัน หรือ ต้องการเพิ่มจุดการอ่านข้อมูลมากๆ จะแยกภาคสายอากาศออกมาจากตัวเครื่องอ่าน ซึ่งสามารถต่อสายอากาศเพิ่มได้ตั้งแต่ 2 – 8 ตัว ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน และยังสามารถเปลี่ยนชนิดของสายอากาศได้ตามความต้องการตามการนำไปใช้งานต่างๆ แต่ถ้าเป็นเครื่องอ่านขนาดเล็กหรือแบบพกพาได้ โดยส่วนใหญ่จะรวมภาคสายอากาศไว้ในตัวเครื่องอ่านด้วยกันและมีภาคสายอากาศเพียง 1 ตัวเท่านั้น

2.1 ภาคควบคุม

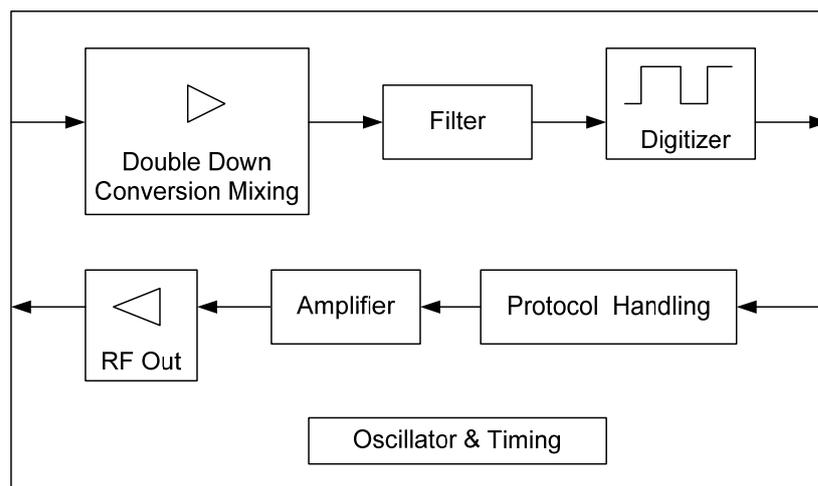
ภาคควบคุม เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องอ่านให้มีขั้นตอนการทำงานที่ถูกต้อง ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการทำงานของเครื่องอ่านนั้นๆ โดยผ่านการควบคุมจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า “ไมโครคอนโทรลเลอร์” ซึ่งโดยส่วนใหญ่ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันนั้น จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM (Advanced RISC Machine) เป็นส่วนใหญ่ (Chen Ying et al, 2008) ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลขนาด 32 บิต ซึ่งมีพื้นที่ในการเก็บหน่วยความจำโปรแกรม (Flash) สูง ซึ่งสามารถรองรับการทำงานของโปรแกรม (Firmware) ขนาดใหญ่และซับซ้อนได้ และยังสามารถทำงานด้วยความถี่ที่สูง ซึ่งจะทำให้สามารถประมวลได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ในส่วนภาคควบคุมยังทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณการทำงานต่างๆ ไปให้ภาคจัดการคลื่นความถี่สร้างสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุออกมาตามโปรโตคอลต่างๆ ที่ต้องการใช้งาน และต้องถอดรหัสสัญญาณตามโปรโตคอลต่างๆ ที่ได้รับมาจากภาคจัดการคลื่นความถี่ และหน้าที่สุดท้ายของภาคควบคุม คือ การควบคุมสัญญาณเข้า – ออกต่างๆ ผ่านเครื่องอ่าน เช่น หน่วยแสดงผล LCD, LED หน่วยรับ-ส่งข้อมูล RS-232, TCP/IP และหน่วยรับ-ส่งข้อมูลผ่านทาง I/O พอร์ต (Input / Output port)

โดยในส่วนภาคควบคุมของงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ชุดพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่งของบริษัท Austria Microsystem จำกัด รุ่น AS3990

2.2 ภาคจัดการคลื่นความถี่

ในส่วนของภาคจัดการคลื่นความถี่นั้น จะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุออกมาตามโปรโตคอลที่กำหนดไว้จากภาคควบคุม ซึ่งจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่นั้นออกไปยังภาคสายอากาศ และยังทำหน้าที่ในการรับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจากภาคสายอากาศแล้วทำการแปลงสัญญาณที่ได้รับมาเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งไปให้หน่วยควบคุมประมวลผลต่อไป ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 16

โดยในส่วนภาคจัดการคลื่นความถี่ของงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ชุดพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่งของบริษัท Austria Microsystem จำกัด รุ่น AS3990



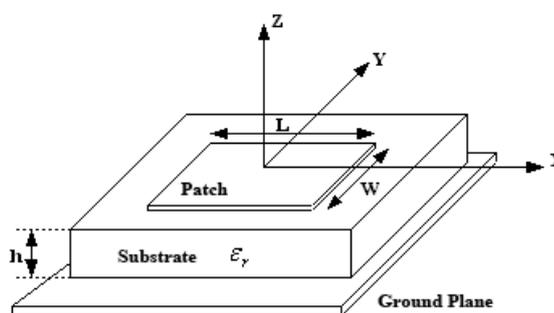
ภาพที่ 16 แสดงรายละเอียดในภาคจัดการคลื่นความถี่วิทยุ

2.3 ภาคสายอากาศ

สายอากาศทำหน้าที่ในการรับ-ส่งสัญญาณวิทยุให้กับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี โดยในปัจจุบันนี้ จะมีอยู่ด้วยกันสายอากาศอยู่หลายชนิด เช่น สายอากาศไดโพล สายอากาศยาگی-อูคะ และสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna) เป็นต้น โดยที่หนึ่งในสายอากาศที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน คือสายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะแบน และมีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการประดิษฐ์ในลักษณะที่เป็นแผงสายอากาศและสามารถ

วางแผนกับพื้นผิวต่างๆได้ดี มีราคาถูกสามารถสร้างได้ง่ายโดยอาศัยกรรมวิธีการทำแผ่นวงจรพิมพ์ โดยประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ทั้งในส่วนของขนาด รูปร่างของแผ่นตัวนำ และวิธีการป้อนกำลังที่ใช้

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna) คือสายอากาศซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นโลหะวางติดอยู่บนตัวกลางซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกเหนือระนาบของกราวด์ ในบางครั้งอาจจะมีวัสดุหุ้มห่อเพื่อใช้ป้องกันสายอากาศได้



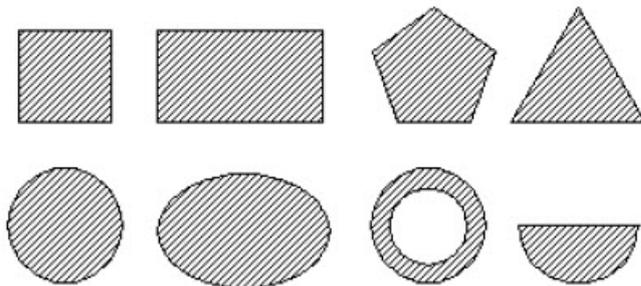
ภาพที่ 17 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างโดยทั่วไปจะเป็นดังภาพที่ 17 พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในตัวกลางบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบๆ กับผิวโลหะด้านล่าง ความหนาของตัวกลางมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ($0.003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$) (Balanis, 2005) ความกว้างของแผ่นโลหะนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวสตริปเองนั้น ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางหรือแบบฟิล์มหนาในการสร้างสตริป

2.3.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์

สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ ประกอบไปด้วยแพทช์ตัวนำวางติดอยู่บนตัวกลางซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกเหนือระนาบกราวด์ ส่วนรูปร่างของแพทช์มีหลากหลาย แบบตามภาพที่ 18



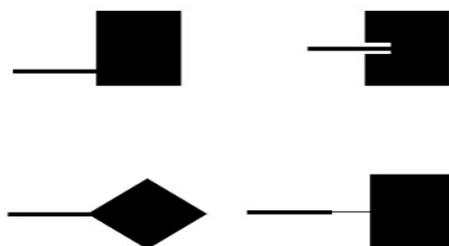
ภาพที่ 18 รูปแบบของแพทช์ของสายอากาศไมโครสตริป

2.3.3 รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป

การป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น การป้อนสัญญาณโดยสายส่งไมโครสตริป และการป้อนสัญญาณโดยสายโคแอกเซียล เป็นต้น

ก. การป้อนสัญญาณโดยสายส่งไมโครสตริป

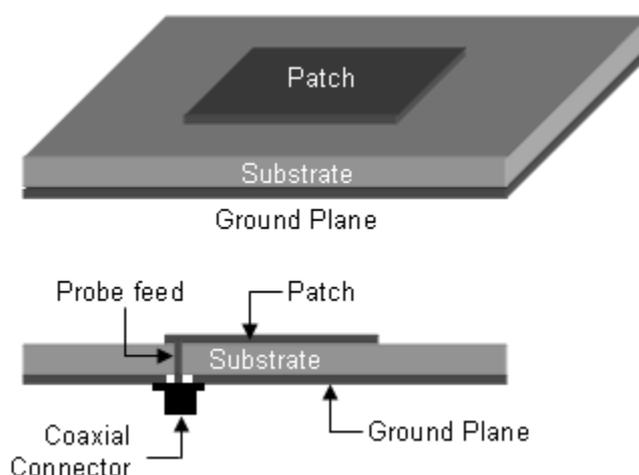
เป็นการป้อนสัญญาณให้สายอากาศไมโครสตริปด้วยสายส่งไมโครสตริป การป้อนแบบนี้เป็นแบบที่จัดสร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย โดยวิธีการป้อนสัญญาณทำได้หลายแบบ ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การป้อนสายอากาศโดยสายส่งไมโครสตริป

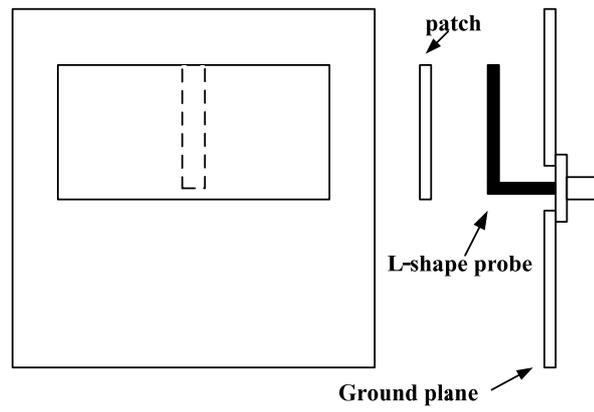
ข. การป้อนสัญญาณ โดยสายโคแอกเซียล (coaxial feed)

เป็นการป้อนสัญญาณโดยใช้สายโคแอกเซียล (coaxial) หรือหัวต่อ (connector) สอดทะลุจากด้านหลังมาแพทช์ หรือบางครั้งเรียกว่า โพรบฟีด (probe feed) โดยที่แกนในของสายโคแอกเซียลจะต่ออยู่กับแพทช์ และตัวนำด้านนอกหรือชิลด์จะต่ออยู่กับกราวด์แสดงดังภาพที่ 20 โดยการป้อนสัญญาณแบบนี้สร้างได้ง่าย และมีการรบกวนจากวงจรป้อนสัญญาณน้อยมาก

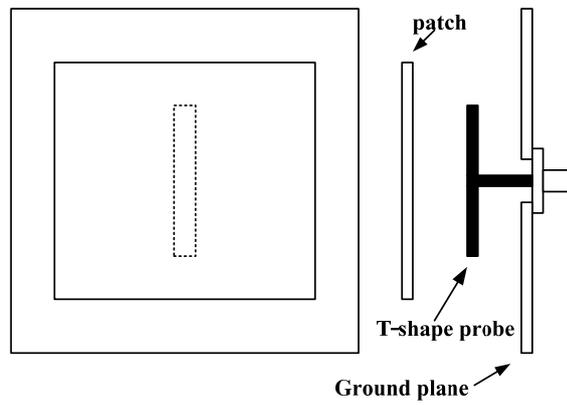


ภาพที่ 20 การป้อนสัญญาณแบบโพรบ

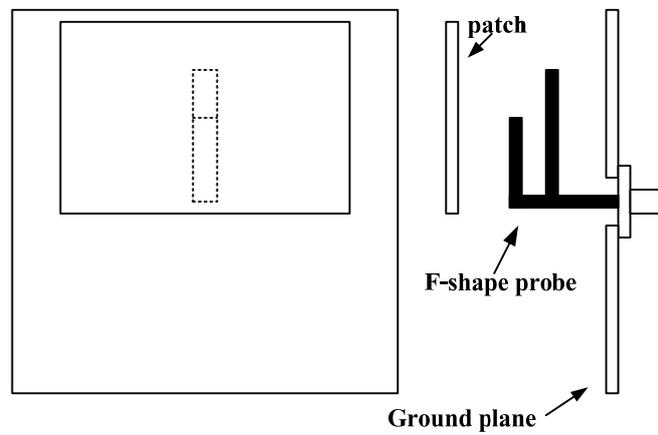
ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีการนำเทคนิคของการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปและการป้อนสัญญาณโดยสายโคแอกเซียล (coaxial feed) มารวมกันทำให้เกิดรูปแบบของการป้อนสัญญาณใหม่ๆเข้ามา เช่น การป้อนสัญญาณแบบ L-probe (MAK C.L. et al, 2000) ดังแสดงดังภาพที่ 21 T-probe (GUO Y.X. et al, 2001) ดังแสดงดังภาพที่ 22 และ F-probe (OOI B.L. et al, 2003) ดังแสดงดังภาพที่ 23 เป็นต้น



ภาพที่ 21 การป้อนสัญญาณแบบ L-probe



ภาพที่ 22 การป้อนสัญญาณแบบ T-probe



ภาพที่ 23 การป้อนสัญญาณแบบ F-probe

2.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น แบบรูปการแผ่พลังงาน, อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีด้วยกันหลายรูปแบบ ดังนี้

ก. การวิเคราะห์โดยใช้สายส่งสัญญาณ (Transmission line model)

การวิเคราะห์โดยใช้สายส่งสัญญาณ (Demeryd, 1976) ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศที่มีลักษณะสี่เหลี่ยม โดยแพทช์ที่มีความกว้าง (W) และความยาว (L) ประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นประสิทธิผล ดังนั้นช่วงหัวและท้ายของแพทช์จะมีลักษณะของสายส่งที่มีความยาว 180 องศาที่ปลายของแพทช์จะมีลักษณะเป็นร่อง และสนามไฟฟ้าแพร่กระจายออกมาจากร่อง โดยประมาณว่าร่องนี้วางขนานกับแผ่นกราวด์ และสนามไฟฟ้ามีทิศทางที่ตั้งฉากกับแผ่นกราวด์ ในการหาสนามไฟฟ้าจากร่องทั้งสอง ทำได้โดยอาศัยสมการเวกเตอร์โพเทนเชียลของสนามไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยใช้ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

ข. การวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบของโพรง

การวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบของโพรง (Balanis, 2005) อาศัยทฤษฎีกล่องคลื่นที่มีผนังด้านข้างที่ในบริเวณที่เป็นฉนวนและเป็น Magnetic conductor วิธีนี้ต้องการคำนวณหาโหมด (Mode) ต่างๆ ของสนามไฟฟ้าในกล่องคลื่นที่เกิดจากการป้อนพลังงานจากภายนอก

ค. การวิเคราะห์โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข เป็นวิธีการที่สามารถใช้วิเคราะห์สายอากาศแบบต่างๆ ได้ โดยมีอยู่หลายแบบมากแต่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบคือ ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element) และวิธีของโมเมนต์ (Moment of method) โดยทั้งสองวิธีได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปอย่างแพร่หลาย สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีของโมเมนต์ ซึ่งมีโปรแกรมสำเร็จรูปมากมายที่ใช้ในการออกแบบและ

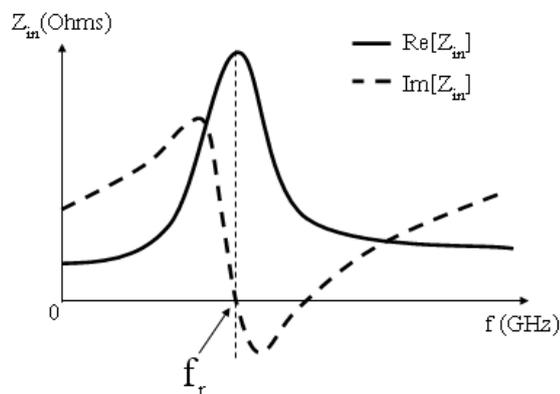
วิเคราะห์สายอากาศ เช่น โปรแกรม CST ของ Spatial Corp. Inc., โปรแกรม Ensemble ของ Ansoft Corporation และ โปรแกรม Sonnet ของ Sonnet Software Inc.

2.3.5 ค่าคุณสมบัติของสายอากาศ

สำหรับค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่สำคัญก็มี ความถี่เรโซแนนซ์, อิมพีแดนซ์ด้านเข้า, แบนด์วิดท์แบบอิมพีแดนซ์ และรูปแบบการแผ่กระจายของคลื่น

ก. ความถี่เรโซแนนซ์

ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ (Basilio *et al.*, 2001) คือความถี่ที่ $\text{Re}[Z_{in}]$ มีค่าสูงสุด และ $\text{Im}[Z_{in}]$ มีค่าประมาณศูนย์ เมื่อ $\text{Re}[Z_{in}]$ คือส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า และ $\text{Im}[Z_{in}]$ คือส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ดังแสดงในภาพที่ 24 ซึ่งจะเป็นความถี่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำสายอากาศนั้นๆ ไปใช้งาน



ภาพที่ 24 แสดงการหาค่าความถี่เรโซแนนซ์

ข. อิมพีแดนซ์ด้านเข้า

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะขึ้นกับตำแหน่งการป้อนสัญญาณ (Basilio *et al.*, 2001) ดังนั้นสามารถเลือกตำแหน่งการป้อนสัญญาณเพื่อให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ตรงกับโหลดได้

ค. ความกว้างแถบ (Bandwidth) แบบอิมพีแดนซ์

ความกว้างแถบแบบอิมพีแดนซ์ หากจากช่วงกว้างของความถี่ที่ 10 dB ของ Return loss (RL) ซึ่ง Return loss มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1 และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Γ) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2 (Pozar, 1998)

$$RL = -20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2)$$

เมื่อ Z_0 คือส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์และ Z คือส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ที่ 10 dB ของ Return loss

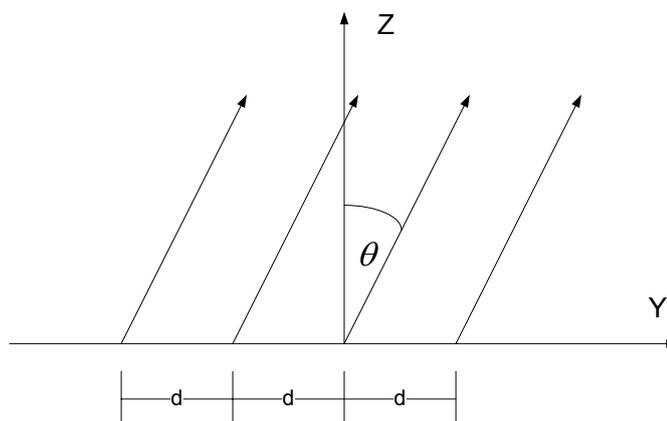
ง. แบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) คือการพล็อตแบบรูปการแผ่พลังงานเป็น 3 มิติที่สนามไกล เมื่อแอมพลิจูดของส่วนประกอบที่กำหนดสนาม E ถูกพล็อต จะเรียกว่าแบบรูปสนาม(Field pattern) หรือแบบรูปแรงดัน (Voltage pattern) เมื่อกำลังสองของแอมพลิจูดสนาม E ถูกพล็อตจะเรียกว่าแบบรูปกำลัง (Power pattern) การพล็อตแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศเป็น 3 มิติสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยพล็อตขนาดสนาม E ที่ถูกนอร์มอลไลซ์ (การทำให้ขนาดสูงสุดของสนามมีค่าเท่ากับ 0 dB) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมใดมุมหนึ่ง ในขณะที่กำหนดค่าอีกมุมไว้

3. สายอากาศแถวลำดับ

3.1 สายอากาศแถวลำดับ

โดยทั่วไปแล้วสายอากาศองค์ประกอบเดียว (Single element) จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่กว้างแต่ได้อัตราขยายที่ต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบสายอากาศที่มีค่าอัตราขยายที่สูงเพื่อให้รองรับความต้องการของการสื่อสารที่มีระยะทางไกลๆ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยเพิ่มขนาดของสายอากาศ ซึ่งการออกแบบสายอากาศให้ได้ผลตามที่ต้องการนั้นนอกเหนือจากการเพิ่มขนาดของสายอากาศแล้ว ยังมีอีกวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถเพิ่มขนาดของสายอากาศได้ คือ การสร้างสายอากาศที่มีหลายองค์ประกอบ โดยอาศัยการจัดเรียงสายอากาศตามลักษณะทางไฟฟ้าและทางเรขาคณิต สายอากาศที่ถูกจัดเรียงขึ้นใหม่จากสายอากาศหลายๆ องค์ประกอบ (Multi-element) จะถูกเรียกว่า “แถวลำดับ” (Array) ดังภาพที่ 25 โดยส่วนใหญ่การจัดเรียงตัวของสายอากาศแบบแถวลำดับแต่ละองค์ประกอบที่นำมาประกอบกันจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน



ภาพที่ 25 การจัดเรียงสายอากาศจำนวน N องค์ประกอบ (N -element array)

วิธีการที่ประกอบด้วยการจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับจำนวน N องค์ประกอบ (N -element array) ให้ทำการสมมติว่าส่วนทั้งหมด มีระดับสัญญาณเท่ากัน แต่ให้ส่วนตัวต่อๆ ไปมี β ที่เฟสของกระแสนำเฟสของกระแสในส่วนก่อนหน้า การจัดเรียงตามลำดับของส่วนที่เหมือนกัน (Identical element) มีขนาด (Identical magnitude) ที่เท่ากัน และมีเฟสที่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ (Progressive phase) จะเรียกว่า “ uniform array ” ในส่วนของตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) ได้จากการพิจารณาส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด (Point source) ค่าสนามทั้งหมดหาได้จากการ

คุณตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) ของแหล่งกำเนิดที่แผ่กระจายคลื่นได้ทุกทิศทาง (Isotropic source) เข้ากับค่าสนามของสายอากาศองค์ประกอบเดียว (Single element) ดังสมการที่ 3 ซึ่งรูปแบบการคูณนี้ใช้ได้กับ สายอากาศที่มีแต่ละองค์ประกอบเหมือนกันเท่านั้น (Identical element) และค่าตัวประกอบแถวลำดับสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$E_T = [E_S] \times [AF] \quad (3)$$

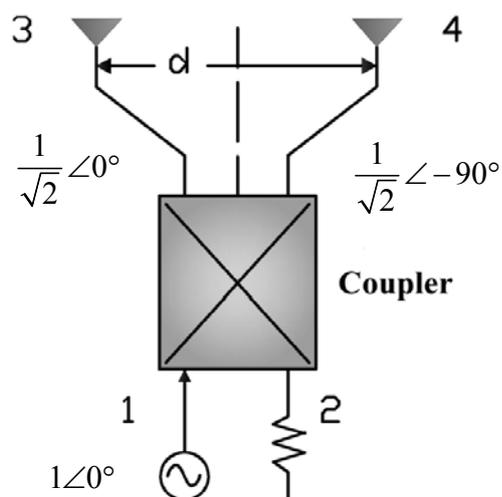
E_T	คือ	ค่าสนามไฟฟ้ารวม
E_S	คือ	ค่าสนามไฟฟ้าของแต่ละองค์ประกอบ
AF	คือ	ตัวประกอบแถวลำดับ

$$(AF)_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right] ; \psi = kd\sin\theta + \beta \quad (4)$$

N	คือ	จำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ
d	คือ	ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบ
λ	คือ	ค่าความยาวคลื่น
k	คือ	ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น
β	คือ	ค่าความต่างเฟสระหว่างแต่ละองค์ประกอบ

3.2 คัปเปอร์ (Coupler)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการกำหนดทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเมื่อป้อนอินพุตเข้าไปจะให้เอาต์พุตออกมามีขนาดลดลง $\frac{1}{\sqrt{2}}$ เมื่อเทียบกับอินพุตจำนวนสองค่าซึ่งขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ภาพที่ 26



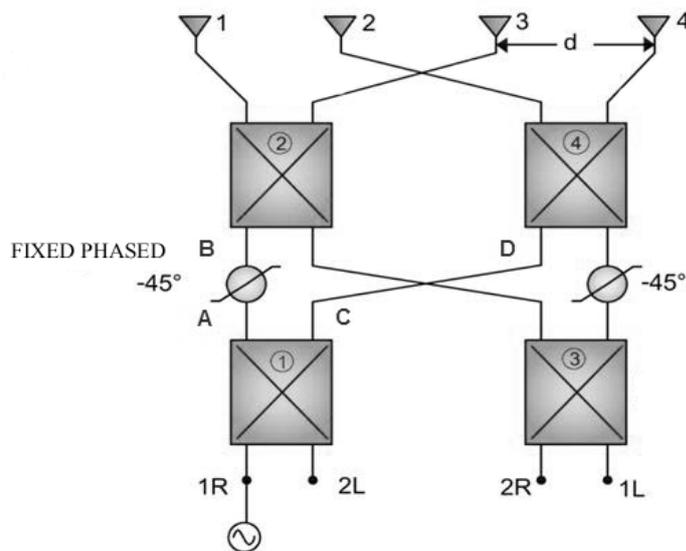
ภาพที่ 26 การทำงานของคัปเปอร์

ตารางที่ 4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากอุปกรณ์คัปเปอร์

อินพุต	เอาต์พุต(3)	เอาต์พุต(4)
1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ$
2	$\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ$

3.3 วงจรสร้างลำคลื่น

วงจรสร้างลำคลื่นเป็นวงจรที่ใช้แบ่งสัญญาณไปที่สายอากาศแต่ละอันในมีขนาดและเฟสตามที่ได้ออกแบบไว้ซึ่ง บัทเลอร์เมทริกซ์ เป็นวงจรสร้างลำคลื่นชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ อุปกรณ์คัปเปอร์ ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 วงจรบัทเลอร์เมทริกซ์ แบบ 4 ล้อคลื่น

บัทเลอร์เมทริกซ์แบบ 4 ล้อคลื่น คือวงจรสร้างล้อคลื่นที่ใช้สำหรับสายอากาศ 4 องค์ประกอบ และสามารถสร้างล้อคลื่นได้ 4 ทิศทาง ส่วนประกอบคัปเปอร์ 4 อัน วางต่อกันดังภาพที่ 27 การทำงานของวงจรเมื่อป้อนอินพุตเข้าที่พอร์ท 1R เมื่อผ่านคัปเปอร์ตัวที่ 1 แล้วจะได้เอาต์พุตเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle 0$ ที่ตำแหน่ง A เมื่อนำเอาต์พุตที่ตำแหน่ง A ไปผ่านวงจร fixed phased จะทำการเปลี่ยนเฟสไป -45° และได้เอาต์พุตที่ตำแหน่ง B เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -45$ จากนั้นนำเอาต์พุตที่ตำแหน่ง B เข้าที่ด้านอินพุตของคัปเปอร์ตัวที่ 2 จะได้เอาต์พุตที่ตำแหน่ง 1 เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -45$ และจะได้เอาต์พุตที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -135$ และที่ตำแหน่ง C มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -90$ ที่ตำแหน่ง D มีค่าเท่ากับตำแหน่ง C จากนั้นจากนั้นนำเอาต์พุตที่ตำแหน่ง D เข้าที่ด้าน อินพุตของคัปเปอร์ตัวที่ 4 จะได้เอาต์พุตที่ตำแหน่ง 2 เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -90$ และจะได้เอาต์พุตที่ตำแหน่ง 4 เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -180$ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงเอาต์พุตของบัทเลอร์เมทริกซ์ แบบ 4 ลำคลื่น เมื่อ β คือ ค่าความต่างเฟสของ
เอาต์พุต

	เอาต์พุต 1	เอาต์พุต 2	เอาต์พุต 3	เอาต์พุต 4	β
อินพุต 1R	$\frac{1}{2} \angle -45$	$\frac{1}{2} \angle -90$	$\frac{1}{2} \angle -135$	$\frac{1}{2} \angle -180$	-45
อินพุต 2L	$\frac{1}{2} \angle -135$	$\frac{1}{2} \angle 0$	$\frac{1}{2} \angle 225$	$\frac{1}{2} \angle -90$	+135
อินพุต 2R	$\frac{1}{2} \angle -90$	$\frac{1}{2} \angle 225$	$\frac{1}{2} \angle 0$	$\frac{1}{2} \angle -135$	+135
อินพุต 1L	$\frac{1}{2} \angle -180$	$\frac{1}{2} \angle -135$	$\frac{1}{2} \angle -90$	$\frac{1}{2} \angle -45$	+45

โดยในส่วนของภาคสายอากาศในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับจำนวน 4 องค์ประกอบ แต่เนื่องจากสายอากาศแถวลำดับจะมีขนาดใหญ่ จึงได้พยายามที่จะลดขนาดสายอากาศแถวลำดับลง โดยขนาดของแผ่นตัวนำในสายอากาศนั้นจะมีความกว้างประมาณเศษหนึ่งส่วนสองของความยาวคลื่น ($\lambda/2$) ของความถี่ที่นำไปใช้งาน โดยสามารถคำนวณความยาวคลื่นได้จากสมการที่ 5 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่าความยาวคลื่น (λ) จะแปรผันแบบผกผันตามความถี่ (f) และค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (ϵ_r) โดยค่าคงตัวไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุตัวกลางที่นำมาใช้

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

โดย λ คือความยาวคลื่น c คือความเร็วคลื่นแสง f คือความถี่ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ซึ่งสายอากาศโดยทั่วไปจะใช้ตัวกลางเป็นอากาศซึ่งจะมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประมาณ 1 ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุตัวกลางที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความยาวคลื่นน้อยลงเมื่อความถี่ยังคงเดิมและเมื่อค่าความยาวคลื่นน้อยลงก็จะทำให้ขนาดของแผ่นตัวนำในสายอากาศมีขนาดเล็กลงตามไปด้วยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พีเอ็มเอ็มเอ ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประมาณ 3 และเมื่อนำแต่ละองค์ประกอบมาประกอบกันเป็นสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบ และได้ใช้วงจรบัทเลอร์เมทริกซ์แบบ 4 ลำคลื่น ทำหน้าที่เป็นวงจรที่ใช้แบ่งสัญญาณไปที่สายอากาศแต่ละองค์ประกอบให้มีขนาดและเฟสตามที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้

สายอากาศที่ออกแบบไว้สามารถเลือกแบบรูปการแผ่พลังงานได้ 4 รูปแบบ โดย 4 รูปแบบนั้นจะแตกต่างกันที่มุมมองของพลังงานที่ส่งออกไป โดยสามารถเลือกรูปแบบการกระจายคลื่น ได้ผ่านการควบคุมจากสวิตช์ ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ทิศทางของป้ายที่สามารถอ่านข้อมูลมาได้ โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ 920 -925 เมกะเฮิรต์ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานในประเทศไทย (สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ [กทช] , 2549) โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศให้มีการ โพลาริซั้แบบวงกลม หลังจากนั้นจึงได้นำสายอากาศไปทำการวัดค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. โปรแกรมจำลองทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. โปรแกรมสำหรับออกแบบลายวงจร
4. โปรแกรมสำหรับคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สำหรับลายวงจร
5. อุปกรณ์สำหรับสร้างชุดสายอากาศ
6. อุปกรณ์สำหรับวัดสายอากาศ
 - 6.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (Network analyzer)
 - 6.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
 - 6.2 สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial cable) แบบแข็ง, แบบกึ่งแข็ง และแบบอ่อน
 - 6.3 หัวต่อสายเคเบิล (Connector)
7. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Core 2 Duo P8600 2.4 GHz, 2 GB of DDR RAM, 250 GB HDD

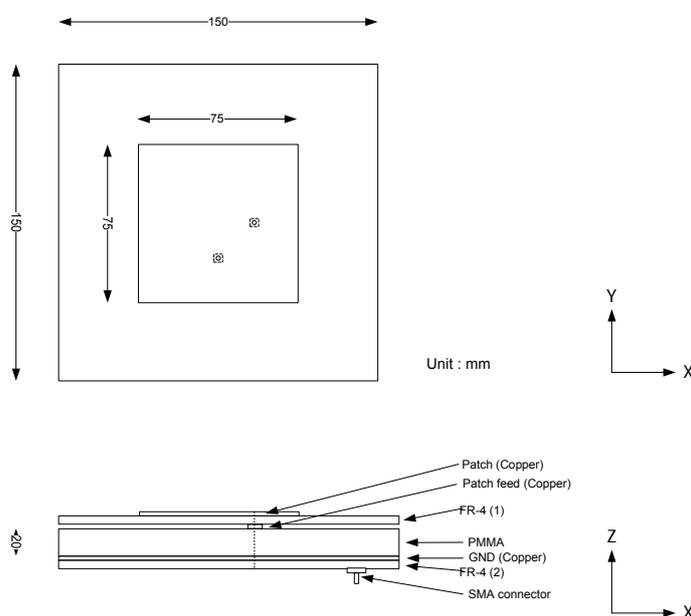
วิธีการ

1. การออกแบบและจำลองสายอากาศแบบไมโครสตรีกึ่งประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

ในส่วนนี้แสดงขนาดตามที่ออกแบบและผลการจำลองของสายอากาศเพียงองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งจะใช้เป็นองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ โดยทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปเป็นรายละเอียดได้ ดังนี้

1.1. ขนาดของสายอากาศ

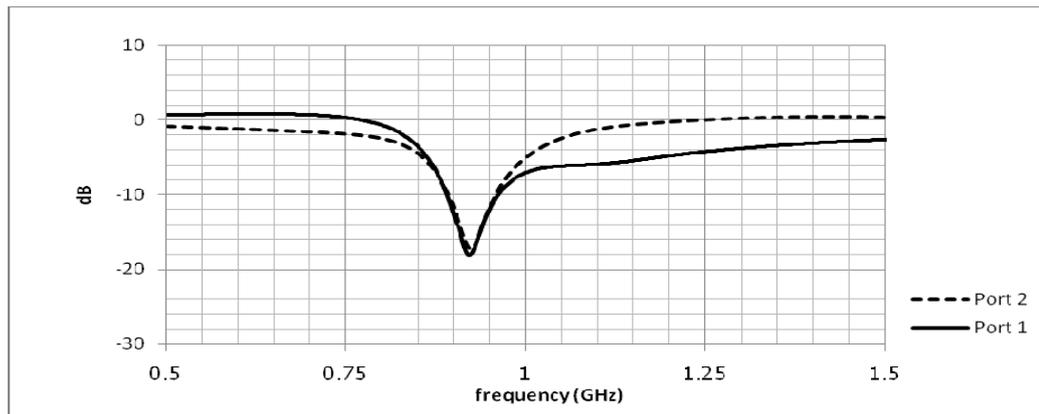
ขนาดของสายอากาศแบบไมโครสตรีกึ่งประกอบเดียวที่ใช้ในการจำลองสายอากาศจะทำบนแผ่นวงจรพิมพ์ (วงจรพิมพ์) ชนิด FR4 ที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร 2 ชั้น ประทับกับแผ่นพีเอ็มเอ็มเอ หนา 20 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แสดงขนาดของสายอากาศแบบไมโครสตรีกึ่งประกอบเดียว

1.2. ค่า S_{11}

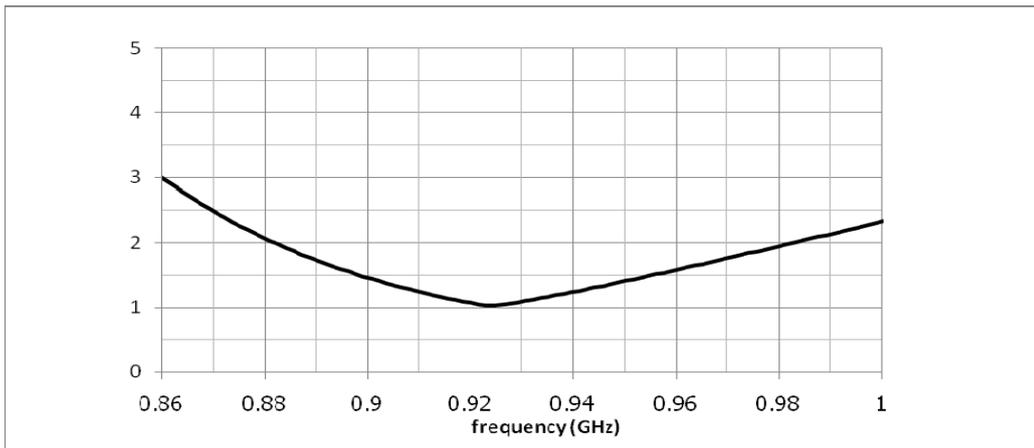
ค่า S_{11} ของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านพลังงานออกไปจากสายอากาศ ซึ่งค่าควรจะน้อยกว่า -10 dB ในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งสายอากาศนี้ถูกออกแบบให้ใช้งานในช่วงย่านความถี่ 920 – 925 เมกะเฮิรต์ ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ผลการจำลองค่า S_{11} ของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว

1.3. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)

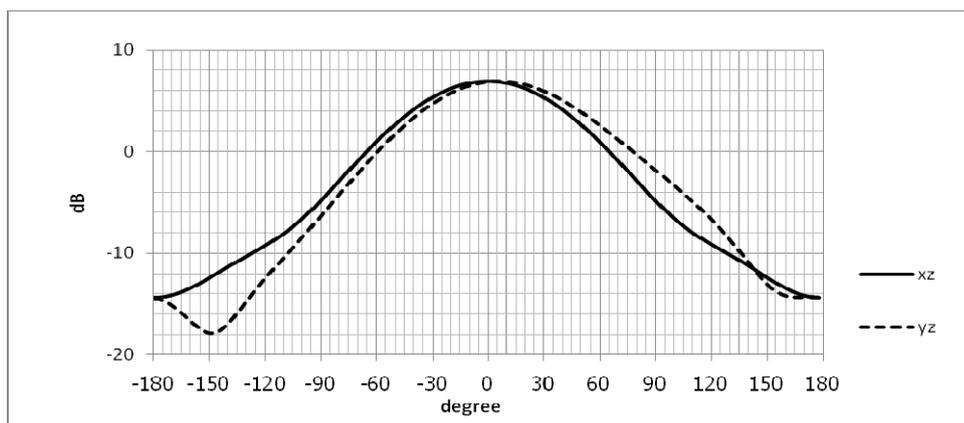
ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน คือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึงอนันต์ สายอากาศจะส่งสัญญาณได้ดีที่สุดเมื่อค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งตามภาพที่ 30 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันต่ำสุดจะอยู่ที่ความถี่ประมาณ 925 เมกะเฮิรต์ โดยทั่วไปสายอากาศจะใช้งานในช่วงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันน้อยกว่า 2 ดังนั้นค่าช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศนี้จึงอยู่ที่ ประมาณ 880 – 980 เมกะเฮิรต์ หรือมีช่วงความถี่ใช้งานประมาณ 10%



ภาพที่ 30 ผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว

1.4. แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern)

ภาพที่ 31 แสดงแบบรูปการแผ่ในระนาบ yz และ xz ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่เป็นแบบมีทิศทาง ที่มีลำคลื่นหลักในทิศทางมุม Theta (θ) เท่ากับ 0 องศา หรือตามแนวแกน z ซึ่งก็คือด้านหน้าของสายอากาศ อัตราขยายของสายอากาศมีค่าประมาณ 6 dBi



ภาพที่ 31 ผลการจำลองค่าแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์ของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว

2. การออกแบบและจำลองสายอากาศแฉวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม

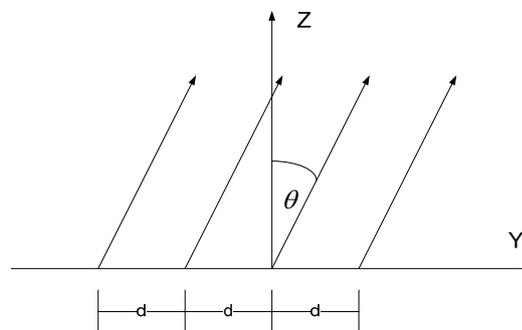
2.1 จุดประสงค์ของการใช้ทฤษฎีสายอากาศแบบแฉวลำดับ

คุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีองค์ประกอบเดียวซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานค่อนข้างกว้างและมีอัตราขยายต่ำ แต่ในการใช้งานบางวัตถุประสงค์ต้องการใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง ซึ่งการเพิ่มอัตราขยายนี้อาจทำได้โดยเพิ่มขนาดของสายอากาศ หรือใช้ทฤษฎีสายอากาศแฉวลำดับ N ตัว

จุดประสงค์ของการทำแฉวลำดับก็คือ ต้องการเพิ่มขนาดของสายอากาศเพื่อปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้น ซึ่งการเพิ่มขนาดของสายอากาศองค์ประกอบเดียวแม้ว่าจะทำให้พู่คลื่นหลัก (Main lobe) ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแคบลงก็ตาม แต่จะมีผลลัพท์ให้พู่คลื่นด้านข้าง (Side lobe) มีขนาดสูงขึ้น ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ การปรับขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบ จะมีผลทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่การปรับเฟสระหว่างองค์ประกอบ จะเป็นการกำหนดทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงาน

2.2 การวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ขององค์ประกอบต่อตัวประกอบแฉวลำดับ

แบบรูปของการแผ่ของกำลังงานของสายอากาศแฉวลำดับจะขึ้นอยู่กับแต่ละส่วนประกอบ ได้แก่ จำนวนสายอากาศ และระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ และ ค่าความต่างเฟสระหว่างแต่ละองค์ประกอบ ดังภาพที่ 32

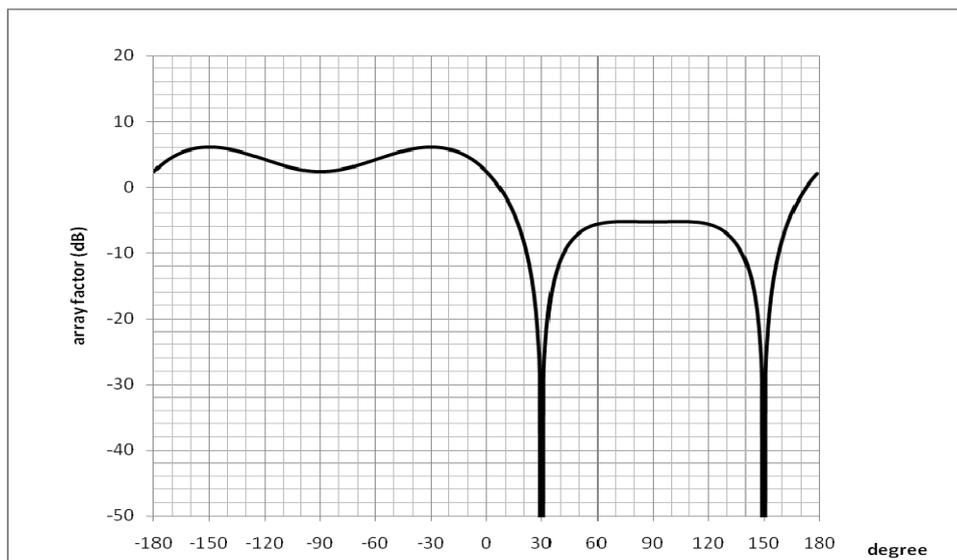


ภาพที่ 32 การจัดเรียงสายอากาศแบบแฉวลำดับ

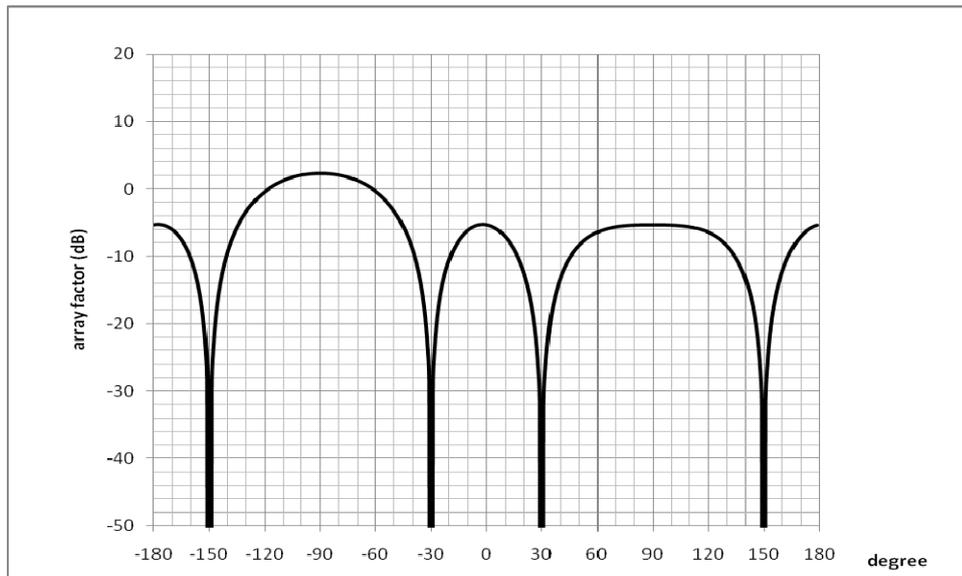
ซึ่งเมื่อพิจารณาตามสมการที่ 3 นั้น ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมของสายอากาศ จะเกิดจากค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขององค์ประกอบเดียวคูณกับค่าตัวประกอบแกลวลำดับ (AF: Array factor) ซึ่งค่าตัวประกอบแกลวลำดับสามารถหาได้จากสมการที่ 4 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามสมการที่ 4 และการใช้วงจรมัทเธอร์เมติกส์ในสายอากาศแกลวลำดับจะมีตัวแปร d ที่เป็นระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบที่ยังไม่ทราบค่าจึงต้องนำสมการดังกล่าวไปสร้างเป็นค่าตัวประกอบแกลวลำดับโดยพิจารณาค่าที่ระยะ $d = 0.25\lambda, 0.3\lambda, 0.35\lambda, 0.4\lambda, 0.45\lambda, 0.5\lambda, 0.55\lambda, 0.6\lambda, 0.65\lambda$ และ 0.7λ โดยแต่ละค่าระยะ d นั้นจะพิจารณาค่า β เท่ากับ $45^\circ, -45^\circ, 135^\circ$ และ -135°

2.2.1 ค่าตัวประกอบแกลวลำดับที่ระยะ $d = 0.25\lambda$ ที่ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

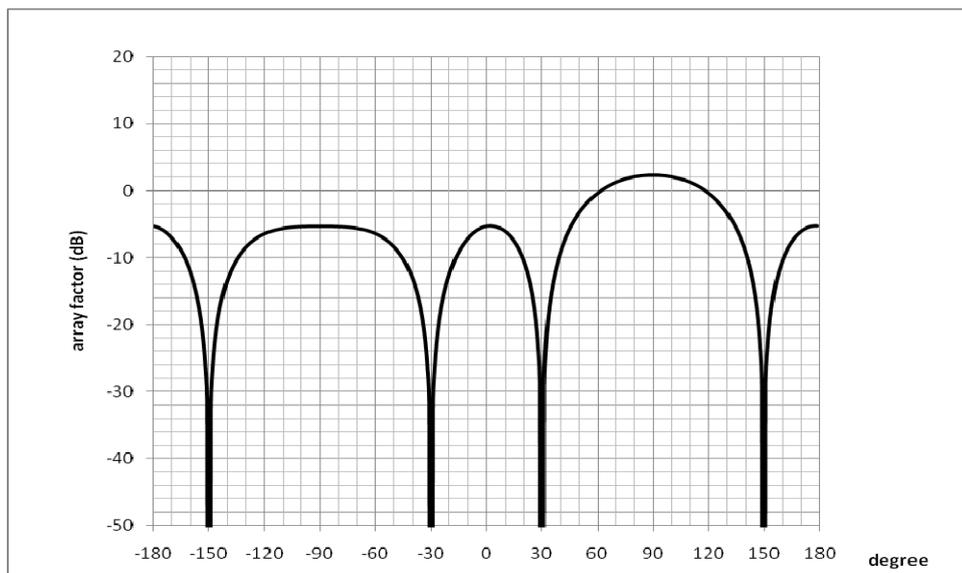
ได้ผลการจำลองดังนี้



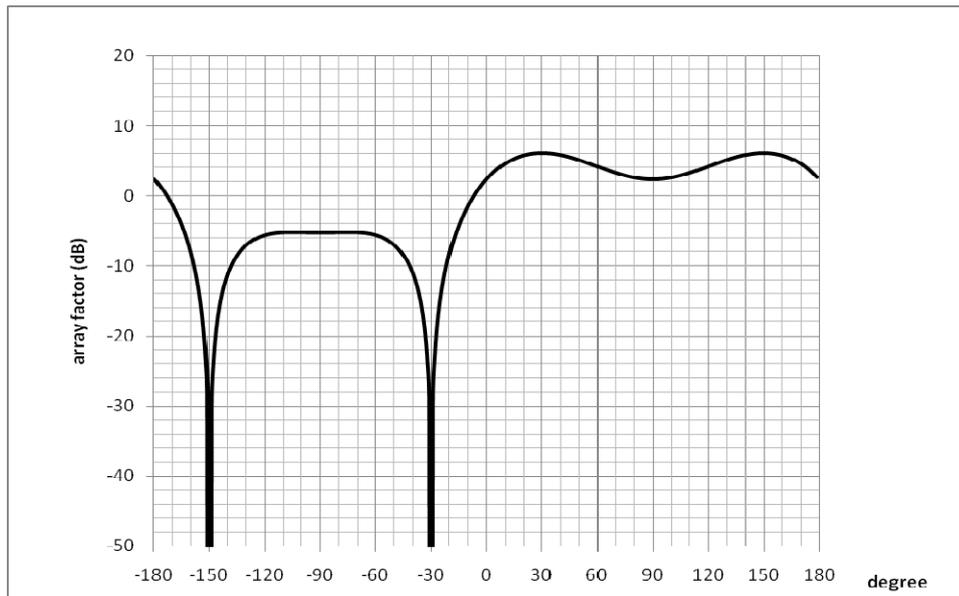
ภาพที่ 33 ค่าตัวประกอบแกลวลำดับที่มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.25\lambda$



ภาพที่ 34 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.25\lambda$



ภาพที่ 35 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.25\lambda$



ภาพที่ 36 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.25\lambda$

พิจารณา ภาพที่ 33 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 330 องศา และที่มุม 30 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 30 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และค่าตัวประกอบแอมพลิจูดลักษณะนี้มีอัตราขยายในมุม 330 องศาและช่วง 30 ถึง 90 องศาที่แตกต่างกันมาก ทำให้ระยะที่สามารถอ่านแผ่นป้ายต่างกัน ที่ช่วงมุม 330 องศาสามารถอ่านได้ไกล แต่ที่ช่วงมุม 30 ถึง 90 องศา จะไม่สามารถอ่านได้ที่ระยะห่างมากที่สุดที่มุม 330 องศาอ่านได้

พิจารณา ภาพที่ 34 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 270 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่สุด ที่มุม 30 และ 330 องศา และค่าตัวประกอบแอมพลิจูดลักษณะนี้ จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 30 และ 330 องศาได้ จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแอมพลิจูดนี้ ประกอบด้วยพหุนามหลักและพหุนามรอง ซึ่งคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นที่เหมาะสมกับระบบเครื่องอ่านที่ออกแบบควรเป็นแบบที่มีทิศทางที่คงที่และมีอัตราขยายสูงอย่างสม่ำเสมอมากกว่าลักษณะการแผ่กระจายนี้

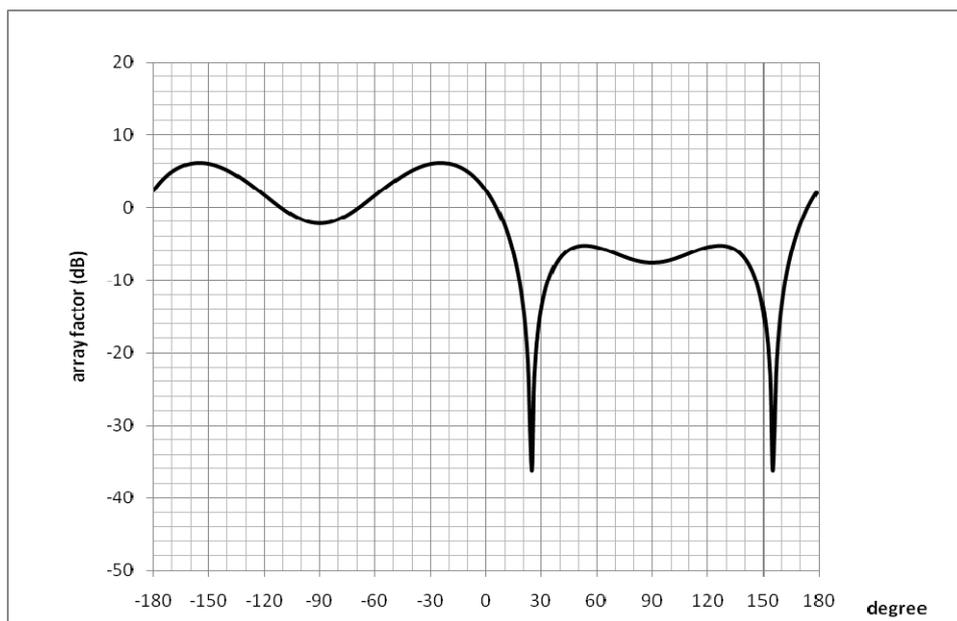
พิจารณา ภาพที่ 35 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 30 องศา และที่มุม 330 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 330 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และค่าตัวประกอบ

แอมพลิจูดลักษณะนี้มีอัตราขยายในมุม 30 องศาและช่วง 270 ถึง 330 องศาที่แตกต่างกันมาก ทำให้ระยะที่สามารถอ่านแผ่นป้ายต่างกัน ที่ช่วงมุม 30 องศาสามารถอ่านได้ไกล แต่ที่ช่วงมุม 270 ถึง 300 องศาจะไม่สามารถอ่านได้ที่ระยะห่างมากที่สุดที่มุม 30 องศาอ่านได้

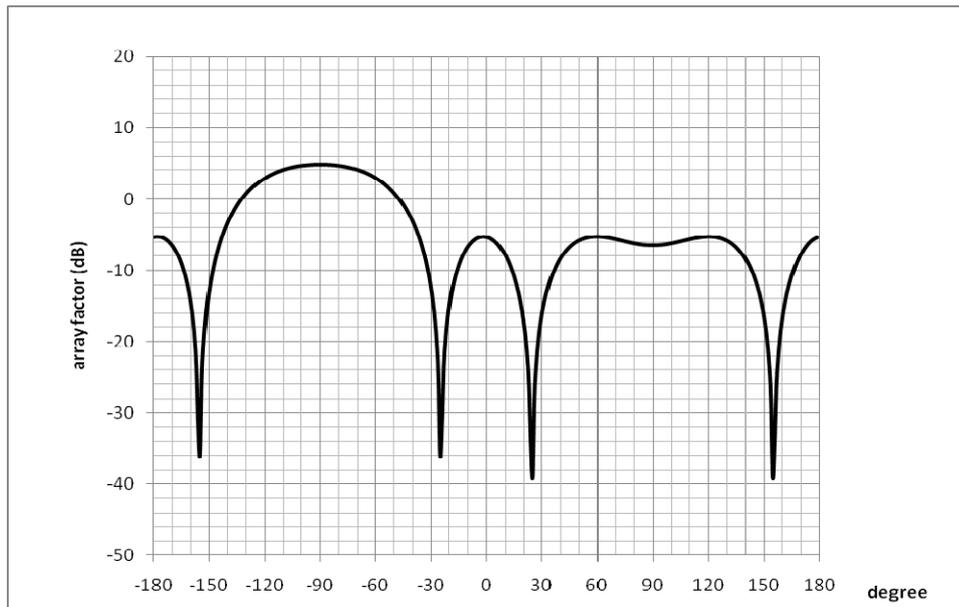
พิจารณา ภาพที่ 36 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 90 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่สุด ที่มุม 30 และ 330 องศา ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดลักษณะนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 30 และ 330 องศาได้

2.2.2 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ระยะ $d = 0.3\lambda$ ที่ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

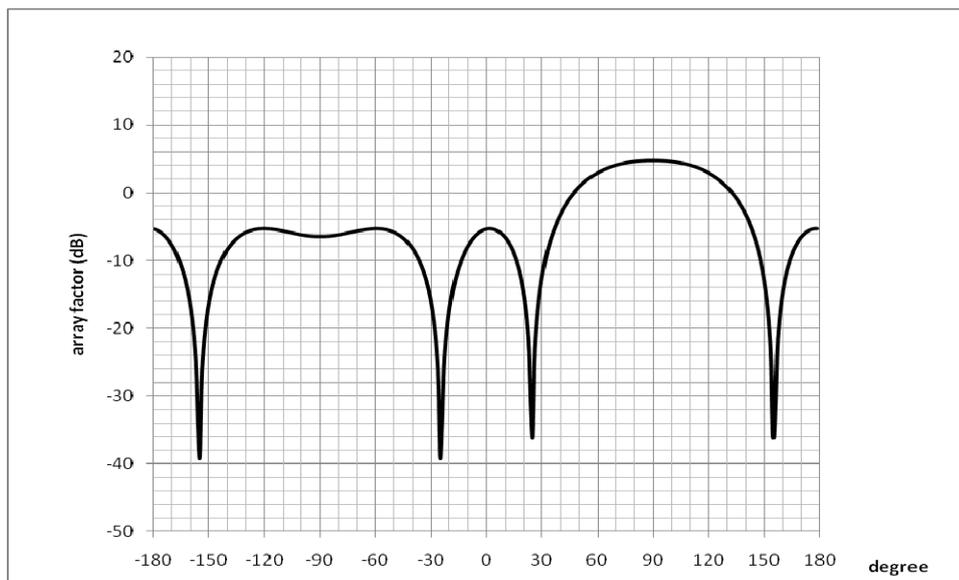
ได้ผลการจำลองดังนี้



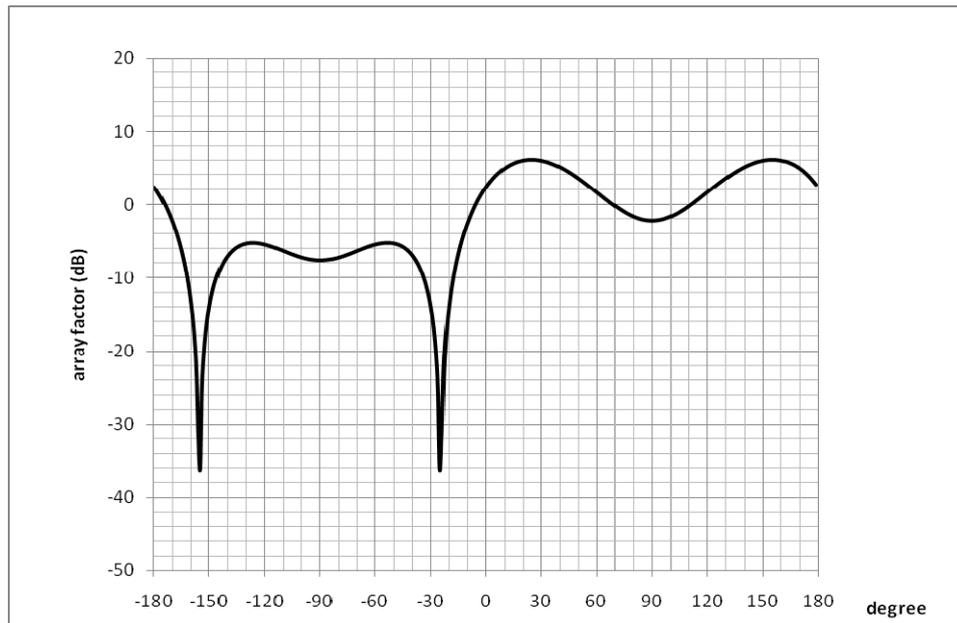
ภาพที่ 37 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.3\lambda$



ภาพที่ 38 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.3\lambda$



ภาพที่ 39 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.3\lambda$



ภาพที่ 40 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.3\lambda$

พิจารณา ภาพที่ 37 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 330 องศา และที่มุม 30 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 30 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้มีอัตราขยายในมุม 330 องศาและช่วง 30 ถึง 90 องศาที่แตกต่างกันมาก ทำให้ระยะที่สามารถอ่านแผ่นป้ายต่างกัน ที่ช่วงมุม 330 องศาสามารถอ่านได้ไกล แต่ที่ช่วงมุม 30 ถึง 90 องศาจะไม่สามารถอ่านได้ที่ระยะห่างมากที่สุดที่มุม 330 องศาอ่านได้ ค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้แตกต่างจากค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ระยะ $d = 0.25\lambda$ คือบริเวณมุม 90 และ 270 องศา ที่ระยะ $d = 0.3\lambda$ จะมีอัตราขยายต่ำกว่า

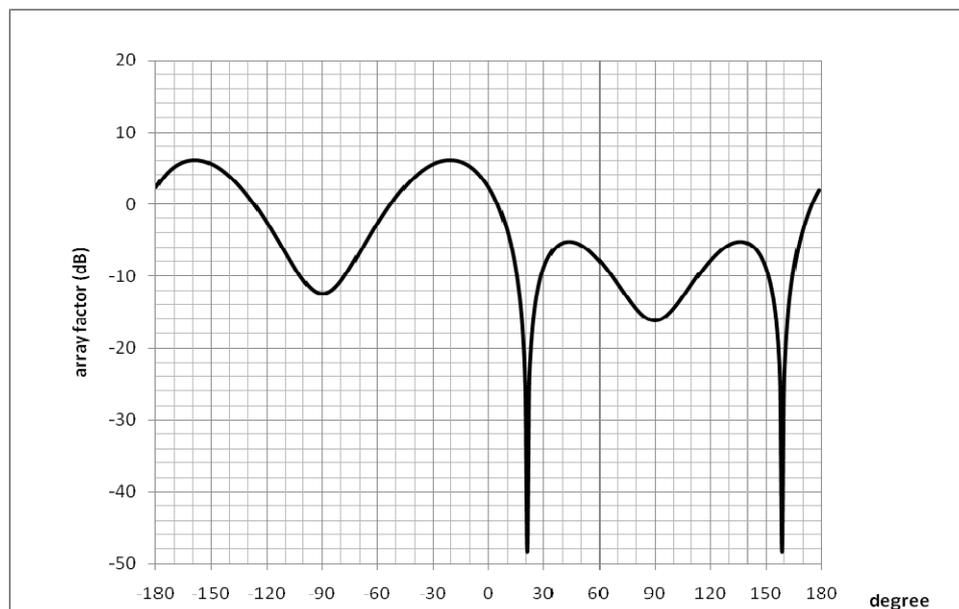
พิจารณา ภาพที่ 38 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 270 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่สุด ที่มุม 30 และ 330 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 30 และ 330 องศาได้ จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้ ประกอบด้วยพู่คลื่นหลักและพู่คลื่นรอง ซึ่งค่าตัวประกอบแถวลำดับที่เหมาะสมกับระบบเครื่องอ่านที่ออกแบบควรเป็นแบบที่มีทิศทางที่คงที่และที่อัตราขยายสูงอย่างสม่ำเสมอมากกว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้

พิจารณา ภาพที่ 39 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 30 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 330 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และลักษณะค่าตัวประกอบแอมพลิจูดลักษณะนี้มีอัตราขยายในมุม 30 องศาและช่วง 270 ถึง 330 องศาที่แตกต่างกันมาก ทำให้ระยะที่สามารถอ่านแผ่นป้ายลักษณะต่างกัน ที่ช่วงมุม 30 องศาสามารถอ่านได้ไกล แต่ที่ช่วงมุม 270 ถึง 300 องศาจะไม่สามารถอ่านได้ที่ระยะห่างมากที่สุดที่มุม 30 องศาอ่านได้ ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดนี้แตกต่างจากค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ระยะ $d = 0.25\lambda$ คือบริเวณมุม 90 และ 270 องศา ที่ระยะ $d = 0.3\lambda$ จะมีอัตราขยายต่ำกว่า

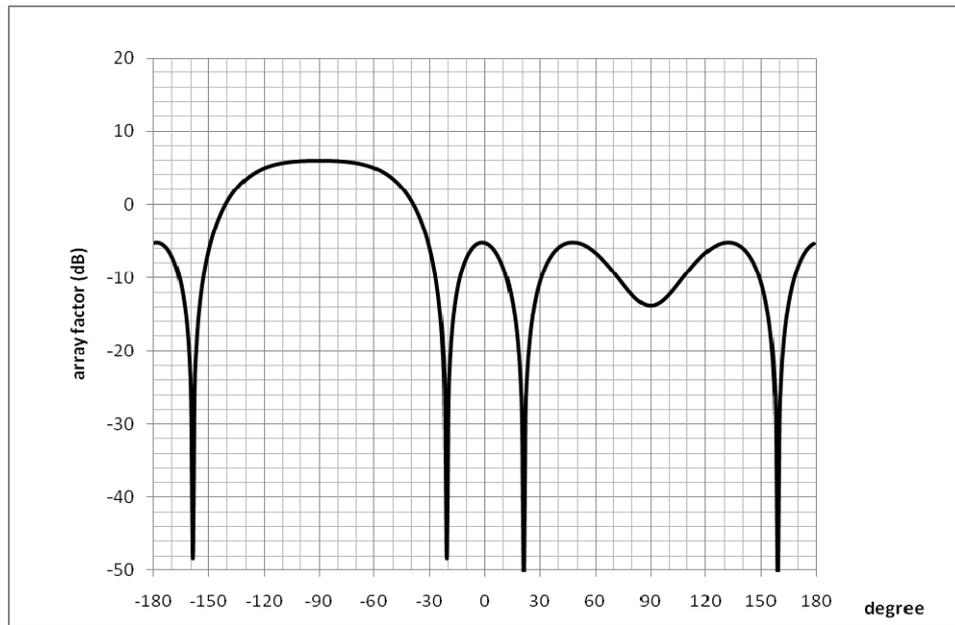
พิจารณา ภาพที่ 40 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมากที่สุดที่บริเวณมุม 90 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่สุด ที่มุม 30 และ 330 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแอมพลิจูดนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 30 และ 330 องศาได้

2.2.3 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ระยะ $d = 0.35\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

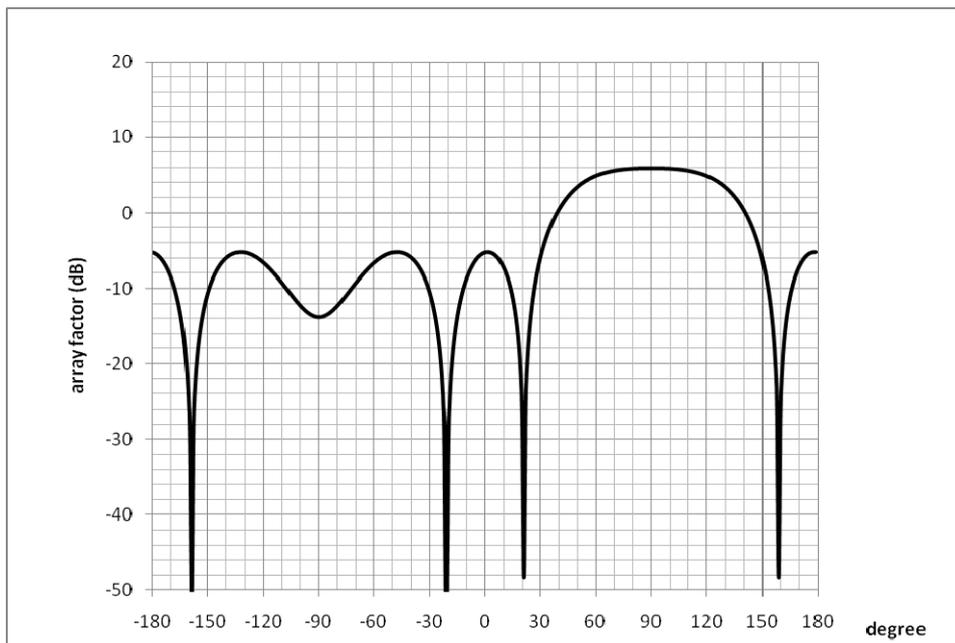
ได้ผลการจำลองดังนี้



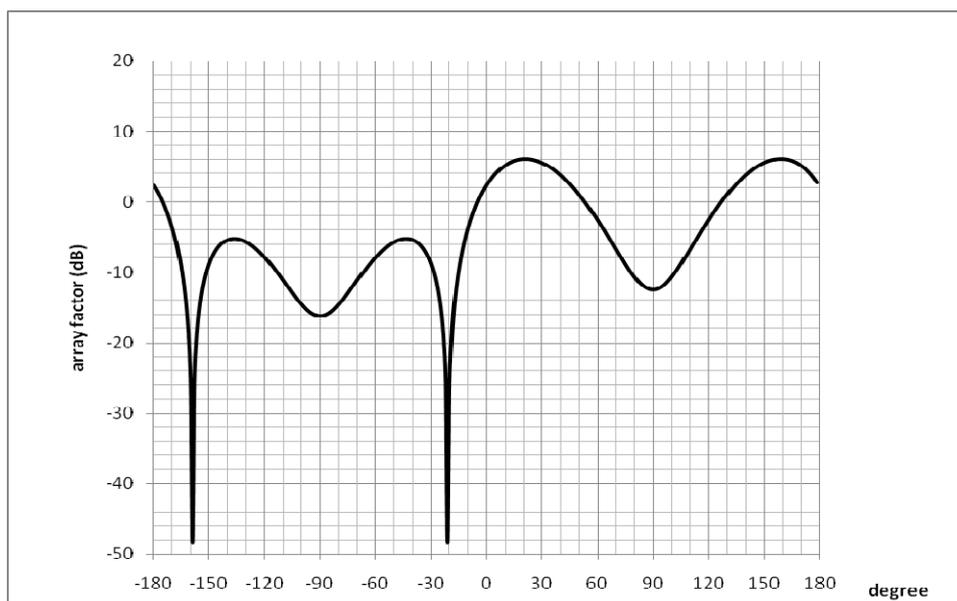
ภาพที่ 41 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.35\lambda$



ภาพที่ 42 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.35\lambda$



ภาพที่ 43 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.35\lambda$



ภาพที่ 44 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.35\lambda$

พิจารณาภาพที่ 41 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 340 องศา และที่มุม 20 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 20 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้มีอัตราขยายในมุม 340 องศากับที่มุม 30 และ 60 องศาที่แตกต่างกันมาก ทำให้ระยะที่สามารถอ่านแผ่นป้ายต่างกัน ที่ช่วงมุม 340 องศาสามารถอ่านได้ไกล แต่ที่มุม 30 และ 60 องศาจะไม่สามารถอ่านได้ที่ระยะห่างมากที่สุดที่มุม 340 องศาอ่านได้ และจะเห็นได้ว่าอัตราขยายในมุม 270 องศา มีค่าน้อยกว่าที่ระยะ $d = 0.25\lambda$ และ $d = 0.3\lambda$

พิจารณาภาพที่ 42 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 270 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 20 และ 320 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 20 และ 320 องศาได้ ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะเห็นได้ว่าที่บริเวณมุม 270 องศาจะมีอัตราขยายสูงและเป็นพหุคูณหลักแต่ในช่วงมุม 90 องศาจะมีอัตราขยายที่ต่ำ ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้จะทำให้สามารถรับสัญญาณได้บริเวณช่วงมุม 270 องศาได้ดีกว่าบริเวณอื่นมาก

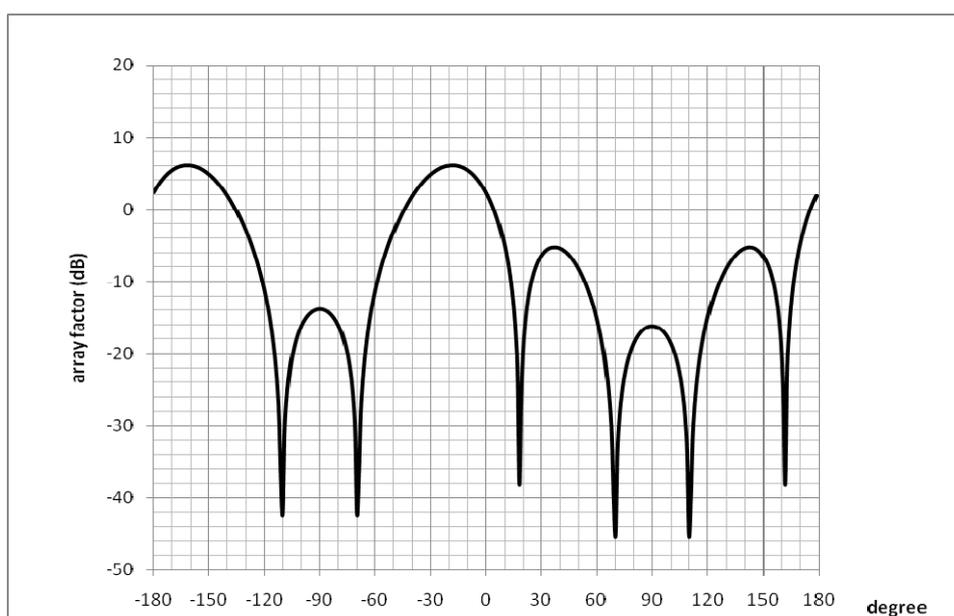
พิจารณาภาพที่ 43 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 30 องศา และที่บริเวณมุม 345 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่

ตำแหน่งบริเวณมุม 345 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และ ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้มีอัตราขยายในมุม 30 องศา กับช่วง 300 และ 330 องศาที่แตกต่างกันมาก ทำให้ระยะที่สามารถอ่านแผ่นป้ายมีความแตกต่างกัน ที่ช่วงมุม 30 องศาสามารถอ่านได้ไกล แต่ที่ช่วงมุม 300 และ 330 องศาจะไม่สามารถอ่านได้ที่ระยะห่างมากที่สุดที่มุม 30 องศาอ่านได้และจะเห็นได้ว่าอัตราขยายในมุม 270 องศา มีค่าน้อยกว่าที่ระยะ $d = 0.25\lambda$ และ $d = 0.3\lambda$

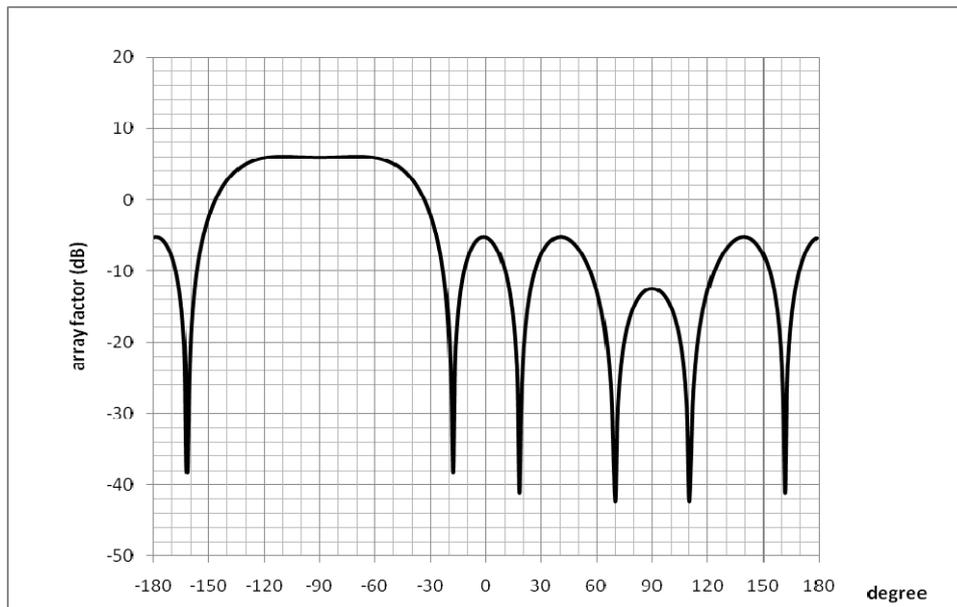
พิจารณาภาพที่ 44 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 90 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 20 และ 320 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 20 และ 320 องศาได้ ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะเห็นได้ว่าที่บริเวณมุม 90 องศาจะมีอัตราขยายสูงและเป็นพุดคลื่นหลักแต่ในช่วงมุม 270 องศาจะมีอัตราขยายที่ต่ำ ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะทำให้สามารถรับสัญญาณได้บริเวณช่วงมุม 90 องศาได้ดีกว่าบริเวณอื่นมาก

2.2.4 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

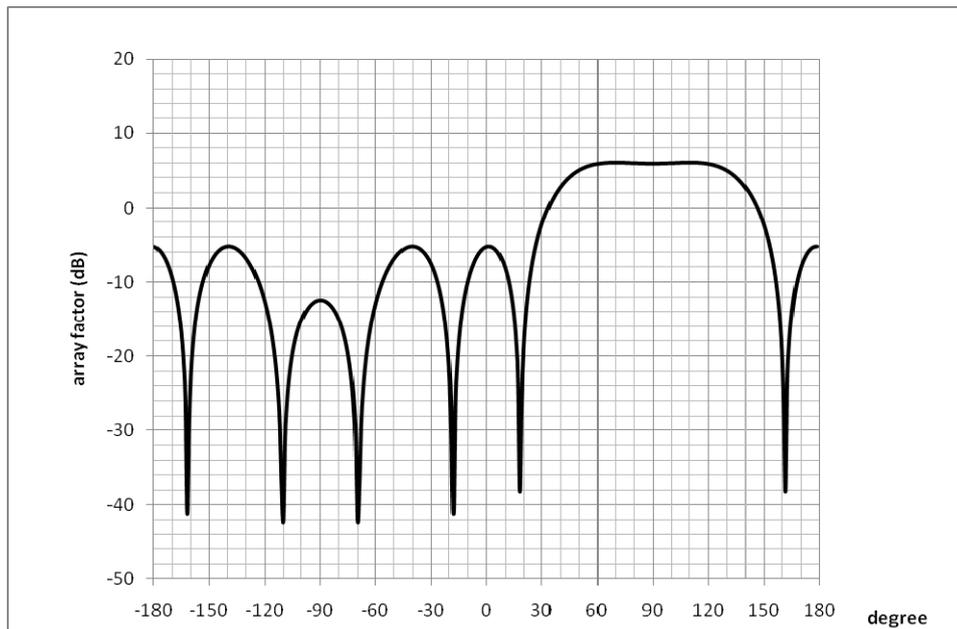
ได้ผลการจำลองดังนี้



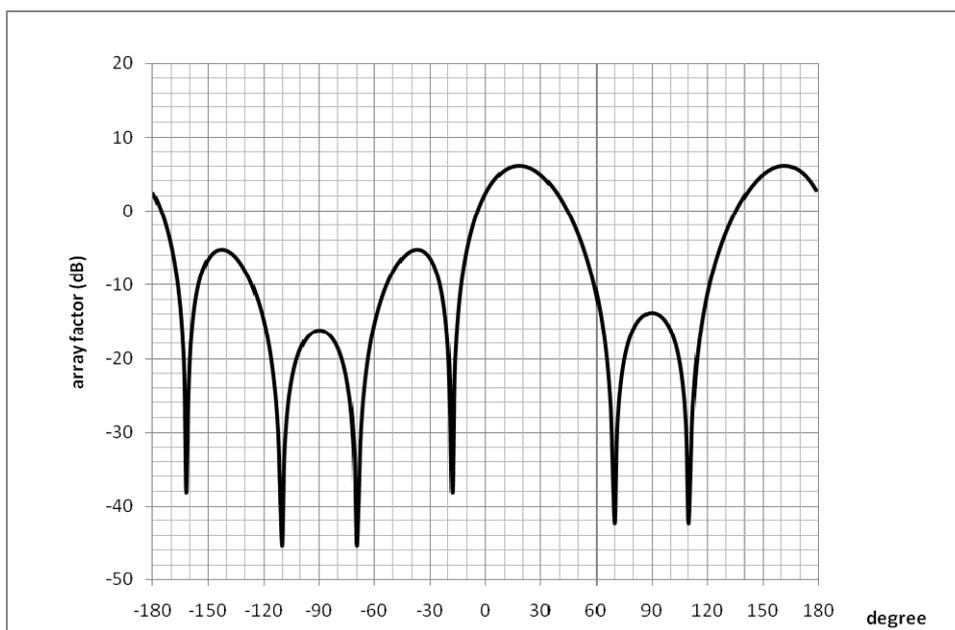
ภาพที่ 45 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.4\lambda$



ภาพที่ 46 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.4\lambda$



ภาพที่ 47 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.4\lambda$



ภาพที่ 48 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.4\lambda$

พิจารณาภาพที่ 45 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 345 องศา และที่มุม 20, 70 และ 285 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 20, 70 และ 285 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และค่าตัวประกอบแอมพลิจูดเป็นไปในลักษณะที่มีพูล์ล้นหลักก่อนข้างแคบเมื่อเทียบกับที่ระยะ $d = 0.25\lambda, 0.3\lambda, 0.35\lambda$ และ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ จะรับสัญญาณที่ระยะไกลได้ทิศทางก่อนข้างแคบกว่า

พิจารณาภาพที่ 46 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 30 ถึง 90 องศา ซึ่งมีลักษณะพูล์ล้นหลักที่กว้างและมีอัตราขยายสูง การมีพูล์ล้นหลักที่กว้างจะสามารถรับสัญญาณที่ทิศทางไกลได้กว้าง และมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 25, 290 และ 340 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแอมพลิจูดแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่ 25, 290 และ 340 องศาได้ แต่มีข้อเสียคือพูล์ล้นรองที่ก่อนข้างแคบทำให้รับสัญญาณได้ในทิศทางที่จำกัด

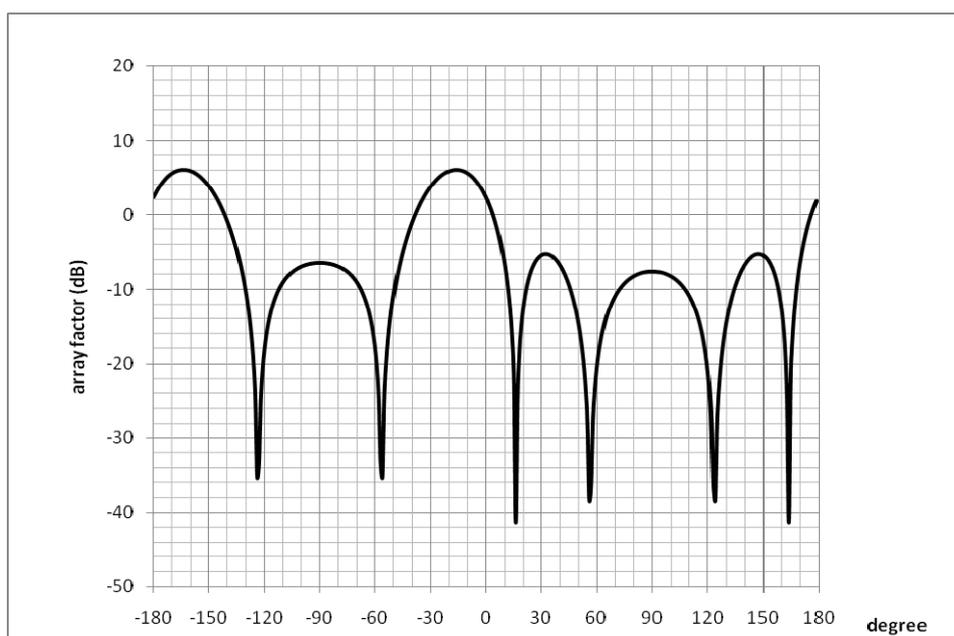
พิจารณาภาพที่ 47 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 20 องศา และที่บริเวณมุม 75, 290 และ 345 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 75, 290 และ 345 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดเป็นไปในลักษณะที่มีพูล์ล้นหลักก่อนข้างแคบเมื่อเทียบกับที่

ระยะ $d = 0.25\lambda$, 0.3λ และ 0.35λ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ จะรับสัญญาณที่ระยะไกลได้ ทิศทางค่อนข้างแคบกว่า

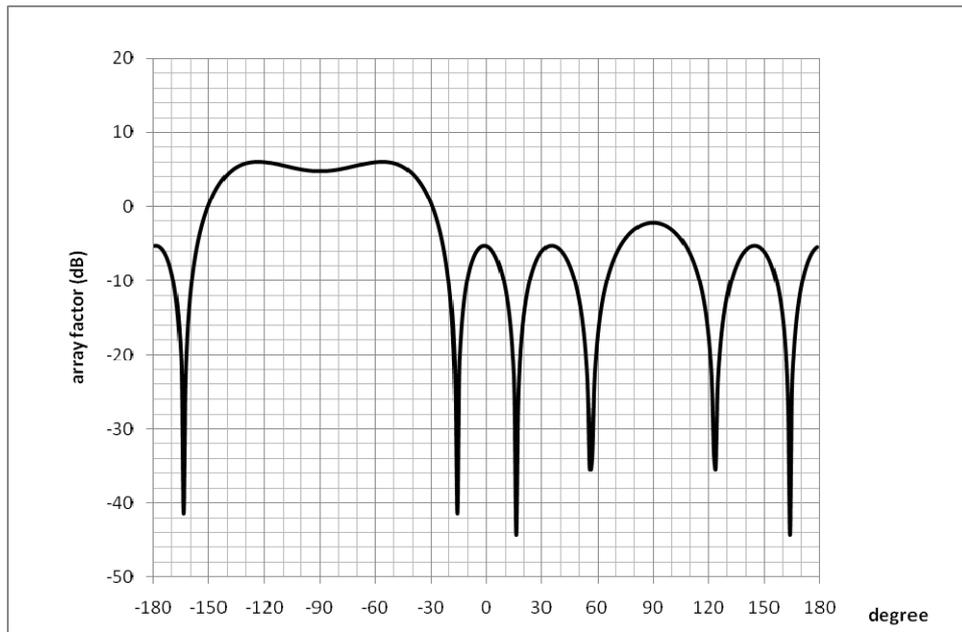
พิจารณาภาพที่ 48 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 20 ถึง 90 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 20, 290 และ 340 องศาซึ่งมีลักษณะพูคลื่นหลักที่กว้าง ลักษณะค่าตัวประกอบแอมพลิจูดแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 20, 290 และ 340 องศาได้ แต่มีข้อเสียคือพูคลื่นรองค่อนข้างแคบ

2.2.5 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ระยะ $d = 0.45\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

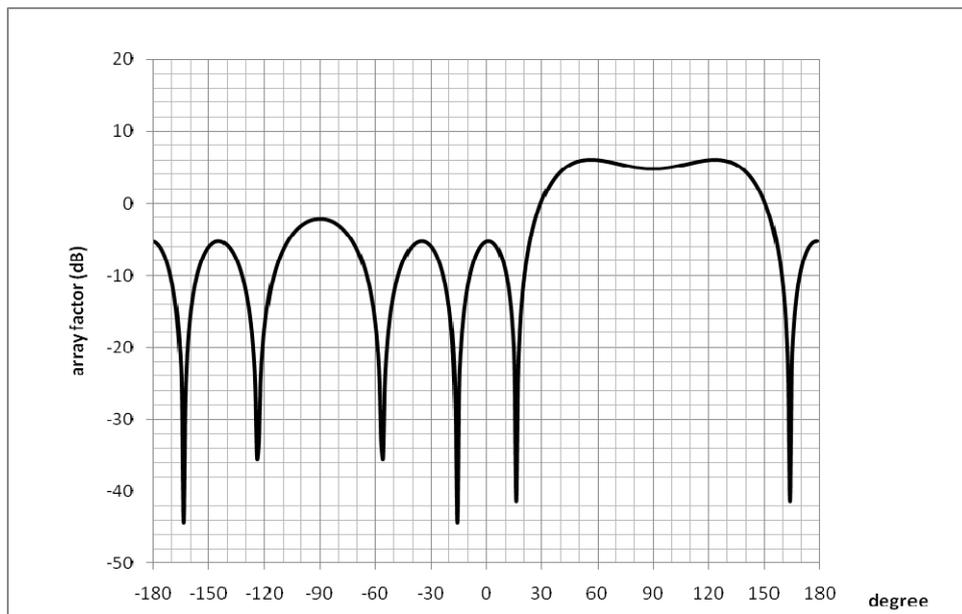
ได้ผลการจำลองดังนี้



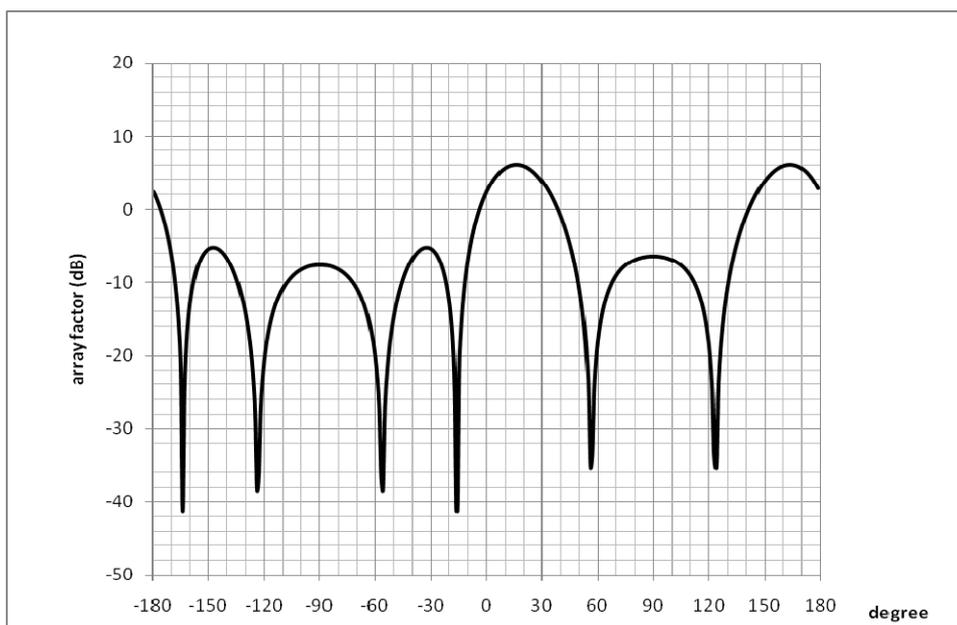
ภาพที่ 49 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = 45$ องศา ที่ระยะ $d = 0.45\lambda$



ภาพที่ 50 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.45\lambda$



ภาพที่ 51 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.45\lambda$



ภาพที่ 52 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ องศา ที่ระยะ $d = 0.45\lambda$

พิจารณาภาพที่ 49 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 345 องศา และที่มุม 20, 60 และ 300 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งมุม 20, 60 และ 300 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ และค่าตัวประกอบแถวลำดับที่มีพหุคูณหลักที่แคบกว่าระยะ $d = 0.4\lambda$ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $d = 0.45\lambda$ จะรับสัญญาณได้ในทิศทางแคบกว่าที่บริเวณพหุคูณหลัก แต่เมื่อเทียบกับที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ พหุคูณรองของระยะ $d = 0.45\lambda$ มีอัตราขยายที่มากกว่า

พิจารณาภาพที่ 50 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 270 องศา ถึงมุม 340 องศา มีค่ามากที่สุด ที่มุม 300 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 20, 60 และ 345 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 20, 60 และ 345 องศาได้ แต่มีข้อเสียคือพหุคูณรองที่ค่อนข้างแคบทำให้รับสัญญาณได้ในทิศทางที่จำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $d = 0.4\lambda$ ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ระยะ $d = 0.45\lambda$ มีอัตราขยายที่มุม 90 องศา มากกว่า และมีอัตราขยายที่มุม 270 องศา น้อยกว่า

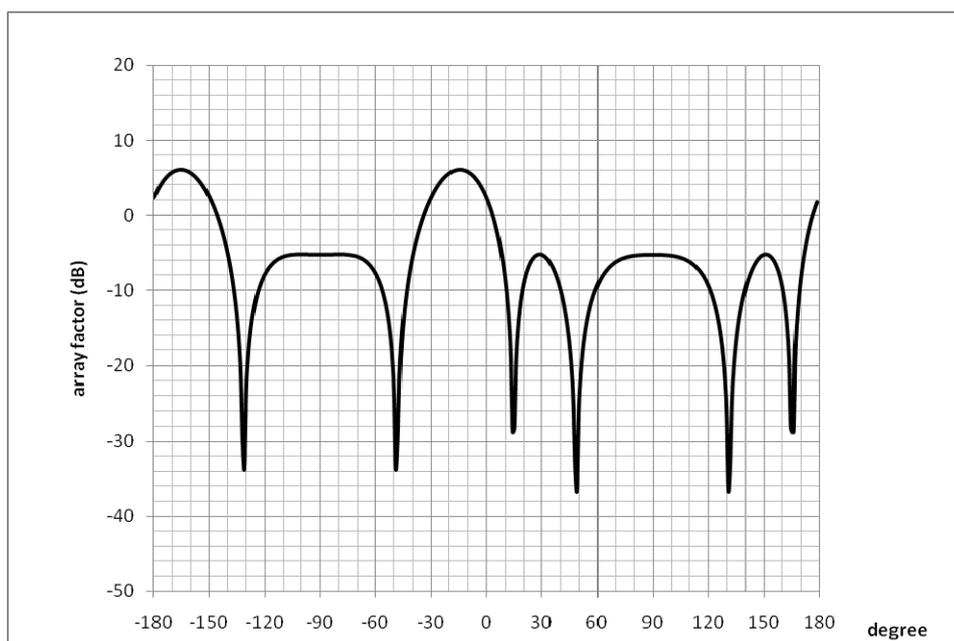
พิจารณาภาพที่ 51 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 15 องศา และที่บริเวณมุม 55, 300 และ 345 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 55, 300 และ 345 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจาก

แผ่นป้ายได้ และค่าตัวประกอบแอมพลิจูดมีพหุคูณหลักที่แคบกว่าระยะ $d = 0.4\lambda$ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $d = 0.45\lambda$ จะรับสัญญาณได้ในทิศทางแคบกว่าที่บริเวณพหุคูณหลัก แต่เมื่อเทียบกับที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ พหุคูณรอง ของระยะ $d = 0.45\lambda$ มีอัตราขยายที่มากกว่า

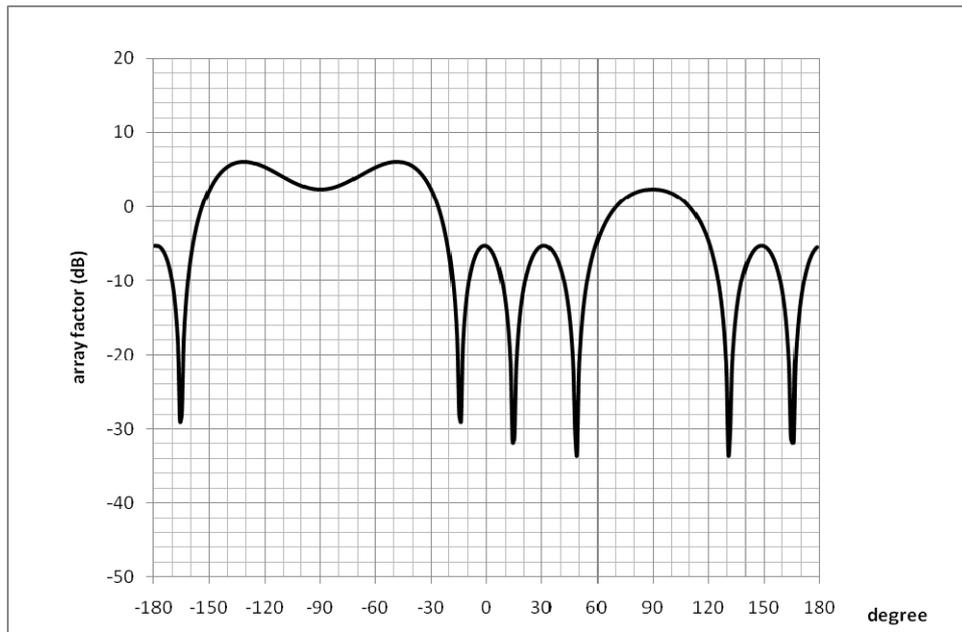
พิจารณาภาพที่ 52 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 30 ถึง 90 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 20, 300 และ 345 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแอมพลิจูดแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 20, 300 และ 345 องศา ได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $d = 0.4\lambda$ ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ระยะ $d = 0.45\lambda$ มีอัตราขยายที่มุม 270 องศา มากกว่า และมีอัตราขยายที่มุม 90 องศา น้อยกว่า

2.2.6 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ระยะ $d = 0.5\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

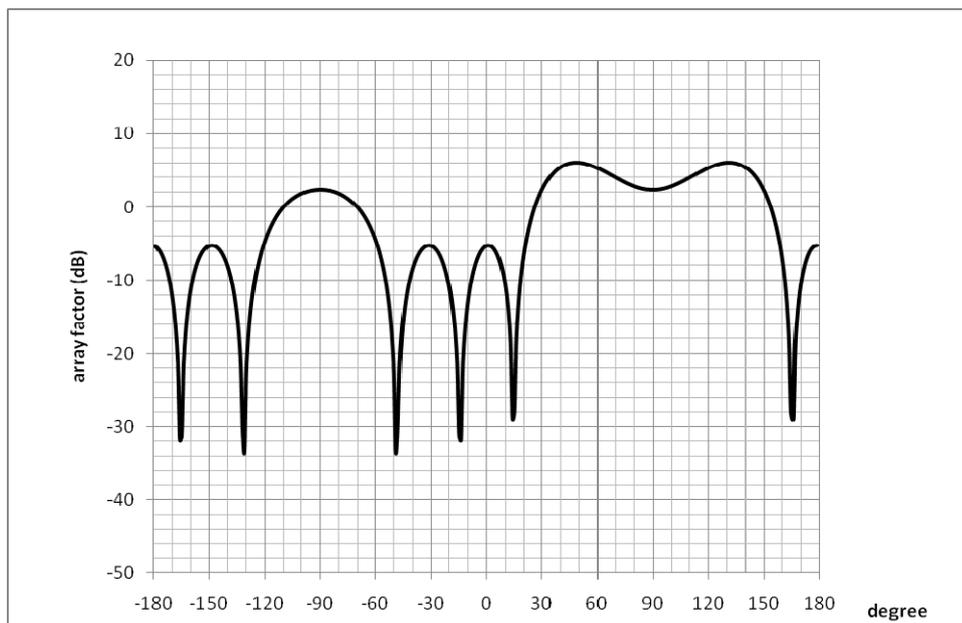
ได้ผลการจำลองดังนี้



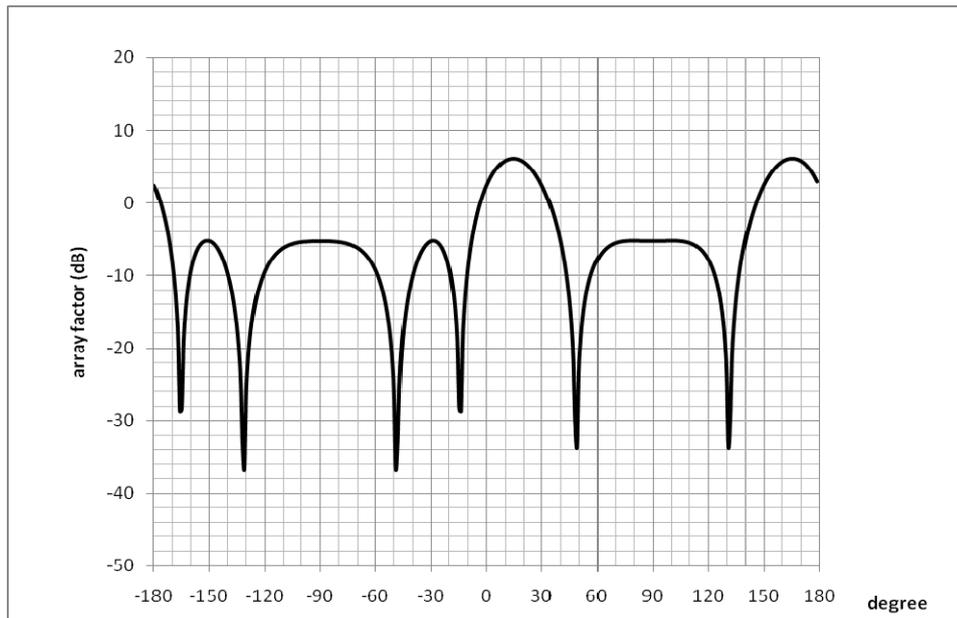
ภาพที่ 53 ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.5\lambda$



ภาพที่ 54 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.5\lambda$



ภาพที่ 55 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.5\lambda$



ภาพที่ 56 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.5\lambda$

พิจารณาภาพที่ 53 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 345 องศา และที่มุม 20, 60 และ 300 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 20, 60 และ 300 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้และค่าตัวประกอบแถวลำดับที่พหุคูณหลักที่แคบกว่าระยะ $d = 0.4\lambda$ และ $d = 0.45\lambda$ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $d = 0.5\lambda$ จะรับสัญญาณได้ในทิศทางแคบกว่าที่บริเวณพหุคูณหลัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพหุคูณรอง ที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ และ $d = 0.45\lambda$ จะเห็นได้ว่าที่ระยะพหุคูณรอง $d = 0.5\lambda$ มีอัตราขยายที่มากกว่า

พิจารณาภาพที่ 54 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 270 องศา ถึงมุม 330 องศา มีค่ามากที่สุดที่ มุม 310 องศาและมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 15, 50 และ 345 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 15, 50 และ 345 องศาได้ ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่พหุคูณรองที่บริเวณมุม 350 ถึง 40 องศาที่มีลักษณะแคบกว่าเมื่อเทียบกับที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ และ $d = 0.45\lambda$ แต่มีอัตราขยายที่มุม 90 องศา มากกว่าและที่ 270 องศาต่ำกว่า

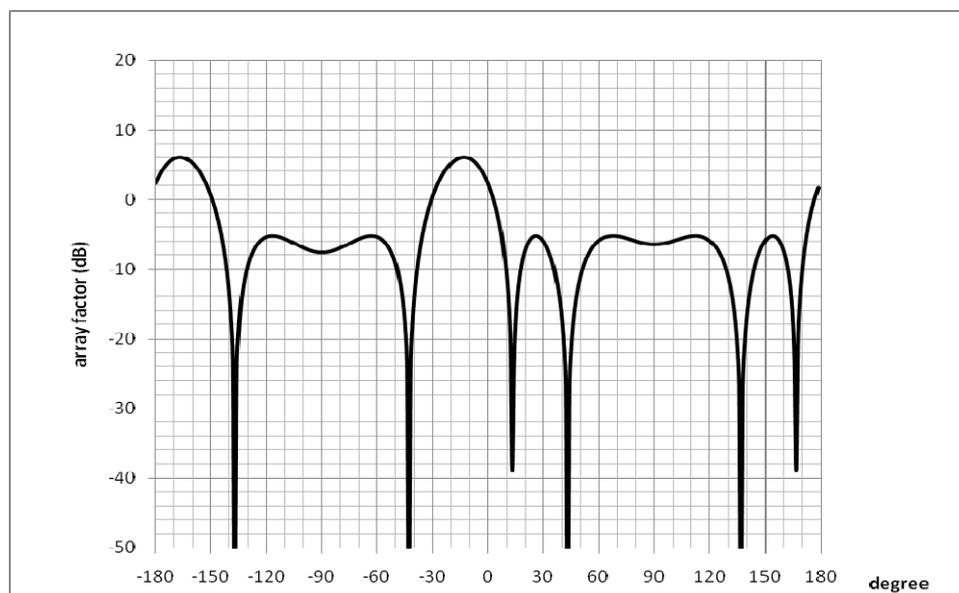
พิจารณาภาพที่ 55 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 15 องศา และที่บริเวณมุม 50, 310 และ 345 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 40, 105, 140 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่น

ปายได้ และค่าตัวประกอบแถวลำดับมีพหุคูณหลักที่แคบกว่าระยะ $d = 0.4\lambda$ และ $d = 0.45\lambda$ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $d = 0.5\lambda$ จะรับสัญญาณได้ในทิศทางแคบกว่าที่บริเวณพหุคูณหลัก แต่เมื่อเปรียบเทียบพหุคูณรอง ที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ และ $d = 0.45\lambda$ จะเห็นได้ว่าที่ระยะพหุคูณรอง $d = 0.5\lambda$ มีอัตราขยายที่มากกว่า

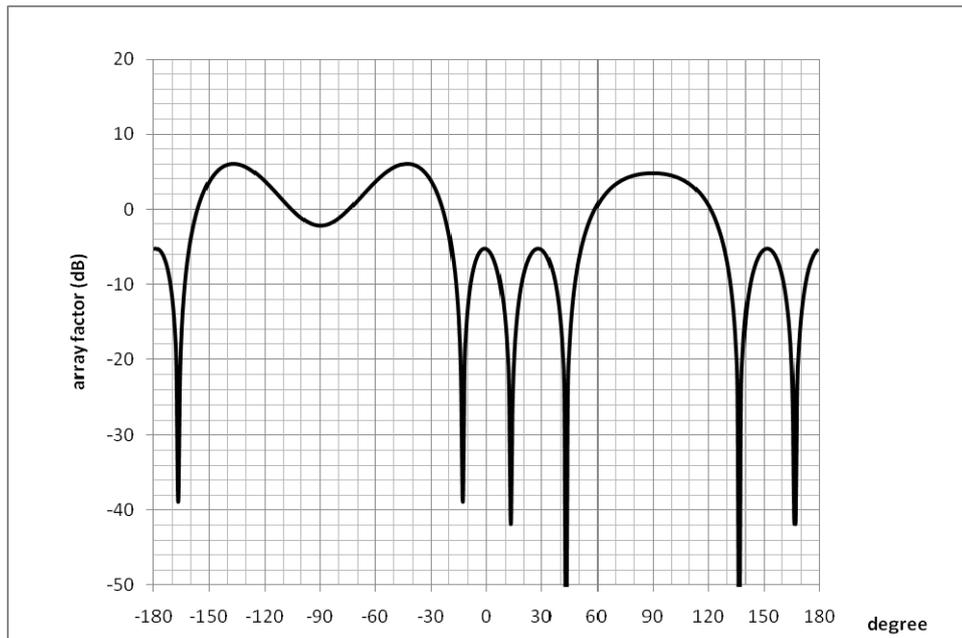
พิจารณาภาพที่ 56 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 45 ถึง 90 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 15, 310 และ 345 องศา ค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากปายระบุลักษณะที่มุม 15, 310 และ 345 องศา ค่าตัวประกอบแถวลำดับมีพหุคูณรองที่บริเวณมุม 310 ถึง 15 องศา ที่มีลักษณะแคบกว่าเมื่อเทียบกับที่ระยะ $d = 0.4\lambda$ และ $d = 0.45\lambda$ แต่มีอัตราขยายที่มุม 270 องศาสูงกว่า และที่ 90 องศาต่ำกว่า

2.2.7 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ระยะ $d = 0.55\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

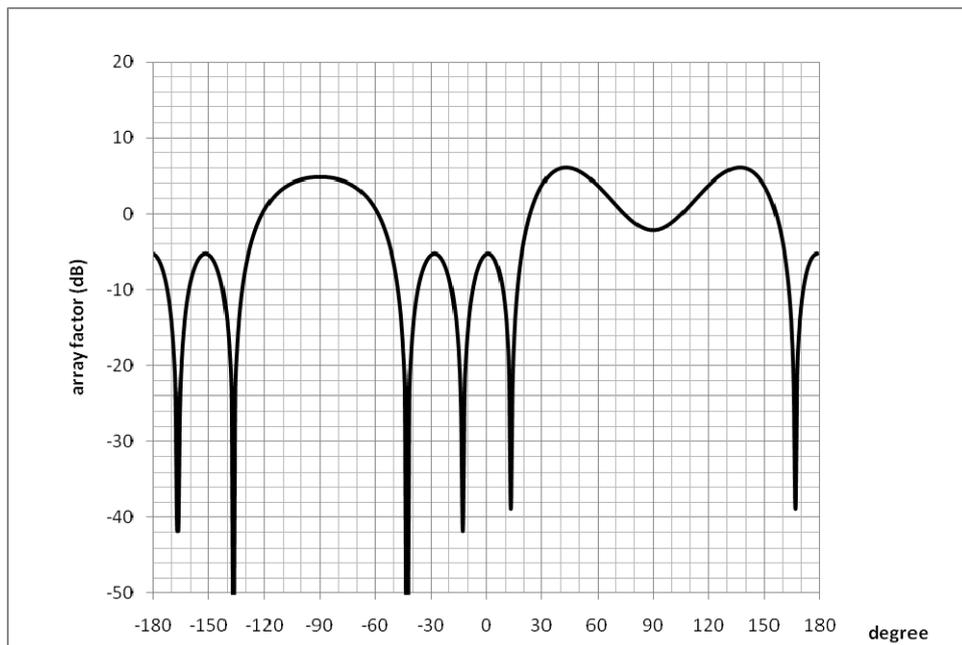
ได้ผลการจำลองดังนี้



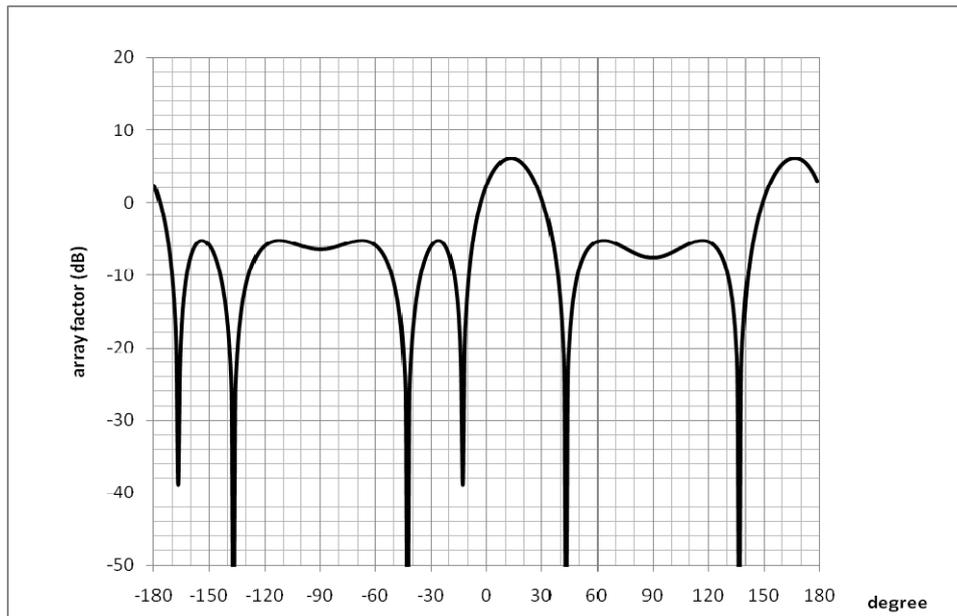
ภาพที่ 57 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.55\lambda$



ภาพที่ 58 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.55\lambda$



ภาพที่ 59 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.55\lambda$



ภาพที่ 60 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.55\lambda$

พิจารณาภาพที่ 57 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 345 องศา และที่มุม 15, 45 และ 315 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 15, 45 และ 315 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ จะเห็นว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับที่มีพหุคูณรองที่มุม 30 องศา แคบมาก เมื่อเทียบกับระยะ $d = 0.4\lambda$, $d = 0.45\lambda$ และ $d = 0.5\lambda$ แต่พหุคูณรองที่บริเวณมุม 90 และ 270 องศา มีอัตราขยายสูงกว่าและมีลักษณะกว้างกว่าเมื่อเทียบกับระยะ $d = 0.4\lambda$, $d = 0.45\lambda$ และ $d = 0.5\lambda$

พิจารณาภาพที่ 58 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 300 องศา ถึงมุม 330 องศา มีค่ามากที่สุดที่ มุม 315 องศา และมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 15, 45 และ 315 องศา ค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 15, 45 และ 315 องศาได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระยะ $d = 0.4\lambda$, $d = 0.45\lambda$ และ $d = 0.5\lambda$ จะเห็นได้ว่าที่ระยะ $d = 0.55\lambda$ มีพหุคูณรองบริเวณ 330 ถึง 10 องศา แคบกว่า แต่มีอัตราขยายที่มุม 270 องศา ต่ำกว่า

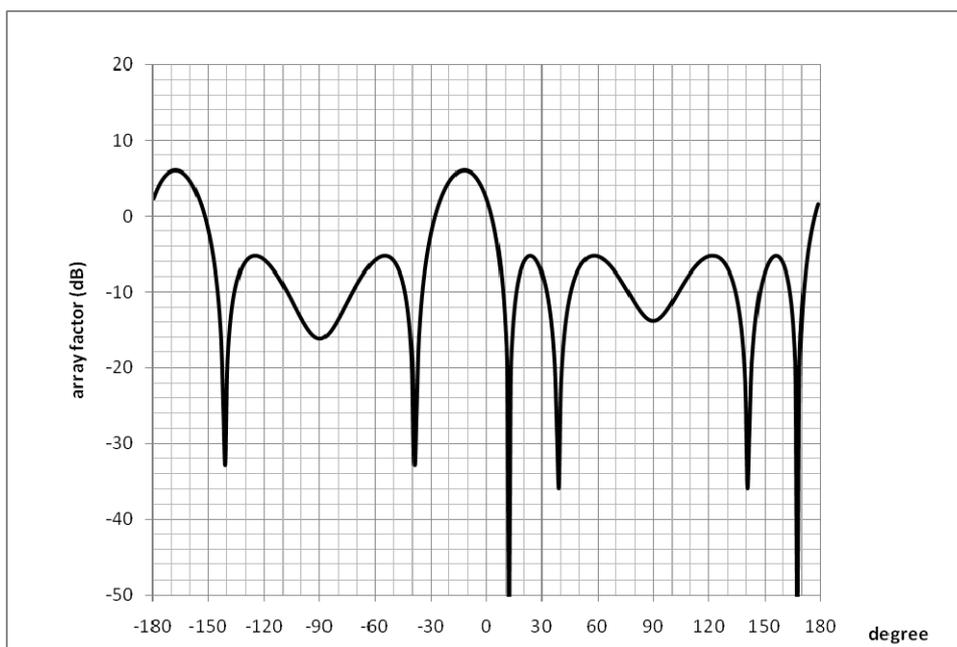
พิจารณาภาพที่ 59 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 15 องศา และที่บริเวณมุม 50, 310 และ 345 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 50, 310 และ 345 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจาก

แผ่นป้ายได้ จะเห็นว่าค่าตัวประกอบแกลวลำดับมีพหุคูณรอง ที่มุม 340 องศาแคบมาก เมื่อเทียบกับ ระยะ $d = 0.4\lambda$, $d = 0.45\lambda$ และ $d = 0.5\lambda$ แต่พหุคูณรอง ที่บริเวณมุม 90 และ 270 องศาที่อัตราขยาย สูงกว่าและมีลักษณะกว้างกว่าเมื่อเทียบกับระยะ $d = 0.4\lambda$, $d = 0.45\lambda$ และ $d = 0.5\lambda$

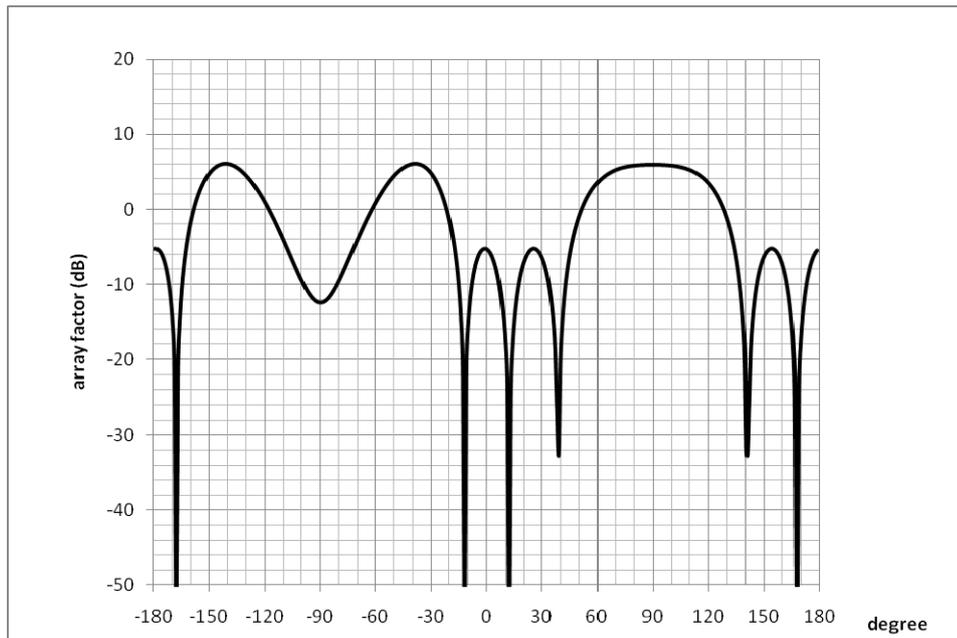
พิจารณาภาพที่ 60 ค่าตัวประกอบแกลวลำดับที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมากบริเวณ มุม 20 ถึง 90 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 15, 315 และ 345 องศา ค่าตัวประกอบแกลวลำดับแบบ นี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 15, 315 และ 345 องศา ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระยะ $d = 0.4\lambda$, $d = 0.45\lambda$ และ $d = 0.5\lambda$ จะเห็นได้ว่าที่ระยะ $d = 0.55\lambda$ มีพหุคูณรองบริเวณ 330 ถึง 10 องศา แคบกว่า แต่มีอัตราขยายที่มุม 90 องศาต่ำกว่า

2.2.8 ค่าตัวประกอบแกลวลำดับที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

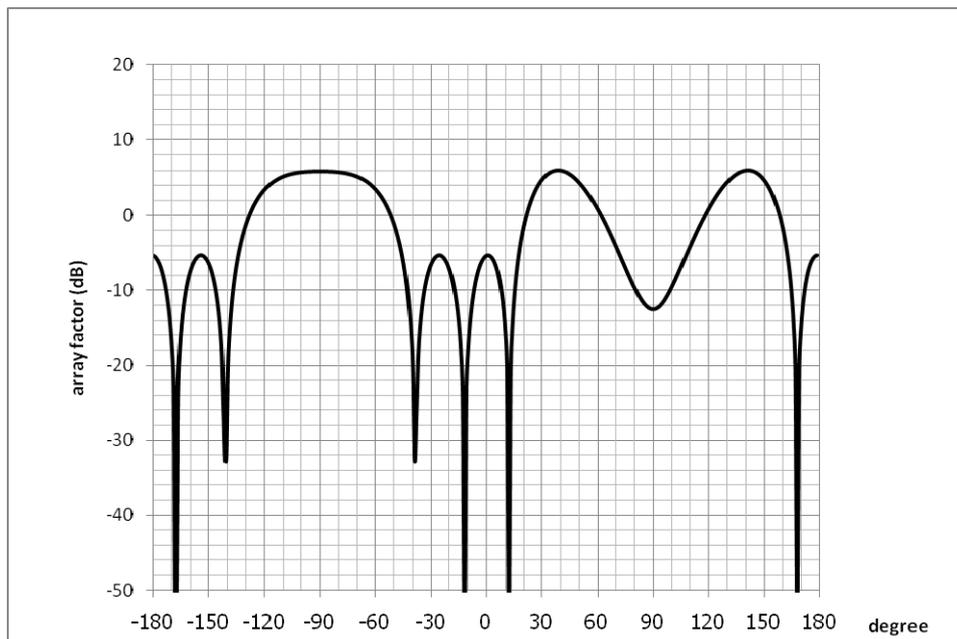
ได้ผลการจำลองดังนี้



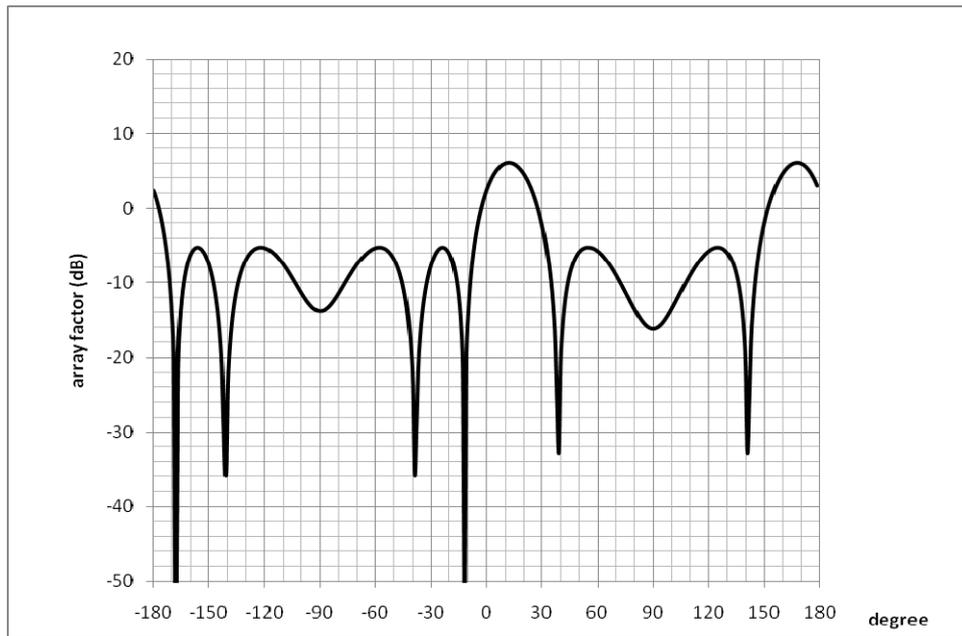
ภาพที่ 61 ค่าตัวประกอบแกลวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.6\lambda$



ภาพที่ 62 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.6\lambda$



ภาพที่ 63 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.6\lambda$



ภาพที่ 64 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.6\lambda$

พิจารณาภาพที่ 61 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 345 องศา และที่มุม 15, 40 และ 350 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุดซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่ง 15, 40 และ 350 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้มีพหุคูณรองที่มีอัตราขยายสูงและแคบกว่าที่ระยะอื่นๆ และมีพหุคูณหลักที่ค่อนข้างแคบ ความแตกต่างของค่าอัตราขยายของพหุคูณหลักและพหุคูณรอง ประมาณ 16 dB

พิจารณาภาพที่ 62 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 300 องศา ถึงมุม 340 องศา มีค่ามากที่สุดที่ มุม 320 องศาและมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 15, 40 และ 350 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่ มุม 15, 40 และ 350 องศาได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพหุคูณหลักที่เล็กกว่าที่ระยะอื่นและมีพหุคูณรองที่แคบ ความแตกต่างของค่าอัตราขยายของพหุคูณหลักและพหุคูณรอง ประมาณ 16 dB

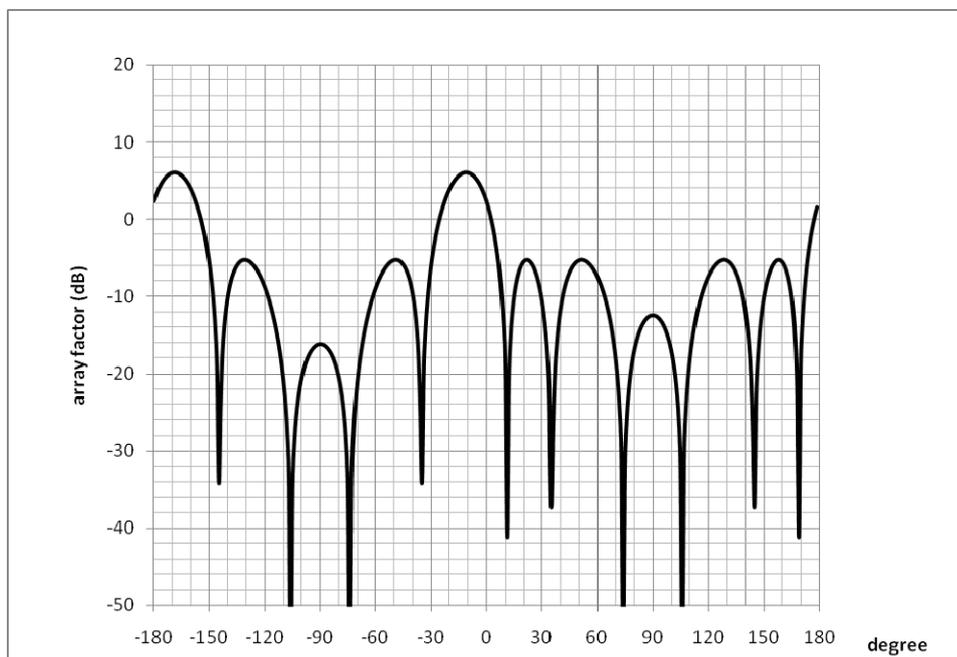
พิจารณาภาพที่ 63 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 15 องศา และที่บริเวณมุม 40, 320 และ 350 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 40, 320 และ 350 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจาก

แผ่นป้ายได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้มีพหุคูณรองที่มีอัตราขยายสูงและแคบกว่าที่ระยะอื่นๆ มีพหุคูณหลักที่ค่อนข้างแคบ ความแตกต่างของค่าอัตราขยายของพหุคูณหลักและพหุคูณรองประมาณ 16 dB

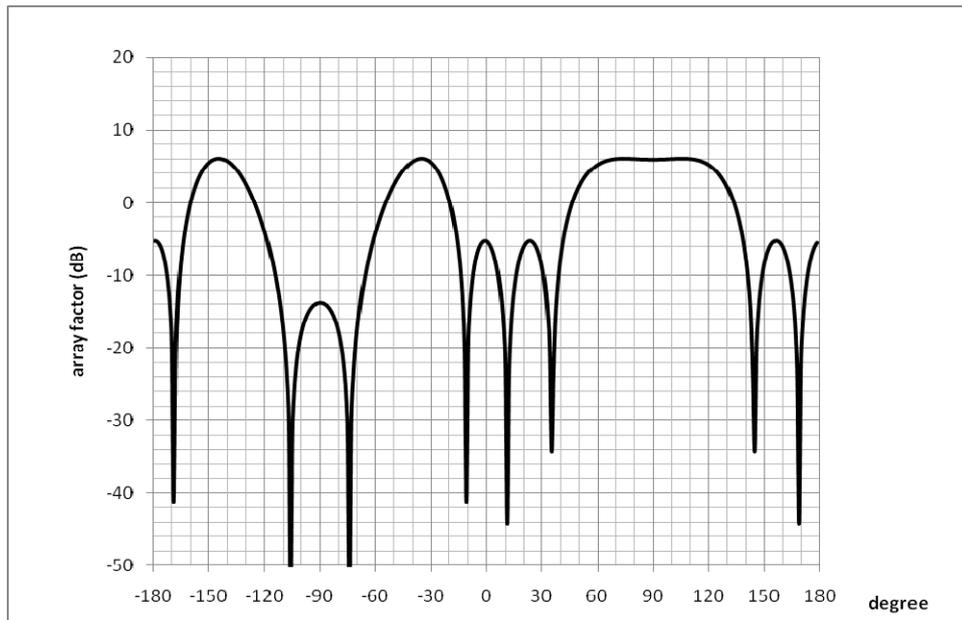
พิจารณาภาพที่ 64 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 20 ถึง 60 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 15, 320 และ 350 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 15, 320 และ 350 องศาได้จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพหุคูณหลักที่เล็กกว่าที่ระยะอื่นและมีพหุคูณรองที่แคบและไม่ครอบคลุมบริเวณกว้าง ความแตกต่างของค่าอัตราขยายของพหุคูณหลักและพหุคูณรองประมาณ 16 dB

2.2.9 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ระยะ $d = 0.65\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

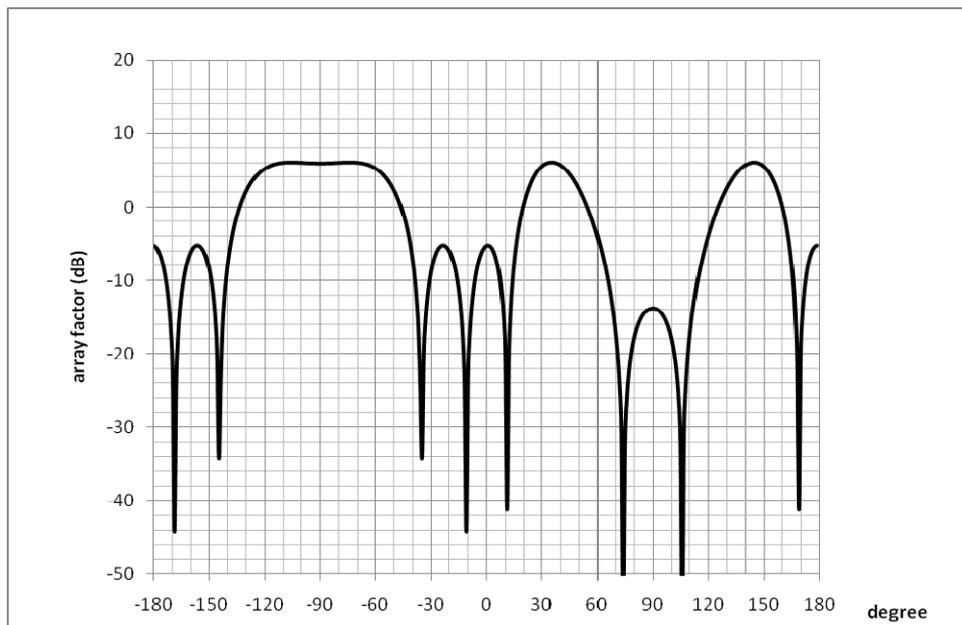
ได้ผลการจำลองดังนี้



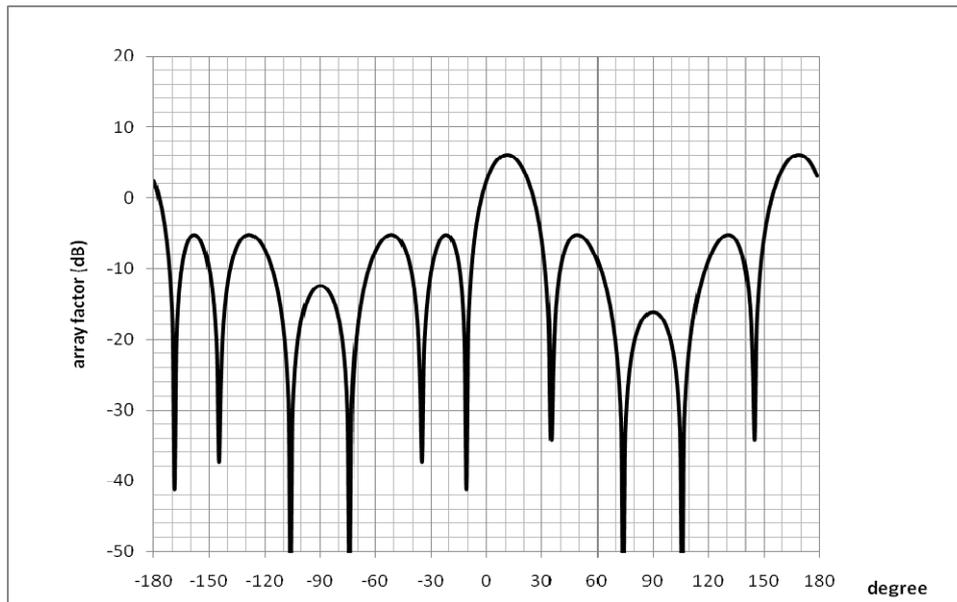
ภาพที่ 65 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.65\lambda$



ภาพที่ 66 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.65\lambda$



ภาพที่ 67 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.65\lambda$



ภาพที่ 68 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.65\lambda$

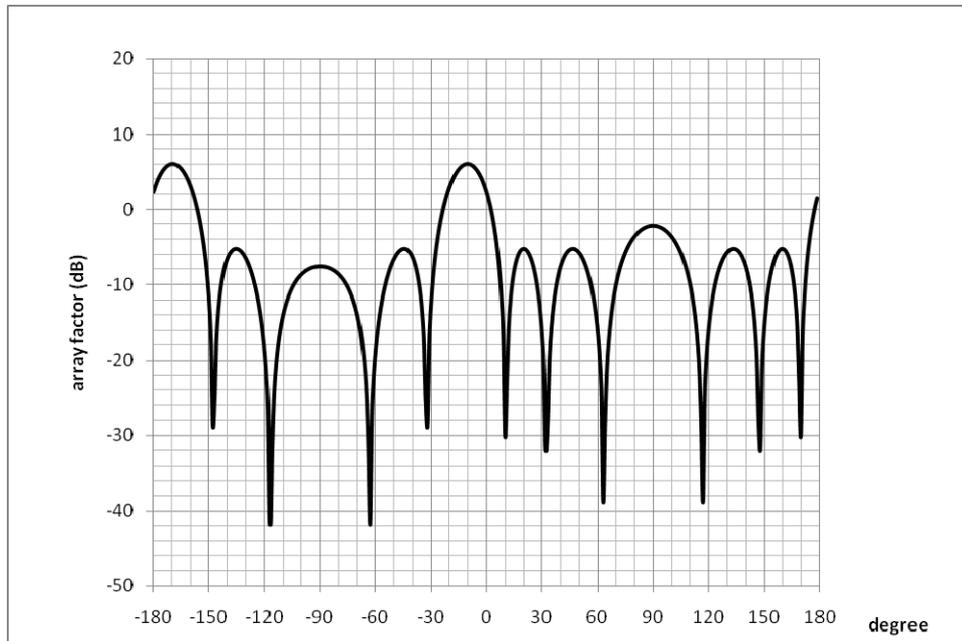
พิจารณาภาพที่ 66 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 330 องศา ถึงมุม 10 องศา มีค่ามากที่สุดที่ มุม 325 องศาและมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 15, 30 และ 350 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่ มุม 15, 30 และ 350 องศาได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพูคลื่นหลักที่เล็กกว่า ที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ และมีพูคลื่นรองที่แคบแต่มีจำนวนมากกว่าระยะ $d = 0.6\lambda$

พิจารณาภาพที่ 67 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 15 องศา และที่บริเวณมุม 40, 320 และ 350 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้าย วางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 40, 320 และ 350 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจาก แผ่นป้ายได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับลักษณะนี้มีพูคลื่นรองที่มีอัตราขยายสูงและมี จำนวนมากกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ มีพูคลื่นหลักที่ค่อนข้างแคบกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$

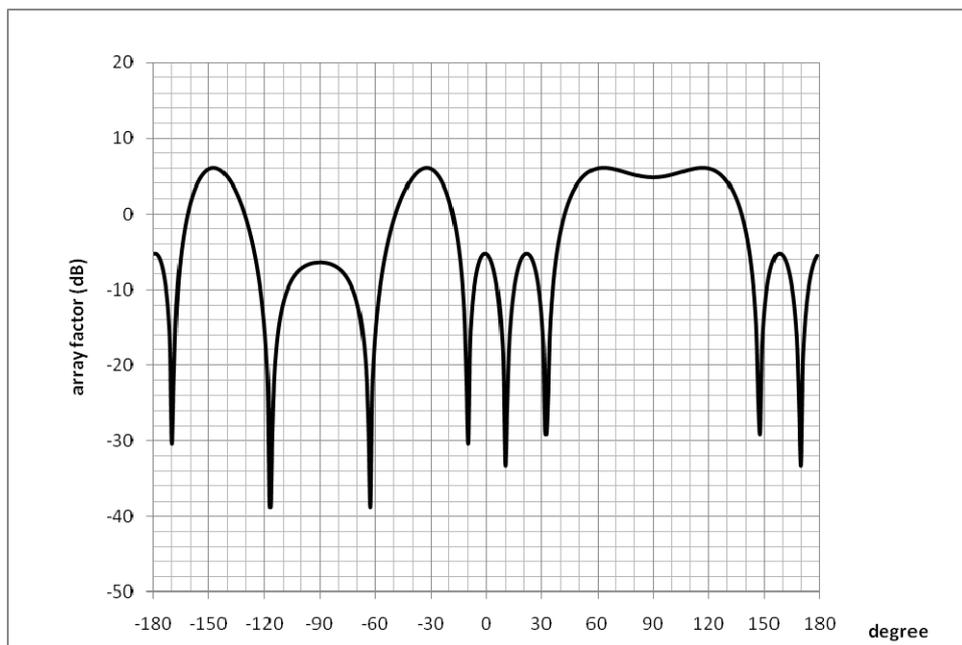
พิจารณาภาพที่ 68 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมาก บริเวณมุม 20 ถึง 65 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 30, 320 และ 345 องศา ค่าตัวประกอบแถว ลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 30, 320 และ 345 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบ แถวลำดับลักษณะนี้มีพูคลื่นรองที่มีอัตราขยายสูงและมีจำนวนมากกว่าระยะ $d = 0.6\lambda$ มีพูคลื่น หลักที่ค่อนข้างแคบกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$

2.2.10 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ระยะ $d = 0.7\lambda$ ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์

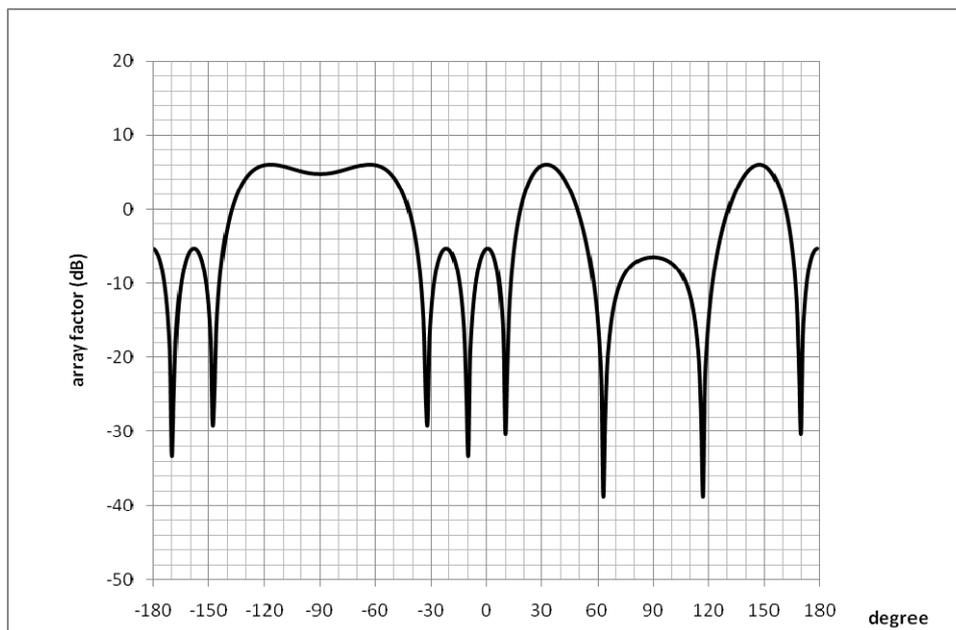
ได้ผลการจำลองดังนี้



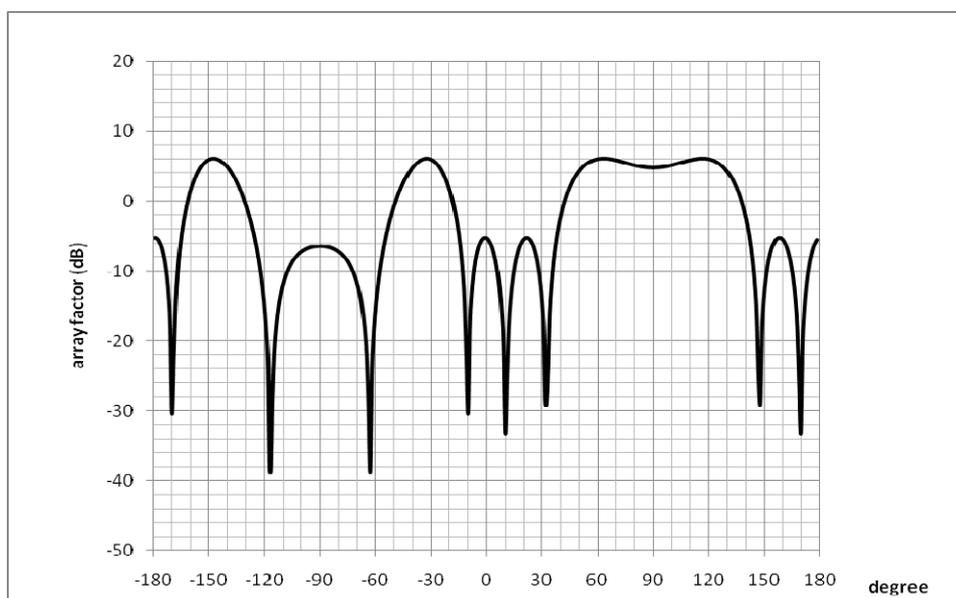
ภาพที่ 69 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 45$ องศา และระยะ $d = 0.7\lambda$



ภาพที่ 70 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = 135$ องศา และระยะ $d = 0.7\lambda$



ภาพที่ 71 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -135$ องศา และระยะ $d = 0.7\lambda$



ภาพที่ 72 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ มุม $\beta = -45$ องศา และระยะ $d = 0.7\lambda$

พิจารณาภาพที่ 69 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 45$ มีอัตราขยายมากบริเวณ มุม 350 องศา และที่มุม 15, 40 และ 330 องศา มีอัตราขยายต่ำที่สุดซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ ตำแหน่ง 15, 40 และ 330 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ จะเห็น

ได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพหุคูณหลักที่เล็กกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$ มีพหุคูณรองที่แคบแต่มีจำนวนมากกว่าระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$

พิจารณาภาพที่ 70 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = 135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 300 องศา ถึงมุม 340 องศา มีค่ามากที่สุดที่ มุม 320 องศาและมีอัตราขยายต่ำที่บริเวณมุม 15, 40 และ 350 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 15, 40 และ 350 องศาได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพหุคูณหลักที่เล็กกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$ มีพหุคูณรองที่แคบแต่มีจำนวนมากกว่าระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$

พิจารณาภาพที่ 71 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -135$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 15 องศา และที่บริเวณมุม 40, 320 และ 350 องศา มีอัตราขยายต่ำ ซึ่งถ้าหากนำแผ่นป้ายวางไว้ที่ตำแหน่งบริเวณมุม 40, 320 และ 350 องศา อาจทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแผ่นป้ายได้ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพหุคูณหลักที่เล็กกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$ มีพหุคูณรองที่แคบแต่มีจำนวนมากกว่าระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$

พิจารณาภาพที่ 72 ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ $\beta = -45$ มีอัตราขยายมากบริเวณมุม 20 ถึง 60 องศาและมีอัตราขยายต่ำบริเวณ 15, 320 และ 350 องศา ลักษณะค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้จะไม่สามารถรับสัญญาณจากป้ายที่มุม 15, 320 และ 350 องศาได้จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบแถวลำดับมีลักษณะมีพหุคูณหลักที่เล็กกว่าที่ระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$ มีพหุคูณรองที่แคบแต่มีจำนวนมากกว่าระยะ $d = 0.6\lambda$ และ $d = 0.65\lambda$

2.3 เกณฑ์ในการเลือกระยะห่างระหว่างแต่ละเอเลเมนต์ของสายอากาศ(d)

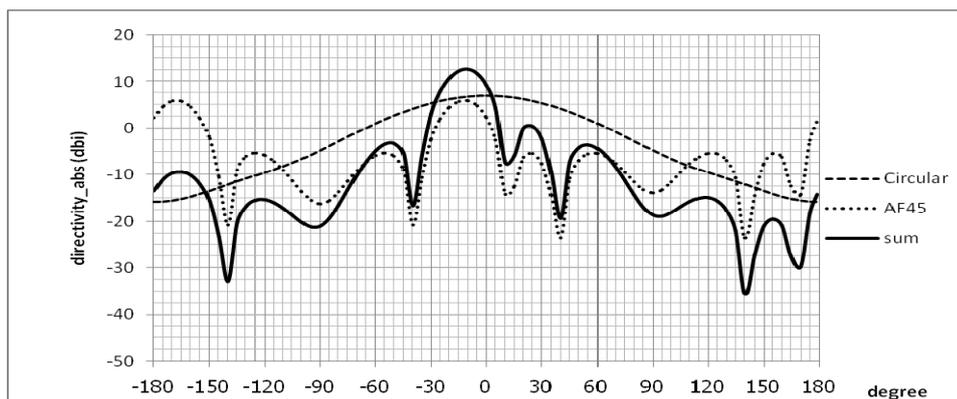
การเลือกระยะห่างระหว่างแต่ละเอเลเมนต์ของสายอากาศ(d) เพื่อให้เหมาะสมกับระบบสายอากาศที่ต้องการจัดสร้างต้องมีลักษณะดังนี้

- ก. พหุคูณหลักมีระยะห่างกัน 45 องศา ในแต่ละค่าความต่างเฟส (β) ที่ 45, 135, -135 และ -45 องศา
- ข. ค่าอัตราขยายของพหุคูณรองต่ำกว่าพหุคูณหลักไม่น้อยกว่า 10 dB

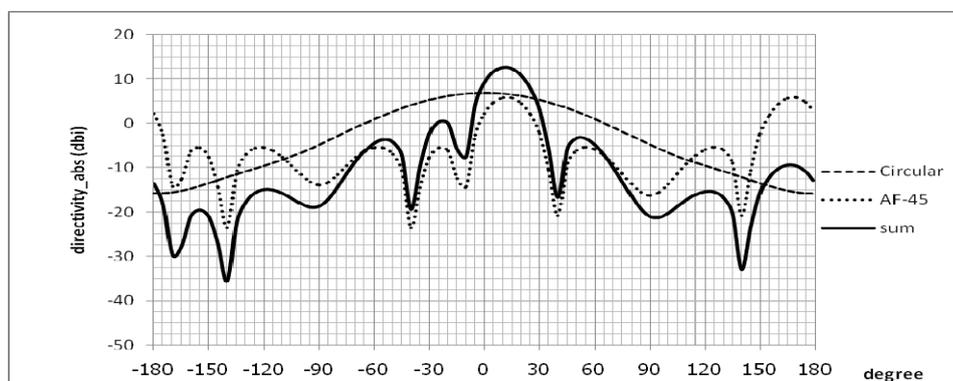
ค. การซ้อนทับกันของพหุนามหลักที่แต่ละค่าความต่างเฟส (β) ที่ 45, 135, -135 และ -45 องศา ต้องมีไม่มาก

ดังนั้นระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ(d)ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบสายอากาศที่ต้องการจัดสร้างคือ ระยะ $d = 0.6\lambda$ ซึ่งมีลักษณะของค่าตัวประกอบแถวลำดับตรงตามวัตถุประสงค์ข้างต้น

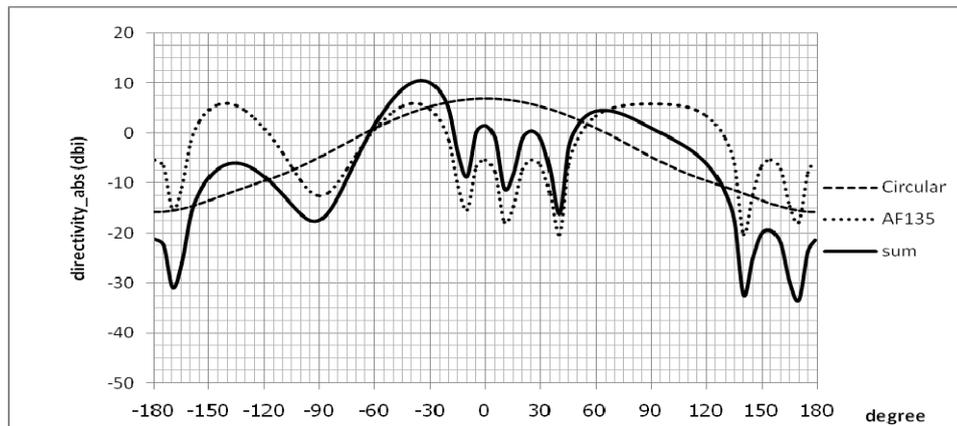
หลังจากที่เลือกใช้ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศได้แล้ว จะทำการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศที่ทำการจัดสร้างโดยการนำผลของการจัดเรียงสายอากาศที่มีระยะ $d = 0.6\lambda$ ที่ค่าความต่างเฟส $\beta = 45, 135, -135$ และ -45 องศา มารวมกับผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานองค์ประกอบเดี่ยวดังภาพที่ 73 -76 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่ารวมแล้วนั้นในแต่ละค่าความต่างเฟสจะมีอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 12 dBi



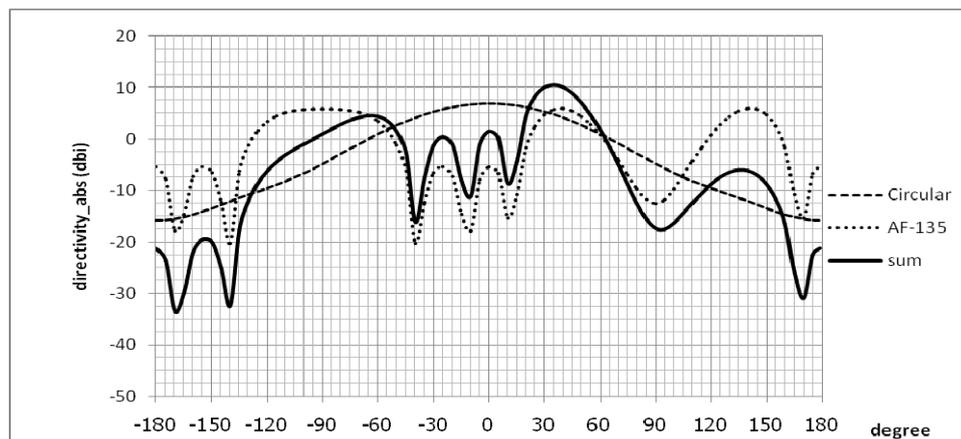
ภาพที่ 73 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่ $d = 0.6\lambda$, $\beta = 45$ องศา



ภาพที่ 74 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่ $d = 0.6\lambda$, $\beta = -45$ องศา



ภาพที่ 75 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่ $d = 0.6\lambda$ $\beta = 135$ องศา

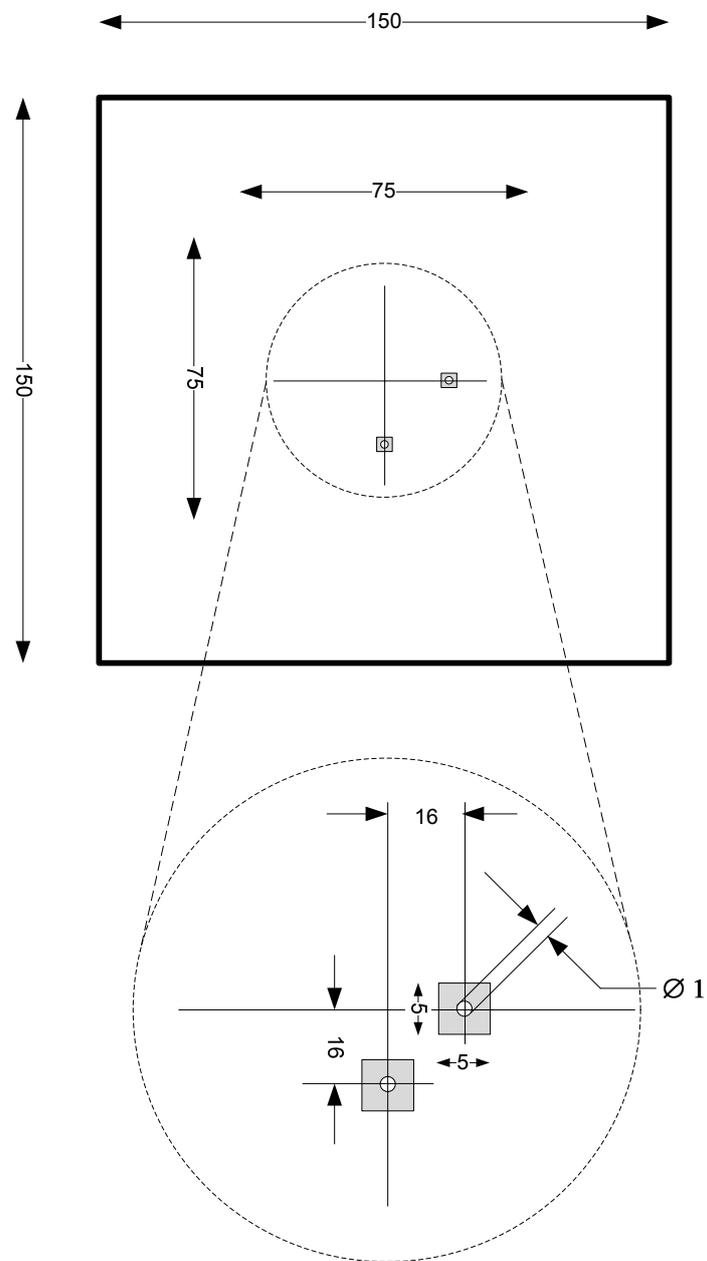


ภาพที่ 76 แบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่ $d = 0.6\lambda$, $\beta = -135$ องศา

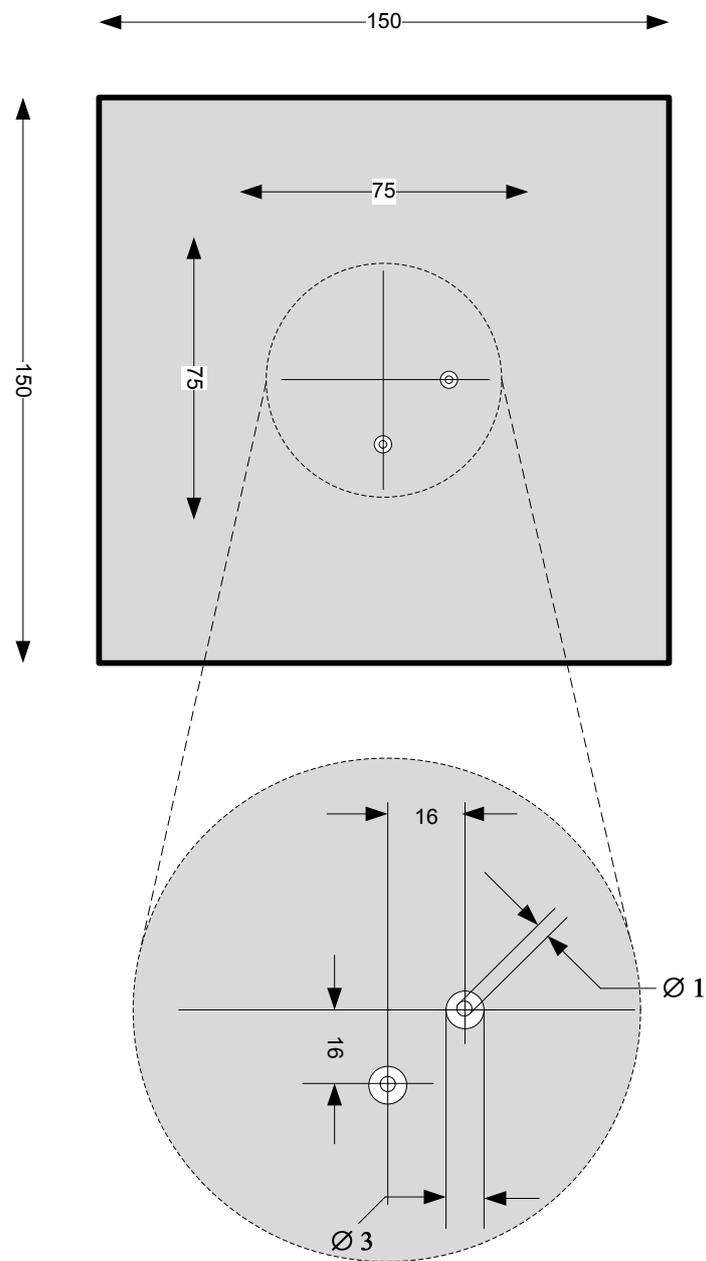
3. การสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

การออกแบบสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมได้ออกแบบลายวงจรให้มีขนาดอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω โดยสายอากาศแต่ละอัน จะประกอบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ 2 แผ่น โดยภาพที่ 77 จะเป็นลายวงจรของแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านบนและ ภาพที่ 78 เป็นของด้านล่าง และภาพที่ 79 เป็นลายวงจรของแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านบน และภาพที่ 80 เป็นของด้านล่าง โดยระหว่างแผ่นวงจรพิมพ์ ทั้ง 2 แผ่น จะมีแผ่นพีเอ็มเอ็มเอความหนา 20 มม. แทรกอยู่ โดยใช้เส้นลวดทองแดงขนาด $\varnothing 1$ มม. เป็นตัวเชื่อมแผ่นวงจรพิมพ์ทั้ง 2 แผ่น ในส่วนของการส่งผ่านพลังงานผ่านแผ่นพีเอ็มเอ็มเอ โดยที่แผ่นวงจรพิมพ์ทั้ง 2 แผ่น และแผ่นพีเอ็มเอ็มเอ ใช้

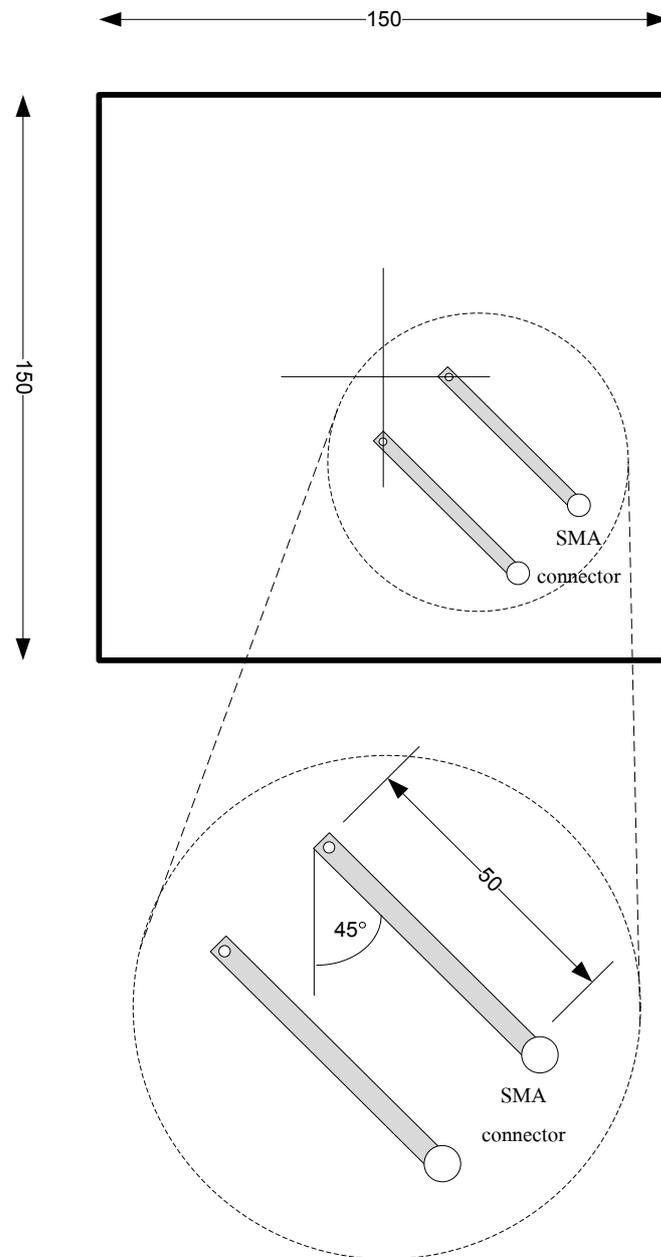
สกรูในลอน ขนาด M3 ความยาว 30 มม. เป็นตัวยึดเข้าหากัน โดยมีลำดับชั้นการประกอบ ดังแสดงดังภาพที่ 81 หลังจากนั้น จึงได้ประดิษฐ์สายอากาศออกมา โดยได้แผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ดังภาพที่ 82 และ 83 โดยภาพที่ 82 เป็นภาพลายวงจรด้านบน และภาพที่ 83 เป็นภาพลายวงจรด้านล่าง และได้แผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ดังภาพที่ 84 และ 85 โดยภาพที่ 84 เป็นภาพลายวงจรด้านบน และภาพที่ 85 เป็นภาพลายวงจรด้านล่าง ซึ่งเมื่อทำการประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะได้สายอากาศที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังภาพที่ 86 และ 87 โดยภาพที่ 86 เป็นภาพด้านหน้า และภาพที่ 87 เป็นภาพด้านหลัง ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำไปทดสอบต่อไป



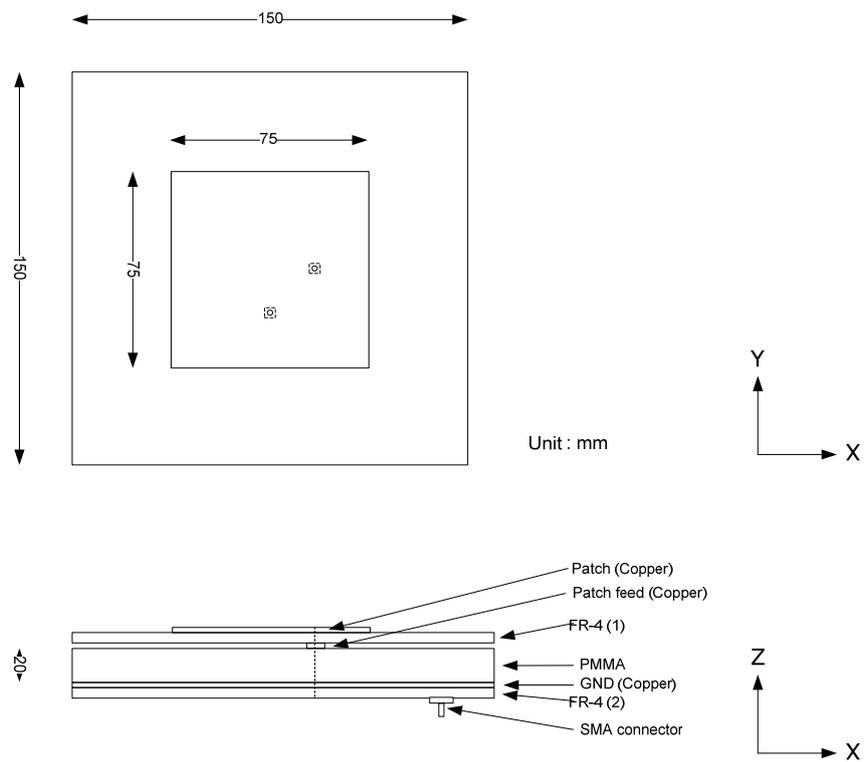
ภาพที่ 78 แสดงขนาดของลายวงจรรของแผ่นวงจรมพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านล่างของสายอากาศที่มีการ
โพลารไรซ์แบบวงกลม



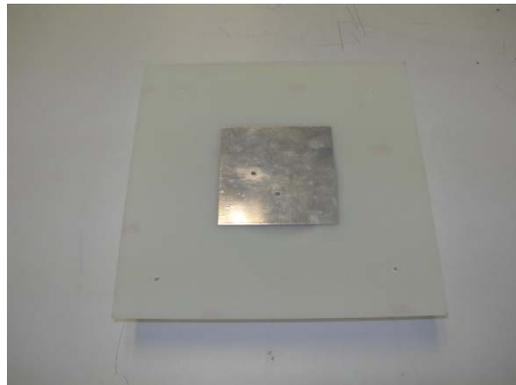
ภาพที่ 79 แสดงขนาดของลายวงจรรของแผ่นวงจรรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านบนของสายอากาศที่มีการ
โพลารไรซ์แบบวงกลม



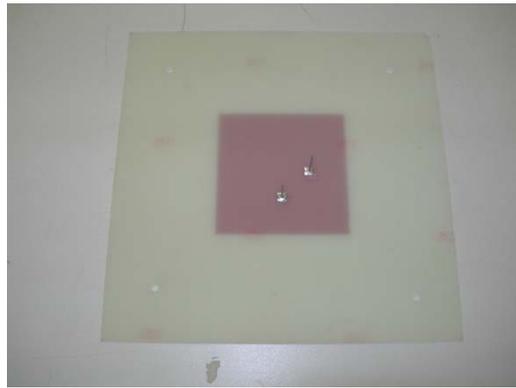
ภาพที่ 80 แสดงขนาดของลายวงจรของแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านล่างของสายอากาศที่มีการ
โพลาริซแบบแบบวงกลม



ภาพที่ 81 แสดงการจัดลำดับชั้นของการประกอบสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม



ภาพที่ 82 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านบนของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม



ภาพที่ 83 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 1 ด้านล่างของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม



ภาพที่ 84 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านบน ของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม



ภาพที่ 85 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ แผ่นที่ 2 ด้านล่างของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม



ภาพที่ 86 แสดงด้านหน้าของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม



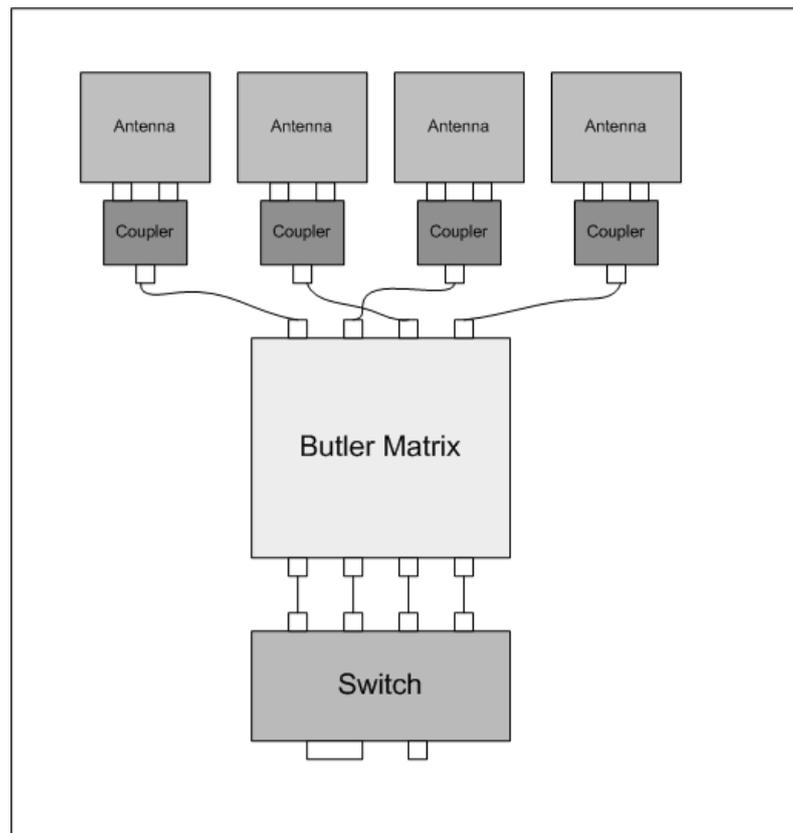
รูปที่ 87 แสดงด้านหลังของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม

4. การสร้างสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม

ในส่วนของสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบนั้นจะประกอบด้วย ส่วนย่อยๆทั้งหมด 5 ส่วน คือ

- ก. บอร์ดสวิทช์
- ข. บอร์ดแบตเตอรี่เมทริกซ์
- ค. สายนำสัญญาณ
- ง. บอร์ดพีเปอร์
- จ. สายอากาศ 1 องค์ประกอบ

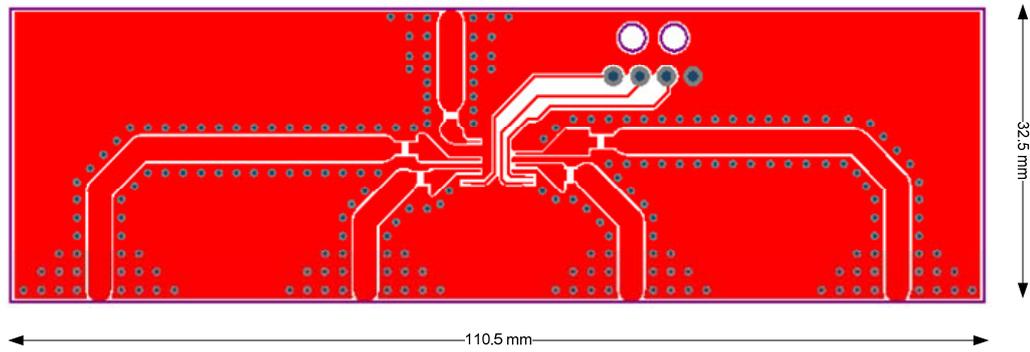
โดยส่วนประกอบแต่ละส่วนสามารถเชื่อมต่อกันดังแสดงดังภาพที่ 88



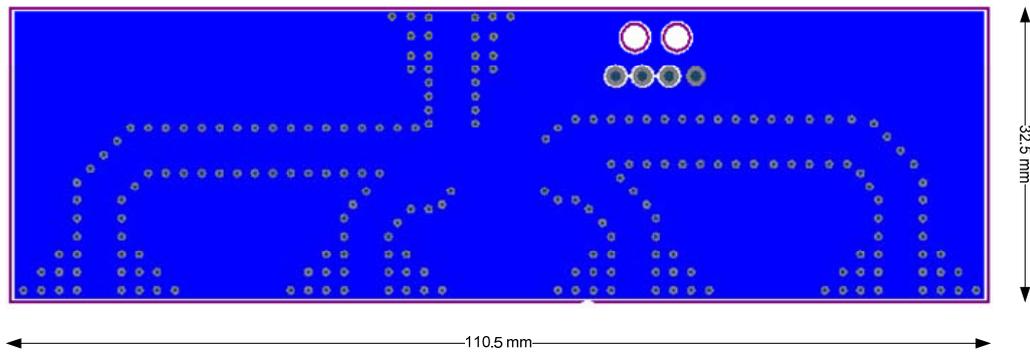
รูปที่ 88 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศแบบแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ

4.1 โครงสร้างของบอร์ดสวิตช์

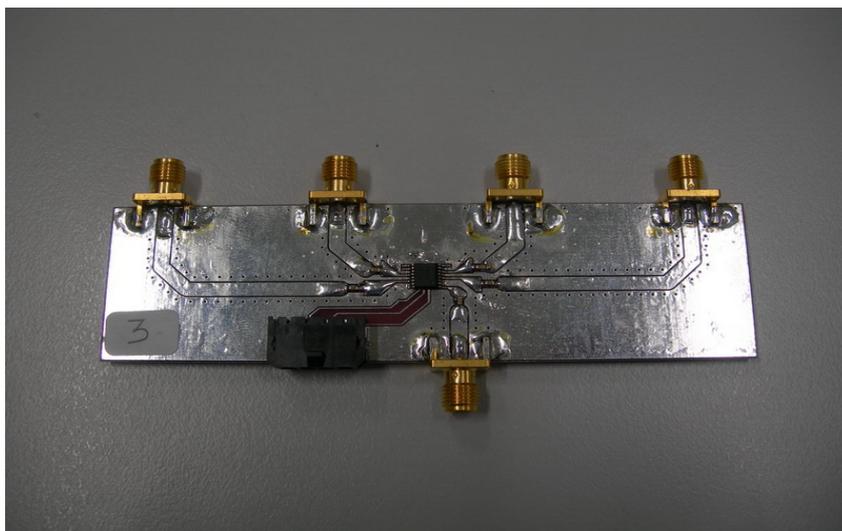
ส่วนของบอร์ดสวิตช์ทำหน้าที่ในการเลือกสัญญาณอินพุตให้ออกไปยังเอาต์พุตตามพอร์ตที่ได้ถูกเลือกไว้ โดยได้เลือกใช้ไอซี (IC) เบอร์ hmc241qs16 ของบริษัท Hittite จำกัดซึ่งสามารถเลือกสัญญาณได้ 4 พอร์ต โดยสร้างลายวงจรลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ขึ้นมาให้มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม โดยใช้ตัวเชื่อมต่อ (Connector) ชนิด SMA เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณกับบอร์ดอื่นๆ และมีตัวเชื่อมต่อสำหรับสัญญาณควบคุมการเลือกทิศทางของสัญญาณ โดยมีลายวงจรและขนาดดังภาพที่ 89 และภาพที่ 90 ซึ่งภาพที่ 89 เป็นลายวงจรด้านบน และภาพที่ 90 เป็นลายวงจรด้านล่าง ซึ่งเมื่อประกอบอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วจะเป็นดังภาพที่ 91



ภาพที่ 89 แสดงลายวงจรและขนาดของบอร์ดสวิทช์ ด้านบน



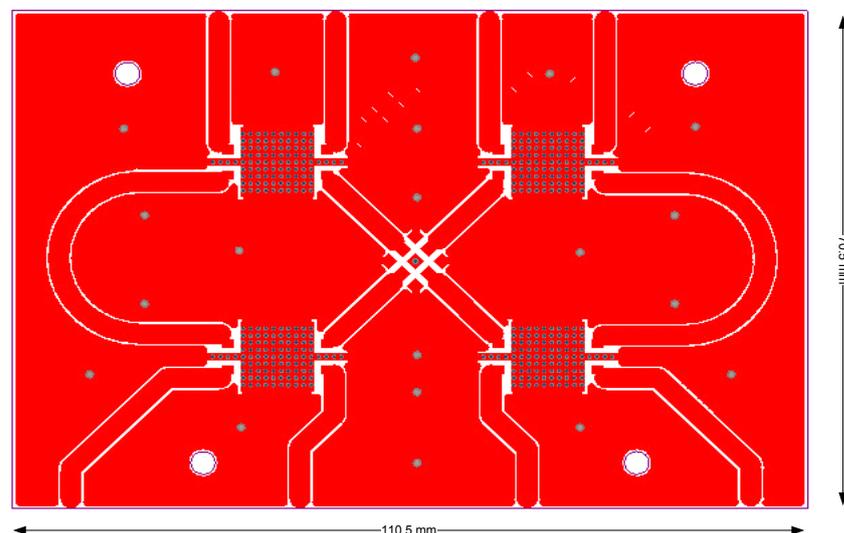
ภาพที่ 90 แสดงลายวงจรและขนาดของบอร์ดสวิทช์ ด้านล่าง



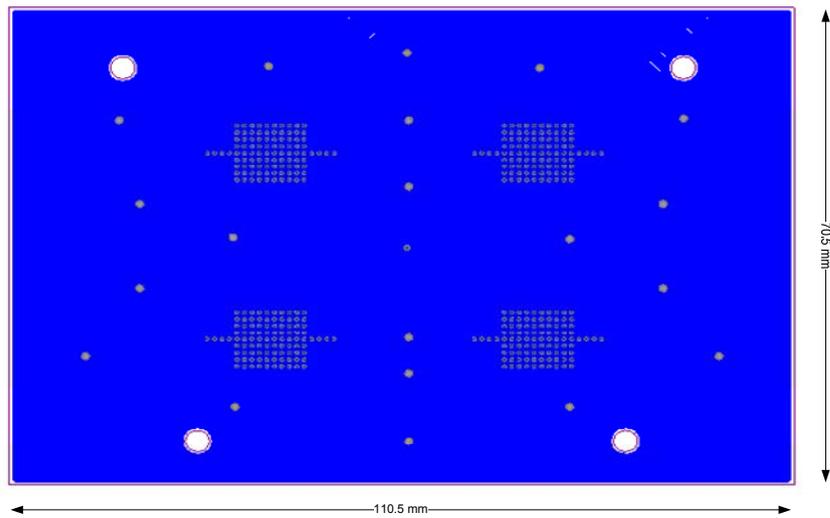
ภาพที่ 91 แสดงบอร์ดสวิทช์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

4.2 โครงสร้างของบอร์ดับทเลอ์เมทริกซ์

ส่วนของบอร์ดับทเลอ์เมทริกซ์ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณอินพุตที่ได้รับเข้ามา กระจายสัญญาณออกเป็น 4 พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตจะมีมุมเฟสที่แตกต่างกันตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยสร้างลายวงจรลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ให้มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม โดยใช้ตัวเชื่อมต่อชนิด SMA เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณกับส่วนอื่นๆ โดยมีลายวงจรและขนาด ดังภาพที่ 92 และภาพที่ 93 ซึ่งภาพที่ 92 เป็นลายวงจรด้านบน และภาพที่ 93 เป็นลายวงจรด้านล่าง ซึ่งเมื่อประกอบอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วจะเป็นดังภาพที่ 94 หลังจากนั้นจะถูกนำไปเชื่อมต่อกับบอร์ดของสวิตซ์ดังภาพที่ 95 และภาพที่ 96



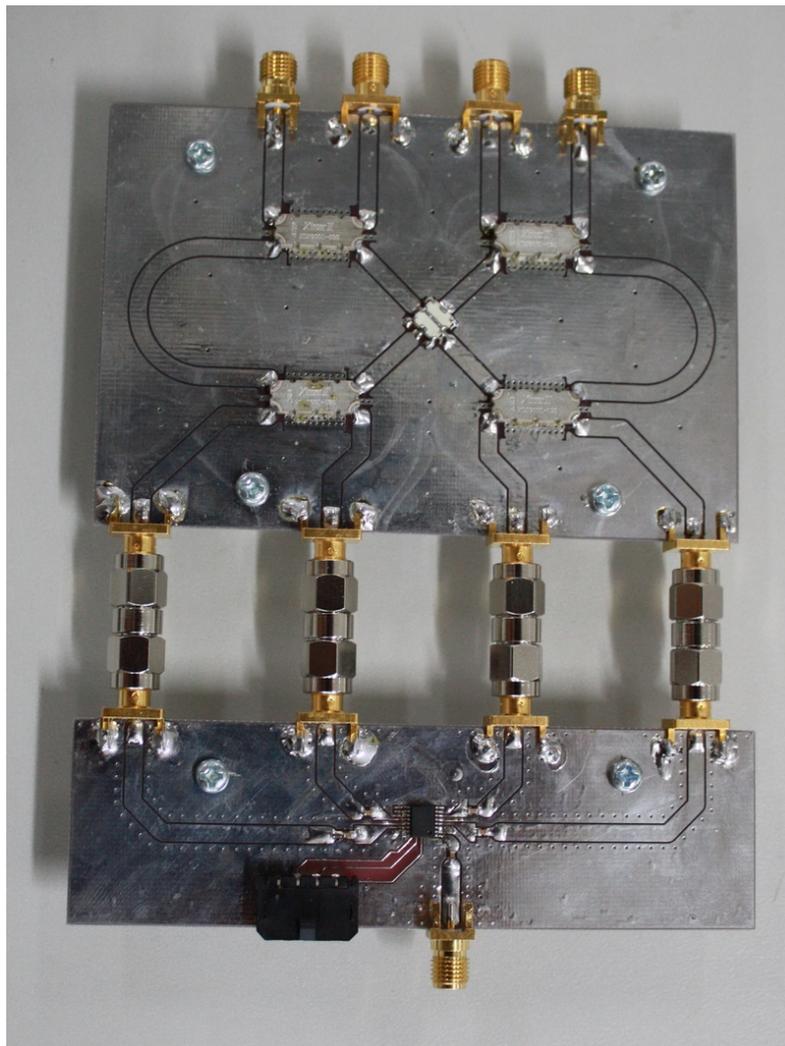
ภาพที่ 92 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดับทเลอ์เมทริกซ์ด้านบน



ภาพที่ 93 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดแบตเตอรี่เมทริกซ์ด้านล่าง



ภาพที่ 94 แสดงบอร์ดแบตเตอรี่เมทริกซ์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว



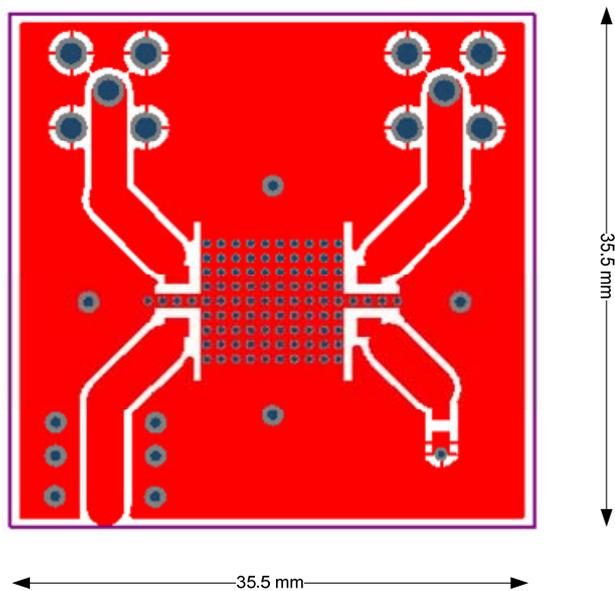
ภาพที่ 95 แสดงการต่อบอร์ดสวิทช์กับบอร์ดไมโครเมทริกซ์ ด้านบน



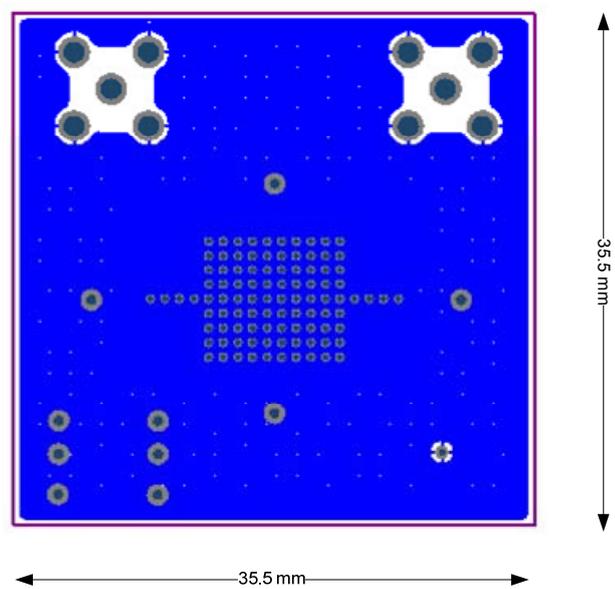
ภาพที่ 96 แสดงการต่อบอร์ดสวิตช์กับบอร์ดแบตเตอรี่เมทริกซ์ ด้านล่าง

4.3 โครงสร้างของบอร์ดคัปเปอ์

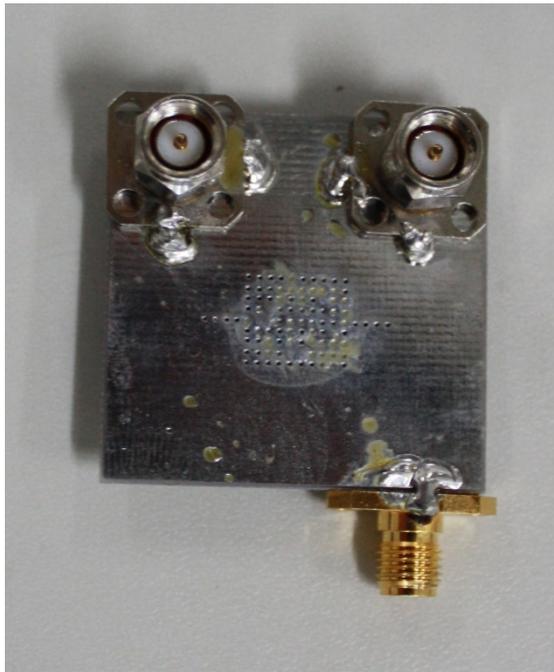
ส่วนของบอร์ดคัปเปอ์ทำหน้าที่ในการแบ่งพลังงานออกเป็น 2 ส่วนที่เท่ากันแต่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งเลือกใช้ Hybrid Coupler เบอร์ XC0900E-03 โดยสร้างลายวงจรลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ขึ้นมาให้มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม แล้วใช้ตัวเชื่อมต่อชนิด SMA เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณกับส่วนอื่นๆ โดยมีลายวงจรและขนาด ดังภาพที่ 97 และภาพที่ 98 ซึ่งภาพที่ 97 เป็นลายวงจรด้านบน และภาพที่ 98 เป็นลายวงจรด้านล่าง และภาพบอร์ดจริงด้านบนและด้านล่างดังภาพที่ 99 และภาพที่ 100



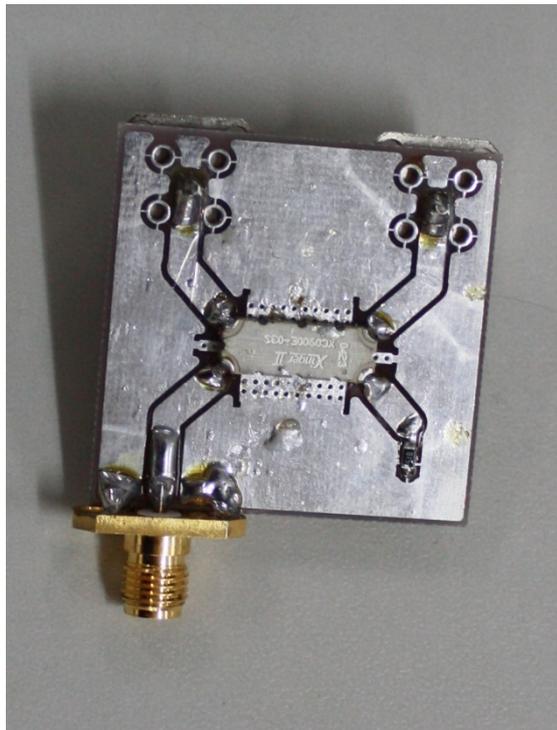
ภาพที่ 97 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดคัปเปอร์ ด้านบน



ภาพที่ 98 แสดงลายวงจรและขนาด ของบอร์ดคัปเปอร์ ด้านล่าง



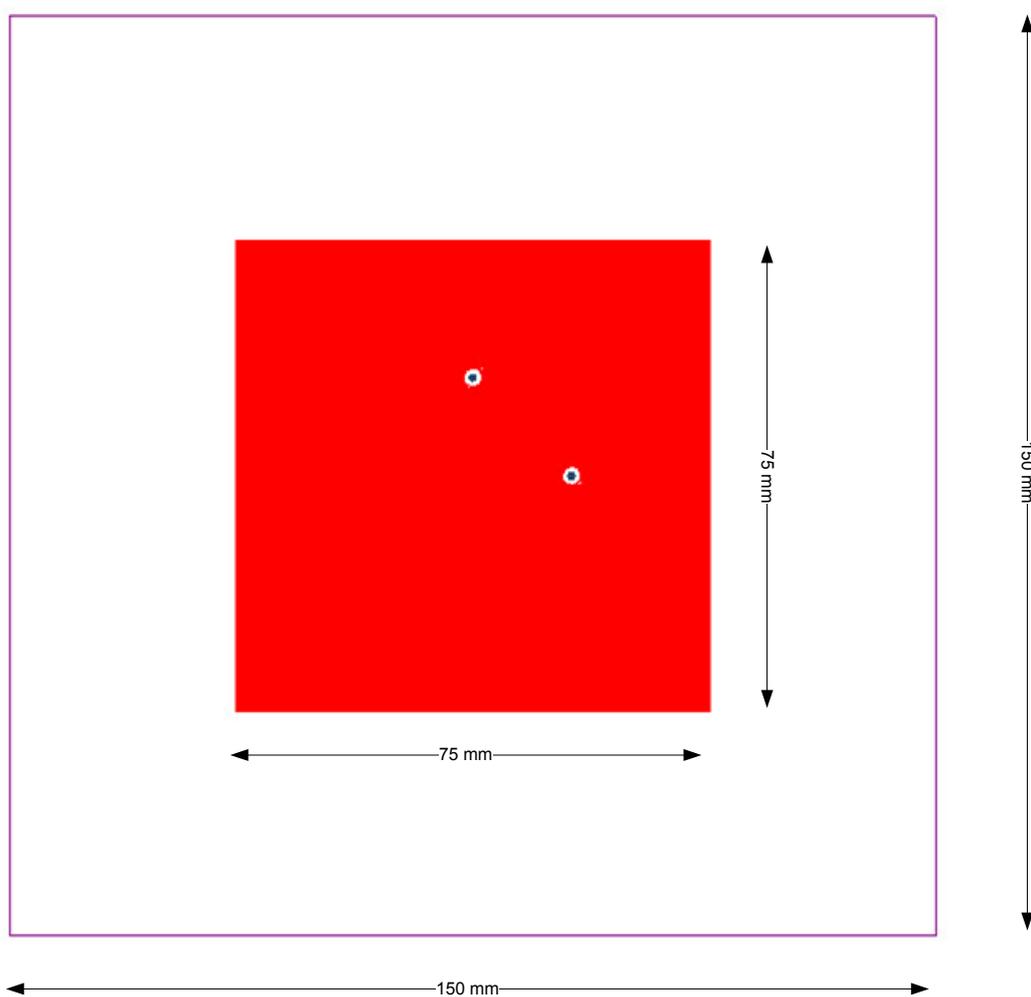
ภาพที่ 99 แสดงบอร์ดคัปเปอร์ ด้านบน



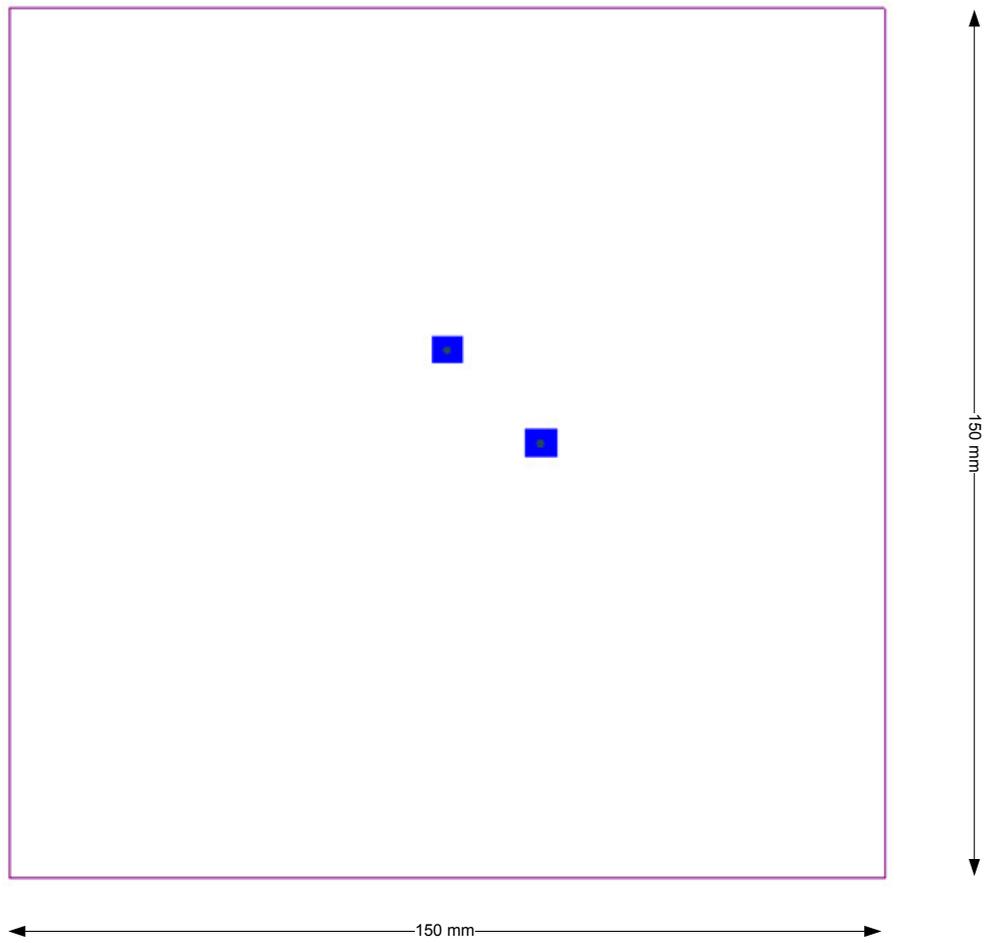
ภาพที่ 100 แสดงบอร์ดคัปเปอร์ ด้านล่าง

4.4 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม

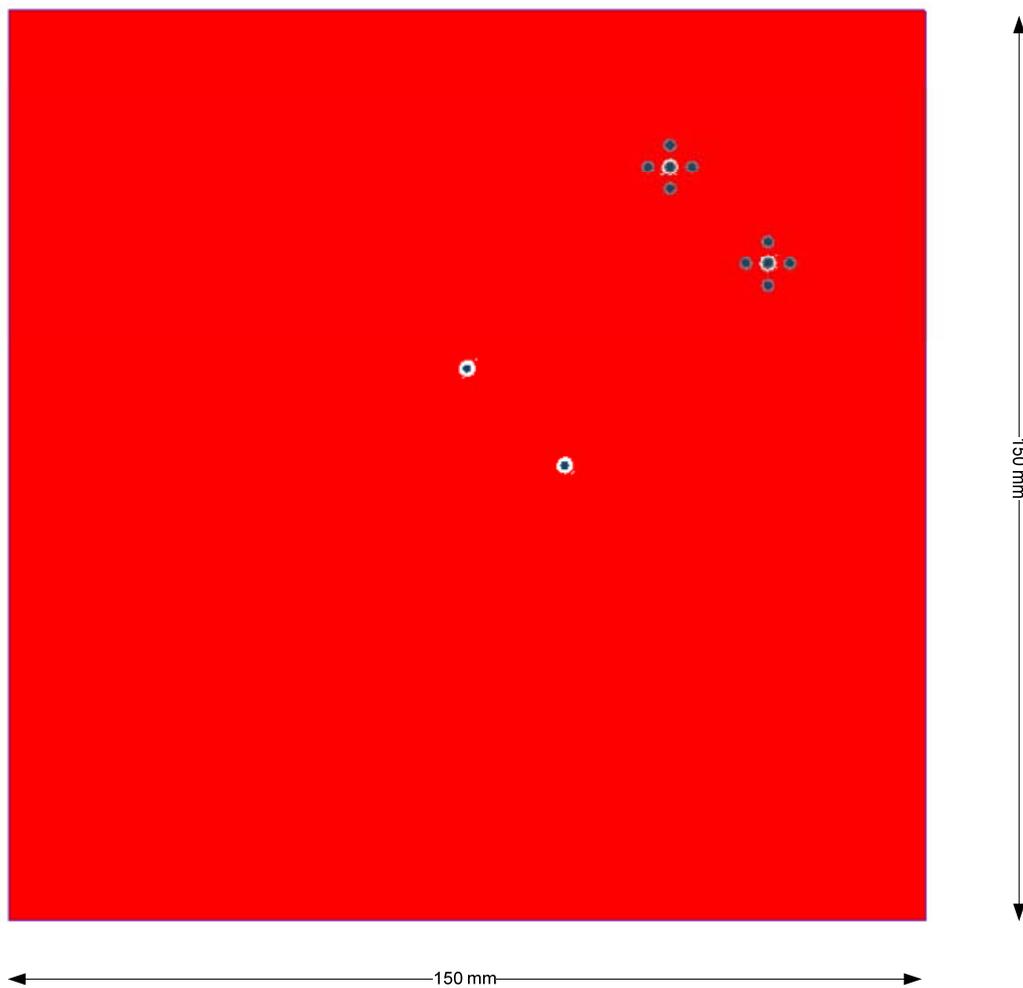
ส่วนของสายอากาศนั้น จะแยกส่วนออกมาแต่ละจุดป้อนพลังงาน โดยใช้ตัวเชื่อมต่อชนิด SMA เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณกับส่วนอื่นๆ โดยมีลายวงจรและขนาด ดังภาพที่ 101 - 102 ซึ่งภาพที่ 101 เป็นลายวงจรด้านบนของแผ่นบน ภาพที่ 102 เป็นลายวงจรด้านล่างของแผ่นบน ภาพที่ 103 เป็นลายวงจรด้านบนของแผ่นล่าง และ ภาพที่ 104 เป็นลายวงจรด้านล่างของแผ่นล่าง โดยภาพที่ 105 แสดงจุดป้อนพลังงานของสายอากาศ



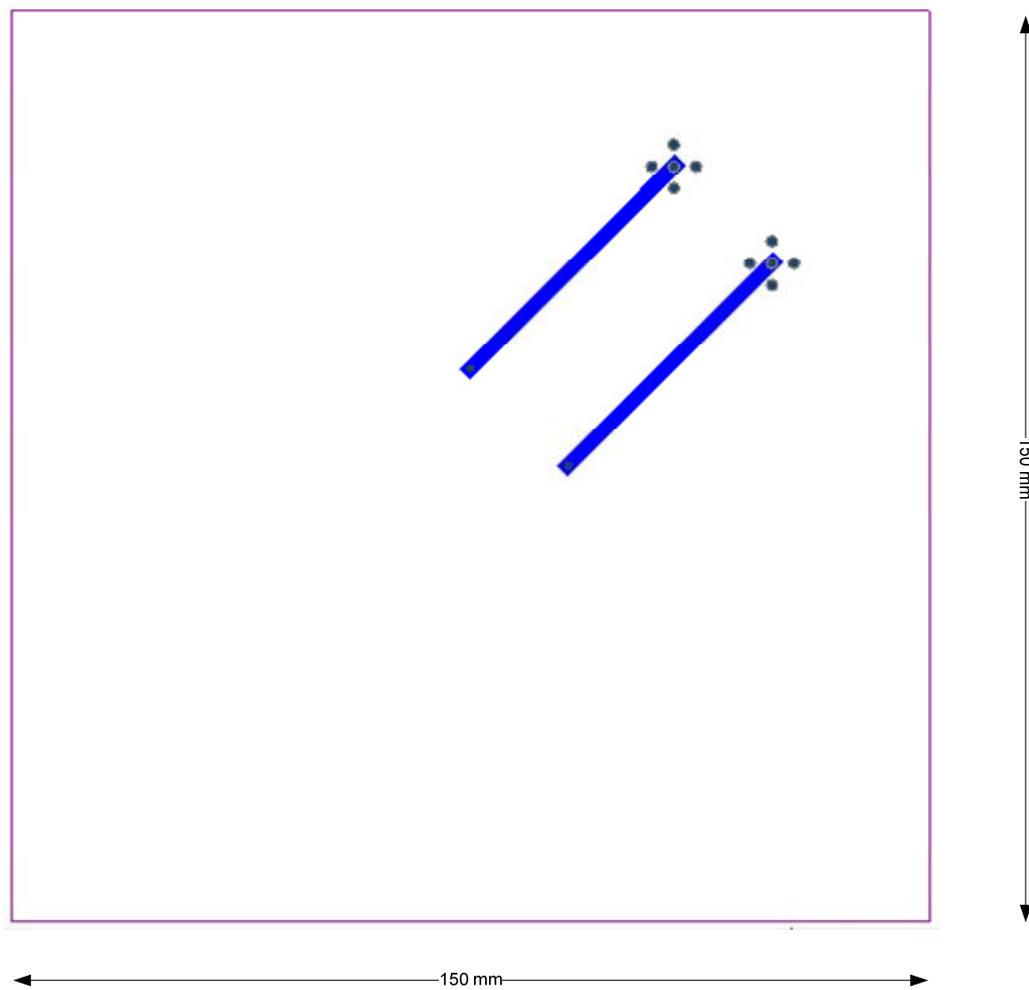
ภาพที่ 101 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นลายวงจรแผ่นบน ด้านบน



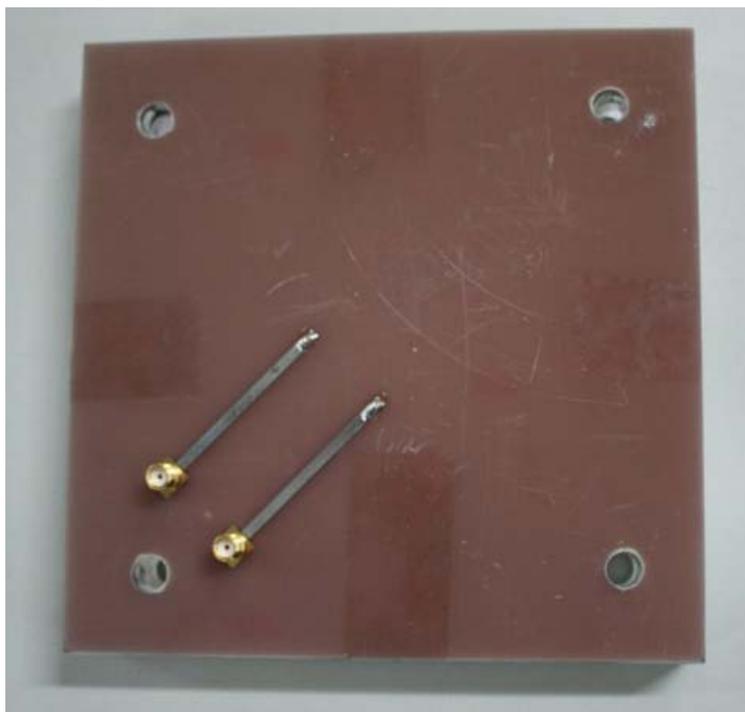
ภาพที่ 102 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นลายวงจรแผ่นบน ด้านล่าง



ภาพที่ 103 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นลายวงจรแผ่นล่าง ด้านบน



ภาพที่ 104 แสดงลายวงจรและขนาด ของแผ่นลายวงจรแผ่นล่าง ด้านล่าง



ภาพที่ 105 แสดงจุดป้อนพลังงานของสายอากาศ

ผลและวิจารณ์

ผล

1. การทดสอบสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

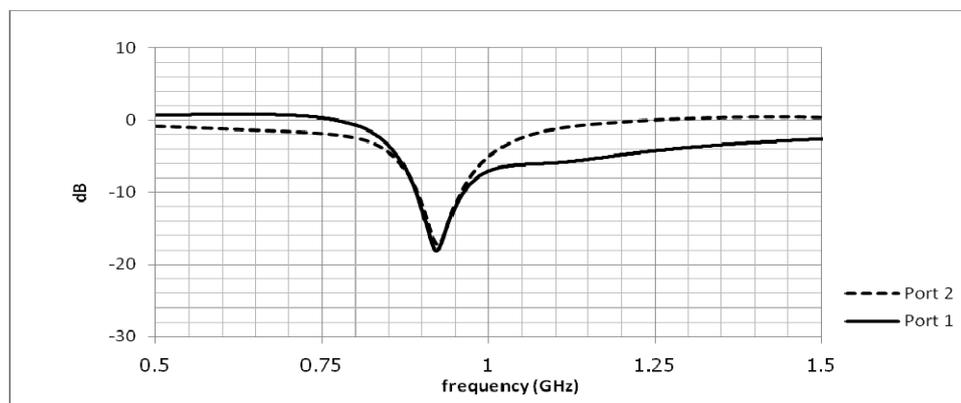
การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศนั้น ได้ทำการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ซึ่งได้ผลออกมา ดังภาพที่ 106 ซึ่งเพื่อพิจารณาค่า S_{11} ในช่วงย่านความถี่ 920 - 925 เมกะเฮิรตซ์นั้น ค่าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า -10 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศที่ออกแบบมานั้นสามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่ดังกล่าวได้ และทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศโดยวัดในห้องสถานะแวลลุ่มเปิด โดยใช้ชุดพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง ของ บริษัท Austria Microsystem จำกัด เป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณออกมา ซึ่งชุดพัฒนาฯ นี้สามารถส่งพลังงานออกมาได้สูงสุด 27 dBm โดยชุดพัฒนาฯ จะต่อเข้ากับสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear polarization) ของบริษัท Alien Technology จำกัด ในภาคส่ง ส่วนภาครับนั้น จะต่อสายอากาศในภาครับเข้ากับ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อวัดระดับพลังงาน โดยทำการวัดมุมทุกๆ 15 องศา เฉพาะบริเวณด้านหน้าสายอากาศเท่านั้น โดยให้สายอากาศของภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 3 เมตรในระดับความสูงที่เท่ากันที่ 1.5 เมตร หลังจากนั้นนำค่าระดับพลังงานที่ได้มาหาค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สมการที่ 6

$$G_{antenna} = \frac{\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2}{G_{Tx}} \quad (6)$$

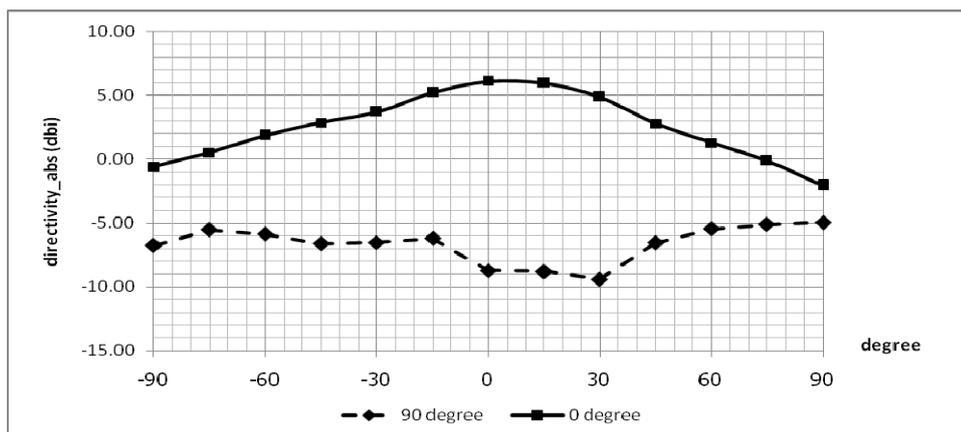
โดย P_r คือพลังงานที่ได้รับมาจากสายอากาศภาครับ, P_t คือพลังงานที่ส่งออกมาจากภาคส่ง G_{Tx} คืออัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง และ r คือระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่ง

ในเบื้องต้นจะต้องหาค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งเสียก่อน โดยใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกันจำนวน 2 อัน อันแรกทำหน้าที่เป็นตัวส่งและอีกอันเป็นตัวรับส่ง แล้วใช้สมการที่ 6 หาค่าอัตราขยายของสายอากาศ โดยสายอากาศทั้ง 2 จะมีอัตราขยายเท่ากัน ซึ่งทำการทดสอบหาค่าอัตราขยายในระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ 3 เมตร ซึ่งวัดระดับพลังงานที่ส่งออก

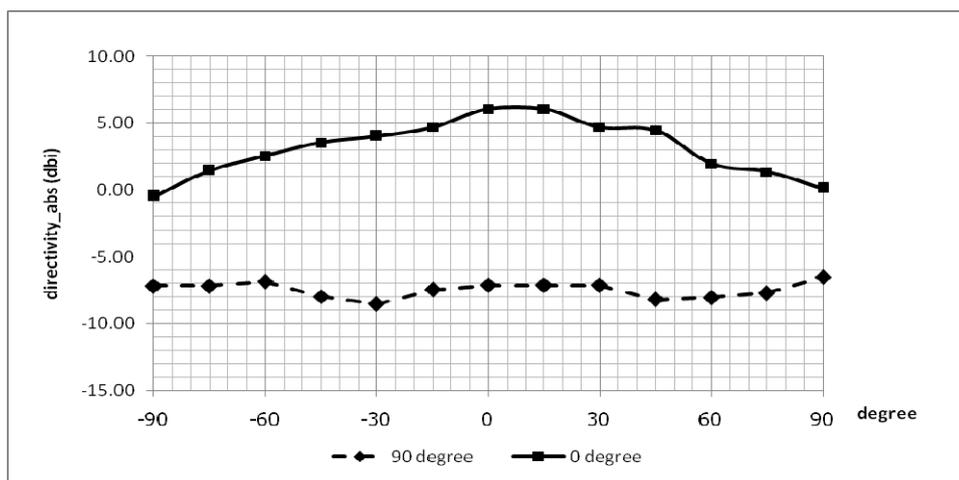
มาได้ 27 dBm และวัดระดับพลังงานที่ได้รับเข้ามาได้สูงสุด -2.17 dBm ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราขยายตามสมการที่ 6 จะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศ 6.12 dBi หลังจากนั้นใช้วิธีในการวัดแบบเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ใช้สายอากาศภาครับเป็นแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มี 2 พอร์ตที่พัฒนาขึ้นทำการวัดค่าจากทั้ง 2 พอร์ต ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าสูงสุดของรูปภาพที่ 107 - 108 จะสามารถหาอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่พัฒนาขึ้นได้ 6.00 dBi



ภาพที่ 106 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมที่วัดได้จริง

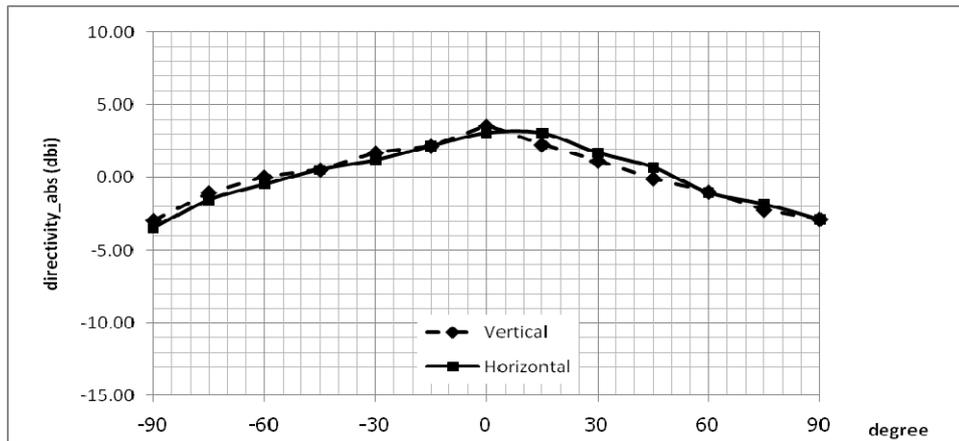


ภาพที่ 107 แสดงอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมของพอร์ต 1 เมื่อทิศโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับและภาคส่งต่างกัน 0° และ 90°



ภาพที่ 108 แสดงอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมของพอร์ต 2 เมื่อทิศทางโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับและภาคส่งต่างกัน 0° และ 90°

หลังจากนั้นจึงได้นำบอร์ดคัปเปอเรอร์ (สามารถอ่านรายละเอียดและการทดสอบได้ในส่วนของสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบ) มาเชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวเพื่อทำให้สายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม โดยทำการทดสอบเหมือนหาอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว ซึ่งสามารถหาอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมได้ดังภาพที่ 109 ซึ่งมีค่าอัตราขยายประมาณ 3 dBi ซึ่งเกิดจากในขั้นตอนของการวัดโดยใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เชิงเส้นเป็นสายอากาศในภาคส่ง ซึ่งจะมีการแบ่งพลังงานในคัปเปอเรอร์ซึ่งจะทำให้พลังงานที่ได้รับหายไปครึ่งหนึ่งแต่เพื่อที่จะสามารถทำให้สามารถทดสอบการเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมได้จึงต้องใช้สายอากาศที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นในภาคส่ง ซึ่งเมื่อลดค่าพลังงานที่หายไป ก็จะได้ค่าอัตราขยายออกมาประมาณ 6 dBi ใกล้เคียงกันทั้งในทิศของการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่งในแนวตั้งและแนวนอนและจากผลในเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่ได้ออกแบบไว้มีทิศการโพลาไรซ์แบบวงกลม



ภาพที่ 109 แสดงอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมในทิศการโพลาไรซ์แนวตั้งและแนวนอน

2. การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

สายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ประกอบด้วยอุปกรณ์ ทั้งหมด 5 ส่วน

- 1.บอร์ดสวิทช์ 1 บอร์ด
- 2.บอร์ดบัทเลอรีเมทริกซ์ 1 บอร์ด
- 3.สายนำสัญญาณ 4 เส้น
- 4.บอร์ดคัปเปอร์ 4 บอร์ด
- 5.สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม 4 อัน

โดยได้ทำการทดสอบแยกแต่ละส่วน หลังจากนั้นจึงนำมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วทำการทดสอบรวมสายอากาศแบบแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมอีกครั้งหนึ่ง

2.1 การทดสอบคุณสมบัติของบอร์ดสวิทช์

การทดสอบคุณสมบัติของบอร์ดสวิทช์ (ภาพที่ 110) ได้ทำการทดสอบการควบคุมให้สัญญาณเอาต์พุตออกมายังตำแหน่งพอร์ตเอาต์พุตถูกต้องหรือไม่ โดยทำการป้อนสัญญาณที่อินพุตขนาด 27 dBm แล้วทำการวัดระดับสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาแต่ละพอร์ต โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม โดยพิจารณาค่าที่ความถี่ 922.5 เมกะเฮิรต์ ดังแสดงดังตารางที่ 6 และสามารถหาค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในบอร์ดสวิทช์ได้ ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 110 บอร์ดสวิทช์

ตารางที่ 6 แสดงค่าระดับพลังงานที่วัดได้ที่พอร์ตเอาต์พุตแต่ละพอร์ต

รหัสควบคุม	ระดับพลังงานที่วัดได้ (dBm)			
	พอร์ต 1	พอร์ต 2	พอร์ต 3	พอร์ต 4
00	25.53	-36.70	-33.00	-38.60
01	-29.00	25.40	-36.30	-36.10
10	-37.20	-50.40	25.38	-36.80
11	-27.00	-39.30	-39.30	25.48

ตารางที่ 7 แสดงค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในบอร์ดสวิทช์แต่ละพอร์ต

รหัสควบคุม	ค่าพลังงานสูญเสีย (dB)			
	พอร์ต 1	พอร์ต 2	พอร์ต 3	พอร์ต 4
00	1.47	63.70	60.00	65.60
01	56.00	1.60	63.33	63.10
10	64.20	77.40	1.62	63.80
11	54.00	66.30	63.30	1.52

2.2 การทดสอบคุณสมบัติของบอร์ดบัทเลอร์เมทริกซ์

การทดสอบคุณสมบัติของบอร์ดบัทเลอร์เมทริกซ์ (ภาพที่ 111) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายวัดค่า S_{12} ออกมาทั้ง 4 พอร์ตของเอาต์พุตของแต่ละอินพุตแล้วทำการลบกับค่าพลังงานอินพุตและค่าคงที่ของพลังงานที่ลดลง (พลังงานที่ลดลงที่เกิดจากอุปกรณ์คัปเปอร์) จะได้พลังงานที่สูญเสียในบอร์ดบัทเลอร์เมทริกซ์ ดังแสดงตารางที่ 8 และทำการวัดค่าความต่างของมุมของพอร์ตที่อยู่ติดกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 9



ภาพที่ 111 บอร์ดบัทเลอร์เมทริกซ์

ตารางที่ 8 แสดงค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในบอร์ดแบตเตอรี่เมทริกซ์

อินพุท	ค่าพลังงานสูญเสีย (dB)			
	พอร์ต 1	พอร์ต 2	พอร์ต 3	พอร์ต 4
พอร์ต 1	1.22	1.03	0.89	1.03
พอร์ต 2	0.81	0.94	1.15	0.87
พอร์ต 3	0.88	1.10	0.99	0.97
พอร์ต 4	0.91	0.75	1.07	1.29

ตารางที่ 9 แสดงค่าความต่างของมุมของแต่ละพอร์ตเอาต์พุทที่อยู่ติดกัน

อินพุท	ค่าความต่างของมุม (β)		
	$\Delta 12$	$\Delta 23$	$\Delta 34$
พอร์ต 1	-54.95	-40.90	-54.98
พอร์ต 2	122.04	145.69	122.57
พอร์ต 3	-126.26	-143.59	-126.32
พอร์ต 4	47.12	36.10	51.84

2.3 การทดสอบคุณสมบัติของสายนำสัญญาณ

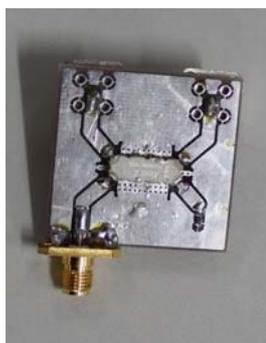
การทดสอบคุณสมบัติของสายนำสัญญาณ (ภาพที่ 112) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย วัดค่า S_{12} แล้วทำการหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ในสายนำสัญญาณที่ความถี่ 922 เมกะเฮิรต์ซึ่งสามารถวัดค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ 0.1 - 0.15 dB



ภาพที่ 112 สายนำสัญญาณ

2.4 การทดสอบคุณสมบัติของบอร์ดคัปเปอร์

การทดสอบคุณสมบัติของบอร์ดคัปเปอร์ (ภาพที่ 113) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรราย วัตต์ค่า S_{12} ออกมาทั้ง 2 พอร์ตของเอาต์พุตแล้วทำการลบกับค่าพลังงานอินพุตและค่าคงที่ของพลังงานที่ลดลง (พลังงานที่ลดลงที่เกิดจากอุปกรณ์คัปเปอร์) จะได้พลังงานที่สูญเสียในบอร์ดคัปเปอร์ ดังแสดงตารางที่ 9 และทำการวัดค่าความต่างของมุมของพอร์ตเอาต์พุต ดังแสดงตารางที่ 10 โดยในสายอากาศแถวลำดับจะใช้บอร์ดคัปเปอร์จำนวน 4 ชั้น



ภาพที่ 113 บอร์ดคัปเปอร์

ตารางที่ 10 แสดงค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในบอร์ดคัปเปอร์

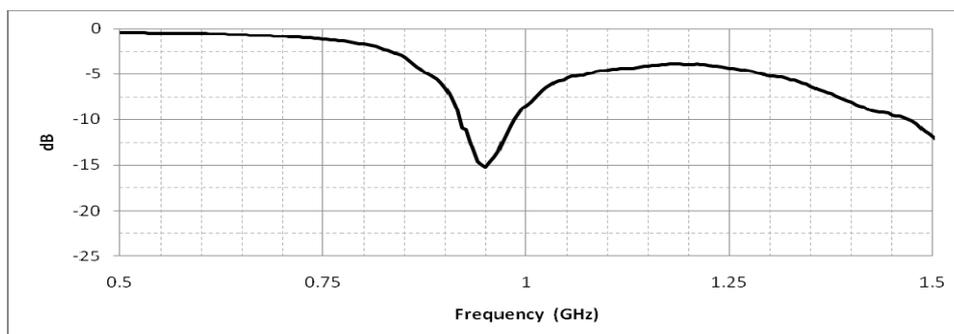
ชั้น	ค่าพลังงานสูญเสีย (dB)	
	พอร์ท 1	พอร์ท 2
1	0.32	0.39
2	0.33	0.38
3	0.30	0.38
4	0.32	0.39

ตารางที่ 11 แสดงค่าความต่างของมุมของเอาร์พุท บอร์ดคัปเปอร์

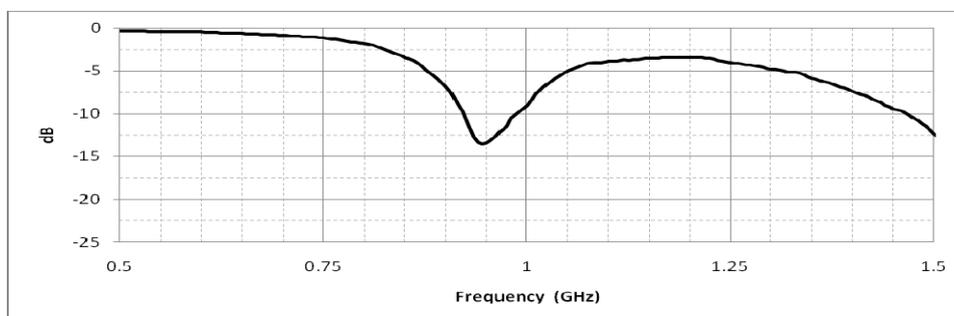
ชั้น	ค่าความต่างของมุมของเอาร์พุท (β)
1	-91.97
2	-92.03
3	-90.93
4	-91.09

2.5 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม

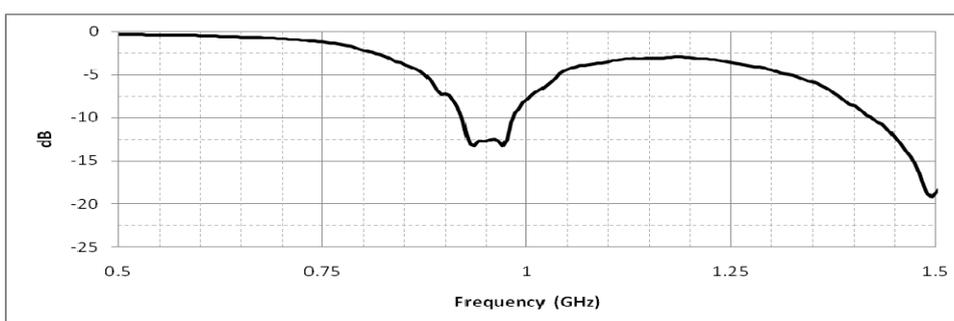
การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลมโดยมีจุดป้อนสัญญาณ 2 จุด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายวัดค่า S_{11} ผ่านทางจุดป้อนสัญญาณ 2 จุด จำนวน 4 อัน โดยแสดงดังภาพที่ 114 - 121 โดยในสายอากาศแถวลำดับ จะประกอบด้วยสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม จำนวน 4 ชุด



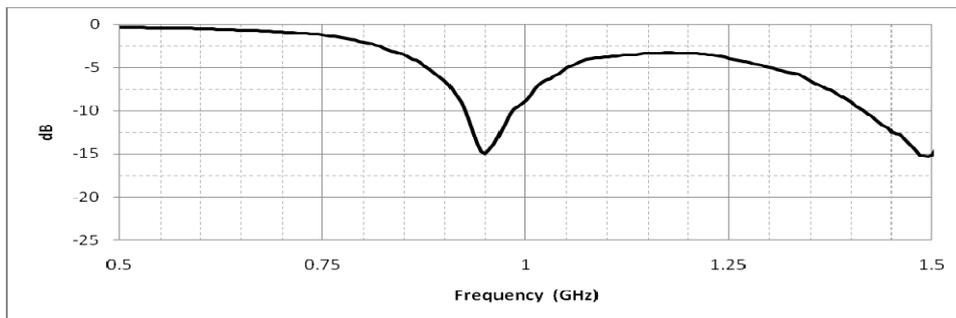
ภาพที่ 114 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 1 พอร์ตที่ 1



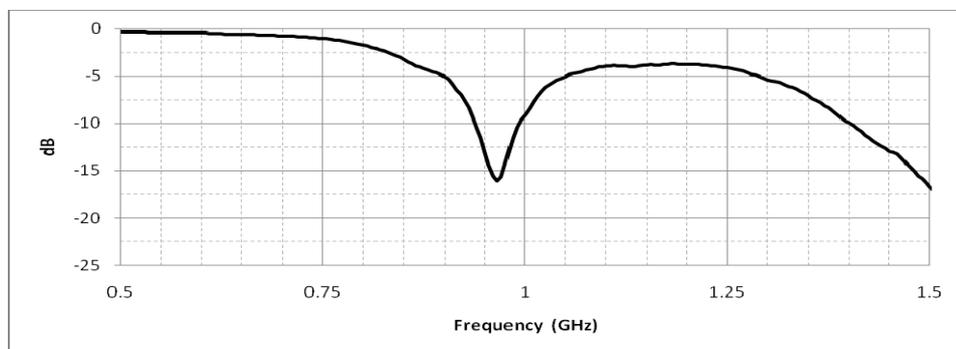
ภาพที่ 115 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 1 พอร์ตที่ 2



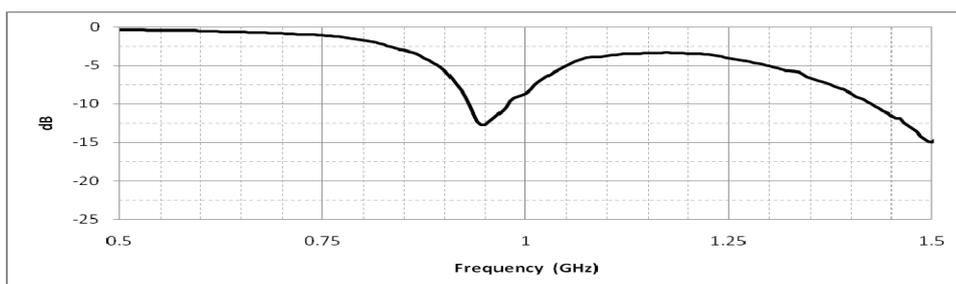
ภาพที่ 116 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 2 พอร์ตที่ 1



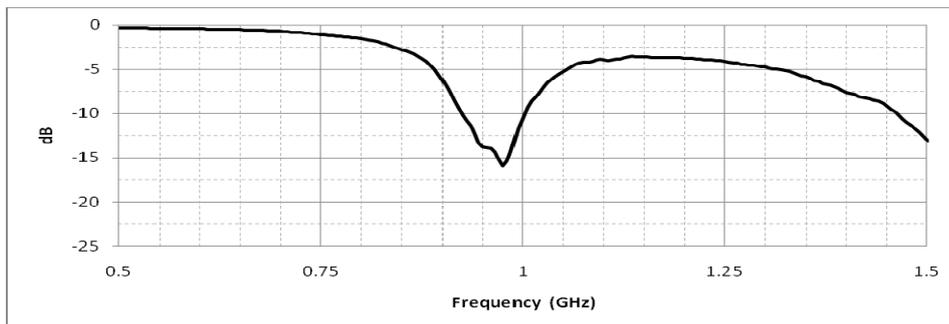
ภาพที่ 117 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 2 พอร์ตที่ 2



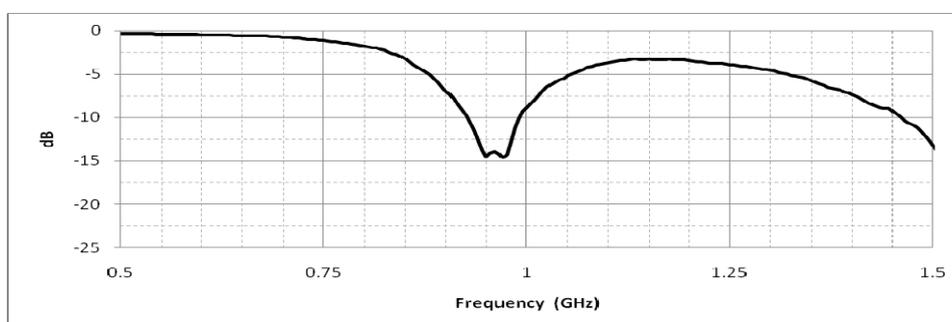
ภาพที่ 118 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 3 พอร์ตที่ 1



ภาพที่ 119 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 3 พอร์ตที่ 2



รูปที่ 120 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 4 พอร์ตที่ 1

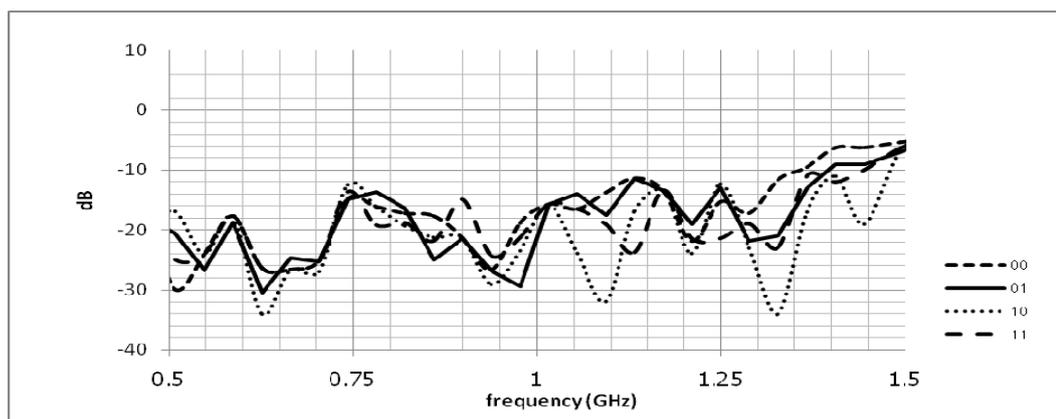


ภาพที่ 121 แสดงค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีการโพลาริซแบบวงกลม ชุดที่ 4 พอร์ตที่ 2

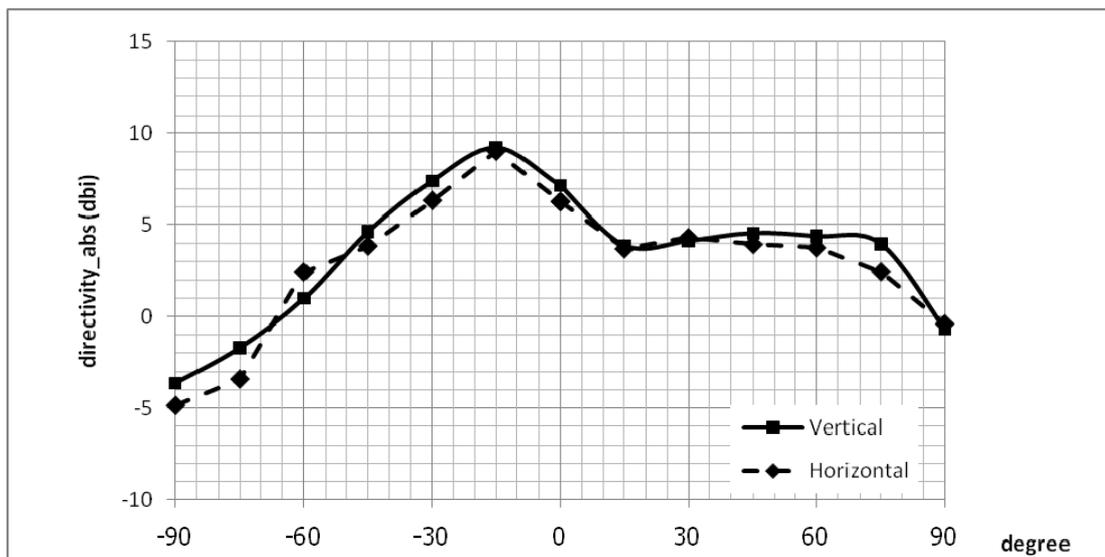
2.6 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาริซแบบวงกลม

การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศนั้น ได้ทำการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ช่วงจายซึ่งได้ผลออกมา ดังภาพที่ 122 ซึ่งเพื่อพิจารณาค่า S_{11} ในช่วงย่านความถี่ 920 - 925 เมกะเฮิรตซ์นั้น ค่าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า -10 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศที่ออกแบบมานั้นสามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่ดังกล่าวได้และทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศโดยวัดในห้องสถานะแวดล้อมเปิด โดยใช้ชุดพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Reader) ของ บริษัท Austria microsystem จำกัด เป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณออกมา ซึ่งชุดพัฒนาฯนี้ สามารถส่งพลังงานออกมาได้สูงสุด 27 dBm โดยชุดพัฒนาฯจะต่อเข้ากับสายอากาศที่มีโพลาริซชันแบบเชิงเส้นของบริษัท Alien Technology จำกัด ในภาคส่ง ส่วนภาครับนั้น จะต่อสายอากาศในภาครับเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อวัดระดับพลังงาน โดยทำการวัดมุมทุกๆ 15 องศา เฉพาะบริเวณด้านหน้าสายอากาศเท่านั้น โดยให้สายอากาศของภาครับและ

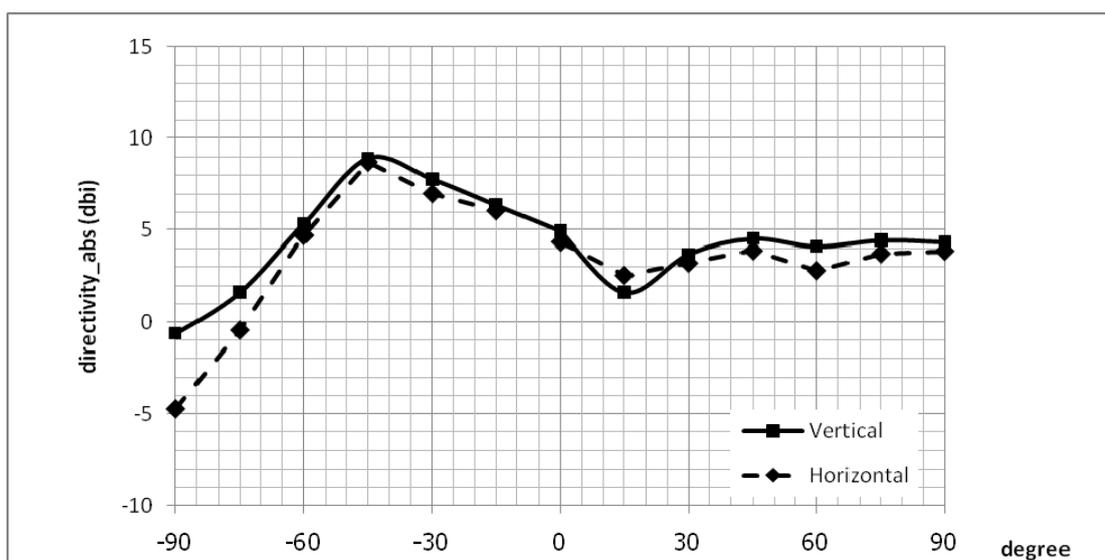
ภาคส่งอยู่ห่างกัน 3 เมตร ที่ความสูง 1.5 เมตร หลังจากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปหาค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สมการที่ 6 ซึ่งใช้วิธีในการหาอัตราขยายแบบเดียวกับที่ใช้ในสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม โดยได้ทำการวัดได้แบบรูปการแผ่พลังงาน ดังภาพที่ 123 - 126 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าจากภาพที่ 123 - 126 จะสามารถหาค่าอัตราขยายได้สูงสุดเท่ากับ 9.27 dB ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการจำลองซึ่งได้ค่าอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ 12.00 dB แต่เมื่อนำค่าความสูญเสียที่เกิดจากแต่ละอุปกรณ์ที่อยู่ภายในสายอากาศประมาณ 2.99 dB ซึ่งเมื่อชดเชยค่าความสูญเสียนี้เข้าไปด้วยจะทำให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ทำการจำลองออกมา ดังแสดงดังภาพที่ 127 โดยถ้าเปรียบเทียบค่าอัตราขยายที่วัดได้จริงของสายอากาศที่มีเพียง 1 องค์ประกอบกับสายอากาศแถวลำดับ ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับจะมีค่ามากกว่าค่าอัตราขยายของของสายอากาศที่มีเพียง 1 องค์ประกอบประมาณ 3 dB ดังแสดงดังภาพที่ 128



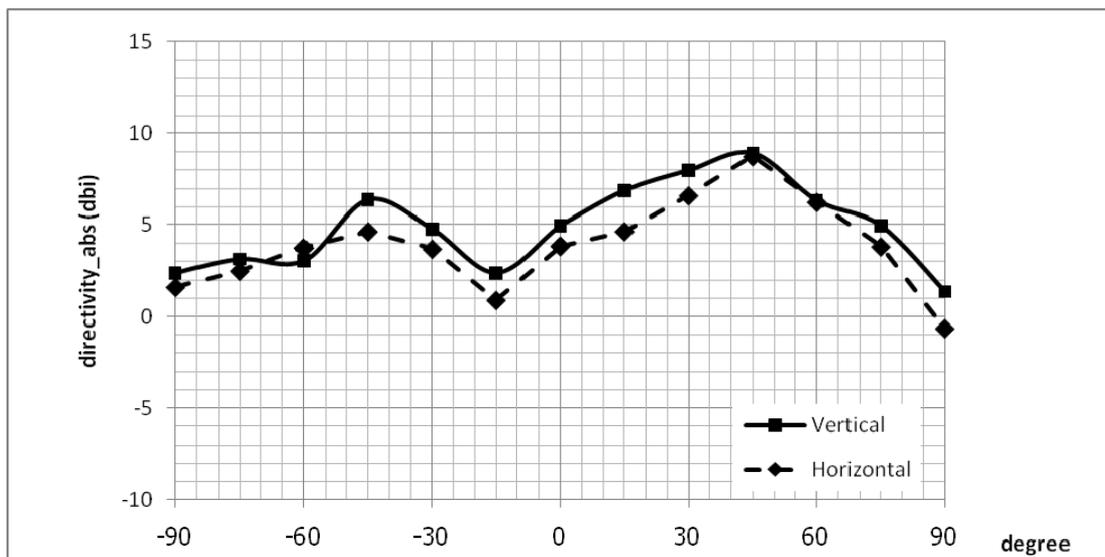
ภาพที่ 122 แสดง ค่า S_{11} ของสายอากาศแถวลำดับ



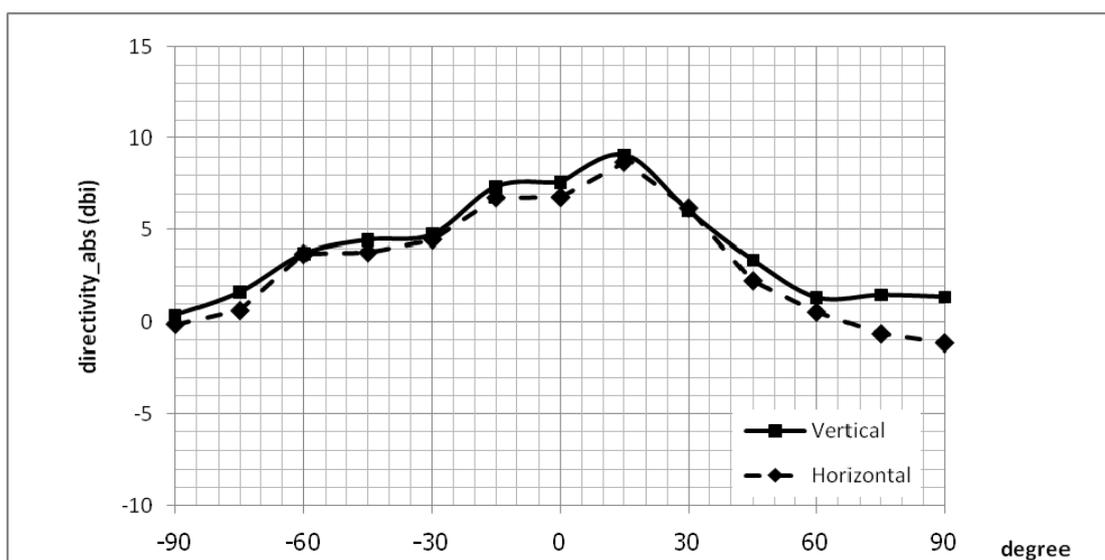
ภาพที่ 123 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 00



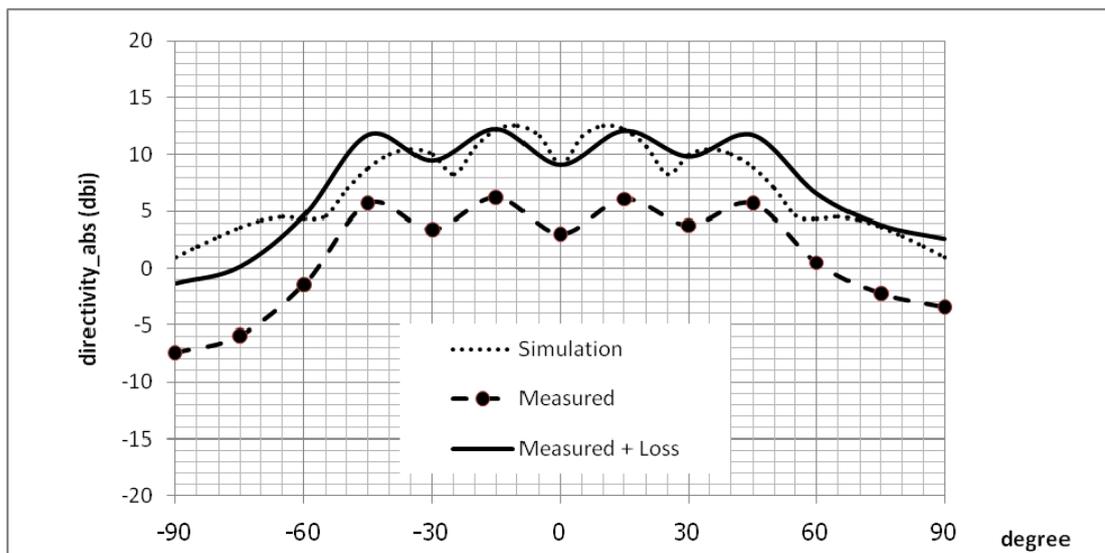
ภาพที่ 124 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 01



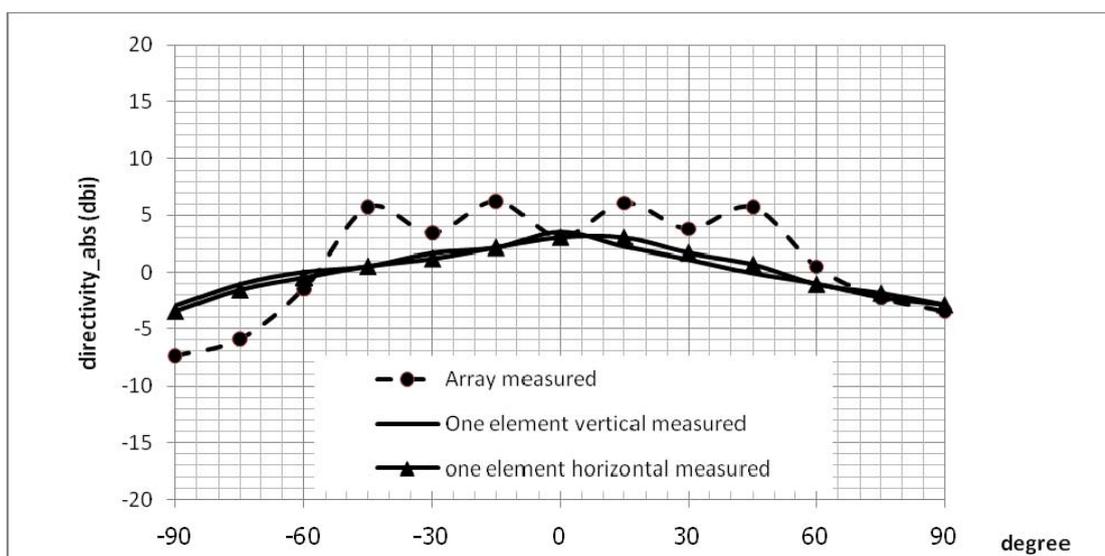
ภาพที่ 125 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 10



ภาพที่ 126 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแนวตั้งและแนวนอน เมื่อควบคุมด้วยรหัส 11



ภาพที่ 127 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศแฉวลำดับ



ภาพที่ 128 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศแฉวลำดับกับสายอากาศที่มีเพียง 1 องค์ประกอบ

วิจารณ์

การทดสอบหาค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม สามารถหาค่าอัตราขยายได้ 6.12 dBi ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองที่ 6.00 dBi

การทดสอบหาค่าอัตราขยายของการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม สามารถหาค่าอัตราขยายได้ 9.27 dBi ซึ่งมีค่าแตกต่างเมื่อเทียบกับค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองที่ 12.00 dBi แต่เมื่อนำค่าอัตราการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทั้งหมดของสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งมีค่าประมาณ 2.99 dB ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราขยายจะทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ได้ 12.26 dBi ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การพัฒนาสายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยเป็นการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ ซึ่งมีทิศโพลาริเซชันแบบวงกลม สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยใช้วงจรถ่ายทอดเมทริกซ์ซึ่งได้ทำการประดิษฐ์ขึ้น โดยใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากขึ้น โดยจะทำให้ขนาดของสายอากาศที่ได้มีขนาดลดลง ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้พีเอ็มเอ็มเอซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 3 ซึ่งเริ่มทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลอง หลังจากนั้น เมื่อได้ผลตรงตามที่ต้องการแล้วจึงได้ประดิษฐ์สายอากาศขึ้นมาแล้วทำการทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณของผลการทดสอบนั้น สายอากาศที่ได้มีอัตราขยายอยู่ที่ 9.27 dBi แต่เมื่อนำค่าอัตราการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ของสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาริเซชันแบบวงกลม ซึ่งมีค่าประมาณ 2.99 dB ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาอัตราขยายจะทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบที่มีการโพลาริเซชันแบบวงกลม ได้ 12.26 dBi ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลอง

ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาสายอากาศแบบปรับทิศทางได้ สำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยเป็นการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ ซึ่งมีทิศการโพลาริเซชันแบบวงกลม โดยใช้วงจรถ่ายทอดเมทริกซ์ นั้นยังมีพลังงานสูญเสียมากเนื่องจากมีอุปกรณ์จำนวนหลายชิ้นต่อกันอยู่ ซึ่งควรมีการพัฒนาต่อไปโดยการรวมเป็นชิ้นเดียวกันซึ่งจะสามารถลดพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Balanis, C.A. 2005. **Antenna Theory Analysis and Design**. John Wiley & Sons, New Jersey.

Basilio, L.I., M.A. Khayat, J.T. Williams and S.A. Long. 2001. **The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line-fed patch antennas**.
IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 49 (1): 45-47.

Chen, Y. and F. Zhang. 2008. **A System Design for UHF RFID Reader**. ICCT2008.

Derneryd, A.G.,1976. **Linearly polarized microstrip antennas**. IEEE Transactions on
Antennas and Propagation. 846-851.

Finkenzeller, K. 2003. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification**. Wiley.

GUO, Y.X., K.M. LUK and K.F. LEE. 2001. Regular circular and compact semicircular patch antennas with a T-probe feeding. **Microw. Opt. Technol. Lett.** 31: 68-71.

MAK, C.L., K.M. LUK, K.F. LEE and Y.L. CHOW. 2000. Experimental study of a microstrip patch antenna with an L-shaped probe. **IEEE Trans. Antennas Propag.** 48: 777-783

OOI, B.L., C.L. LEE and P.S. KOOI. 2003. A novel F-probe-fed broadband patch antenna.
Microw. Opt. Technol. Lett. 30: 355-356

Pozar, D.M. 1998. **Microwave Engineering**. 2nd ed. John Wiley and Sons Inc., New York.

ราชกิจจานุเบกษา. 2549. เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 10ง, 67.

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 2549. รู้จักกับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี.
พิมพ์ครั้งที่ 1.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายอนุกุล น้อยไม้
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 12 พฤศจิกายน 2521
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย 3
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-