

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2532

ภาควิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ANTENNA PATTERN RECORDER

ผู้จัดทำ

1. นายวิชัย อภัยวราภ 291195

2. นายวีระ อภรณ์เสถียร 291199



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. กิตติชัย นามิขประมพงศ์)

เครื่องบันทึกรูปแบบการกระจายคลื่น

วิชัย อภัยวรรณ

วีระ อามรณัฐ

อ. กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในปฏิทินฉบับนี้ เรียบเรียงขึ้นจากผลงานการออกแบบและสร้างระบบการวัดรูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศ โดยนำไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิต ในการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์เป็นรูปกราฟ (วงกลม หรือ สี่เหลี่ยม) ออกมาทางจอภาพหรือทางเครื่องพิมพ์ ซึ่งในระบบการวัดดังกล่าว จะอาศัยเครื่องวัด ความเข้มสนามไฟฟ้า (Field Strength Meter) เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้วัดสัญญาณจากสายอากาศแล้วจึงแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล เพื่อส่งเข้าไปประมวลผลในไมโครคอมพิวเตอร์ โดยมีส่วนประกอบด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ดังนี้คือ ส่วนตรวจจับสัญญาณ ส่วนแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัล ส่วนอินเทอร์เฟซข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ และส่วน โปรแกรมควบคุมเพื่อประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ ทั้งนี้มุ่งหมาย เพื่อให้สามารถวัดรูปแบบการกระจายคลื่นได้รวดเร็ว และถูกต้องแม่นยำยิ่งกว่าแบบเดิม ที่ใช้การอ่านค่าจากเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าโดยตรง เพื่อนำมาคำนวณแล้วนำค่าที่ได้ ไปพล็อตลงบนกระดาษกราฟ ซึ่งเป็นงานที่มีขั้นตอนยุ่งยากและใช้เวลาในการวัดค่อนข้างมากพอสมควร

026850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. พ.ย. 2533

ANTENNA PATTERN RECORDER

Wichai Utaiwan

Weera Arpornsut

Kittichai Panichpathompong

Advisor

1989

Abstract

The application of personal computer for measuring the antenna pattern is presented in this thesis. The radiation pattern can be displayed on the CRT or the printer in polar graph or rectangular graph. Such procedure is to measure signal directly from antenna via the field strength meter. Analog signal are converted to digital signal, by the analog to digital converter (ADC), and then processed by the computer via software, which is the first part, using Turbo Pascal version 4.0. The second part is hardware, consisting of counter, ADC, interfacing part and d.c. motor, which are on a card except for counter and d.c. motor.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 พารามิเตอร์ของสายอากาศ	3
2.1 อินทิเกรตของเส้นตรงของสายอากาศ	3
2.2 แพทเทิร์นของการกระจายคลื่น	4
2.3 แพทเทิร์นแบบต่างๆ	4
2.4 โทลบของการกระจายคลื่น	5
2.5 บริเวณของสนามต่างๆ ของสายอากาศ	6
2.6 ไดเรกทิวิตี	7
2.7 อัตราขยาย	8
2.8 ฮาร์โมนิกเวอริบีมวิทท์	9
บทที่ 3 การวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	10
3.1 สภาพแวดล้อมในการวัด	10
3.2 ระยะห่างที่จำเป็นในการวัด	10
3.3 แพทเทิร์นการกระจายคลื่น	16
3.4 อุปกรณ์ต่างๆ ในการวัด	18
บทที่ 4 ส่วนประกอบของระบบ	22
4.1 ส่วนหม้องศา	23
4.2 ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล	25
4.3 ส่วนอินเตอร์เฟซกับคอมพิวเตอร์	26
4.4 ซอฟต์แวร์ควบคุม	33
บทที่ 5 การทดลองและการวิเคราะห์	36
5.1 การทดลอง	36
5.2 ผลการทดลอง	38
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	46

บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานนี้ๆ โดยลดขั้นตอนและเวลาในการทำงาน

รูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna Pattern) เป็นสิ่งสำคัญในการที่จะอธิบายถึงคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งการจะทราบถึงรูปแบบการกระจายคลื่น (Pattern) นี้จะต้องทำการวัดความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่รับได้ โดยใช้เครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้า (Field Strength Meter) วัดที่มุมต่างๆ จนครบ 360 องศา แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตลงในกราฟวงกลม (Polar Graph) แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งเป็นงานที่ช้เวลามากและยุ่งยาก โครงการนี้ได้นำไมโครคอมพิวเตอร์ 16 บิต รุ่น IBM PC/AT มาประยุกต์ใช้ในส่วนขั้นตอนต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ทางด้านฮาร์ดแวร์โดยทำส่วนอินเทอร์เฟส อีกส่วนคือทางด้านซอฟต์แวร์โดยใช้โปรแกรมภาษาปาสคาลเป็นเทอร์โบปาสคาล เวอร์ชัน 4 (Turbo Pascal Version 4.0)

ระบบการบันทึกรูปแบบการกระจายคลื่นนี้ สามารถแสดงผลการวัดแพทเทินสายอากาศเป็นกราฟวงกลม (Polar Graph) กราฟสี่เหลี่ยม (Rectangular Graph) โดยมีส่วนแสดงผลผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า และจากการวัดจริงๆ ด้วยเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งในส่วนโปรแกรมควบคุมได้จัดเป็นเมนูต่างๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ รวมทั้งสามารถบันทึกผลออกทางกระดาษได้ด้วยเครื่องพิมพ์ที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์

โครงการนี้ได้เคยมีการทำขึ้นมาก่อน แต่เป็นการนำไมโครคอมพิวเตอร์ 8 บิต มาใช้และซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นภาษาเบสิก (Basic) ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ ได้พัฒนาไปถึงการใช้คอมพิวเตอร์ 16 บิต, 32 บิต และในระดับไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิต นับว่าเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน ในโครงการนี้จึงใช้คอมพิวเตอร์ 16 บิต PC/AT เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนในบทที่ 2 กล่าวถึงพารามิเตอร์และคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ ได้แก่ อินพุทอุณหภูมิแดนท์ของสายอากาศ แอทเทินของการกระจายคลื่น โหลบของแพทเทิน บริเวณต่างๆ ของสนาม ไดเร็คติวิตี อัตรารายย ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์

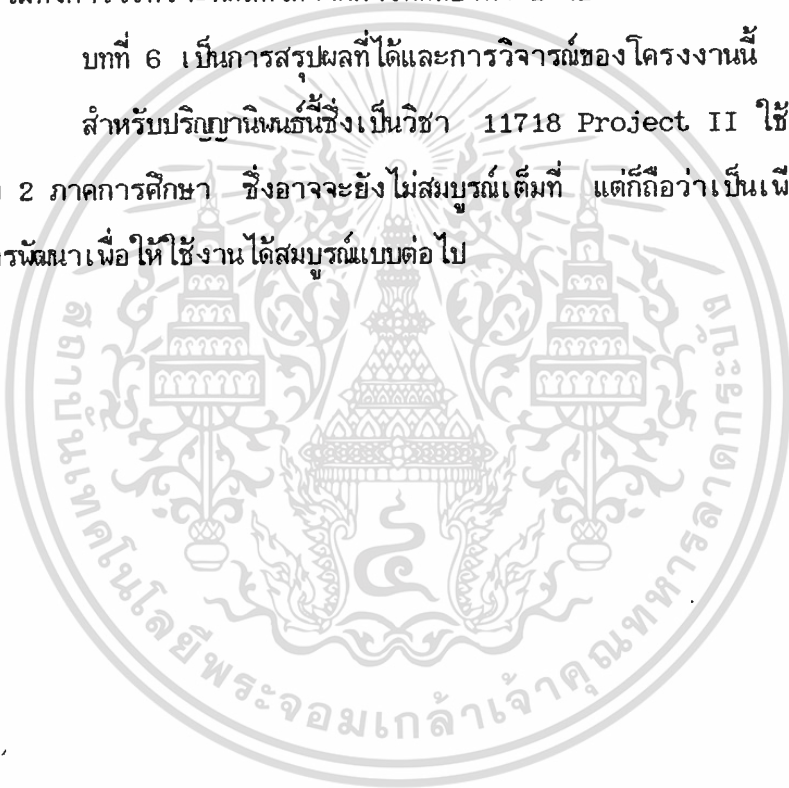
บทที่ 3 เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งในส่วนของทฤษฎีจะกล่าวเป็นเบื้องต้น เพื่อให้เข้าใจดียิ่งขึ้นก่อนเข้าสู่การสร้างและการทดลอง

บทที่ 4 เป็นการสร้างวงจรที่ใช้ในปริกญาเทินนี้ ซึ่งสามารถแยกเป็นส่วนต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว

บทที่ 5 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดจากโครงการนี้ กับการวัดแบบวิธีดั้งเดิม รวมทั้งการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 วิธี

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลที่ได้และการวิจารณ์ของโครงการนี้

สำหรับปริกญาเทินนี้ซึ่งเป็นวิชา 11718 Project II ใช้เวลาออกแบบและสร้าง 2 ภาคการศึกษา ซึ่งอาจจะยังไม่สมบูรณ์เต็มที่ แต่ก็ถือว่าเป็นเพียงการทดลองและรอการพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้สมบูรณ์แบบต่อไป



บทที่ 2

พารามิเตอร์ของสายอากาศ

(PARAMETER OF ANTENNA)

ในบทนี้จะกล่าวถึงค่าจำกัดความของสายอากาศที่ใช้ในสายอากาศระบบรับส่ง คุณสมบัติของสายอากาศ โดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องคือ

2.1 อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Input Impedance)

เป็นอัตราส่วนของโวลต์ตกกับกระแสไฟฟ้าที่จุดป้อนของสายอากาศ โดยอินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) จะมีส่วนที่เป็นทั้งความต้านทานและส่วนที่เป็นรีแอคแตนซ์ (Reactance) โดยปกติเมื่อนำสายสัญญาณมาต่อโดยตรงกับสายอากาศ ส่วนใหญ่แล้วจะไม่แมทช์ (Mismatch) กันขึ้น คือพลังงานของคลื่นที่ส่งบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับทางเครื่องส่ง ในทางปฏิบัติส่วนมากจึงต้องใช้วงจรแมทช์ซิง (Matching Circuit) มาต่อไว้ระหว่างสายส่งกับสายอากาศ สมการอินพุทอิมพีแดนซ์คือ

$$Z_{in} = V/I = R_r + jX_r$$

เมื่อ

Z_{in} = อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่จุด a และ b แสดงในรูป 2.1

R_r = ความต้านทาน (Resistance) ของสายอากาศ

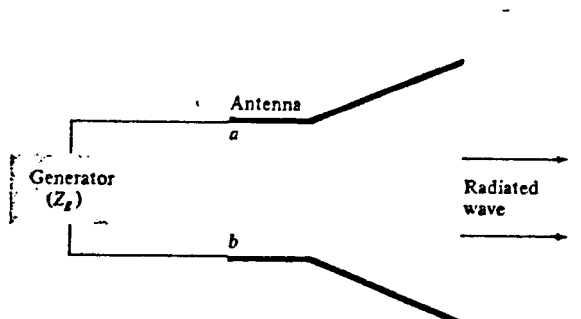
X_r = รีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่จุด a และ b

โดยทั่วไปส่วนของความต้านทานประกอบด้วย 2 ส่วน คือ $R_r = R_r + R_1$

ซึ่ง

R_r = ความต้านทานการกระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Resistance)

R_1 = ความต้านทานที่สูญเสียในตัวของสายอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.1 แสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ของการกระจายคลื่นเป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่านิยม เหมือนกับอิมพีแดนซ์ของกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าธรรมดา ในกรณีของสายอากาศความต้านทานการกระจายคลื่นถ้ากระแสที่ป้อนเป็น I และกำลังของคลื่นที่กระจายออกไปในอากาศ (Radiation Power) เป็น P_r เราได้ความต้านทานของการกระจายคลื่นเป็น

$$R_r = P_r / |I|^2$$

กำลังงานที่กระจายออกไปจากสายอากาศ นั้นก็เหมือนกำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย ในความต้านทาน กำลังคลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศไม่ได้มีแต่กำลังไฟฟ้าที่กระจายออกเท่านั้น ยังมีกำลังคลื่นส่วนที่ไม่ได้กระจายออกไปอยู่ด้วย

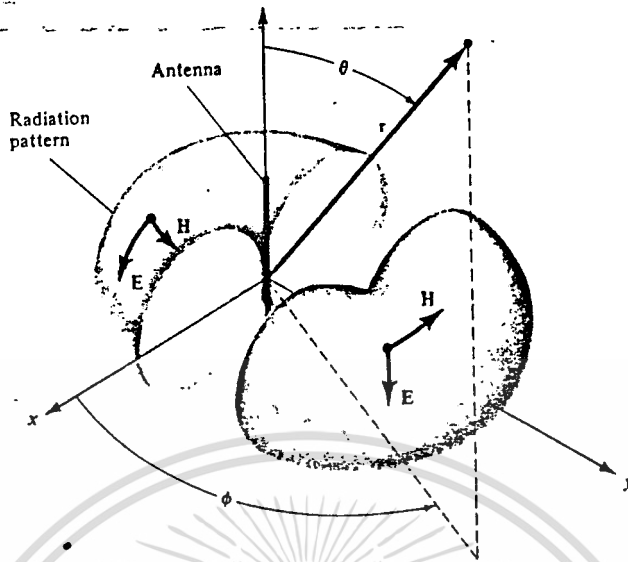
2.2 แพทเทินของการกระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แพทเทินของการกระจายคลื่นเป็นแพทเทินที่เขียนอยู่ในรูปของ 2 มิติหรือ 3 มิติ เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ที่จุดห่างไกลจากแหล่งกำเนิดในทิศ ทางของ θ, ϕ แพทเทินของการกระจายคลื่นมี 3 แบบคือ ถ้ารับกำลังของคลื่นที่มีรัศมีคงที่ เรียกว่าเพาเวอร์แพทเทิน (Power Pattern) ถ้าเขียนอยู่ในรูปสนามไฟฟ้า (หรือสนามแม่เหล็ก) ที่รัศมีคงที่เรียกว่าฟิลด์แพทเทิน (Field Pattern) ปกติจะหารด้วยค่าสูงสุด ซึ่งจะทำให้แพทเทินมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง หรือถ้าเป็นหน่วย dB ก็จะเป็นศูนย์ dB แบบที่ 3 เป็นการเปลี่ยนแปลงของเฟส เรียกว่า เฟสแพทเทิน (Phase Pattern) แพทเทินทั้ง 3 แบบ นอกจากจะบอกความเข้ม บอกเฟสแล้วยังสามารถบอกโพลาไรซ์ (polarize) ของสนามได้

2.3 แพทเทินแบบต่างๆ

สามารถแบ่งแพทเทินออกเป็น ไอโซโทรปิก (Isotropic) ไดเร็คชันนอล (Directional) และ ออมนิไดเร็คชันนอล (Omnidirection) สายอากาศแบบไอโซโทรปิก คือ สายอากาศทางทฤษฎีมีการกระจายคลื่นทุกทิศทางและมีขนาดเท่าๆกันหมดในทุกทิศทาง เช่น แหล่งกำเนิดที่เป็นจุด (Point Source) ดังนั้นจึงใช้สายอากาศชนิดนี้เป็นตัวอ้างอิงกับคุณสมบัติของสายอากาศชนิดอื่นๆ สายอากาศแบบไดเร็คชันนอลมีคุณสมบัติในการกระจายและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งได้ดีกว่าทิศทางอื่นๆ ตัวอย่างของแพทเทินของการกระจายของสายอากาศชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.2 จากรูปแพทเทินนี้ด้านระนาบอะซิมัท (Azimuth plane) จะเป็นแบบไม่มีทิศทาง [$f(\theta) ; \theta = \text{คงที่}$] และทางด้านระนาบอีลีเวชัน (Elevation Plane) จะเป็นแบบไดเร็ค

ชั้นนอล $[g(\theta)]$; = คงที่] ส่วนอิมินิไดเร็คชั่นนอลเป็นแบบหนึ่งไนไดเร็คชั่นนอล



รูปที่ 2.2 แสดงแพทเทินแบบอิมินิไดเร็คชั่นนอล

2.4 โหลบของแพทเทินการกระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ส่วนต่างๆ ของแพทเทินการกระจายคลื่น เรียกว่า โหลบ (Lobe) ซึ่งสามารถแยกย่อยเป็น โหลบหลัก (Major Lobe) โหลบย่อย (Minor Lobe) โหลบข้าง และหลัง (Side and Back Lobe)

เว็คเอชชั่นโหลบ (Radiation Lobe) เป็นส่วนของแพทเทินการกระจายคลื่นที่อยู่ในขอบเขตหนึ่งของการเปรียบเทียบความเข้มของการกระจายคลื่นต่ำ ในรูป 2.3 (ก) แสดงแพทเทินแบบโพลาร์ 3 มิติ กับเว็คเอชชั่นโหลบ ส่วนรูปที่ 2.3 (ข) แสดงแพทเทินใน 2 มิติ ซึ่งเป็นแพทเทินเดียวกันกับรูป 1.3 (ก)

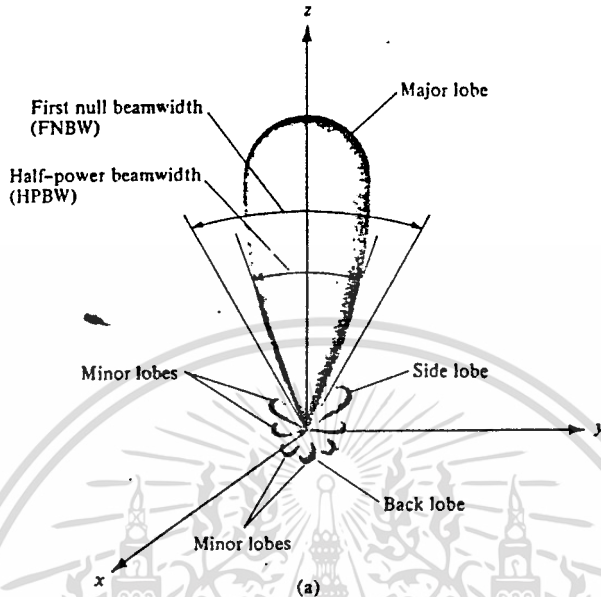
โหลบหลักหรือบางครั้งเรียกว่า เมนโหลบ (Main Lobe) เป็นโหลบของการกระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการกระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูป 1.3 มีโหลบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$

โหลบย่อย ได้แก่โหลบอื่นๆ นอกเหนือจากโหลบหลัก

โหลบข้างเป็นโหลบย่อยที่อยู่ติดกับโหลบหลัก ปกติแล้วโหลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้น สายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโหลบย่อยเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของโหลบย่อยแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงาน

เอกสารที่ กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโหลบหลักซึ่ง เรียกว่าระดับของโหลบ การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าง (Side Lobe Level)



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของรลอบดวงๆ

2.5 บริเวณของสนามต่างๆ ของสายอากาศ (Field Region)

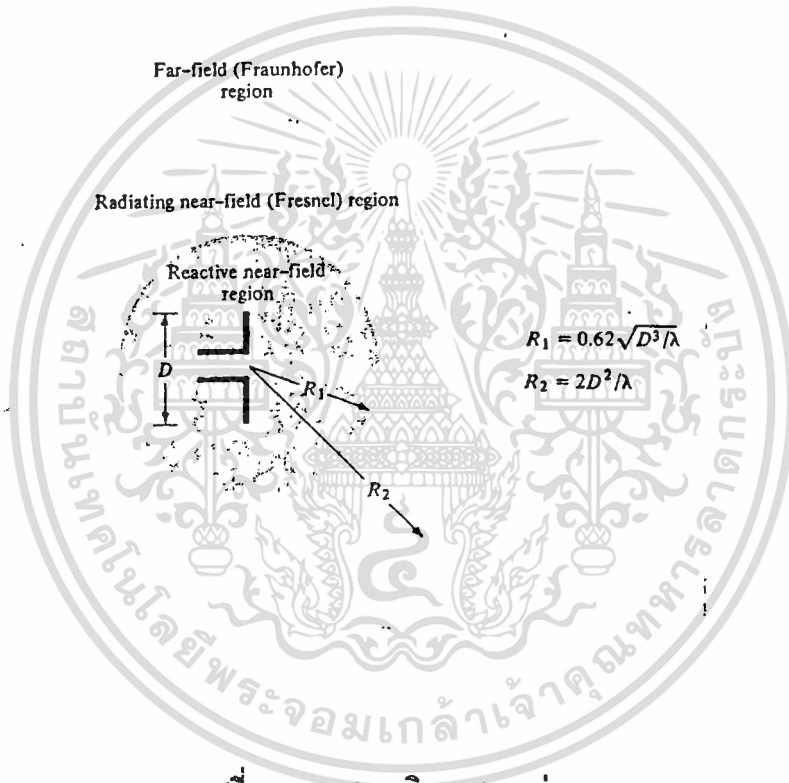
โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วนคือ สนามรีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive Near-field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating Near-field) และสนามระยะไกล (Far-field)

บริเวณสนามรีแอคทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศและมีสนาม เป็นชนิดรีแอคทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณจะมีระยะทาง R น้อยกว่า $0.62 (D^3/\lambda)^{1/2}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างของสนามรีแอคทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น สนามบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 (D^3/\lambda)^{1/2} \leq R \leq 2D^2/\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณของสายอากาศซึ่งการกระจายของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุด เท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

ในบริเวณที่มีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการกระจายของสนาม ตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า K เท่ากับ $2D^2/\lambda$ และขอบนอกเป็นอนันต์



รูปที่ 2.4 แสดงบริเวณสนามต่างๆ

2.6 ไดเรกทิวิตี (Directivity)

ก่อนอื่นควรทราบนิยามของไดเรกทิฟเกน (Directive Gain) เสียก่อน ไดเรกทิฟเกนในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มกระจายในทิศทางที่กำหนดกับความเข้มที่กระจายคลื่นออกของสายอากาศอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศอ้างอิงนี้จะใช้ ไอโซโทรปิกพอยต์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ไดเรกทิวิตี คือ ค่าไดเรกทิฟเกนในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด กล่าวคือ ไดเรกทิวิตี

ของ นอนไอโซโทรปิก ซอร์ส (Nonisotropic Source) เท่ากับอัตราส่วนของความเข้มการแผ่รังสีในทิศทางที่กำหนดต่อความเข้มการแผ่รังสีเฉลี่ยในทิศทางทั้งหมด การคำนวณไดเรกทิวิตีของเสาอากาศจำเป็นต้องทราบค่าของไดเรกทิฟเกนในทิศทางที่กำหนด และต้องอ้างอิงถึงเสาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มสูงสุดของการกระจายคลื่นกับ ไอโซโทรปิคฮอร์นส์

ไดเรกทิวิตีของ ไอโซโทรปิคฮอร์นส์มีค่าเท่าหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังออกทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นๆ นั้นย่อมมีไดเรกทิวิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ และค่าของไดเรกทิฟเกนจะมากกว่าหรือมากกว่าศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับไดเรกทิวิตี ($0 \leq D_1 \leq D_0$) โดยทั่วไปสูตรของไดเรกทิฟเกนและไดเรกทิวิตี อาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ และ ϕ ด้วย

2.7 อัตราขยาย (Gain)

เนื่องจากสายอากาศเป็นอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Element) ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศนั้น จะมีความหมายไม่เหมือนกับในเรื่องของวงจรรขยาย อัตราขยายในเรื่องสายอากาศหมายถึงความสามารถในการส่งหรือรับคลื่นของสายอากาศนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน สายอากาศมาตรฐานที่ใช้คือแหล่งกำเนิดแบบจุด อัตราขยายของสายอากาศมีความสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี โดยวัดเอาประสิทธิภาพของสายอากาศ กับความสามารถในการชี้ทิศทางด้วย ไดเรกทิวิตีจะอธิบายเพียงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศ ดังนั้นค่านี้จะควบคุมแพทเทิร์นการกระจายคลื่นเท่านั้น

เพาเวอร์แพทเทิร์น (Power Pattern) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น มีค่าเท่ากับ 4π เท่าของอัตราส่วนของความเข้มของการกระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังสุทธิที่สายอากาศรับ เมื่อไม่กล่าวถึงทิศทางแล้ว เพาเวอร์เกนมักจะคิดในทิศทางที่มีการกระจายคลื่นแรงสุด ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เกน} &= 4\pi \times \frac{\text{ความเข้มของการกระจายคลื่น}}{\text{กำลังทั้งหมดที่ป้อนในสายอากาศ}} \\ &= 4\pi \times U(\theta, \phi) / P_{in} \end{aligned}$$

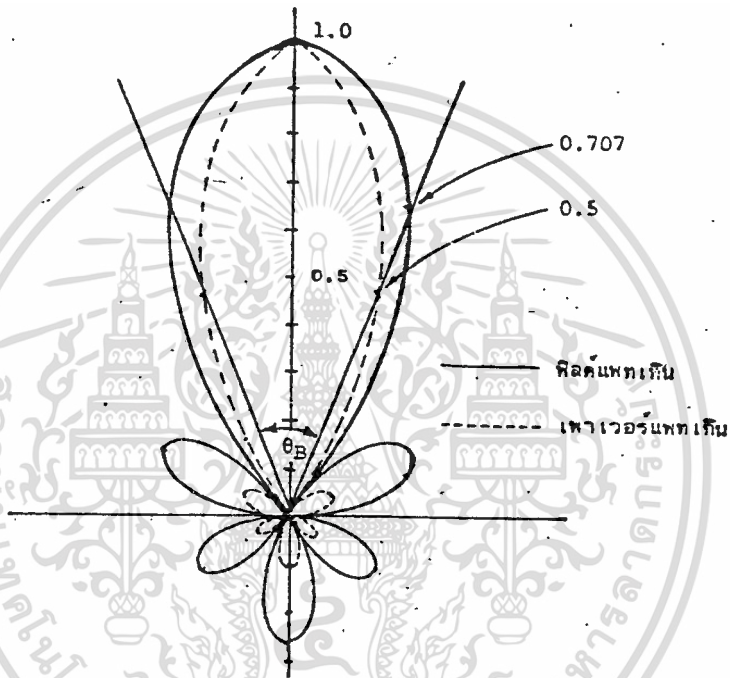
โดยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดเกนสัมพันธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดต่อเพาเวอร์ของสายอากาศอ้างอิงในทิศทางนั้น เพาเวอร์ที่ป้อนจะต้องเท่ากันในสายอากาศ 2 ตัวนั้น สายอากาศอ้างอิงส่วนใหญ่เป็นไดโพล (Dipole) สายอากาศปากแตร (Horn) หรือสายอากาศชนิดอื่นที่เราสามารถคำนวณหาค่าเกนได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบกับไอโซโทรปิคฮอร์นส์ที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น



$$G_{\text{max}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}} \quad (\text{ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย})$$

2.8 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half Power Beamwidth)

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (HPBW) เป็นมุมระหว่าง 2 ทิศทาง ซึ่งมีความเข้มในการกระจายคลื่นเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ในเบีมดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์

ปกติบีมวิดท์ใช้บอกมุมระหว่างจุด 2 จุดบนแพทเทิร์น เช่น มุมระหว่างจุด 10 dB แต่โดยทั่วไปจะใช้กับ 3 dB บีมวิดท์โดยเฉพาะ

026850

บทที่ 3

การวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

การทำทดลองเพื่อวัดคุณสมบัติของสายอากาศนั้น นับว่าเป็นเรื่องสำคัญมากเรื่องหนึ่ง เพราะว่าการวัดเท่านั้นที่จะทำให้แน่ใจสายอากาศมีคุณสมบัติเช่นใด ในขณะที่จะกล่าวถึงหลักการทั่วไปในการวัด และการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ ในการวัดคุณสมบัติของสายอากาศมีหลักการ และข้อควรคำนึงหลายประการด้วยกัน ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

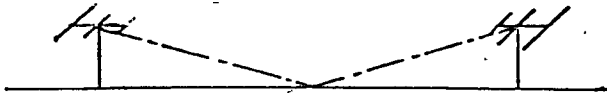
3.1 สภาพแวดล้อมในการวัด

วิธีวัดคุณสมบัติสายอากาศที่ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้อง นั้นคือทำการวัดในสภาพที่ติดตั้งใช้งานจริง ๆ เพราะคุณสมบัติของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ อย่างไรก็ตามสายอากาศมักจะถูกติดตั้งไว้ในที่สูง ๆ เสมอ ซึ่งทำให้ไม่ได้รับความสะดวกในการวัดคุณสมบัติต่างๆ โดยทั่วไปจึงมักทำการวัดที่ตำแหน่งสูงกว่าพื้นโลกหรือตัวอาคารไม่มากนัก เสมอ ซึ่งในสภาพแวดล้อมเช่นนี้ ผลกระทบจากพื้นโลกหรือสิ่งก่อสร้างมีน้อยเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ผลกระทบที่มีต่ออินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นจะเกิดขึ้นเนื่องจาก อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเกิดจากการกระจายคลื่นออกไปจากตัวสายอากาศ

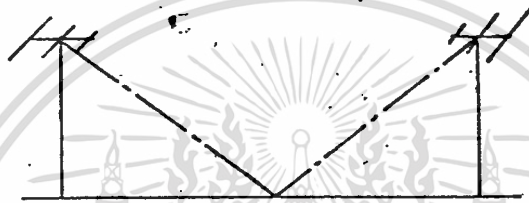
ดังนั้นเงื่อนไขในการกระจายคลื่นเปลี่ยนไป กล่าวคือมีพื้นโลกหรือสิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้ ๆ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขนั้น ๆ สำหรับผลกระทบที่มีต่อแพทเทินของการกระจายคลื่นนั้น จะเกิดจากการที่มีคลื่นสะท้อนจากพื้นโลกหรือสิ่งก่อสร้างเข้าสู่สายอากาศรับ ซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการวัดแพทเทินนั่นเอง สภาพดังกล่าวนี้จะเป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1(ก) ซึ่งเป็นกรณีที่มีการสะท้อนจากพื้นโลก วิธีหลักเลยปัญหาหน้าอาจจะทำได้โดยยกเสาอากาศให้สูงขึ้นหรือติดตั้งสายอากาศไว้บนตึกสูง ๆ ดังรูป (ข) และ (ค) เพื่อให้คลื่นที่สะท้อนจากพื้นโลกเข้ามาในมุมที่กว้างขึ้น ซึ่งสายอากาศรับจะรับคลื่นนั้นได้น้อยลง การใช้สายอากาศส่งที่มีอัตราขยายสูงก็จะช่วยให้ปัญหาจากคลื่นสะท้อนลดน้อยลง นอกจากนั้นการหันสายอากาศส่งให้จุดศูนย์กลางแพทเทินอยู่ในทิศการสะท้อนคลื่น ก็จะช่วยให้คลื่นสะท้อนน้อยลงเช่นเดียวกัน และการใช้ฉาก (screen) ที่ทำด้วยวัสดุดูดกลืนคลื่น (Electromagnetic wave absorber) วางไว้ตำแหน่งที่เกิดการสะท้อนคลื่นดังในรูป (ง) ก็จะช่วยให้คลื่นสะท้อนเข้าสู่สายอากาศรับน้อยลงเช่นเดียวกัน

3.2 ระยะห่างที่จำเป็นในการวัด (Antenna Range)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการสอนและการวัดคุณสมบัติของสายอากาศมี 2 แบบคือ ภายในและ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



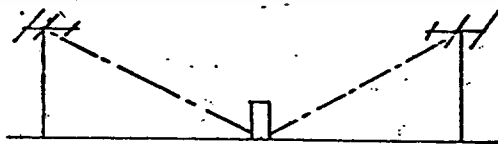
(ก) การสะท้อนของคลื่น



(ข) การยกเส้าให้สูงขึ้นเพื่อลดผลกระทบจากคลื่นสะท้อน



(ค) การติดตั้งสายอากาศบนตึกเพื่อลดคลื่นสะท้อน



(ง) การใช้ฉากกันเพื่อลดคลื่นสะท้อน

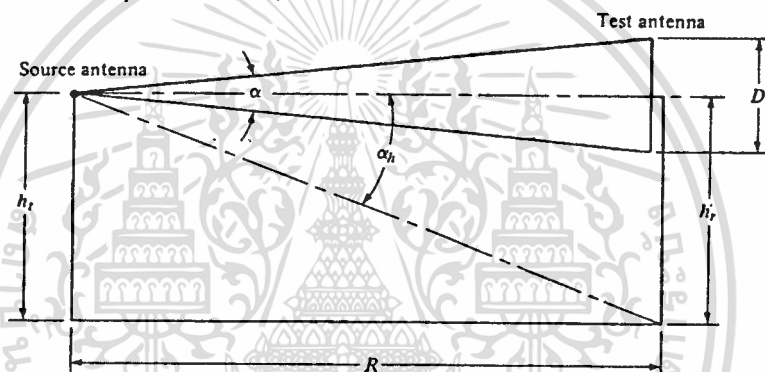
รูปที่ 3.1 การสะท้อนของคลื่น เข้าสู่สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกห้อง ซึ่งการวัดที่ภายนอกห้องข้อจำกัดดังกล่าวในหัวข้อที่แล้ว โดยทั่วไปสามารถแยกระยะสายอากาศเป็นระยะที่สะท้อน (Reflection Range) กับระยะในฟรีสเปซ (Free-Space Range) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระยะในฟรีสเปซสามารถแยกเป็น

3.2.1 ระยะมุมเงย (Elevated Ranges)

โดยทั่วไปจะออกแบบให้ใช้งานในพื้นที่ที่ราบเรียบ สายอากาศจะวางอยู่บนหอสูงหรือบนหลังคาของตึกใกล้เคียง ระยะนี้ใช้ทดลองกับสายอากาศขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูป 2.2



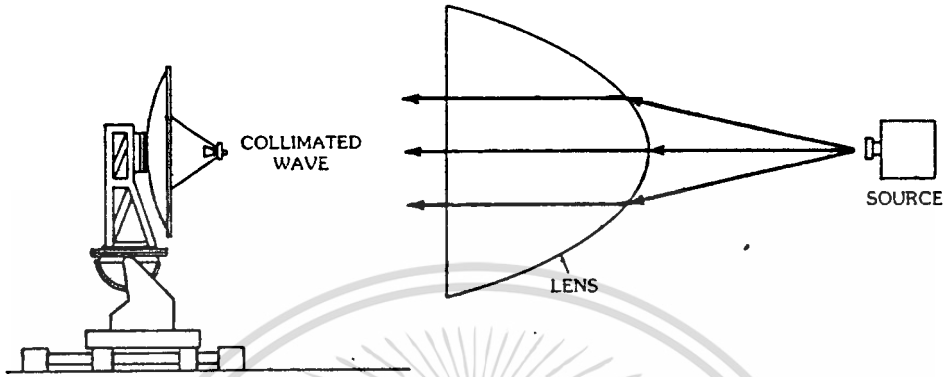
รูปที่ 3.2 แสดงระยะมุมเงย

สิ่งรบกวนจากสภาวะแวดล้อมรอบข้างจะถูกลดลง โดย

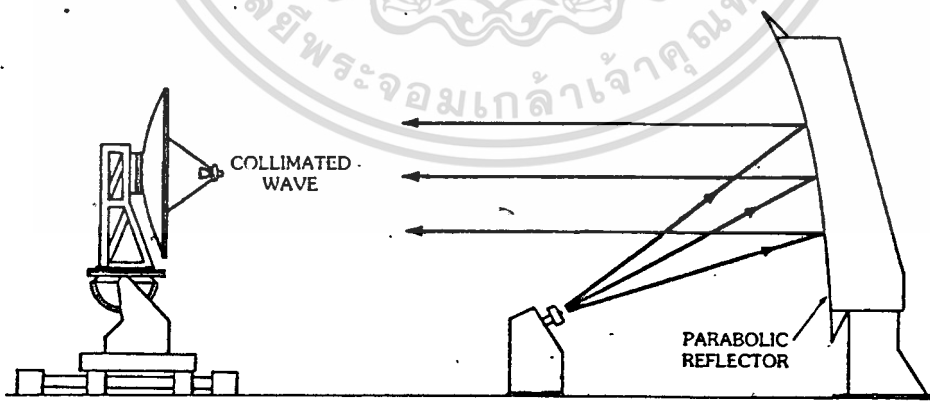
1. ให้ระมัดระวังการเลือกไดเรกทิวตี้และโพลซิ่งของสายอากาศต้นกำเนิด
2. ระยะสายตา (Line Of Side) ระหว่างสายอากาศปราศจากสิ่งกีดขวาง
3. ต้องเบี่ยงเบนหรือดักคลื่นพลังงานที่สะท้อนจากผิวดิน หรือสิ่งกีดขวางที่ไม่สามารถเคลื่อนออกได้
4. ใช้เทคนิคพิเศษในการประมวลสัญญาณ (Signal Processing) เช่นการมอดูเลชันของสัญญาณที่การ หรือใช้ฟิล์ซึ้นๆ

3.2.2 ระยะมุมเอียง (Slant Range)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้

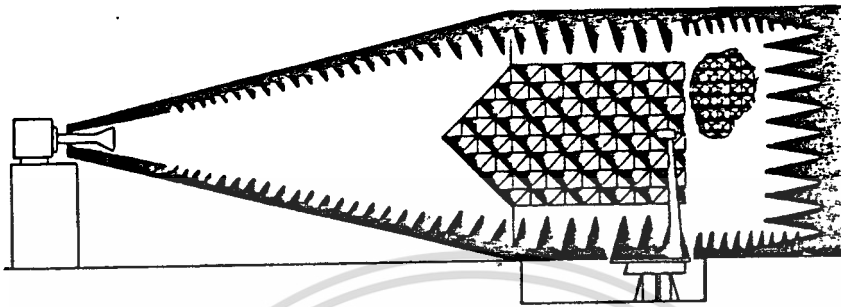


(ก) แบบเลนส์คอมแพคต์



(ข) แบบตัวสะท้อนเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเครือข่ายคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 รูปที่ 3.4 แสดงการวัดแบบระยะคอมแพคต์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แบบเทเปอร์

รูปที่ 3.5 แสดงห้องดูดกลืนคลื่น

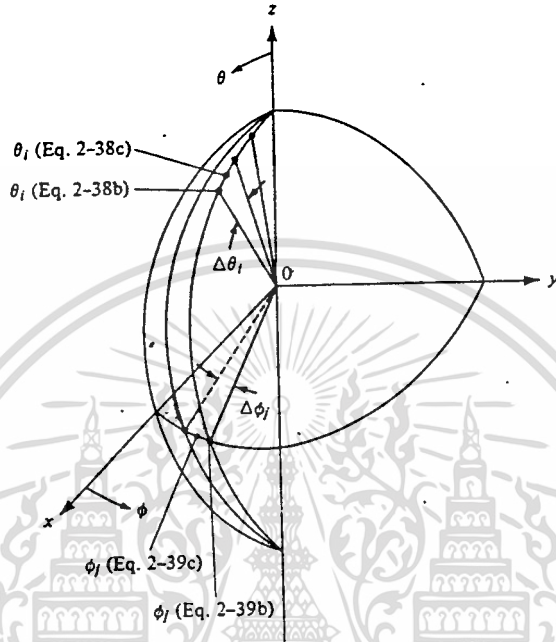
3.2.5 การวัดสนามระยะใกล้ (Near Field)

ระยะทดสอบสามารถลดลงโดยการวัดระยะใกล้ แล้วใช้การวิเคราะห์แปลค่าที่วัดได้ ไปคำนวณเป็นค่าระยะไกล วิธีนี้สามารถใช้วัดแพทเทินและใช้วัดภายในสถานที่ อย่างไรก็ตามวิธีต้องใช้วิธีที่ยุงยากและราคาแพง รวมทั้งต้องใช้ฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่วัดจากระยะใกล้ เช่นขนาดของสัญญาณ (Amplitude) และเฟส สามารถวัดโดยการสแกน (Scan) ตัวต้นกำเนิดไปบนพื้นที่ที่กำหนดก่อน ซึ่งอาจจะเป็นในแนวระนาบ ทรงกระบอกหรือทรงกลม ข้อมูลที่ได้ก็จะแปลงเป็นระยะไกลโดยวิธีฟูเรียร์ (Fourier Transform

3.3 แพทเทินการกระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แพทเทินการกระจายคลื่น (ขนาดและเฟส) โพลาริเซชัน

(Polarization) และอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งใช้บ่งบอกคุณสมบัติของสายอากาศการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



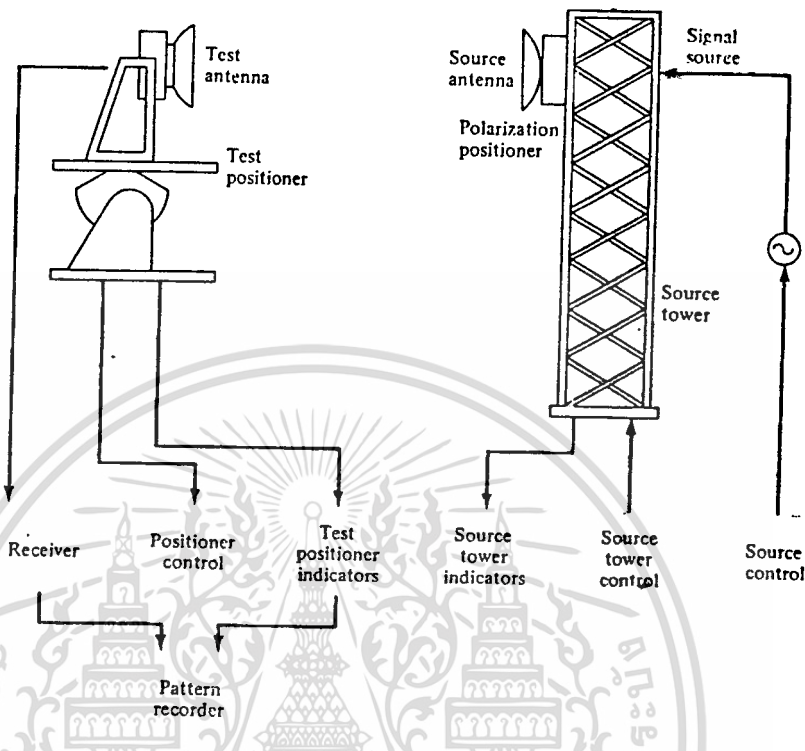
รูปที่ 3.7 แสดงแพทเทิร์นการกระจายคลื่น

แพทเทิร์นของสายอากาศสามารถวัดโดยวิธีการส่งหรือการรับได้ อย่างไรก็ตามถ้าสายอากาศส่งและรับส่วนใหญ่จะเป็นเช่นนี้ ถ้าเป็นดังนี้ก็จะเลือกเอาวิธีการรับ

3.4 อุปกรณ์ต่างๆ ในการวัด (Instrument)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดขึ้นอยู่กับความต้องการในหน้าที่ต่างๆ ซึ่งออกแบบให้ทำงานในช่วงความถี่ที่กว้าง สามารถแยกออกดังนี้

1. สายอากาศต้นกำเนิดและระบบภาคส่ง (Source Antenna)
2. ระบบภาครับ (Receiving System)
3. ระบบการวางตำแหน่ง (Positioning System)
4. ระบบบันทึก (Recording System)
5. ระบบประมวลผลข้อมูล (Data Processing System)



รูปที่ 3.8 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของอุปกรณ์การวัด

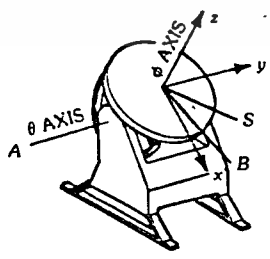
สายอากาศส่วนใหญ่จะเป็นสายอากาศแบบ ล็อกซ์พรีออดิค (Log-Periodic) สำหรับความถี่ที่ต่ำกว่า 1 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) หรือสายอากาศแบบพาราโบลาที่ป้อนความถี่สูงกว่า 400 เมกกะเฮิรตซ์ (MHz) หรือแม้แต่สายอากาศปากแตรระบบจะต้องสามารถควบคุมการโพลาไรซ์ ควบคุมการหมุนของการโพลาไรซ์อย่างต่อเนื่อง ใช้ร่วมกับกำลังสายอากาศต้นกำเนิดแบบลิเนียร์โพลาไรซ์ (Linear Polarize Source Antenna)

ภาคส่งอาร์เอฟจะต้องเลือกที่สามารถควบคุมความถี่และมีเสถียรภาพ มีสเปกตรัมที่ดี (Spectral Purity) ระดับกำลัง (Power Level) การผสมคลื่น (Modulation) ระบบภาครับอาจจะใช้แบบง่าย เช่น โบลมิเตอร์ ดีเทคเตอร์ (

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

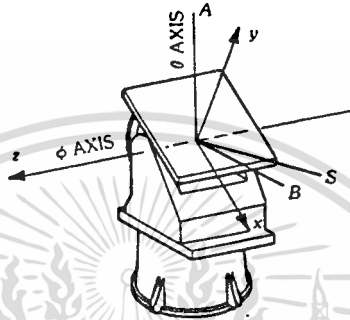
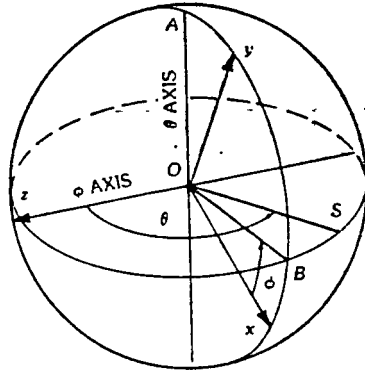
Sensitivity) และมีไดนามิคเรนทึสูง เช่น ระบบเฮเทอโรไดนามิก (Heterodyne) การที่จะมีแพทเทินคัทได้ั้นเราจะต้องมีระบบที่มีโครงสร้าง ที่สามารถหมุนหลายระนาบ สามารถแยกเป็น 3 ชนิด (ก) อะซิมุท-โอเวอร์-อีเลเวชัน (Azimuth-Over-Elevation) (ข) อีเลเวชัน-โอเวอร์-อะซิมุท (Elevation-Over-Azimuth) และ (ค) โรล-โอเวอร์-อะซิมุท (Roll-Over-Azimuth) ตำแหน่งต่างๆ รวมทั้งโคออดิเนต แสดงในรูป 3.9 ก, ข, ค

ในทางปฏิบัติมีข้อบังคับใน 2 แบบแรก ซึ่งใช้การเคลื่อนที่ในแนวระดับ สายอากาศที่ใช้ทดสอบไม่สามารถวางที่จุดตัดกันของแกน ที่ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของตำแหน่งระบบโคออดิเนต ระบบที่ต้องการความละเอียด ตัวอย่างเช่นระบบโรล-โอเวอร์-อะซิมุท-โอเวอร์-อีเลเวชันสามารถทำงานได้ 2 วิธี แกนโรลเป็นตัวช่วยและตำแหน่งอะซิมุทใช้เคลื่อนหมุนแกน ϕ ขณะที่ตำแหน่งอีเลเวชันใช้เคลื่อนหมุนแกน θ หรือตรงกันข้ามก็ได้

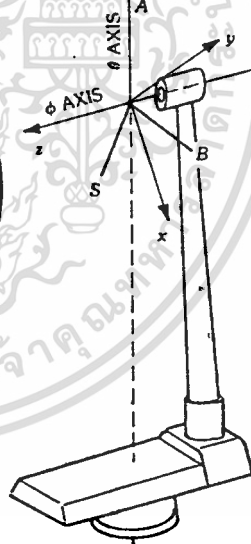
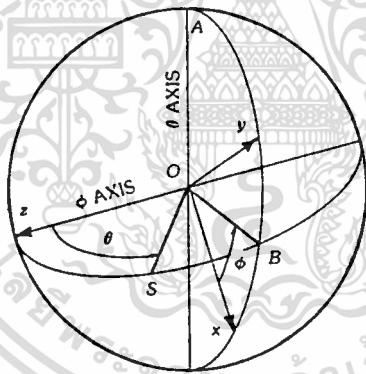


(ก) แบบอะซิมุท-โอเวอร์-อีเลเวชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แบบอัลเวชัน-โอเวอร์-อะซิมท



(ค) แบบโรล์-โอเวอร์-อัลเวชัน

รูปที่ 3.9 แสดงระบบการหมุนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

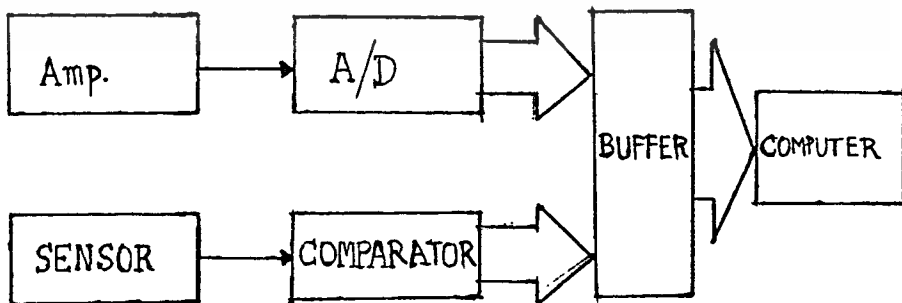
บทที่ 4

ส่วนประกอบของระบบ

ระบบบันทึกรูปแบบการกระจายคลื่น (Antenna Pattern Recorder) ใช้หลักการโดยวัดความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) ที่เกิดขึ้นบริเวณสายอากาศ โดยมีสายอากาศส่ง (Source Antenna) ส่งคลื่นที่มีความถี่ใดๆ แล้วทำการรับสัญญาณโดยผ่านทางสายอากาศรับ โดยที่สายอากาศส่งจะหมุนรอบตัวเป็นมุมต่างๆ จนครบ 360 องศา ซึ่งจะทำให้สายอากาศรับจะได้รับสัญญาณในแต่ละองศาแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศ สัญญาณที่ได้จะผ่านเข้าเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้า (Field Strength meter) เอาท์พุทที่ได้จะเป็นสัญญาณกระแสสลับ A.C. ที่มีสัญญาณกระแสตรง D.C. อยู่ด้วย จากนั้นนำเอาเอาท์พุทที่ได้ไปเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วนำไปประมวลสัญญาณป้อนเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ออกประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ เพื่อให้ได้รูปแบบการกระจายคลื่น (Pattern) ตามชนิดของสายอากาศที่ทำการทดสอบ จากวิธีการข้างบนสามารถจำแนกส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ส่วนรับองค์
2. ส่วนแปลงสัญญาณความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นดิจิทัล
3. ส่วนที่ติดต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์ IBM PC/AT
4. ส่วนซอฟต์แวร์ควบคุมการพล็อต (Plot Pattern)

โดยแสดงบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.1

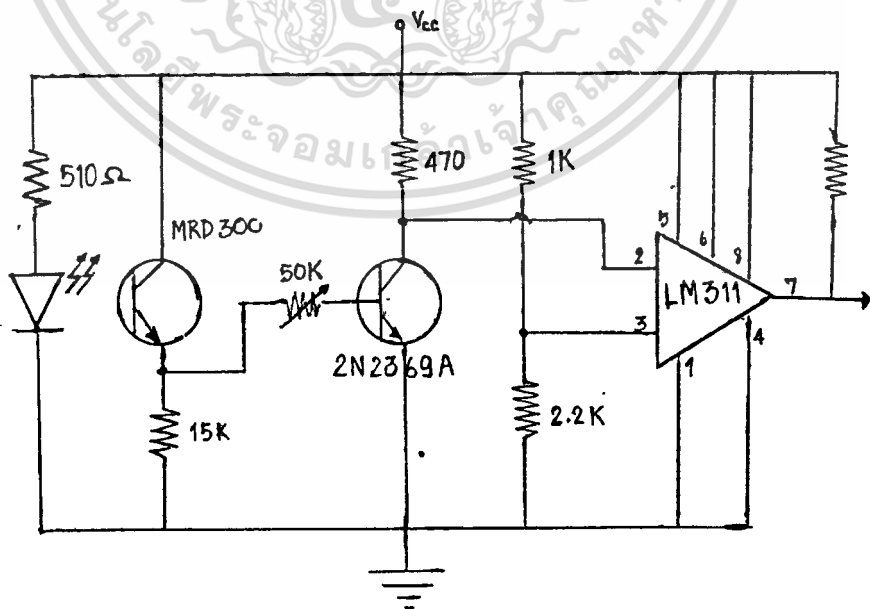


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.1 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบบันทึกรูปแบบการกระจายคลื่น การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ส่วนหม้องศา

ส่วนนี้ประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) เป็นตัวกำเนิดแสงผ่านแผ่นเพลตเซ็นเซอร์ (Plate Sensor) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกกลมใสมีขีดสีดำสลับกับสีขาว ซึ่งแต่ละขีดดำหรือขีดขาวจะเปรียบเสมือน 1 องศา แล้วแต่เราต้องการจะนำขีดดำหรือขีดขาวเป็นตัวอ้างอิง ในโครงการนี้จะใช้ขีดดำหนึ่งขีดเป็น 1 องศา ส่วนแผ่นเพลตเซ็นเซอร์จะวางอยู่ติดกับตัวมอเตอร์

เมื่อควบคุมตัวมอเตอร์หมุน ก็จะทำให้สายอากาศส่งที่ติดอยู่หมุน แผ่นเพลตเซ็นเซอร์ก็จะหมุนด้วย ลำแสงของไดโอดเปล่งแสง อุปกรณ์รับแสงจะใช้ออปโตทรานซิสเตอร์ (Opto-transister MRD 300) เมื่อขีดขาวของแผ่นเพลตเซ็นเซอร์ตัดผ่านลำแสงไดโอด เปล่งแสง จะทำให้แสงผ่านไปที่ทรานซิสเตอร์ จะทำให้ตัวเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparater LM 311) ให้เอาต์พุตออกมาเป็น "0" V แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปเอนาเบิล (Enable) ให้ตัวส่งรับข้อมูลทำงาน (Octal Bus transcevers 74LS244) ถ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์จะให้ข้อมูล 8 บิตจากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ผ่านข้อมูลที่รออยู่ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อ ไปประมวลผล วงจรส่วนหม้องศาแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรของส่วนหม้องศา

จากรูปที่ 4.2 เมื่อไดโอดเปล่งแสงให้แสงออกมาผ่านแผ่นเพลตเซ็นเซอร์ตรงขีดขาว แสงผ่านตกระทอบอปโตทรานซิสเตอร์ (MRD 300) จะทำให้ความต้านทานของออปโตทรานซิสเตอร์ลดลงอย่างมาก ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ของออปโตทรานซิสเตอร์ ไหลผ่านเกิดกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) ซึ่งจะถูกรแบ่งกระแส ให้เป็นกระแสไบอัส (I_B) ของทรานซิสเตอร์ (2N2369A) ซึ่งใช้เป็นเชกทูเรทสวิท (Saturate Switch) มีกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ที่จุดอิมิตัวประมาณ 10 มิลลิแอมป์ มี V_{CE} ที่อิมิตัวประมาณ 0.2 โวลท์

ฉะนั้นจากการคำนวณจะได้ความต้านทาน R_C ประมาณ 470 โอห์ม ทรานซิสเตอร์ 2N2369A มีอัตราขยายกระแส (H_{FE}) ประมาณ 40 เท่า จึงได้กระแสไบอัส (I_B) ประมาณ 0.25 มิลลิแอมป์ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความต้านทาน R_B ประมาณ 12200 โอห์ม เพราะฉะนั้นเมื่อมีแสงมาตกระทอบอปโตทรานซิสเตอร์ จะทำให้มีเอาท์พุทที่ชาคอลลเลคเตอร์ของ 2N2369A ประมาณ 0.2 โวลท์

เมื่อเพลตเซ็นเซอร์ที่เป็นขีดดำตัดผ่านลำแสงไดโอดเปล่งแสง จะทำให้แสงไม่สามารถผ่านไปตกระทอบอปโตทรานซิสเตอร์ได้ จะทำให้ความต้านทานของ MRD 300 มีค่ามากเหมือนขณะเปิดวงจร (Open Circuit) จึงทำให้ไม่มีกระแสไบอัส (I_B) ไบอัสแก่ ทรานซิสเตอร์ 2N2369A จึงทำให้ชาคอลลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีโวลท์เตกตกคร่อมประมาณ $I_C \times R_C$ ได้เท่ากับ 4.7 โวลท์

เอาท์พุทที่ได้ตรงชาคอลลเลคเตอร์ จะนำไปป้อนให้เกอินพุทของตัวเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparater LM311) โดยใช้แรงดันอ้างอิง (Voltage Comparater V_{REF}) ซึ่งถูกกำหนดค่าโดยตัวความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม และ 3.3 กิโลโอห์ม โดยใช้วิธิแบ่งความดัน (Voltage Devider) จะได้แรง ดันอ้างอิงประมาณ 3.8 โวลท์ ป้อนเข้าที่ขา 3 ซึ่งเป็นขาอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) อินพุทของออปแอมป์ (OPAMP) ส่วนแรงดันอินพุทที่ได้จากเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ 2N2369A ซึ่งมีค่าประมาณ 4.7 โวลท์

ขณะที่ไม่มีแสงและประมาณ 0.2 โวลท์ เมื่อมีแสง ป้อนเข้าขา 2 ซึ่งเป็นขาอนอินเวอร์ตติ้ง (Non-Inverting) ของออปแอมป์ เมื่อใดที่แรงดันอินพุทมีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง เอาท์พุทของออปแอมป์จะอยู่ในสภาวะ "0" และเมื่อใดที่แรงดัน

อินพุทมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงเอาท์พุทจะอยู่ในสภาวะ "1" ดังนั้นเมื่อไม่มีแสงตกระ

ทบอบิตทรานซิสเตอร์จะได้สถานะเป็น "1" และเมื่อมีแสงตกกระทบจะมีสถานะเป็น "0" สถานะที่ได้จะถูกนำไปเอ็นนาเบลที่ตัว 74LS245

4.2 ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอก (Analog) เป็นดิจิทัล (Digital)

เนื่องจากเอาท์พุทที่ได้จากเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้า ที่วัดสายอากาศ ในระยะใกล้ (Near Field) นั้นความเข้มสนามไฟฟ้าจึงขึ้นกับระยะทางและสภาวะแวดล้อม ที่เครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้ายังสามารถทดสอบสัญญาณได้ ในโครงการนี้ให้สัญญาณสูงสุดประมาณ 2 โวลต์ จึงใช้ออปแอมป์ LF351 ขยายสัญญาณให้ได้ประมาณ 3 โวลต์ เพื่อป้อนแก่ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (A/D Converter ACD 0805) ทำการแปลงข้อมูล (Data) ที่เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณดิจิทัล 8 บิต เพื่อป้อนเข้าที่พอร์ท A ของ 8255 เพื่อรอการประมวลผลข้อมูล

จากวงจรรูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุท (V_{in}) เป็นสัญญาณที่มาจากเอาท์พุทของเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้า ผ่านเข้าออปแอมป์ขยายแรงดันแบบนอนอินเวอร์ต อัตรากาขยายหาได้จากสมการที่ (1)

$$\text{อัตรากาขยาย } A_v = 1 + R_f / R_{in} \quad (1)$$

R_f = ความต้านทานป้อนกลับ

R_{in} = ความต้านทานอินพุท

ฉะนั้นจะได้อัตรากาขยายประมาณ 1.4 เท่า ออปแอมป์ LF351 สามารถนำไปใช้กับอนาลอก/ดิจิทัลคอนเวอร์เตอร์ (A/D Converter) ที่มีความเร็วสูงได้ รวมทั้งมีคุณสมบัติค่าอินพุทออฟเซตโวลเตจ (Input Offset Voltage) และกระแสไบแอส (Input Bias Current) ที่ต่ำมาก สามารถขยายในแบนด์วิท (BandWidth) ที่กว้างและมีสัญญาณรบกวน (Noise) ต่ำ เอาท์พุทที่ได้จะป้อนให้ แก่สัญญาณอินพุท (V_{in}) ของอนาลอก/ดิจิทัลคอนเวอร์เตอร์

อนาลอก/ดิจิทัลคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ใช้ ACD 0805 โดยใช้แบบเซล์คล็อกฟรีรันนิ่งโหมด (Self-Clock Free-Running Mode) โดยมีช่วงการปรับสัญญาณ (Span Adjust) ระหว่าง 0-3 โวลต์ การมีช่วงการปรับสัญญาณนี้ เพิ่มรีโซลูชัน (Resolution) ของเครื่องแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลให้ดีขึ้น โดยเพิ่มวงจร

ให้เก้ขา 9 ของตัวแปลงสัญญาณเป็นแรงดันอ้างอิง ($V_{ref/2}$) วงจร ที่เพิ่มนี้จะสร้างระดับ

เอกสารนี้ แร่ดันอ้างอิง วนไว้ส่ ส่วนคล็อกที่จะ ให้แก่อนาลอก/ดิจิทัลนั้นอาจจะ ได้มาจากคล็อกของชิป ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(CPU) ของคอมพิวเตอร์ หรือใช้คล็อกภายนอกโดยสร้างจากตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ ในโครงการนี้จะใช้คล็อกจากภายนอกเนื่องจากไม่ต้องการความเร็วมากจึงใช้คล็อกที่ 640 เฮิรตซ์ ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2)

$$F_{clk} = 1/1.1RxC \quad \text{--- (2)}$$

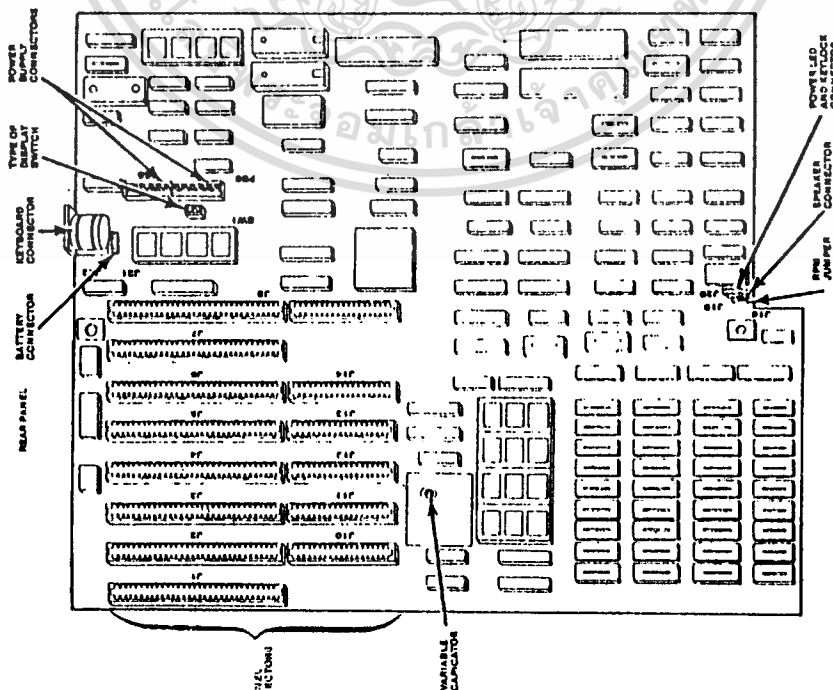
R = ความต้านทาน

C = ตัวเก็บประจุ

โดยใช้ตัวความต้านทานประมาณ 10 กิโลโอห์ม แทนค่าในสมการจะได้ตัวเก็บประจุประมาณ 150 นีโคพาริต ซาไรท์ (WR) และซาอินเทอร์รับ (INTR) จะถูกต่อเข้าด้วยกัน ส่วนเซาซีพีสเลท (CS) กับซาไรด์ (RD) ต่อลงดิน (Grond) เพื่อให้ทำงานตลอด ทั้งนี้เพื่อไม่ต้องการกุกอินเทอร์รับจากภายนอก และทำงานตลอด (Free Running Mode) คืออินพุตที่เป็นเวลาออกจะถูกแปลงเป็นดิจิตอลเอาท์พุทตลอดเวลาโดยไม่ถูกขัดจังหวะ

4.3 ส่วนอินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์

การติดต่อกับคอมพิวเตอร์ พีซี/เอที (Computer PC/AT) โดยจะติดต่อผ่านช่องซันคอร์ดกอนเนกเตอร์ (I/O Channel Support) โดยจะใช้สลิต J1 (62 ซา 4 คอนเน็คเตอร์) ดังรูปที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 แสดงรูปช่อง I/O
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีสัญญาณสำหรับแต่ละขา ดังตาราง 4.1 (ก) และ (ข)

I/O Pin	Signal Name	I/O
A 1	-I/O CH CK	I
A 2	SD7	I/O
A 3	SD6	I/O
A 4	SD5	I/O
A 5	SD4	I/O
A 6	SD3	I/O
A 7	SD2	I/O
A 8	SD1	I/O
A 9	SD0	I/O
A 10	-I/O CH RDY	I
A 11	AEN	O
A 12	SA19	I/O
A 13	SA18	I/O
A 14	SA17	I/O
A 15	SA16	I/O
A 16	SA15	I/O
A 17	SA14	I/O
A 18	SA13	I/O
A 19	SA12	I/O
A 20	SA11	I/O
A 21	SA10	I/O
A 22	SA9	I/O
A 23	SA8	I/O
A 24	SA7	I/O
A 25	SA6	I/O
A 26	SA5	I/O
A 27	SA4	I/O
A 28	SA3	I/O
A 29	SA2	I/O
A 30	SA1	I/O
A 31	SA0	I/O

(ก) ด้านเอ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I/O Pin	Signal Name	I/O
B 1	GND	Ground
B 2	RESET DRV	0
B 3	+5 Vdc	Power
B 4	IRQ 9	I
B 5	-5 Vdc	Power
B 6	DRQ2	I
B 7	-12 Vdc	Power
B 8	CWS	I
B 9	+12 Vdc	Power
B 10	GND	Ground
B 11	-SMEMW	0
B 12	-SMEMR	0
B 13	-IOW	I/O
B 14	-IOR	I/O
B 15	-DACK3	0
B 16	DRQ3	I
B 17	-DACK1	0
B 18	DRQ1	I
B 19	-Refresh	I/O
B 20	CLK	0
B 21	IRQ7	I
B 22	IRQ6	I
B 23	IRQ5	I
B 24	IRQ4	I
B 25	IRQ3	I
B 26	-DACK2	0
B 27	T/C	0
B 28	BALE	0
B 29	+5 Vdc	Power
B 30	OSC	0
B 31	GND	Ground

(ข) ด้านนี้

ตาราง 4.1 แสดงขาสัญญาณด้าน A และ B

สัญญาณที่ใช้มีดังนี้

A_0-A_{19} (Address Buses) ขาสัญญาณทั้ง 20 นี้เป็นเอาต์พุตซึ่งใช้สำหรับกำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำ หรืออุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตไมโครโปรเซสเซอร์ 8088 ต้องการติดต่อด้วยเส้นแอดเดรส (Address) นี้มีอยู่ 20 เส้นซึ่งสามารถอ้างได้ 1 เมกกะไบต์ แต่บางแอดเดรสถูกใช้โดย IBM PC อยู่ก่อนแล้ว สำหรับการอ้างแอดเดรสของพอร์ทอิน

พอร์ทพอร์ท (I/O Port) จะใช้แอดเดรสบัสเพียง 16 เส้น คือ A₀-A₁₅ โดยที่เหลือไม่ถูกใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามภายใน IBM PC จะใช้แอดเดรสบัสในการอ้างแอดเดรสของพอร์ทเพียง 10 เส้นคือ A₀-A₉

ในการเรียกใช้ช่องสัญญาณอินพุทพอร์ทพอร์ท (I/O Channel) ดังกล่าว จะใช้วงจรถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่ (Address Decoder) ซึ่งจะถอดรหัสตำแหน่งเพื่อเลือกพอร์ทที่ต้องการ โดยพอร์ทที่จะใช้สามารถดูได้จากตารางที่ 2

ช่วงเลขฐานสิบหก	อุปกรณ์
000 - 01F	ตัวควบคุม ดีเอ็มเอ 1, 8237A-5
020 - 03F	ตัวควบคุมการอินเทอร์รัพ 1, 8259A, มาสเตอร์
040 - 05F	ตัวตั้งเวลา, 8254.2
060 - 06F	8042 (แป้นพิมพ์)
070 - 07F	เรียล-ไทม์ คล็อก, เอ็นเอ็มไอ
080 - 09F	ดีเอ็มเอ เพลทริจัสเตอร์, 74LS612
0A0 - 0DF	ตัวควบคุมการอินเทอร์รัพ 2, 8237A-5
0F0	เคิลียร์แมทโคโปรเซสเซอร์บัส
0F1	รีเซ็ทแมทโคโปรเซสเซอร์
0F8 - 0FF	แมทโคโปรเซสเซอร์
1F0 - 1F8	ดิสค์ดั่งที่
200 - 207	เกมอินพุท-เอาต์พุท
278 - 27F	พอร์ทเครื่องพิมพ์แบบขนาน 2
2F8 - 2FF	พอร์ทอนุกรม 2
300 - 31F	โปรโตไทป์การ์ด
360 - 36F	สงวนไว้
378 - 37F	พอร์ทเครื่องพิมพ์แบบขนาน 1
380 - 38F	เอสดีแอลซี, ซิงค์โครนิส 2 ทาง 2
3A0 - 3AF	ซิงค์โครนิส 2 ทาง 1
3B0 - 3BF	ไบโนโครมดิสเพลย์และอะแดปเตอร์เครื่องพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานโดยไม่ในโครมดิสเพลย์และอะแดปเตอร์เครื่องพิมพ์ ยินดีดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเลขฐานสิบหก	อุปกรณ์
3C0 - 3CF	สงวนไว้
3D0 - 3DF	สี/กราฟิค มอนิเตอร์อะแดปเตอร์
3F0 - 3F7	ตัวควบคุมดิสเก็ต
3F8 - 3FF	พอร์ตอนุกรม 1

ตารางที่ 2 แสดง I/O Map

ตำแหน่งอินพุทเอาต์พุทที่ 000 ถึง 0FF ถูกสงวนไว้ใช้สำหรับ อินพุทเอาต์พุทซิสเต็มบอร์ด (System Board I/O) และตำแหน่งที่ 100 ถึง 3FF ใช้สำหรับช่องสัญญาณอินพุทเอาต์พุทซึ่งเป็นช่วงที่สามารถใช้ได้ ในโครงงานนี้ได้เลือกพอร์ต 300 ในการอินเทอร์เฟส

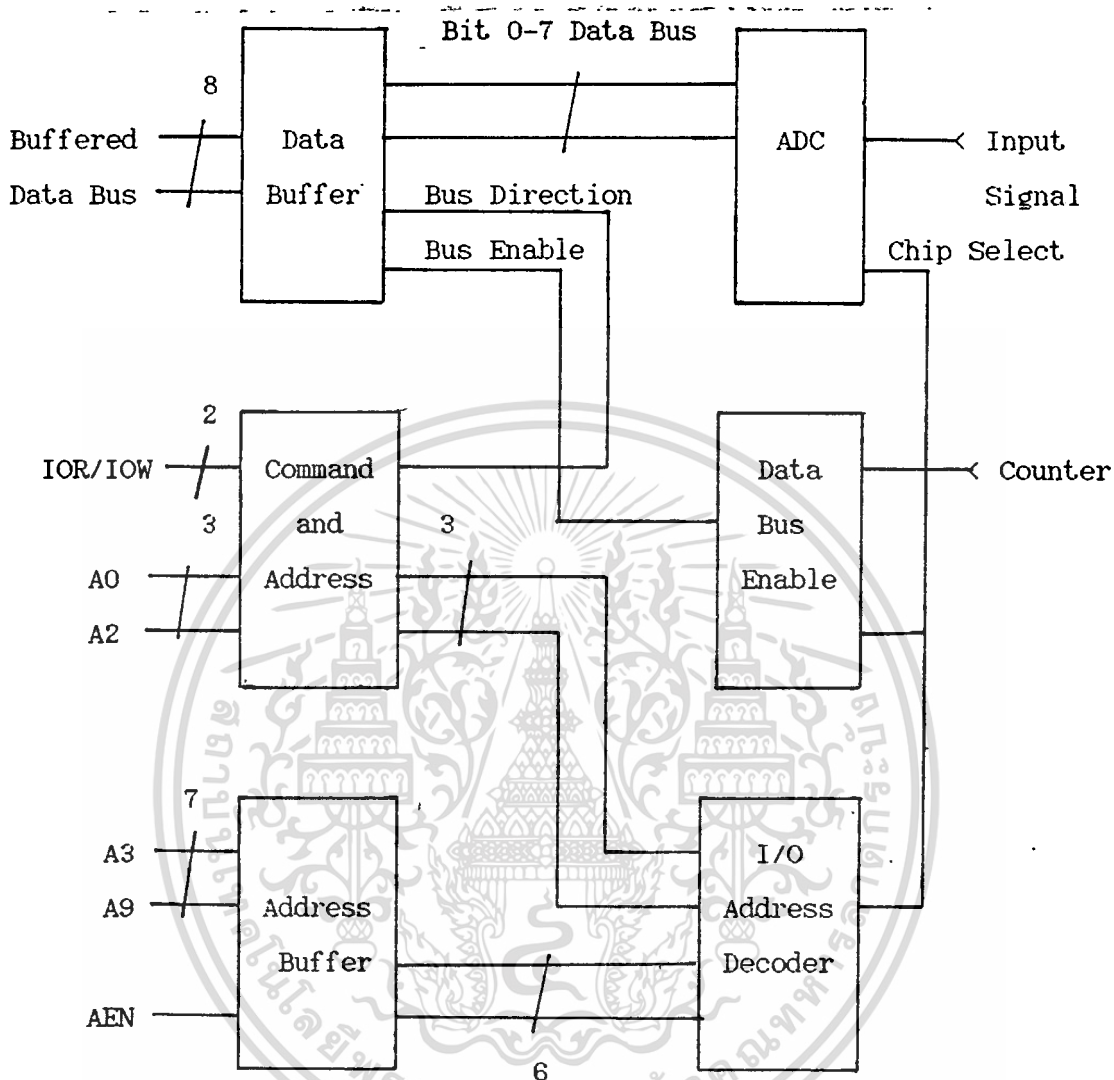
โดยบล็อก ไดอะแกรมสำหรับการติดต่อเป็นดังรูปที่ 4.4

ตัวถอดรหัสตำแหน่งที่ใช้คือ 74LS138 จะถอดรหัสพอร์ทที่ 300 ซึ่งมีตำแหน่งจะมีค่าคือ

A_9	A_8	A_7	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	A_0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

และค่า เออีเอ็น (AEN) จะเป็น " 0 " ดังนั้น 74LS138 ซึ่งเป็น ตัวถอดรหัส 1 ใน 8 จะถอดรหัสได้เอาต์พุทเป็น " 0 " ที่ขา 11 (Y_4) โดยมี บัฟเฟอร์ 8 บิต (Octal Buffer) 74LS244 เป็นบัฟเฟอร์ เพื่อให้สัญญาณคงที่

สัญญาณจาก 74LS138 ก็จะ ไปเอ็นนาเบิ้ล 74LS245 ซึ่งเป็นตัวรับส่ง 8 บิต (Octal Bus Transceiver) เพื่อรับข้อมูลจากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยที่ผ่านออเกตกับสัญญาณจากตัวนับก่อนซึ่งเป็นตัวนับที่ละองศา เพื่อรับข้อมูล ในช่วงที่ตัวนับให้สัญญาณเป็น " 0 "

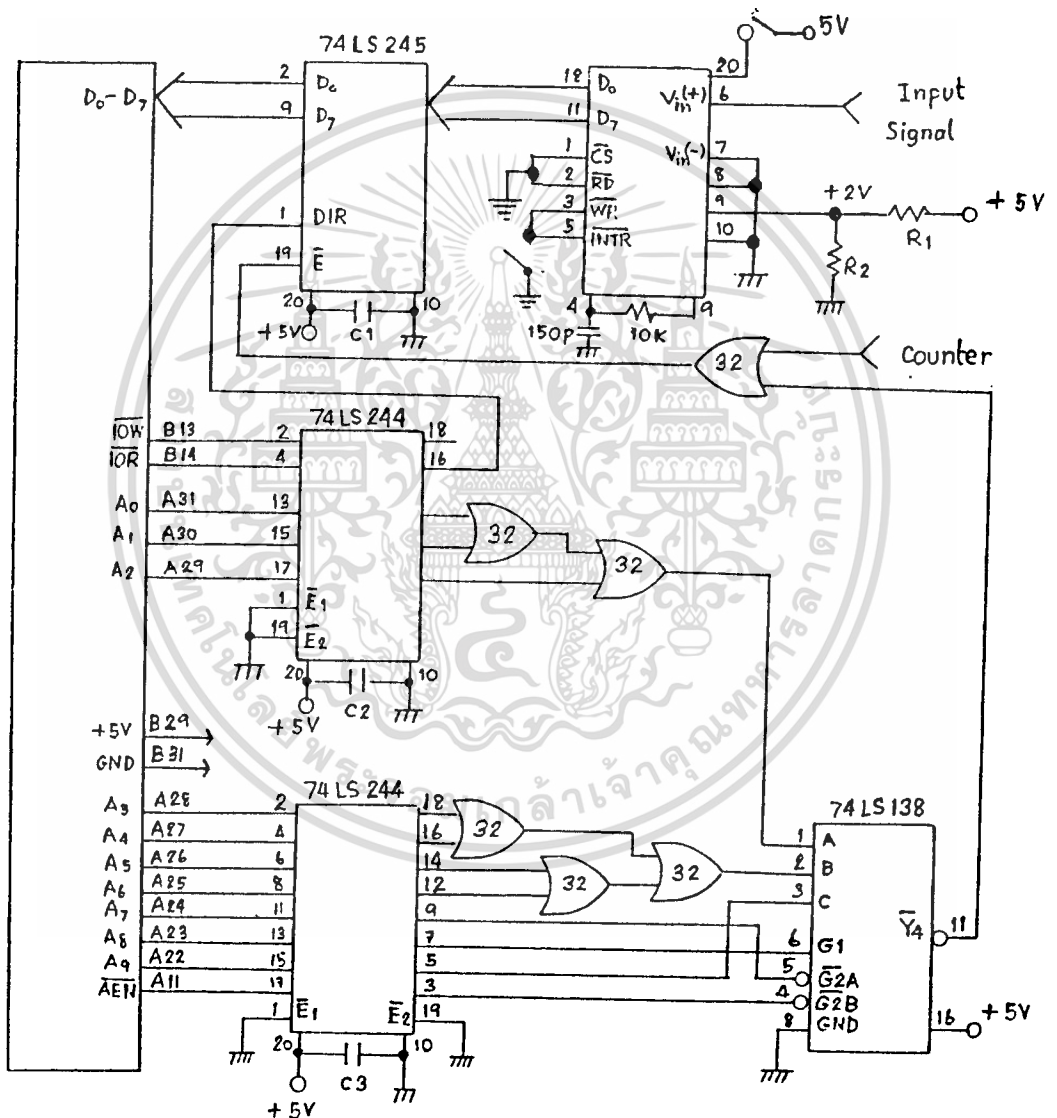


รูปที่ 4.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการอินเตอร์เฟซ

การใช้ตัวนับเป็นตัวเอ็หนาเบิลด้วยก็เพื่อให้สามารถรับสัญญาณจากตัวแปลง

เอกสารนี้สัญญาอนุญาตเป็นสัญญาดิจิทัลขององค์กรที่เปลี่ยนไป หมายความว่ากรณีสัญญาอนุญาตเป็นสัญญาดิจิทัลขององค์กรที่เปลี่ยนไป หมายความว่ากรณีสัญญาอนุญาตเป็นสัญญาดิจิทัลขององค์กรที่เปลี่ยนไป หมายความว่ากรณีสัญญาอนุญาตเป็นสัญญาดิจิทัลขององค์กรที่เปลี่ยนไป

แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล 1 ค่าต่อ 1 องศา สัญญาณที่มาควบคุมตัวรับส่ง 8 บิต อีกสัญญาณหนึ่งก็คือ ไอโออาร์ (IOR) ซึ่งจะทำงานที่ " 0 " เมื่อ ซอฟต์แวร์ สั่งให้อ่านจากนอร์ท ค่าไอโออาร์ก็จะทำงาน (" 0 ") ซึ่งจะไปควบคุมทิศทางของข้อมูลในบัสเฟอ์ เมื่อค่า ดีไออาร์ (DIR) เป็น " 1 " จะเขียนข้อมูลออก ถ้าเป็น " 0 " จะอ่านข้อมูลเข้า จากเอาต์พุตของตัวแปลงสัญญาณอนาล็อก-ดิจิทัล ซึ่งถูก ชิปซีเลก (Chip Select) โดย 74LS138 ด้วย วงจรทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรส่วนอินเทอร์เฟสทั้งหมด

D_0-D_7 (Data Buses) ซึ่งต่อเข้ากับบัสข้อมูลของระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อทำหน้าที่

เอกสารนี้เป็นการส่งผ่านข้อมูลระหว่างบอร์ดกับคอมพิวเตอร์นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-IOR (I/O Read) ขาสัญญาณนี้เป็นเอาต์พุตจะทำงานที่สถานะ "0" เพื่ออ่านข้อมูลจากพอร์ทอินพุต เอาต์พุตที่มีแอดเดรสตรงกับแอดเดรสบนบัสแอดเดรสนั้น แล้วทำการส่งข้อมูลออกมาบนบัสข้อมูล

-AEN (Address Enable) สัญญาณนี้เป็นเอาต์พุตที่ใช้ในการแสดงว่าบัสไซเคิล (Bus Cycle) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สัญญาณ AEN ทำงาน (สถานะ "1") นั้นเป็นบัสไซเคิลของขบวนการ DMA ถ้าสถานะ "0" จะทำให้สัญญาณ -IOR, -IOW ทำงาน ทำให้พอร์ทอินพุตเอาต์พุตที่มีแอดเดรส ตรงกับค่าแอดเดรสบนบัสแอดเดรสนั้น ทำการอ่านหรือส่งข้อมูลออกมาบนบัสข้อมูล

Reset DRV ขาสัญญาณนี้เป็นเอาต์พุตซึ่งจะทำงานที่ "1" ในช่วงที่เริ่มจ่ายไฟให้ระบบ และจะยังทำงานต่อไปจนกว่าระบบต่างๆ ภายในคอมพิวเตอร์พร้อมที่จะทำงานได้จากนั้น สัญญาณนี้จะเปลี่ยนกลับเป็นสถานะ "0" โดยทั่วไปสัญญาณนี้จะถูกนำไปรีเซ็ตในวงจรอินเตอร์เฟสหรืออุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตต่างๆ ในช่วงที่เริ่มจ่ายไฟ

4.4 ซอฟต์แวร์ควบคุม

ซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นโปรแกรมภาษาเทอร์โบปาสคาลเวอร์ชัน 4 (Turbo Pascal V.4) โดยจะใช้คำสั่ง " PORT " ในภาษาปาสคาล ให้รับข้อมูลจากพอร์ท 300 โดยจะอ่านค่าข้อมูลทุกครั้งที่มีสัญญาณจากตัวนับ แล้วนำมาทำการประมวลผลคือ จะคำนวณค่าตำแหน่งที่จะทำการลือท แล้วทำการลือทซึ่งสามารถจะลือทได้ทั้งแบบ ไบনারีและแบบ เรคแทนกูลาร์ โดยข้อมูลที่ได้จะเก็บลงแฟ้มข้อมูล (File) เพื่อสามารถนำมาใช้ภายหลังได้หากต้องการ ซึ่งเป็นการแสดงผลบนจอภาพ ซีอาร์ที นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์ออกทาง เครื่องพิมพ์ได้ โดยใช้ฟังก์ชันที่เตรียมไว้คือ กดปุ่ม SHIFT-F1

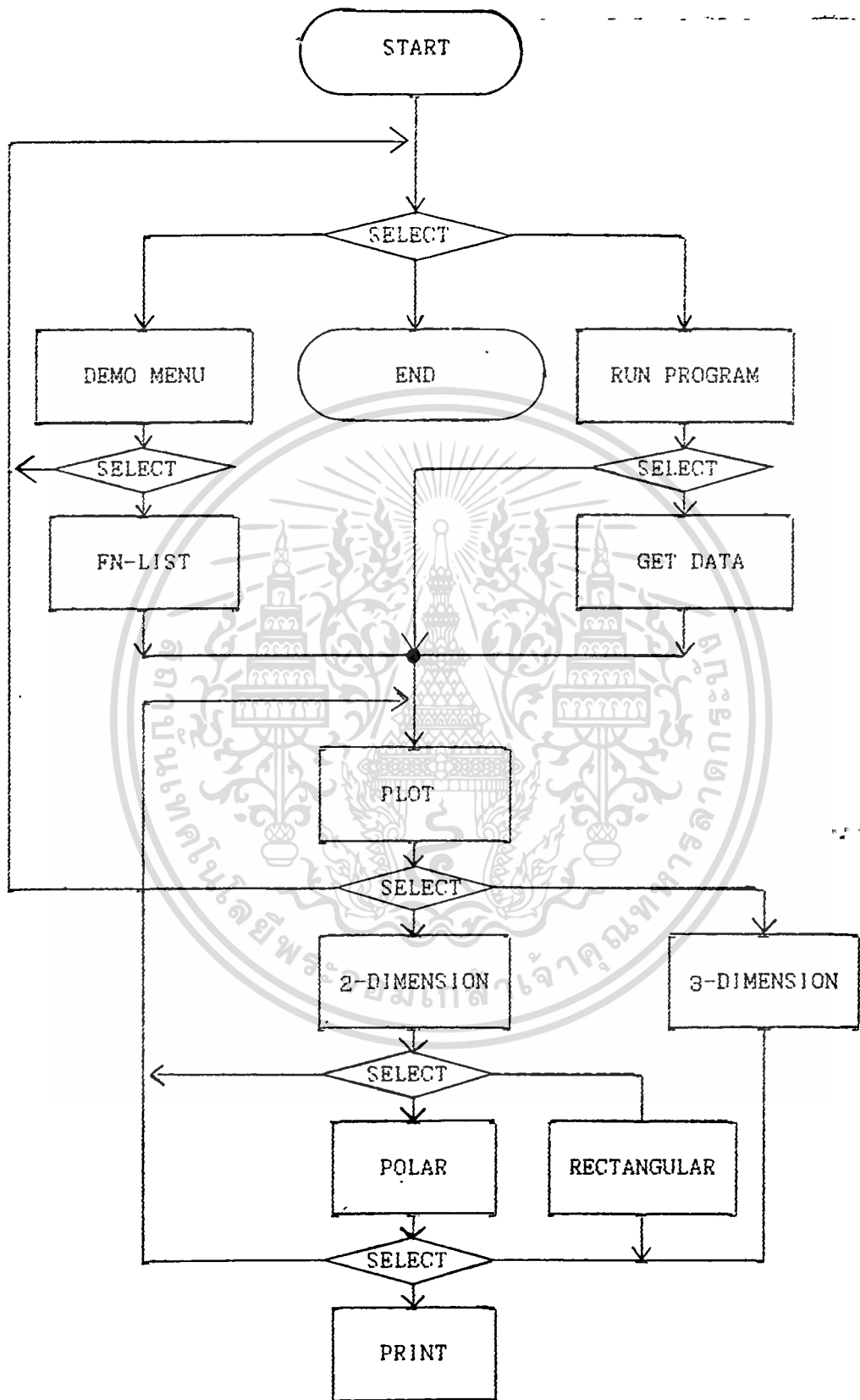
ในการพล็อตรูปดังกล่าวจะแสดงค่าในหน่วยดีบี (dB) ซึ่งสามารถปรับสเกลได้โดยป้อนค่าสเกลที่ต้องการเข้าไปก่อนพล็อตรูป ในการพล็อตจะแสดงเส้น -3 ดีบีและขีดเส้นเพื่อแสดงค่ามุมที่มีค่า -3 ดีบี ทำให้สามารถหาค่าเบีมวิตซ์ของสายอากาศที่ทำการพล็อตแทนที่รัศมีได้

ที่กล่าวมาเป็นส่วนของโปรแกรมที่ทำการอ่านค่าข้อมูลจากส่วนอินเตอร์เฟส และนำมาแสดงผล ยังมีอีกส่วนของโปรแกรมคือส่วนดีโม (Demo : Demonstate) ซึ่งจะแสดงผลในลักษณะสาธิตการทำงานของโปรแกรม โดยได้กำหนดตัวอย่างของฟังก์ชัน

ของสายอากาศบางชนิด เพื่อแสดงแทนที่รัศมี โดยผู้ใช้สามารถเลือกได้ที่จะพล็อตทั้งในแบบไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาร์ฟอร์ม และแบบเรคแทงกูลาร์ฟอร์ม นอกจากนี้ยังสามารถพล็อตในแบบ 3 มิติได้ด้วย ซึ่งในการจะพล็อตแพทเทิร์นในลักษณะ 3 มิติของสายอากาศที่ต้องการวัดนั้นค่อนข้างทำได้ลำบากเพราะจะต้องวัดค่าสนามรอบๆ สายอากาศทุกๆ จุดซึ่งทำได้ยากเนื่องจากต้องทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ทุกๆ แกนที่ต้องการแต่เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้สามารถทำได้เพียงทางเดียวเท่านั้น แต่ถ้าต้องการวัดในระบบ 3 มิติก็อาจจะพอทำได้เหมือนกันโดยการหมุนสายอากาศให้อยู่ในแกนตั้งครั้งหนึ่งและแนวนอนครั้งหนึ่ง โดยต้องตั้งสมมุติฐานว่าแพทเทิร์นของสายอากาศดังกล่าวมีลักษณะสมมาตรกันในแนวทั้งสอง ก็อาจจะพล็อตแพทเทิร์นในแบบ 3 มิติได้ แต่ผลที่ได้อาจจะผิดพลาดได้ค่อนข้างมากเพราะในทางปฏิบัติแล้วแพทเทิร์นจะไม่น่าจะได้รูปที่สมมาตรนัก ทั้งที่ตามทฤษฎีแล้วควรจะสมมาตร





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ PROCESS FLOW CHART นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและการวิเคราะห์

5.1 การทดลอง

จากการที่ได้ออกแบบสร้างดังที่กล่าวในบทที่ 4 โคมพั้นจึงจะทำการทดลองเพื่อทดสอบส่วนต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้น โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทำการทดลองโดยใช้คน กับการใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีวิธีในการทดลองดังนี้

ทั้งสองวิธีมีขั้นตอนในการทดลองเหมือนกันในบางส่วน คือ ขั้นแรกต้องทำการส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง และนำสายอากาศที่ต้องการทดสอบไปรับสัญญาณที่ระยะไกล (Far-Field) โดยใช้เครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าต่อกับสายอากาศรับเพื่ออ่านค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่รับได้ในมุมต่างๆ ซึ่งจะได้ค่าเป็นหน่วยดีบี (dB) แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตใน โพลาร์กราฟ โดยการนอร์มอลไลซ์ข้อมูลทั้งหมดด้วยค่าสูงสุดก่อน (ค่าข้อมูลตั้งแต่ค่าลบด้วยค่าสูงสุด)

ความแตกต่างของทั้งสองวิธีคือในส่วนที่ต้องหมุนสายอากาศไปที่ละองศาซึ่งถ้าทำด้วยผู้ทดลองเองก็จะเกิดความผิดพลาดได้ง่ายเนื่องจากการจะหมุนด้วยมือนั้นต้องคอยขยับมือเข้าออกเพื่อหมุนสายอากาศซึ่งถ้าหมุนเพื่อตั้งองศาแล้วจะทำได้ยาก และเกิดความล่าช้า และยังต้องคอยขยับสายอากาศบ่อยๆ ทำให้ค่าได้อาจคลาดเคลื่อนได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเบื่อหน่ายแก่ผู้ทดลองด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วจึงมักจะหมุนสายอากาศไปที่ละ 5 หรือ 10 องศา เพื่อลดปัญหาดังกล่าว แต่ก็ทำให้ได้ค่าข้อมูลไม่ครบทั้งหมดจึงทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลเกิดมากขึ้น แต่แก้ปัญหาคือจะอนุโลมให้ได้บ้างในทางปฏิบัติ

แต่ในส่วนของบริษัทนั้นจะใช้ ดีซีมิเตอร์ เป็นตัวหมุนสายอากาศทำให้ทำได้รวดเร็วขึ้น และไม่ต้องคอยขยับสายอากาศบ่อยๆ ซึ่งถ้าจะใช้มิเตอร์นี้กับกรณีแรกก็ยังคงทำได้ยากเพราะจะไม่สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ทัน แต่ถ้าเป็นคอมพิวเตอร์แล้วจะสามารถทำได้ โดยใช้ตัวนับ (Counter) เป็นตัวนับองศาที่ละองศาและอ่านค่าข้อมูลเข้ามาที่ละองศา ทำให้ได้ค่าข้อมูลที่ละเอียดถูกต้อง และรวดเร็ว โดยไม่ต้องให้คนเข้าไปอยู่ใกล้ๆ ซึ่งอาจจะรบกวนคลื่นที่จะรับด้วย

ความแตกต่างอีกอย่างหนึ่งก็คือหลังจากได้ค่าข้อมูลมาแล้วจะนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ ซึ่งถ้าหากทำด้วยมือก็จะช้าและเกิดความเบื่อหน่าย หรืออาจจะเกิดความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลาคั้งได้ ในระหว่างค่านาม แต่เมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณแล้วจะทำได้รวดเร็ว
เพียงไม่กี่วินาทีที่สามารถพล็อตกราฟออกมาได้ และมีความถูกต้องในการคำนวณ

สำหรับการทดลองที่ได้ทดลองนี้ ได้ใช้สายอากาศรับเป็นแบบขาคี 3 อิลลิ
เม็นท์ โดยรับสัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ช่อง 5 และ ช่อง 7 ทำให้ไม่ต้องใช้เครื่องส่งตั้งที่
กล่าวข้างต้น แต่ต้องทำการรับในขณะที่สถานีนี้กำลังส่งคลื่นอยู่ โดยจะทำการทดลองทั้ง
สองวิธีตั้งที่กล่าวข้างต้น แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

ผลการทดลองที่วัดจากการอ่านโดยตรงจากเครื่องวัดความเข้มสนาม โดย
อ่านครึ่งละ 5 องศาและจดค่าความเข้มสนามที่อ่านได้ จะได้ข้อมูลตามตารางที่ 5.1 และ
ตารางที่ 5.2 ในตารางที่ 5.1 เป็นค่าความเข้มสนามของสัญญาณช่อง 5 และได้แพทเทิร์นที่
พล็อตลงในกราฟรูวงกลมในรูปที่ 5.1 ส่วนในตารางที่ 5.2 เป็นค่าความเข้มที่ส่งสัญญาณ
โดยช่อง 7 แล้วนำไปพล็อตได้แพทเทิร์นดังรูปที่ 5.2

ส่วนในรูปที่ 5.3 และ 5.4 เป็นรูปแพทเทิร์นที่พล็อตจากวงจรที่สร้างขึ้น
โดยรับสัญญาณจาก ช่อง 5 และ ช่อง 7 ตามลำดับ

5.2 ผลการทดลอง

มุม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)	มุม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)
0	38	115	36
5	36	120	35
10	39	125	37
15	36	130	38
20	38	135	39
25	39	140	40
30	39	145	40
35	39	150	40
40	40	155	40
45	38	160	39
50	37	165	39
55	37	170	40
60	37	175	38
65	36	180	38
70	35	185	36
75	32	190	35
80	35	195	34
85	32	200	33
90	32	205	29
95	34	210	28
100	35	215	25
105	36	220	24
110	35	225	25

มุม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)	มุม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)
230	18	305	28
235	19	310	29
240	18	315	31
245	22	320	31
250	22	325	31
260	21	330	33
265	24	335	35
275	18	340	35
280	19	345	37
290	27	350	37
295	26	355	37
300	27	360	38

ตารางที่ 5.1 แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าสายอากาศยาคี 3 อิลิเมนต์ โดยรับสัญญาณ

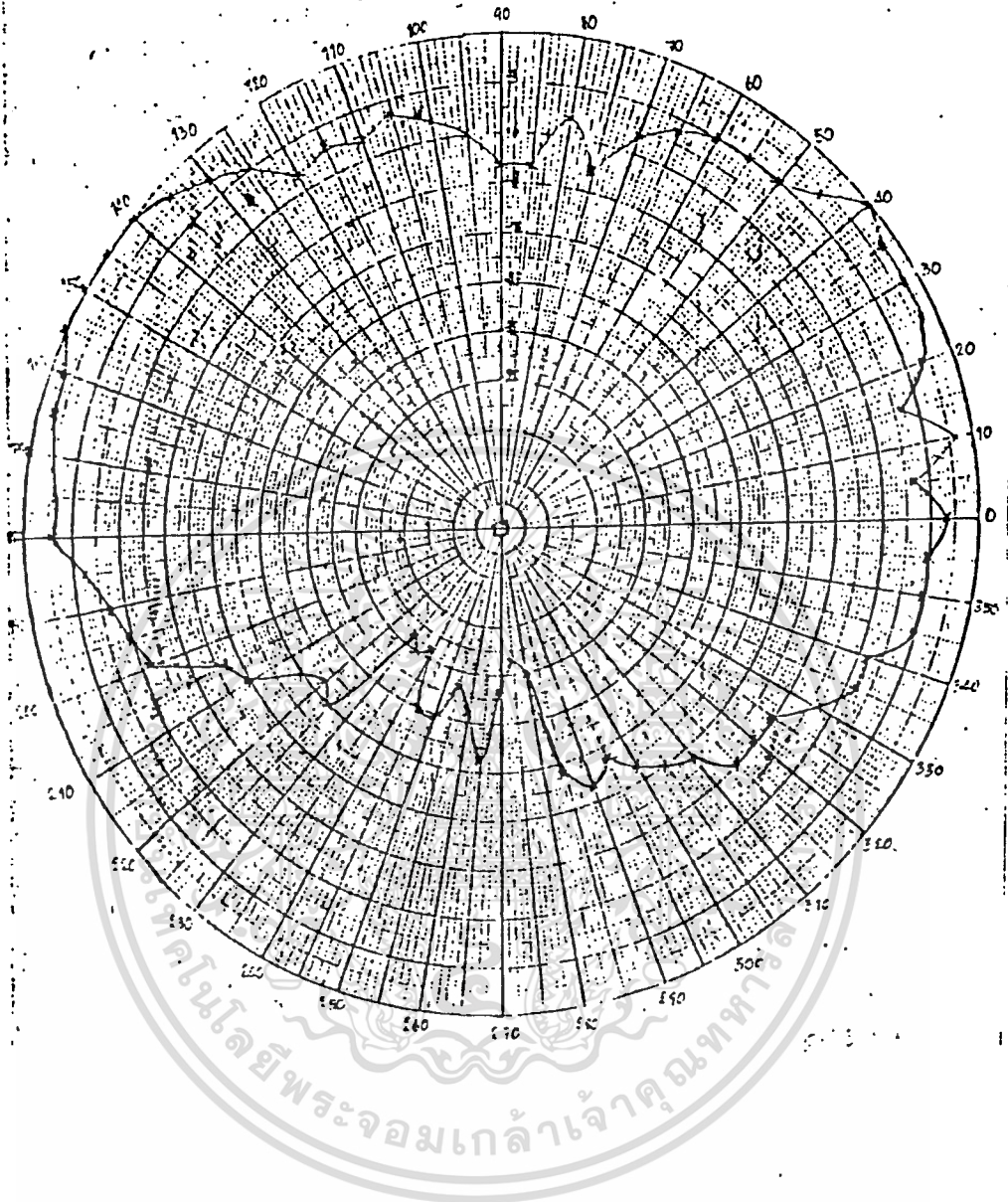
ของช่อง 5

มม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)	มม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)
0	41	115	40
5	41	120	40
10	41	125	41
15	41	130	41
20	40	135	41
25	40	140	41
30	39	145	41
35	38	150	40
40	35	155	41
45	35	160	40
50	33	165	40
55	33	170	40
60	33	175	40
65	34	180	40
70	35	185	41
75	34	190	41
80	34	195	41
85	34	200	42
90	34	205	42
95	35	210	42
100	35	215	42
105	35	220	42
110	36	225	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

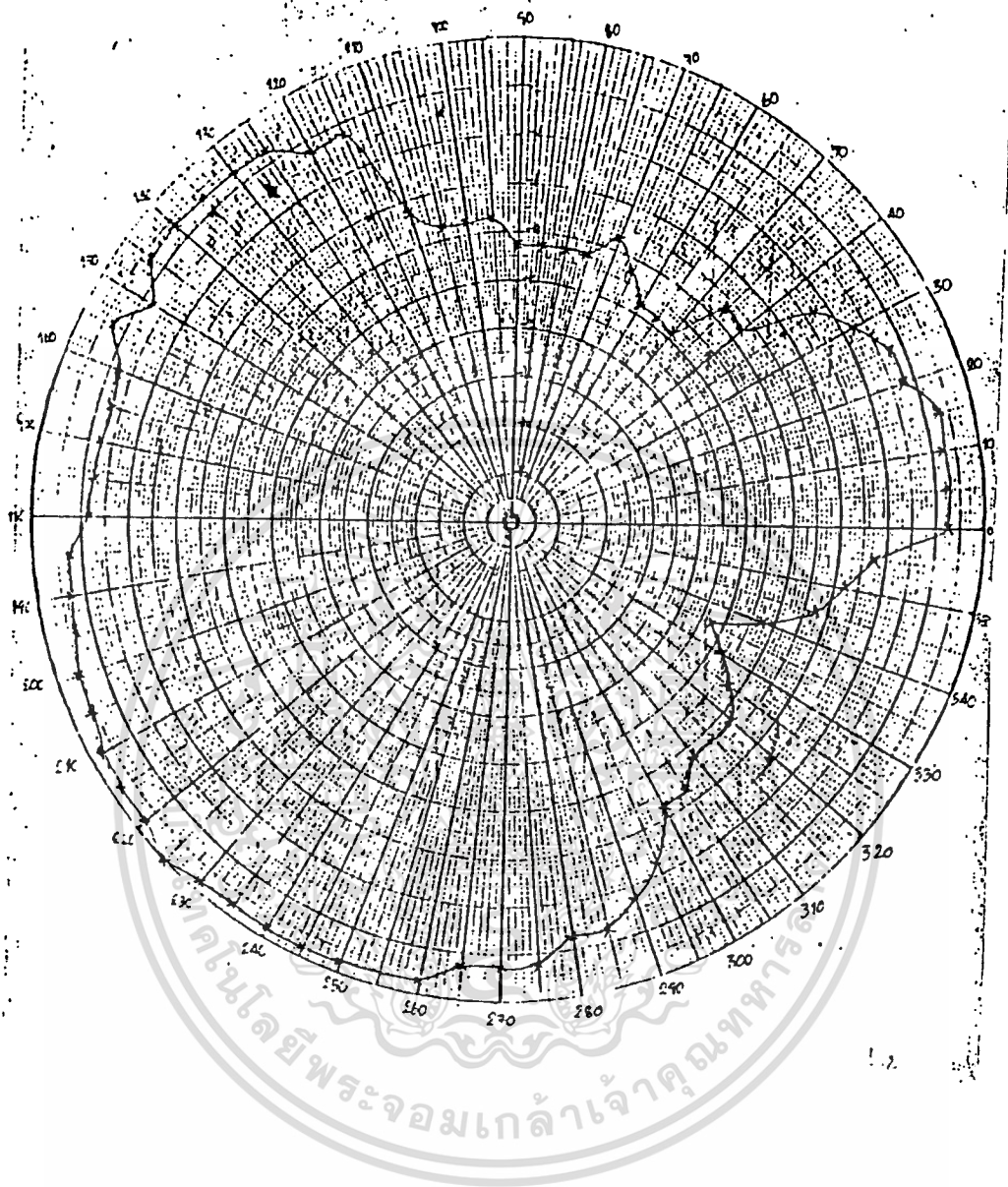
มุม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)	มุม (องศา)	ความเข้มสนาม (dB)
230	42	300	36
235	42	305	36
240	42	310	35
245	42	315	35
250	42	320	35
255	42	325	34
260	42	330	33
265	41	335	32
270	41	340	34
275	41	345	36
280	40	350	37
285	40	355	38
290	39	360	41

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า เข้มสนาม ไฟฟ้าของสายอากาศยาก็ 3 อิลิมินท์โดยรับสัญญาณของช่อง 7



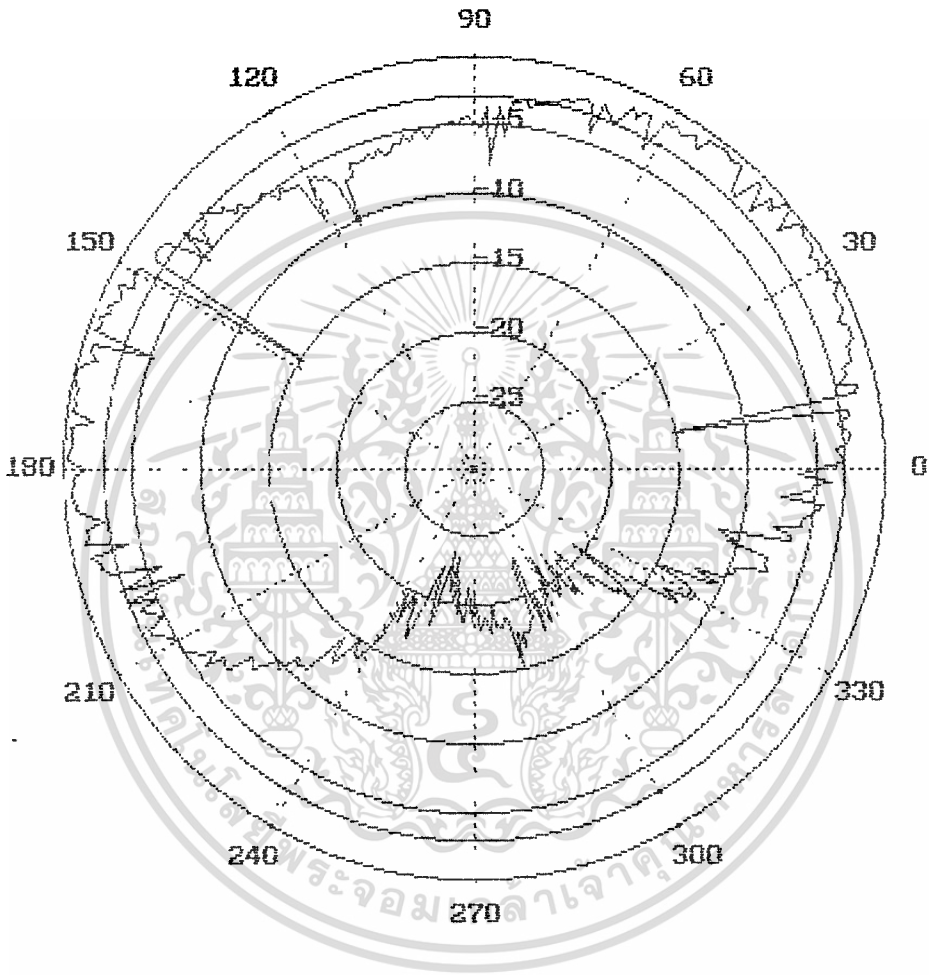
รูปที่ 5.1 แสดงแพทเทินของสัญญาณช่อง 5
กัวยวีซี หมุนกัวยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



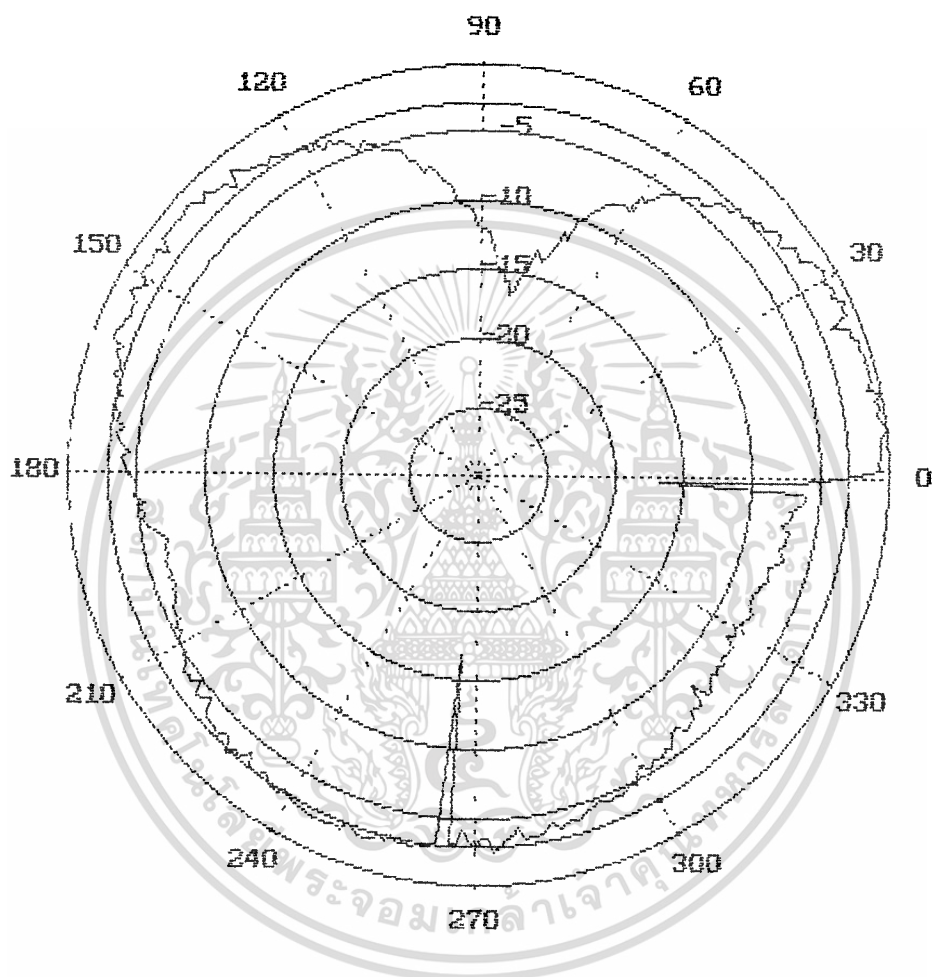
รูปที่ 5.2 แสดงแท่งเงินของสัญญาณของ ๗
 กวยวิธีการหมุนควัยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงแพทเทิร์นของสัญญาณช่อง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

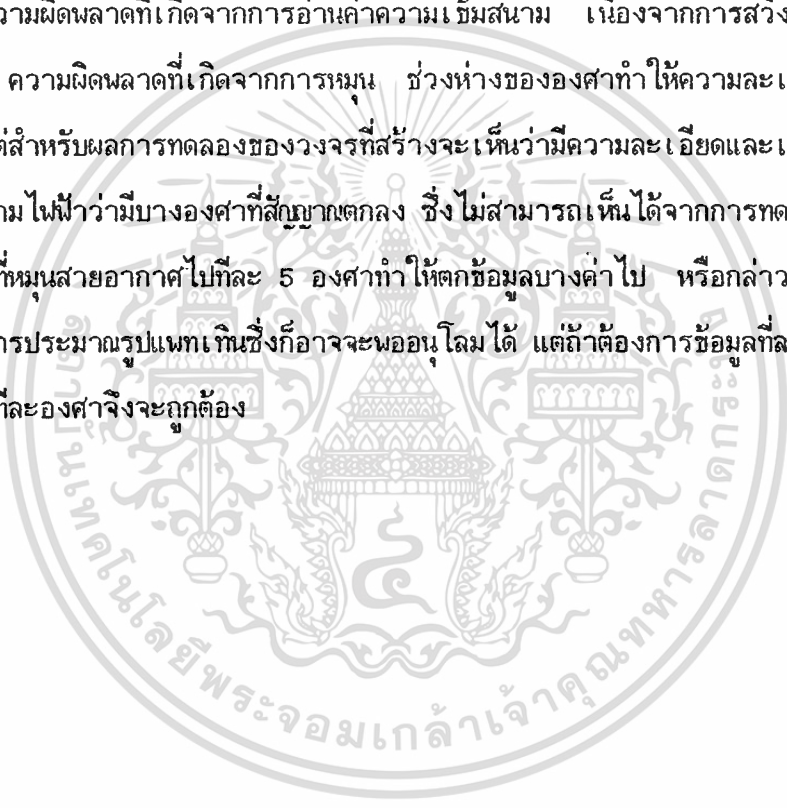


รูปที่ 5.4 แสดงแพทเทิร์นของสัญญาณช่อง 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

สายอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสายอากาศแบบยาگی มีแพทเทิร์นแบบมีทิศทางคือ มี เมน โพล์ แต่โพลข้างและหลังจะมีน้อย แต่จากการวัดด้วยการหมุนด้วยมือแล้วอ่านค่าจะได้แพทเทิร์นดังรูป 5.1 และ 5.2 แพทเทิร์นที่ได้จากวงจรที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะแตกต่างจากทฤษฎี ส่วนผลการทดลองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีนี้มีลักษณะแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้ก็เพราะว่าความผิดพลาดที่เกิดจากการอ่านค่าความเข้มสนาม เนื่องจากการสวิตของสัญญาณที่รับเข้ามา ความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุน ช่วงห่างขององค์ทำให้ความละเอียดของข้อมูลลดลง แต่สำหรับผลการทดลองของวงจรที่สร้างจะเห็นว่ามีค่าความละเอียดและเห็นถึงความเข้มของสนามไฟฟ้าว่ามีบางองค์ที่สัญญาณตกลง ซึ่งไม่สามารถเห็นได้จากการทดลองด้วยมือ เพราะการที่หมุนสายอากาศไปที่ละ 5 องศาทำให้ตกข้อมูลบางค่าไป หรือกล่าวอีกอย่างคือ เป็นเพียงการประมาณรูปแพทเทิร์นซึ่งก็อาจจะพอใช้ได้ แต่ถ้าต้องการข้อมูลที่ละเอียดแล้วจะต้องหมุนทีละองศาจึงจะถูกต้อง



บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุป

จากการทดลองจะเห็นว่า การวัดแพทเทิน โดยใช้วิธีดั้งเดิม กับการใช้ เครื่องคอมพิวเตอร์ ในการวัดนั้นมีความคล้ายคลึงกัน แต่ก็มีบางส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่

1. ความถูกต้องของข้อมูล เนื่องจากการวัด โดยวิธีดั้งเดิมนั้นจะวัดครั้งละหลายองศา จึงทำให้ข้อมูลบางส่วนขาดหายไป เป็นผลให้แพทเทินที่ได้ขาดความละเอียดไป
2. ความรวดเร็วในการวัด เนื่องจากการวัดแบบดั้งเดิม จะใช้การหมุนสายอากาศด้วยมือ ทำให้ต้องใช้ เวลาในการวัดค่อนข้างมาก คือ ในการวัดแต่ละครั้ง จะใช้เวลาอย่างน้อยประมาณ ครึ่งชั่วโมง แต่ถ้าเป็นวิธีนี้จะใช้เวลาเพียงไม่กี่นาที
3. ความสะดวกสบายในการวัด เนื่องจากการวัด โดยวิธีนี้ผู้ทำการวัด จะสามารถควบคุมการทำงาน ได้โดยอยู่แต่เพียงในห้อง ซึ่งถ้าเป็นแบบเก่า จะต้องออกไปควบคุมเองในที่โล่ง
4. การคำนวณที่รวดเร็วและถูกต้อง เพราะการใช้ เครื่องคอมพิวเตอร์ ในการประมวลผลสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องมากกว่า
5. ความสามารถในการแสดงผล โดยวิธีนี้สามารถแสดงผลได้หลายรูปแบบ คือ แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแบบวงกลม ทั้งยังสามารถเก็บข้อมูลที่ไว้ เพื่อนำกลับมาใช้ในภายหลัง ได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์ออกทาง เครื่องพิมพ์ได้อีกด้วย

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้างวงจร คือ ในส่วนของตัวนำซึ่งใช้ โฟโตทรานซิสเตอร์ ในการเซ็นเซอร์ ซึ่งเมื่อนำออกไปใช้ในที่โล่ง อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากแสงจากภายนอกที่ไม่ใช่แสงจาก ไดโอดเปล่งแสง ซึ่งจะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์รับสัญญาณแสงที่ผิดด้วย การรับจึงผิดพลาด แต่หากทำการวัดภายในห้องปัญหาดังกล่าวก็ลดไปเรื่อย ๆ อาจจะทำได้ป้องกันแสงจากภายนอกที่มารบกวน

อีกปัญหาหนึ่งก็คือ ดี.ซี.มอเตอร์ ที่ใช้ยังไม่ค่อยดีเท่าที่ควรคือ การทำงานของมอเตอร์จะทำงานได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้นก็จะหยุดทำงาน (Hang) ทำให้ต้องหยุดคอยจนกว่ามอเตอร์จะสามารถทำงานได้อีก

ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ถ้าสามารถแก้ไขหรือปรับปรุงให้ดีขึ้นก็จะสามารถทำ

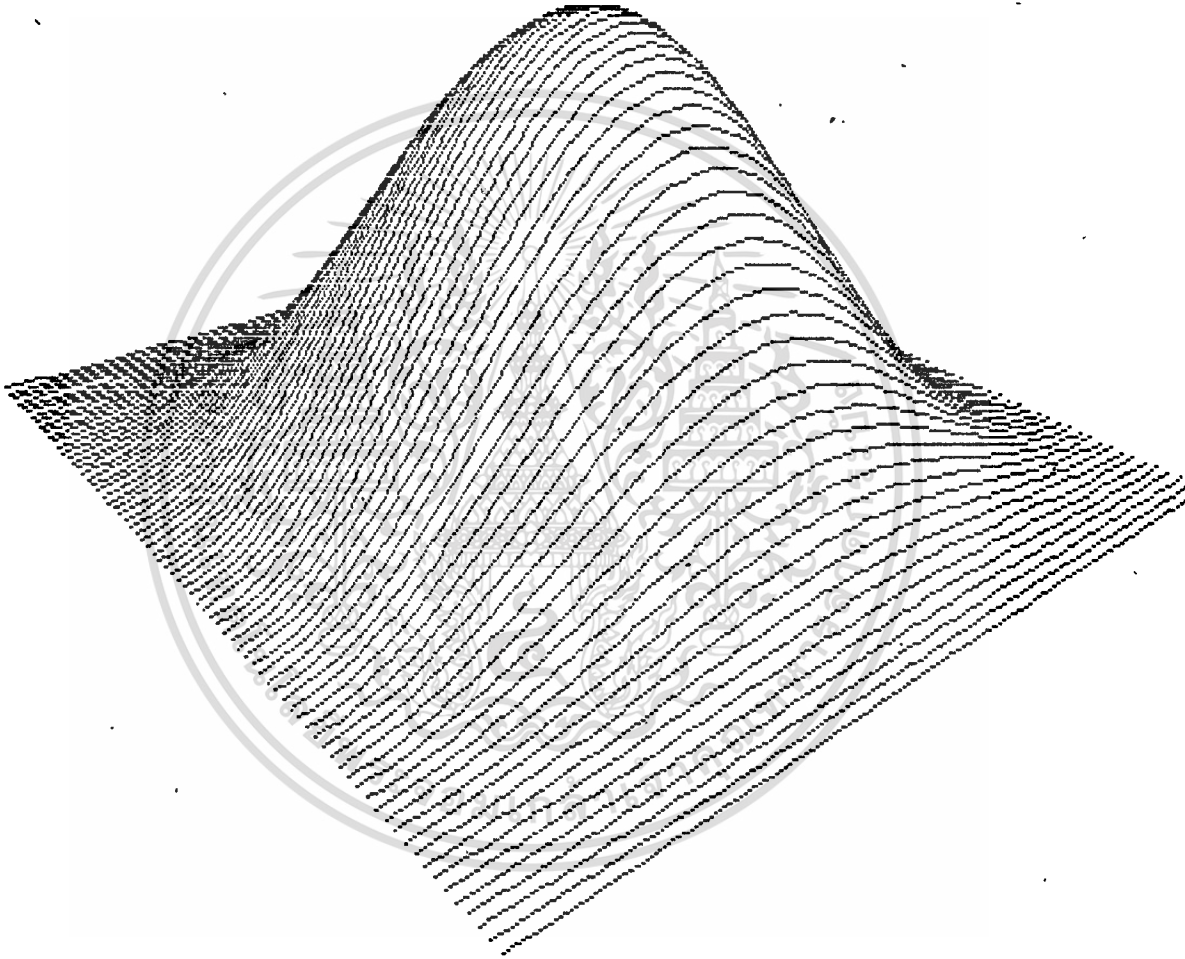
เอกสารงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในส่วนของซอฟต์แวร์ยังสามารถพัฒนาต่อไปให้ดียิ่งขึ้นไปอีกได้ โดยการเพิ่มหน้าที่หรือความสามารถในการประมวลผล และแสดงผล ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของโครงการนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เพราะในส่วนของซอฟต์แวร์นั้นสามารถเพิ่มขีดความสามารถได้ออกซ์นอัยกับโปรแกรมเมอร์

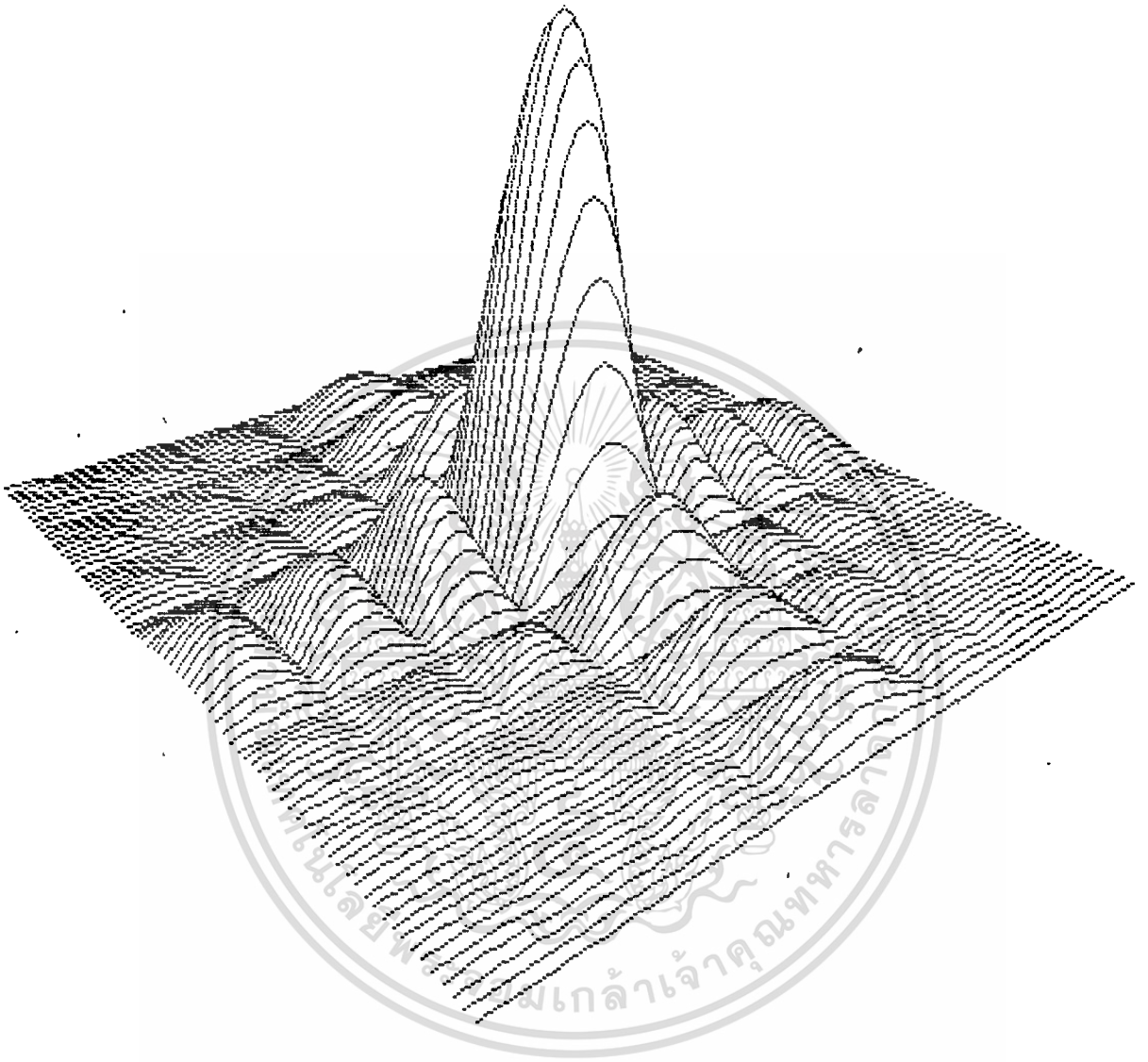


ภาคผนวก

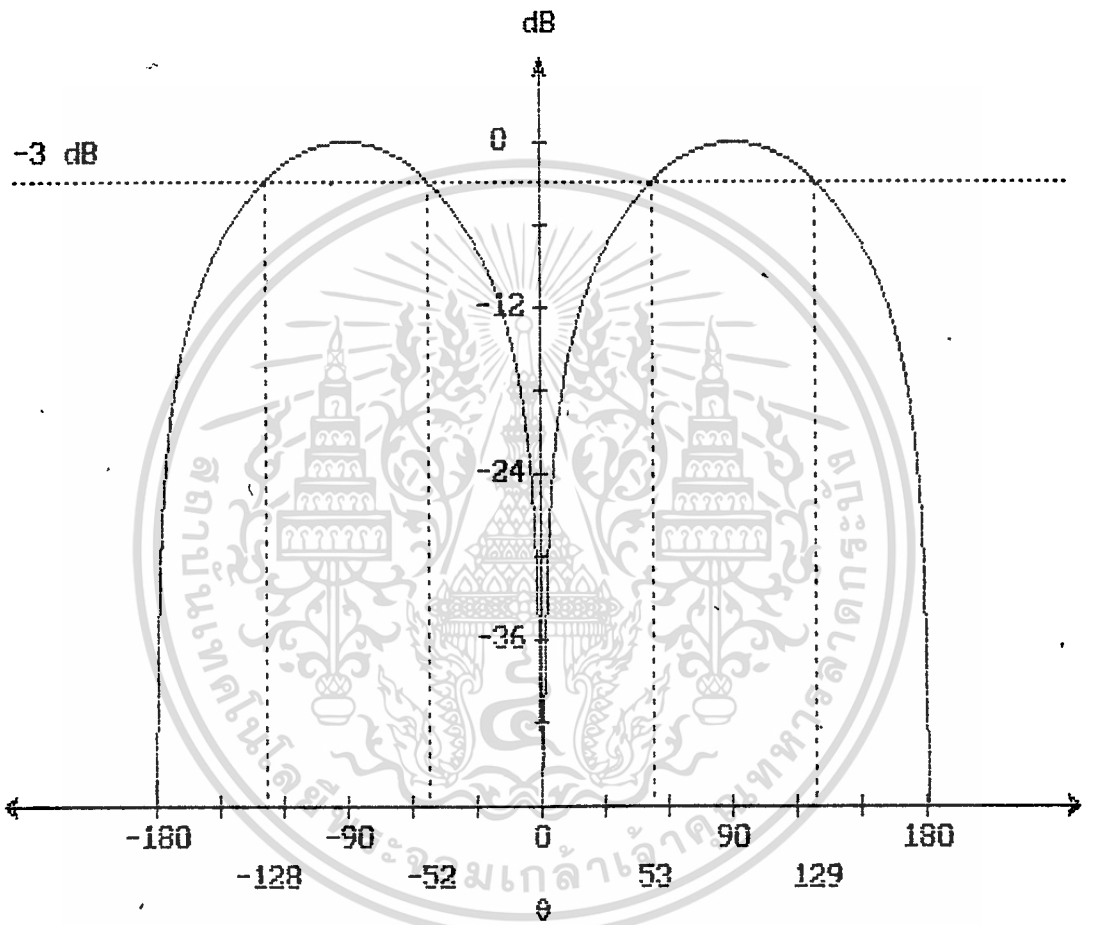
แสดงตัวอย่างส่วนการสาธิตของโปรแกรม (Demonstrate) ในรูป 3 มิติ และ 2 มิติซึ่งมีทั้งแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบวงกลมดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

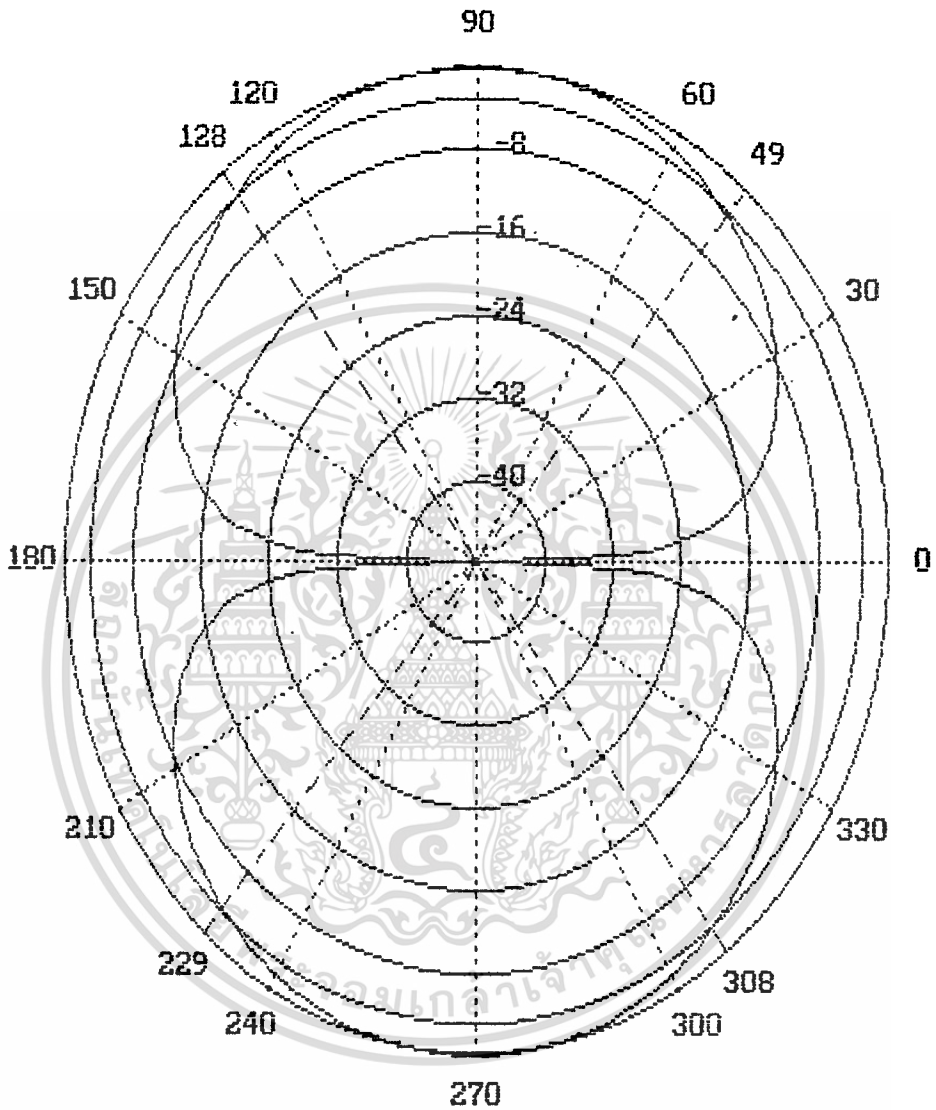


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HALF WAVE DIPOLE : $[\cos(\pi/2 \cos \theta)]/\sin \theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HALF WAVE DIPOLE : $[\cos(\pi/2 \cos \theta)]/\sin \theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้เนื่องจากได้รับคำแนะนำจาก อาจารย์
กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ จึงขอขอบ
คุณทุกท่าน ณ โอกาสนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ชัชวาล ยนต์หงส์, " แนะนำภาษา Pascal โดย Turbo Pascal ", สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2532.
2. บัญญัติ โรจน์อารยานนท์, " วิศวกรรมสายอากาศ ", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
3. บุญเลิศ เอี่ยมทัศนาศ, " เรียนรู้ภาษาปาสคาลด้วยเทอร์โบปาสคาล 4.0-5.0", ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2532.
4. Balanis, Constantine, " ANTENNA THEORY analysis and design", John Wiley & Sons, Inc., 1982.
5. BORLAND, " Turbo Pascal 4.0 Owner's Handbook ", Technical Support Department Borland International.
6. Chan.S.Park, " Interactive Microcomputer Graphics ", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1985.
7. International Business Machines Corporation, " PC/AT Technical Reference ", First Edition, from the IBM Personal Computer Hardware Reference Library, March 1984.
8. International Business Machines corporation, " The IBM Personal Computer XT Technical Reference", Revised Edition, from the IBM Personal Computer Hardware Reference Library, April 1983.
9. Kraus, John Daniel, " ANTENNAS ", McGraw-Hill, 1988.