SUT7-709-50-12-93

รายงานการวิจัย

การพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยใช้ตัวสร้างลำคลื่นเชิงตำแหน่ง

Developing Wideband Smart Antenna Systems using Fully Spatial Beamformer

คณะผู้วิจัย
หัวหน้าโครงการ
อาจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2551

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ Professor Marek E. Bialkowski สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยของโครงการนี้

ผู้วิจัย

ตุลาคม 2551

บทคัดย่อ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านระบบสื่อสารไร้สายได้มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อธุรกิจทั่วโลกและชีวิตประจำวันของประชากรส่วนใหญ่ ปัญหาหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ ความไม่เพียงพอของทรัพยากรความถี่ ระบบสายอากาศฉลาดเป็นระบบที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากระบบสายอากาศฉลาดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สายโดยไม่จำเป็นจะต้องเพิ่มแถบความถี่แต่อย่างใด กล่าวคือระบบสายอากาศฉลาดสามารถก่อรูปลำคลื่นของพูคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมาย ในขณะที่หันจุดศูนย์หรือพูข้างไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งส่งผลให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดี ที่ผ่านมาการพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดมุ่งเน้นการใช้งานในแถบความถี่แคบ แต่เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายในปัจจุบันต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง ดังนั้นจึงได้มีผู้สนใจในการพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดให้สามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง โดยความท้าทายจะอยู่ที่ระบบจะต้องมีความซับซ้อนน้อยในการประมวลผลสัญญาณ และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

ดังนั้นรายงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง หรือที่เรียกว่าตัวก่อรูปลำคลื่นที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม ระบบดังกล่าวแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ ระบบที่ประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งและเวลา เชิงตำแหน่งและความถี่ และเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ให้ความสนใจที่จะพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดที่ประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นระบบที่มีข้อดีมากกว่าระบบอื่นตรงที่ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ผลสำเร็จของงานวิจัยชิ้นนี้ได้ถูกแสดงผ่านการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ และการสร้างตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวก่อรูปลำคลื่นที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมีความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นที่เป็นไปตามต้องการตลอดช่วงแถบความถี่กว้างที่ได้ออกแบบไว้

Abstract

In the past two decades, wireless communication systems have grown with an unprecedented speed. This rapid expansion of radio systems has a profound impact on today's business world and people's daily lives. One undesired outcome is a heavy utilization of the available frequency spectrum. Because of this situation, a smart antenna system is envisaged to be the solution as it is capable of increasing the wireless system capacity without additional frequency spectrum. By pointing their beam towards a desired user and nulls or low side lobes towards interfering sources, it is able to considerably improve the quality of signal transmission in a multi-user environment. It has to be noted that the benefits of smart antennas have been largely demonstrated for the case of narrowband communication systems. As the rapid growth of wireless technologies demands high bit rate data transmission, there is an interest in smart antenna which would operate over an increased frequency band. The design of such wideband intelligent antenna system creates a challenge in terms of processing techniques and associated costs.

Therefore, this report presents theoretical investigations into a wideband smart antenna system, namely wideband beamformer. From literatures, a wideband beamformer can be realized through space-time, space-frequency or fully spatial signal processing. The focus of this report is on the wideband beamformer employing fully spatial signal processing as it's low of cost and complexity. The performance of this beamformer is tested via computer simulations and constructed prototype. The obtained resutls show that the beamformer successfully performs beam formation to designated direction within a given wide frequency band.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญรูปภาพ ..... ฉ
บทที่ 1 1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 3
2.1 กล่าวนำ 3
2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสายอากาศฉลาด 3
2.3 ข้อจำกัดของสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบ 7
2.4 สายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและเวลา 9
2.5 สายอากาศฉลาดที่ประมวลผลเชิงตำแหน่งและความถี่ 10
2.6 สายอากาศฉลาดที่ประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว 11
2.7 กล่าวท้ายบท 12
บทที่ 3 13
3.1 กล่าวนำ 13
3.2 อัลกอริทึมในการก่อรูปลำคลื่น 13
3.3 สมรรถนะในการก่อรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบ 19
3.4 กล่าวท้ายบท 22
บทที่ 4 24
4.1 กล่าวนำ 24

4.2 ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 4×4 24
4.3 ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 2×2 36
4.4 กล่าวท้ายบท 43
บทที่ 5 44
5.1 กล่าวนำ 45
5.2 อัลกอริทึมในการกำหนดจุดศูนย์ 44
5.3 ผลการจำลองแบบ 47
5.4 กล่าวท้ายบท 49
บทที่ 6 50
6.1 สรุป 50
6.2 ข้อแสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อ 51
บรรณานุกรม 53
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ 57
ประวัติผู้วิจัย 58

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2- 1 โครงสร้างของสายอากาสฉลาด 4
รูปที่ 2- 2 โครงสร้างของสายอากาศแบบสลับลำคลื่น 5
รูปที่ 2- 3 โครงสร้างของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix 6
รูปที่ 2- 4 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับลำคลื่น 7
รูปที่ 2- 5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบโดยใช้
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น 4×1 ต้น เมื่อนำมาใช้งานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้าง 8
รูปที่ 2- 6 โครงสร้างสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและเวลา 9
รูปที่ 2- 7 โครงสร้างสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและความถี่ 10
รูปที่ 2- 8 โครงสร้างสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว 11
รูปที่ 3- 1 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยอาศัยการประมวลผล
เชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว 14
รูปที่ 3- 2 วงรอบของสมการ (3-8) 16
รูปที่ 3- 3 การกำหนดค่าทิศทางของลำคลื่นหลักและ
ช่วงความถี่เป้าหมายให้กับฟังก์ชันเป้าหมาย 17
รูปที่ 3- 4 ฟังก์ชันเป้าหมายของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้สายอากาศแถวลำดับจำนวน 41×41 ต้น
ในช่วงความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายของลำคลื่นหลักคือ 10° 18
รูปที่ 3- 5 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 41×41 ที่ทำงานในแถบความถี่
1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ 45° 19
รูปที่ 3- 6 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 41×41 ที่ทำงานในแถบความถี่
1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ -10° 20
รูปที่ 3- 7 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 4×4 ที่ทำงานในแถบความถี่
1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ -40° 21
รูปที่ 3- 8 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 4×4 ที่ทำงานในแถบความถี่
1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ 20° 22
รูปที่ 4- 1 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 25
รูปที่ 4- 2 ภาพถ่ายของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สร้างขึ้น 25
รูปที่ 4- 3 ผลการทดสอบเทียบกับผลจากการจำลองแบบของความสูญเสีย

เนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4- 2 26
รูปที่ 4- 4 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อใช้ในการอ้างอิงแบบรูปการแผ่พลังงานใน
รูปที่ 4- 5 ถึงรูปที่ 4- 7 26
รูปที่ 4- 5 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4- 2
ในระนาบ H ที่ $E_\theta(\phi, \theta = 90°)$ ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz 27
รูปที่ 4- 6 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4- 2
ในระนาบ E ที่ $E_\theta(\phi, \theta = 90°)$ ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz 27
รูปที่ 4- 7 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4- 2
ในระนาบ E ที่ $E_\theta(\theta, \phi=0°)$ ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz 28
รูปที่ 4- 8 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับ 4×4 ของสายอากาศโมโนโพล
แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 29
รูปที่ 4- 9 ภาพถ่ายของสายอากาศสายอากาศแถวลำดับ 4×4 ของ
สายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยม 29
รูปที่ 4- 10 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ
ที่แสดงในError! Reference source not found. ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz 29
รูปที่ 4- 11 โครงสร้างของตัวลดทอน 0.5 5 3 และ 10 dB 31
รูปที่ 4- 12 ภาพถ่ายของตัวลดทอน (0.5 3 5 และ 10 dB) แบบ stepped-impedance
ที่สร้างขึ้นเพื่อถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ 31
รูปที่ 4- 13 โครงสร้างของตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริงที่ออกแบบไว้ 32
รูปที่ 4- 14 ภาพถ่ายของตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริงที่ออกแบบไว้ใน 32
รูปที่ 4- 15 ตัวแบ่ง/รวมกำลังงานที่ใช้ในการสร้างตัวต้นแบบ 32
รูปที่ 4- 16 โครงสร้างของตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง
โดยใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว 33
รูปที่ 4- 17 ภาพถ่ายของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ได้สร้างขึ้นจากการออกแบบที่แสดงไว้ในรูปที่ 4- 16 34
รูปที่ 4- 18 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบเมื่อทิศทางเป้าหมายอยู่ที่ 0° 34
รูปที่ 4- 19 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบเมื่อทิศทางเป้าหมายอยู่ที่
10° 20° 30° และ 45° 35
รูปที่ 4- 20 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบเมื่อทิศทางเป้าหมายอยู่ที่
-10° -20° -30° และ -45° 36
รูปที่ 4- 21 ภาพถ่ายของสายอากาศแถวลำดับ 2×2 ที่วางห่างกัน 3.06 cm 37
รูปที่ 4- 22 บอร์ดไมโครคอนโทลเลอร์รุ่น ET-AVR STAMP ATmega128

ที่ใช้สำหรับประมวลผล 38
รูปที่ 4- 23 โครงสร้างของบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega128 38
รูปที่ 4- 24 การจัดเรียงขาของพอร์ต C 39
รูปที่ 4- 25 ตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่น 2×2 41
รูปที่ 4- 26 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 2×2 ที่ความถี่ 2.4 GHz 42
รูปที่ 4- 27 ผลการทดสอบการหาทิศทางของตัวต้นแบบที่ความถี่ 2.4 GHz 42
รูปที่ 5- 1 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถกำหนดศูนย์ได้บนแถบความถี่กว้าง 45
รูปที่ 5- 2 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปคลื่น 5×5 เมื่อมีสัญญาณเป้าหมายเข้ามาที่ 40° และไม่มีสัญญาณแทรกสอดในระบบ 48
ปที่ 5- 3 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปคลื่น 5×5 เมื่อมีสัญญาณเป้าหมายเข้ามาที่ 40° โดยมีสัญญาณแทรกสอด 2 สัญญาณเข้ามาที่ -20° และ -10° 48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัญหาสำคัญของระบบสื่อสารไร้สาย (wireless communication systems) ในอนาคตคือ การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความต้องการการบริการที่รวดเร็วทั้งภาพ และเสียงของผู้ใช้บริการ ซึ่งส่งผลให้การสื่อสารด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเป็นที่ต้องการอย่างมาก หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าการส่งข้อมูลในระบบไร้สายในอนาคตนั้นต้องการแถบความถี่ใช้งานที่กว้างมากกว่าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อตอบสนองต่อความต้องการในอนาคตดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ระบบสายอากาศฉลาด (smart antenna systems) ถือว่าเป็นระบบที่ช่วยพัฒนาประสิทธิภาพและคุณภาพของระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมาก [1-3] ดังนั้นการพัฒนาระบบสายอากาศเพื่อให้สามารถใช้งานในแถบความถี่กว้างจึงเป็นแนวทางที่กำลังได้รับความสนใจ และเป็นประเด็นที่พูดถึงในปัจจุบันจากนักวิจัยทั้งภาครัฐ และภาคเอกชนทั่วทุกมุมโลก

การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบสายอากาศฉลาดที่จะทำงานบนแถบความถี่กว้างนั้นเริ่มด้วยการพิจารณาผลกระทบของการนำสายอากาศฉลาดที่ทำงานในย่านแถบความถี่แคบไปใช้ในระบบที่มีแถบความถี่กว้าง ผลปรากฏว่าระบบสายอากาศฉลาดนี้ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ [4-5] เนื่องจากสองสาเหตุคือ เกิดการเคลื่อนของตำแหน่งลำคลื่นหลัก (mainbeam) และเกิดการเคลื่อนของจุดศูนย์ (null) ซึ่งยิ่งถ้ามีแถบความถี่ที่กว้างขึ้นเท่าใดปัญหาก็จะรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น การพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดให้สามารถทำงานในแถบความถี่กว้างอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จึงเป็นเรื่องที่นักวิจัยให้ความสนใจในขณะนี้

โครงการวิจัยนี้มีความสนใจที่จะนำวิธีการก่อรูปลำคลื่นเชิงตำแหน่งมาเพื่อใช้ในระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานในย่านความถี่กว้าง ด้วยเหตุผลที่ว่าวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่อเพิ่มมากมายที่ซับซ้อน แต่ข้อเสียคือยังไม่มีงานวิจัยมากนักที่นำวิธีการนี้มาพัฒนา จึงทำให้การสร้างองค์ความรู้ของงานวิจัยชิ้นนี้เป็นเรื่องที่ท้าทายมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีของสายอากาศฉลาดโดยใช้การก่อรูปลำคลื่นเชิงตำแหน่ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษา พัฒนาและสร้างชุดระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้การก่อรูปลำคลื่นเชิงตำแหน่ง โดยใช้การจำลองแบบ (simulation model) การประมวลผลภายในคอมพิวเตอร์ และสร้างชุดสายอากาศอย่างง่ายเพื่อทดสอบผลของการจำลองแบบ

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบตัวจำลองแบบของระบบสายอากาศฉลาดจากหนังสือ และบทความที่เคยตีพิมพ์มาก่อน
2. สร้างโปรแกรมจำลองแบบในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab เพื่อทดสอบระบบรวมถึงปรับปรุงให้ระบบมีผลตอบสนองตามที่คาดหวังไว้
3. ศึกษา และพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดโดยใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นเชิงตำแหน่งในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab
4. ศึกษาและออกแบบเพื่อสร้างชุดทดสอบของระบบสายอากาศฉลาดซึ่งอาศัยการก่อรูปลำคลื่นเชิงตำแหน่ง การออกแบบในครั้งนี้จะได้มาซึ่งอุปกรณ์พื้นฐานทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างชุดทดสอบ
5. ดำเนินการสร้าง และทดสอบชุดระบบสายอากาศฉลาดในห้องปฏิบัติการ
6. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลสำเร็จของงานวิจัยในโครงการนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองประการคือ การได้เทคโนโลยีของระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างที่พัฒนาขึ้นเองในประเทศไทย และการได้มาซึ่งชุดระบบทดสอบสำหรับสายอากาศฉลาด ผลสำเร็จทั้งสองนี้ถือว่าเป็นการนำประโยชน์โดยตรงมาสู่กลุ่มของนักวิจัยทั้งภาครัฐและเอกชนในกิจการโทรคมนาคม ซึ่งสามารถนำไปสู่ภาคการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

บทที่ 2

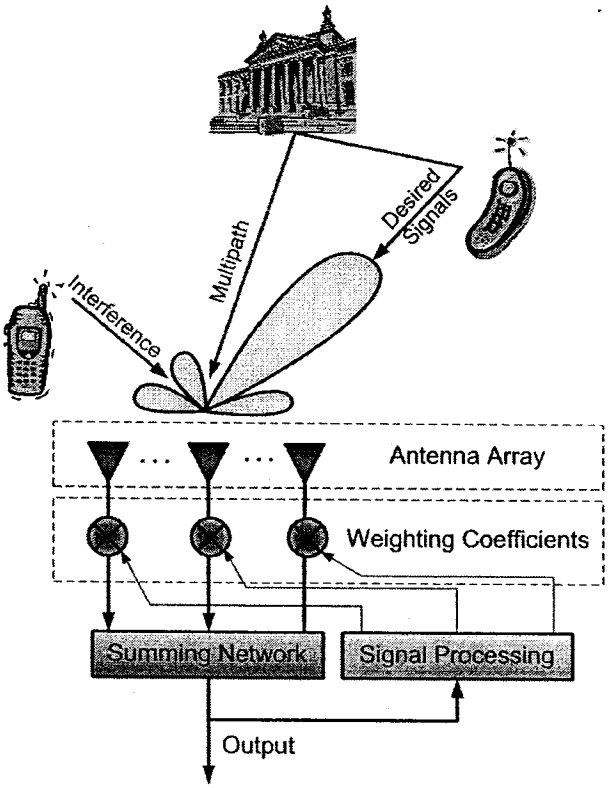
ระบบสายอากาศฉลาด

2.1 กล่าวนำ

ในไม่กี่สิบปีที่ผ่านมานี้ ระบบการส่งสัญญาณแบบไร้สายได้เติบโตเป็นอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้จากวิทยุติดตามตัว โทรศัพท์มือถือ จนถึงคอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วดังกล่าวมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและชีวิตประจำวันของประชากรโลกแทบทุกคน จากการพัฒนาดังกล่าว ปัญหาอย่างหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ได้แก่ ความไม่เพียงพอของทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งการนำเอาทรัพยากรความถี่กลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำนั้น เป็นสิ่งที่กระทำไม่ได้โดยตรง เนื่องจากจะมีผลของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ใช้ความถี่เดียวกัน ซึ่งการใช้ระบบสายอากาศฉลาดเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานและประเภทของระบบสายอากาศฉลาดโดยสังเขป เนื่องจากในระบบสื่อสารไร้สายนั้นผู้ใช้บริการมีความต้องการอัตราการสื่อสารข้อมูลที่เร็วขึ้น ส่งผลให้วิศวกรผู้ออกแบบระบบสายอากาศฉลาดต้องคำนึงถึงการใช้งานในแถบความถี่กว้างอีกด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงได้ให้รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อจำกัดของระบบสายอากาศฉลาดในปัจจุบันเมื่อทำงานในแถบความถี่ที่กว้าง และตามด้วยระบบสายอากาศฉลาดที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง

2.2 หลักการพื้นฐานของระบบสายอากาศฉลาด

ระบบสายอากาศฉลาดเป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และส่วนการประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ระบบสายอากาศฉลาดนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณที่เป้าหมาย (desired signal) ที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ด้วยการหันลำคลื่นหลัก (mainbeam) ไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมายในขณะที่ยังสามารถหันจุดศูนย์ (null) หรือพูรอง (sidelobe) ไปในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-1 [6-9] ดังนั้นสัญญาณขาออกจากระบบจึงเป็นสัญญาณเป้าหมายเท่านั้นซึ่งปราศจากสัญญาณแทรกสอดที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่น ความสามารถที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะถูกเรียกว่า ความาสามารถในการก่อรูปลำคลื่น (beamforming capability) ซึ่งความสามารถนี้จะทำให้ระบบสามารถใช้ความถี่ซ้ำเดิมได้ในตำแหน่งที่



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของสายอากาศฉลาด

แตกต่างกันโดยปราศจากปัญหาของการแทรกสอดของสัญญาณแทรกสอด จึงทำให้เราสามารถใช้ทรัพยากรความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

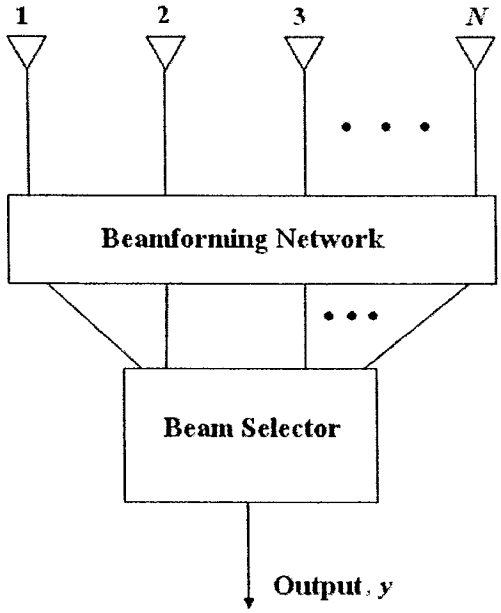
การทำงานของระบบสายอากาศฉลาดในรูปที่ 2-1 อธิบายได้ดังนี้ ในกรณีที่พิจารณาให้ระบบเป็นภาครับ เมื่อสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเป้าหมายรวมถึงสัญญาณแทรกสอดที่ความถี่เดียวกันมาตกกระทบเข้ากับสายอากาศแถวลำดับ สัญญาณที่รับมาได้นี้จะถูกถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น การถ่วงน้ำหนักดังกล่าวหมายถึง การปรับค่าขนาดและเฟสของสัญญาณ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้นจะถูกคูณเข้ากับสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็นเชิงซ้อน (complex number) เพื่อที่จะทำให้ขนาดและเฟสของสัญญาณเปลี่ยนไป ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะถูกเรียกว่า ค่าน้ำหนัก (weight) จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักจะถูกรวมกันออกมาเป็นสัญญาณขาออก โดยที่สัญญาณขาออกจะถูกนำกลับเข้ามาประมวลผลในส่วนของการประมวลสัญญาณเพื่อคำนวณค่าน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อป้อนกลับไปควบคุมน้ำหนักที่สัญญาณในสายอากาศแต่ละต้น ซึ่งการป้อนกลับดังกล่าวจะกระทำในลักษณะอัตโนมัติและตลอดเวลา ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถติดตามสัญญาณเป้าหมายไม่ว่าจะเคลื่อนที่ไปทิศทางใดก็ตาม รวมถึงสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดอื่นได้ในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อนำเอาระบบสายอากาศฉลาดไปใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ไร้สายแบบเซลลูล่าร์จะทำให้สามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมได้กว้างขึ้น

เนื่องจากอัตราขยายของระบบสูงขึ้น ซึ่งยังส่งผลให้เราสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้อีกด้วย โดยทั่วไประบบสายอากาศฉลาดแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ สายอากาศแบบสลับลำคลื่น และสายอากาศแบบปรับลำคลื่น ซึ่งมีรายละเอียดรวมถึงจุดเด่นจุดด้อยดังต่อไปนี้

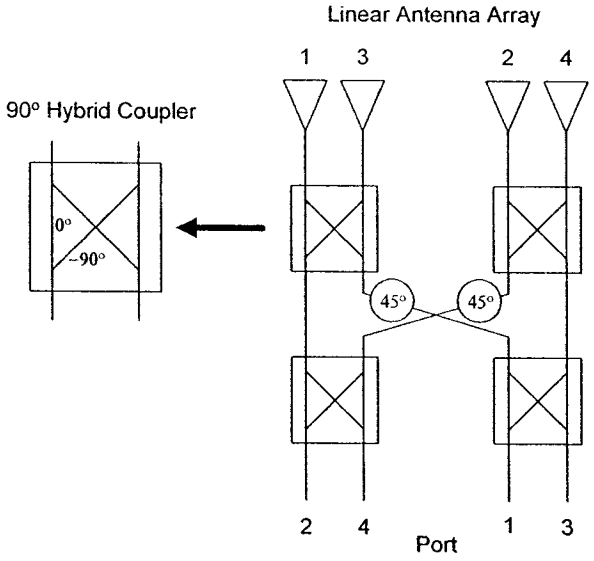
2.2.1 *สายอากาศแบบสลับลำคลื่น (Switched Beam Antennas)*

รูปที่ 2-2 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสลับลำคลื่นซึ่งประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับจำนวน N ต้น โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) และตัวเลือกลำคลื่น เมื่อพิจารณาให้ระบบเป็นภาครับ สัญญาณที่ตกกระทบกับสายอากาศแถวลำดับจะถูกส่งต่อไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ที่ได้กำหนดเอาไว้ก่อนล่วงหน้า หลังจากนั้นตัวเลือกลำคลื่นจะทำหน้าที่ในการเลือกลำคลื่นที่มีขนาดของสัญญาณแรงที่สุด ตามความเป็นจริงที่ว่าลำคลื่นที่ให้ขนาดของสัญญาณที่แรงที่สุดนั้น คือลำคลื่นที่ชี้ไปในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการหรือที่เราเรียกว่าสัญญาณเป้าหมาย และเป็นลำคลื่นที่มีผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดน้อยที่สุด

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-3 เป็นหัวใจหลักที่ทำให้ระบบสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางต่างๆ ได้ ซึ่งโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ Butler matrix [10-12] ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-3 ซึ่งประกอบด้วย ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° (90° hybrid coupler) 4 ตัว วงจรตัดข้าม (crossover) 2 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45° (45° phase shifter) 2 ตัว โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นชนิดนี้จะก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทาง 4 ทิศทางในเวลาเดียวซึ่งได้แก่ทิศ 138.6° 104.5° 75.5° และ 41.4°



รูปที่ 2-2 โครงสร้างของสายอากาศแบบสลับลำคลื่น

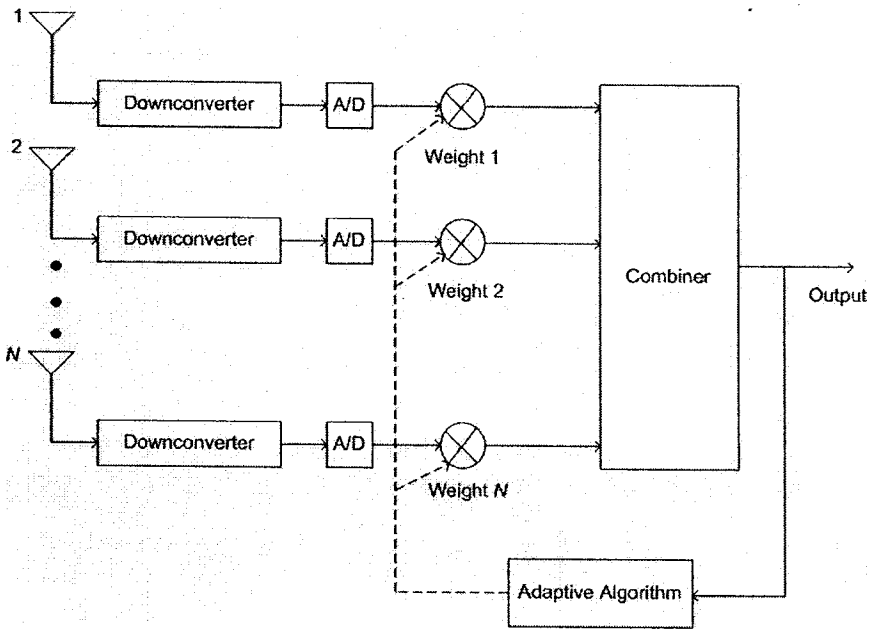


รูปที่ 2-3 โครงสร้างของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

ระบบสายอากาศฉลาดแบบสลับลำคลื่นนี้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำและมีความซับซ้อนน้อย แต่จะเห็นได้ว่าทิศทางของลำคลื่นหลักรวมถึงทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้นั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นสายอากาศแบบสลับลำคลื่นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในลักษณะที่มีการเคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการ เนื่องจากจะให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Siganl-to-Interference Ratio: SIR) ค่อนข้างต่ำ ในกรณีที่สัญญาณเป้าหมายไม่ได้อยู่ในทิศทางของลำลื่นหลัก หรือสัญญาณแทรกสอดไม่ได้อยู่ในทิศทางของจุดศูนย์

2.2.2 *สายอากาศแบบปรับลำคลื่น (Adaptive Antennas)*

สายอากาศแบบปรับลำคลื่นที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2-4 เป็นอีกประเภทหนึ่งของระบบสายอากาศฉลาด ระบบนี้จะมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนลำคลื่นหลักให้หันไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมายถึงแม้ว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณจะเคลื่อนที่ก็ตาม ในขณะเดียวกันระบบก็สามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอดที่ความถี่เดียวกันได้ การกระทำดังกล่าวกระทำผ่านการกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสายอากาศแต่ละต้นในสายอากาศแถวลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากอัลกอริทึมที่หลากหลายเช่น LMS (Least Mean Square) RLS (Recursive Least Squre) หรือ Bussgang Algorithm [10] ซึ่งต่างจากสายอากาศแบบสลับลำคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยการใช้อัลกอริทึมแต่อย่างใด จึงกล่าวได้ว่าสายอากาศแบบปรับลำคลื่นมีความซับซ้อนมากกว่าสายอากาศแบบสลับลำคลื่น แต่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงกว่าในกรณีที่แหล่งกำเนิดสัญญาณมีการเคลื่อนที่

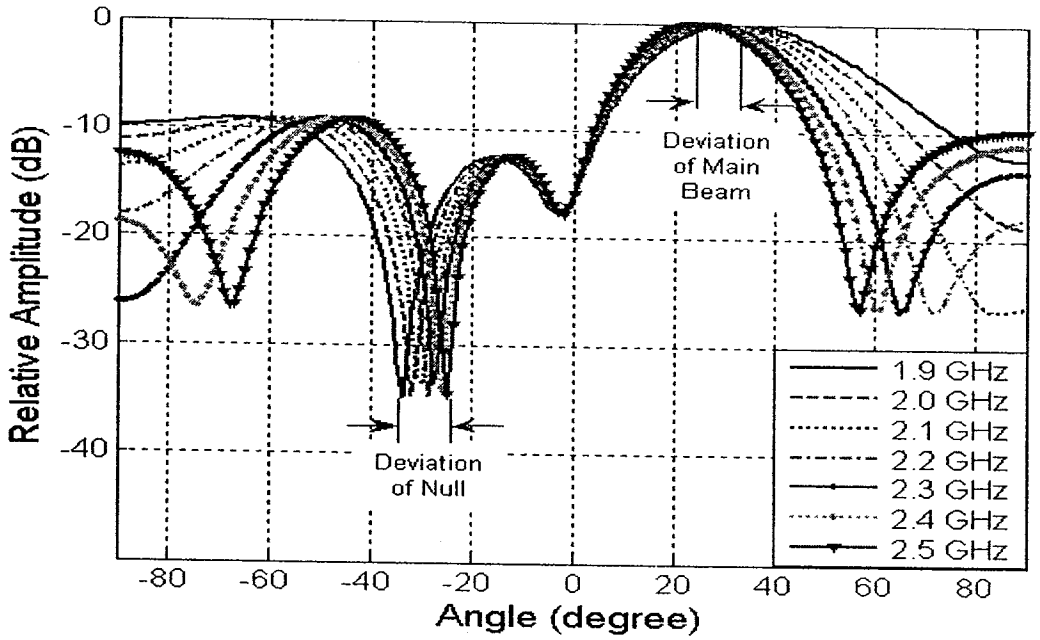


รูปที่ 2-4 โครงสร้างของสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

2.3 ข้อจำกัดของสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบ

ระบบสายอากาศฉลาดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 นั้นเป็นระบบที่ทำงานที่ความถี่เดียว หรือที่เรียกว่าสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบ (narrowband smart antennas) แต่เนื่องจากผู้ใช้งานระบบสื่อสารไร้สายในปัจจุบันต้องการการส่งภาพและเสียงที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น และต้องการอัตราการส่งและรับข้อมูลที่เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งหมายความว่าระบบจะต้องสามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง (wideband) ดังนั้นจึงมีนักวิจัยได้ให้ความสนใจในการนำเอาระบบสายอากาศฉลาดเข้ามาใช้งานร่วมกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้าง

รูปที่ 2-5 แสดงสมรรถนะที่ได้จากการจำลองแบบของระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานได้ดีในแถบความถี่แคบ (ที่ความถี่ 2.2 GHz) แต่นำมาใช้งานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้าง (ตั้งแต่ 1.9 ถึง 2.5 GHz) สมรรถนะดังกล่าวหมายถึงความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ (30°) และหันจุดศูนย์ไปในทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอด (-30°) ในการจำลองแบบในรูปที่ 2-5 นี้จะใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น 4×1 เมื่อสายอากาศแต่ละต้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางและวางห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.2 GHz จากรูปจะเห็นได้ว่า ความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นของระบบจะลดลงเมื่อสัญญาณมีแถบความถี่ที่กว้างขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากความคลาดเคลื่อนของทิศทางของลำคลื่นหลัก



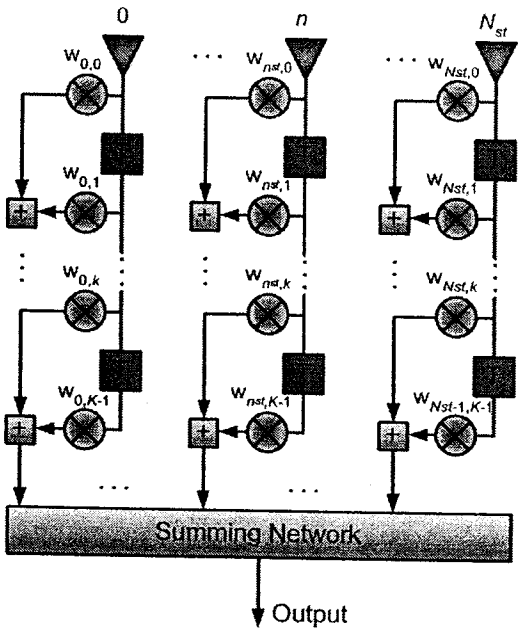
รูปที่ 2-5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ

ซึ่งควรจะคงที่อยู่ที่ตำแหน่ง 30° หรือแม้กระทั่งตำแหน่งจุดศูนย์ซึ่งควรจะคงที่อยู่ที่ตำแหน่ง -30° ตลอดทั้งแถบความถี่ที่ใช้งาน จากผลของการจำลองแบบในข้างต้นร่วมกับงานวิจัยที่ได้ถูกตีพิมพ์ไว้ในบทความ [4-5] ยืนยันได้ว่าเราไม่สามารถนำเอาระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบมาใช้งานร่วมกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้าง

ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยจำนวนไม่น้อยเทความสนใจไปที่การพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดให้สามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง ซึ่งจากการค้นหาข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบสายอากาศฉลาดที่สามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้างแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ ระบบที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่ง/เวลา เชิงตำแหน่ง/ความถี่ และเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งรายละเอียดของแต่ละประเภทจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปดังนี้

2.4 สายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและเวลา

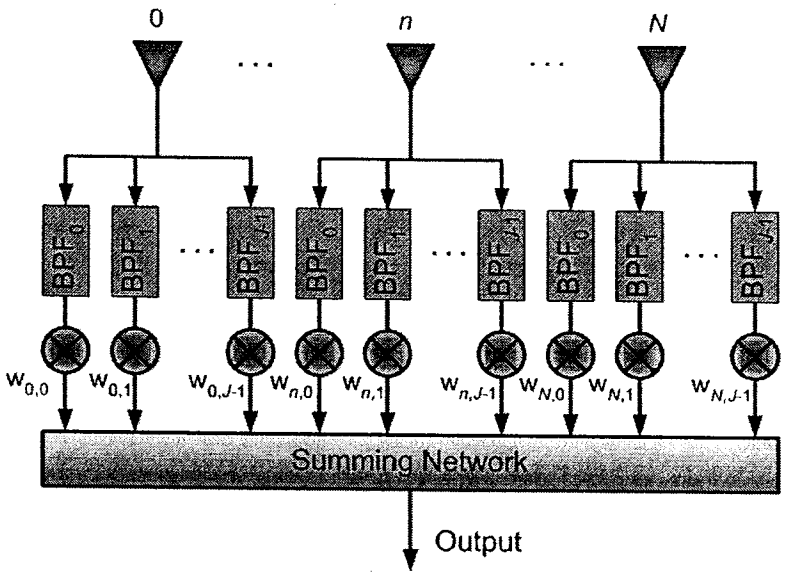
ระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและเวลา (spacce-time signal processing หรือ spatio-temporal signal processing) [13-15] แสดงไว้ในรูปที่ 2-6 ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยการประมวลผล 2 มิติได้แก่ การประมวลผลเชิงตำแหน่งและการประมวลเชิงเวลา การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งนั้นจะกระทำผ่านการใช้สายอากาศแถวลำดับดังนี้ เมื่อสัญญาณที่ตกกระทบเข้ากับสายอากาศแถวลำดับจะถูกคูณเข้ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) เพื่อปรับขนาดและเฟสให้เป็นค่าที่เหมาะสมเพื่อก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงถูกเรียกว่าการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่ง ขณะเดียวกันสัญญาณก็จะถูกประมวลผลในเชิงเวลาด้วยเช่นกันซึ่งกระทำผ่านสายถ่วงเวลาต่อแยก (Tapped-Delay Line: TDL) ที่ถูกต่อไว้ที่สายอากาศแต่ละต้นโดยมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อสัญญาณที่เราใช้งานมีความถี่ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีค่าเฟสของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการก่อรูปลำคลื่นลดลง ดังนั้นเราจึงต้องใช้สายถ่วงเวลาต่อแยกเพื่อทำหน้าที่ปรับการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันให้มีเฟสที่เท่ากัน ซึ่งการกระทำดังกล่าวคือการประมวลผลสัญญาณในเชิงเวลา และจากงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในบทความที่ [16-18] แสดงให้เห็นว่า จำนวนสายถ่วงเวลาต่อแยกจะเพิ่มขึ้นตามความกว้างของแถบความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นนอกจากระบบสายอากาศฉลาดประเภทนี้จะมีความซับซ้อนแล้ว ยังมีข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ในแถบความถี่ที่กว้างไม่ได้มากนัก



รูปที่ 2-6 โครงสร้างสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและเวลา

2.5 สายอากาศฉลาดที่ประมวลผลเชิงตำแหน่งและความถี่

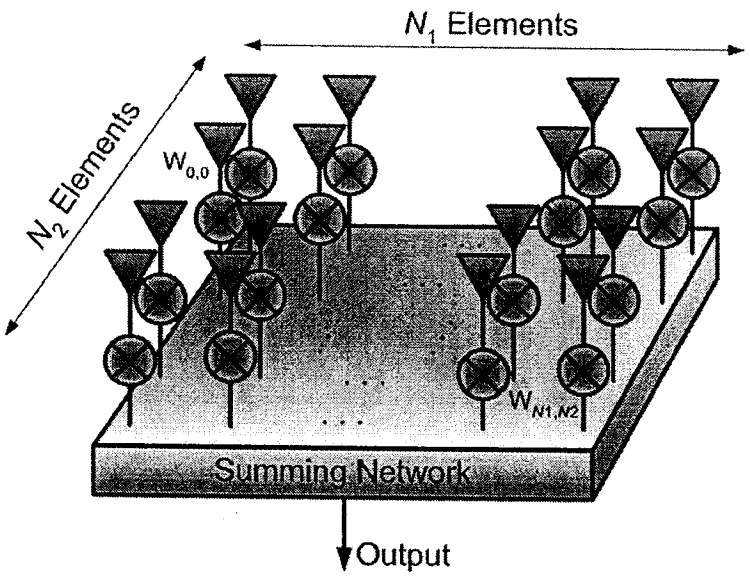
จากข้อจำกัดที่ได้กล่าวไว้ในส่วนท้ายของหัวข้อที่ 2.4 เป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดที่สามารถทำงานในแถบความถี่กว้าง โดยเปลี่ยนการประมวลผลเชิงเวลามาเป็นการประมวลผลเชิงความถี่แทน ซึ่งถูกเรียกว่า ระบบสายอากาศฉลาดที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งและความถี่ (space-frequency signal processing) [19-20] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-7 การประมวลผลสัญญาณในเชิงตำแหน่งนั้นกระทำผ่านการใช้งานสายอากาศแถวลำดับเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ส่วนการประมวลผลสัญญาณเชิงความถี่นั้นกระทำได้โดยการใช้ตัวกรองผ่านแถบ (band-pass filter) กล่าวคือ สัญญาณ (ที่มีแถบความถี่กว้าง) ที่ส่งผ่านมาจากสายอากาศแต่ละต้นจะถูกแบ่งออกเป็นแถบความถี่ย่อยๆ (sub-band) ด้วยตัวกรองผ่านแถบ ซึ่งสัญญาณที่ผ่านตัวกรองผ่านแถบมานั้นจะกลายเป็นสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ ดังนั้นการให้น้ำหนักจึงสามารถใช้อัลกอริทึมอย่างง่ายที่ทำงานในแถบความถี่แคบได้ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองผ่านแถบก็ยังเป็นข้อจำกัดของระบบนี้ เนื่องจากจำนวนตัวกรองผ่านแถบจะเพิ่มขึ้นตามความกว้างแถบของสัญญาณ และตัวกรองผ่านแถบจะต้องมีผลตอบสนองที่ดีเพียงพอ มิเช่นนั้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับของสัญญาณในแต่ละแถบย่อยได้



รูปที่ 2-7 โครงสร้างสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งและความถี่

2.6 สายอากาศฉลาดที่ประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

จากข้อจำกัดของระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 และ 2.5 ดังนั้น ในไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้จึงได้มีนักวิจัยที่สนใจจะพัฒนาการประมวลผลสัญญาณเพื่อให้ระบบสายอากาศฉลาดสามารถทำงานในแถบความกว้างได้โดยปราศจากความสิ้นเปลืองและซับซ้อนของระบบ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะเป็นการประมวลผลสัญญาณเพียงมิติเดียวเท่านั้นคือ การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว (fully spatial signal processing) [21-22] ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-8 จากรูป สายอากาศที่ใช้ในระบบจะเป็นสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ (planar array antennas) ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสายอากาศฉลาดระบบนี้มีโครงสร้างที่เหมือนกับระบบสายอากาศฉลาดทั่วๆ ไปที่ทำงานในแถบความถี่แคบนั้นเอง ซึ่งเป็นระบบที่ไม่จำเป็นจะต้องใช้สายถ่วงเวลาต่อแยก หรือตัวกรองผ่านแถบแต่อย่างใด ส่งผลให้ได้ระบบที่ไม่ซับซ้อนและยังเป็นระบบที่ใช้ต้นทุนต่ำในการผลิตอีกด้วย อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมในการหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อที่จะก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ให้คงที่ตลอดทั้งแถบความถี่กว้างนั้น ถือได้ว่าเป็นหัวข้อที่ยังมีความท้าทายและเปิดโอกาสให้เกิดการวิจัยและพัฒนาต่อไปได้อีกในอนาคต เนื่องจากระบบสายอากาศฉลาดระบบนี้เป็นระบบที่มีจุดเด่นและน่าสนใจกว่าระบบอื่น รายละเอียดของอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่าน้ำหนักจะขอแยกไปกล่าวถึงในบทถัดไป



รูปที่ 2-8 โครงสร้างสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

2.7 กล่าวท้ายบท

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบสายอากาศฉลาด ซึ่งระบบโดยทั่วๆ ไปได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่แคบ หรือได้เพียงความถี่เดียวเท่านั้น แต่เมื่อมีความต้องการของผู้ใช้บริการการสื่อสารไร้สายที่เพิ่มมากขึ้น และยังต้องการการส่งข้อมูลที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น ดังนั้นระบบสายอากาศฉลาดจึงได้ถูกคาดหวังให้สามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอาระบบสายอากาศฉลาดแบบเดิมที่ทำงานในแถบความถี่แคบมาทำงานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างขึ้น ระบบจะสูญเสียความสามารถในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของการส่งข้อมูลลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยพัฒนาเพื่อให้ระบบสายอากาศฉลาดสามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้างโดยแบ่งการวิจัยพัฒนาดังกล่าวออกเป็น 3 แนวทางได้แก่ ระบบที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งและเวลา เชิงตำแหน่งและความถี่ และเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งใน 3 แนวคิดนี้ระบบที่มีการใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวจัดได้ว่าเป็นระบบที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน สร้างง่ายและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

บทที่ 3

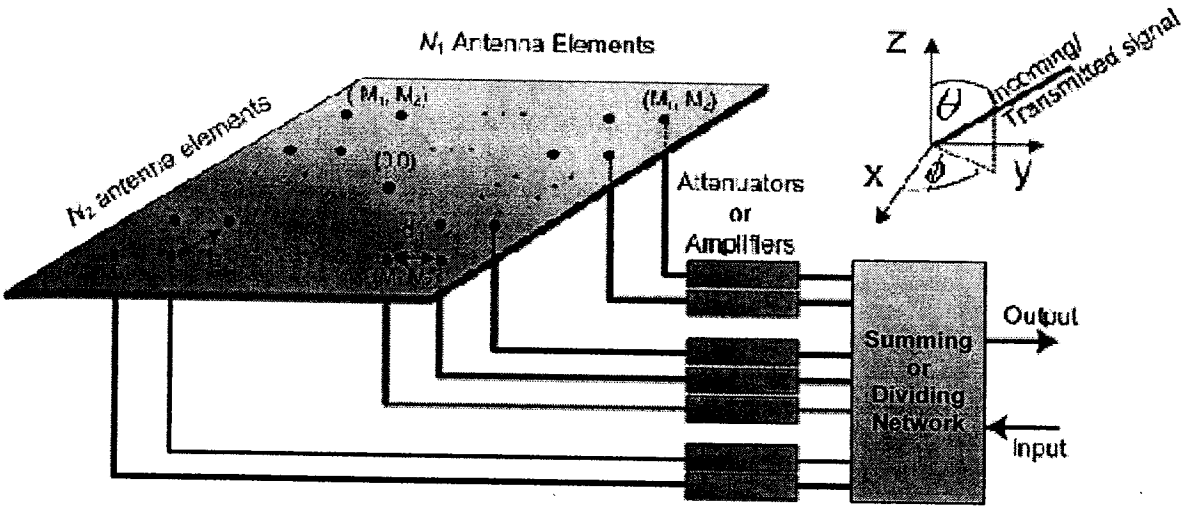
ระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

3.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ในส่วนแรกจะกล่าวถึงอัลกอริทึมในการหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสม ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวไม่เพียงแต่จะทำให้ระบบสามารถใช้งานได้ดีในแถบความถี่กว้างแล้ว ยังทำให้ระบบสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่เป็นค่าจริง (real number) ได้ไม่ใช่ค่าเชิงซ้อนเหมือนกับในระบบสายอากาศฉลาดทั่วๆ ไป ส่งผลให้เราสามารถใช้ตัวลดทอนหรือตัวขยายสัญญาณมาทำเป็นตัวถ่วงน้ำหนัก ซึ่งจุดนี้จะทำให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลง และส่งผลให้เราสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ จากนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดของตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นในทิศทางต่างๆ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบจริงเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของตัวต้นแบบ

3.2 อัลกอริทึมในการก่อรูปลำคลื่น

โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่น (beamformer) ที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวแสดงไว้ในรูปที่ 3-1 ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบที่มีจำนวนสายอากาศเท่ากับ $N_1 \times N_2$ ต้น จากนั้นจะต่อด้วยตัวลดทอนสัญญาณ(attenuator) หรือตัวขยายสัญญาณ (amplifier) เพื่อถ่วงน้ำหนัก และส่งต่อไปยังโครงข่ายรวมสัญญาณ (combinining network) ซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักมาแล้วออกไปเป็นสัญญาณขาออก (output) ที่ปลายทาง ซึ่งการลำดับอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นการพิจารณาให้ระบบเป็นภาครับ ในทำนองเดียวกันถ้าหากพิจารณาให้ระบบเป็นภาคส่ง สัญญาณก็จะถูกแบ่งออกในโครงข่ายแบ่งกำลัง (dividing network) และส่งต่อไปยังตัวลดทอน หรือตัวขยายเพื่อปรับน้ำหนัก จากนั้นจะส่งผ่านไปยังสายอากาศเพื่อส่งออกอากาศต่อไป ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีลักษณะเหมือนโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนเหมือนกับโครงสร้างของระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบ จากรูปที่ 3-1 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของสายอากาศแต่ละต้นถูกกำหนดด้วยดัชนี (m_1, m_2) เมื่อ $-M_1 \le m_1 \le M_1$ และ $-M_2 \le m_2 \le M_2$ ซึ่งความสัมพันธ์ของ N และ M เป็นดังนี้ $M_i = (N_i - 1)/2$



รูปที่ 3-1 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยอาศัยการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

เมื่อกำหนดให้สัญญาณที่มาตกกระทบกับสายอากาศ (หรือส่งออกจากสายอากาศในขณะที่พิจารณาให้เป็นภาคส่ง) จากทิศทาง 90° ในแนวดิ่ง (elevation angle) เฟสของสัญญาณในสายอากาศต้นที่ (m_1,m_2) มีค่าดังนี้

$$\psi(m_1,m_2)=\left(\frac{2\pi f}{c}\right)(d_1 m_1 \sin\phi + d_2 m_2 \cos\phi)\sin\theta \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ ϕ คือทิศทางการถึงสายอากาศของสัญญาณ (Direction Of Arrival: DOA) ในแนวระนาบ (azimuth plane) f คือความถี่ของสัญญาณ และ c คือความเร็วของสัญญาณที่เดินทางในอวกาศว่าง (free space) ดังนั้นผลตอบสนองทางความถี่และมุมของสายอากาศแถวลำดับที่แสดงในรูปที่ 3-1 จะเป็นดังนี้

$$H(f,\phi)=G(f,\phi)\sum_{m_1=-M_1}^{M_1}\sum_{m_2=-M_2}^{M_2} w_{m_1,m_2}\, e^{j\left(\frac{2\pi f}{c}\right)(d_1 m_1 \sin\phi + d_2 m_2 \cos\phi)} \qquad (3\text{-}2)$$

เมื่อ w_{m_1,m_2} คือค่าน้ำหนักที่ให้กับสายอากาศแต่ละต้น และ $G(f,\phi)$ คือค่าอัตราขยายของสายอากาศแต่ละต้นซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่และมุม ซึ่งค่า $G(f,\phi)$ นี้เราสามารถหาได้ด้วยการจำลองแบบ หรือวัด

ทดสอบจริงกับตัวสายอากาศโดยตรง โดยการทดสอบนั้นจะกระทำด้วยการวัดอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ และมุมที่สนใจ

เพื่อที่จะทำให้ (3-2) อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ตัวแปรช่วย u_1 และ u_2 ถูกกำหนดมาให้มีค่าดังนี้

$$u_1 = \frac{fd_1}{c}\sin\phi \tag{3-3}$$

และ

$$u_2 = \frac{fd_2}{c}\cos\phi \tag{3-4}$$

สมการ (3-3) กับ (3-4) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{d_1}{d_2}\tan\phi \tag{3-5}$$

จากการแทนค่ากลับเข้าไปในสมการ (3-2) จะได้

$$H(u_1,u_2) = G(u_1,u_2)\sum_{m_1=-M_1}^{M_1}\sum_{m_2=-M_2}^{M_2} w_{m_1,m_2}\, e^{j2\pi u_1 m_1} e^{j2\pi u_2 m_2} \tag{3-6}$$

เมื่อ $G(u_1,u_2)$ สามารถหาได้จากค่า $G(f,\phi)$ บนระนาบ u_1 และ u_2 ที่แสดงไว้ในสมการ (3-3) และ (3-4) ตามลำดับ ซึ่งช่วงของค่า u_1 และ u_2 มีค่าเท่ากับ [-0.5, 0.5]

จากการพิจารณาสมการ (3-6) จะเห็นว่ามีรูปแบบสมการเหมือนกับ 2-D Discrete Fourier Transform (DFT) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ w_{m_1,m_2} (ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก) จะสามารถหาได้จากการทำ Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) กับค่า $H(u_1,u_2)/G(u_1,u_2)$ นั้นเอง

ค่า $H(u_1,u_2)$ ถือได้ว่าเป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการหาค่าน้ำหนัก w_{m_1,m_2} ซึ่งในที่นี้เราจะเรียกค่า $H(u_1,u_2)$ นี้ว่าเป็น ฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) ฟังก์ชันดังกล่าวนี้เป็นตัวแทนของแบบรูปการแผ่พลังงานเป้าหมาย (desired radiation pattern) ที่เราคาดหวังไว้ กล่าวคือมีทิศทางของพูหลักชี้ไปในทิศทางของสัญญาณเป้าหมายตลอดช่วงแถบความถี่กว้างที่เราต้องการ โดยแบบรูปการแผ่พลังงานนี้เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานที่สร้างขึ้นบนระนาบ u_1-u_2 และจุดนี้เองทำให้ระบบมีคุณสมบัติไม่ขึ้นกับความถี่ (frequency

invariant property) จึงสามารถใช้ได้กับทั้งกับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบและกว้างตามต้องการของผู้ออกแบบ ซึ่งรายละเอียดการสร้างฟังก์ชันเป้าหมายมีดังต่อไปนี้

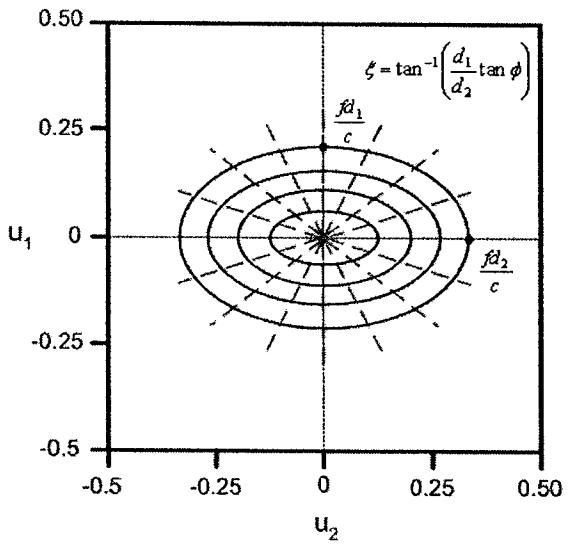
จากความสัมพันธ์ของ u_1 และ u_2 ที่แสดงไว้ในสมการ (3-3) และ (3-4) เราสามารถสร้างวงรอบของความสัมพันธ์ดังกล่าวที่มุมใดๆ และความถี่ใดๆ ด้วยสมการ

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{d_1}{d_2}\tan\phi = \tan\xi \tag{3-7}$$

เมื่อ ξ คือมุมเชิงขั้ว (polar angle) บนระนาบ u_1-u_2 และจากการแก้สมการ (3-3) และ (3-4) โดยการกำจัด ϕ ออกไปจะพบว่า

$$\left(\frac{u_1}{fd_1/c}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{fd_2/c}\right)^2 = 1 \tag{3-8}$$

สมการ (3-8) แสดงถึงสมการวงรีที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $u_1 = u_2 = 0$ ในกรณีที่ค่า $d_1 = d_2 = d$ และจะแสดงถึงสมการวงกลม $u_1^2 + u_2^2 = (fd/c)^2$ เมื่อมีรัศมีเท่ากับ fd/c รูปที่ 3-2 แสดงถึงการพลอตวงรอบที่ได้กล่าวมานี้ โดยการพลอตในครั้งนี้เป็นประโยชน์ในการกำหนดค่ามุมและช่วงความถี่ในการก่อรูปลำคลื่น



รูปที่ 3-2 วงรอบของสมการ (3-8)

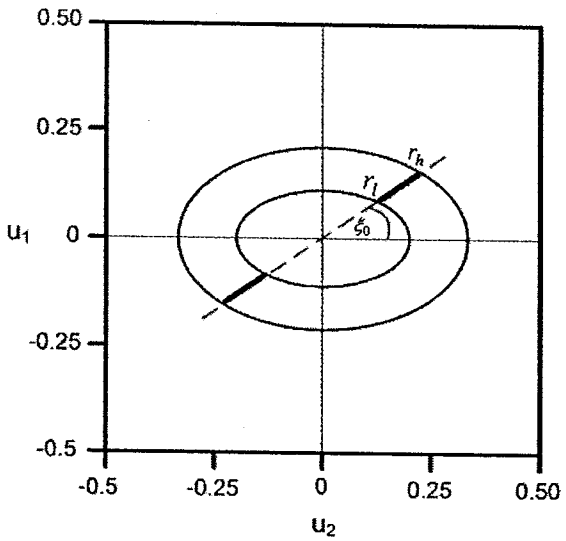
เราจะใช้ภาพที่พลอตในรูปที่ 3-2 อธิบายลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งมีตัวอย่างเพื่ออธิบายลักษณะดังกล่าวในรูปที่ 3-3 โดยจะแสดงถึงค่าบนระนาบ u_1-u_2 ที่อธิบายทิศทางที่เราต้องการให้ลำคลื่นหลักชี้ไป (ϕ_0) ในช่วงความถี่ที่กำหนด ($f_l < f < f_h$) ซึ่งช่วงของการกำหนดค่าจะถูกจำกัดไว้ที่ $\xi = \tan^{-1}[(d_1/d_2)\tan\phi_0]$ และ $r_l < |r| < r_h$ เมื่อ

$$r_l = \frac{f_l}{c}\bar{d} \tag{3-9}$$

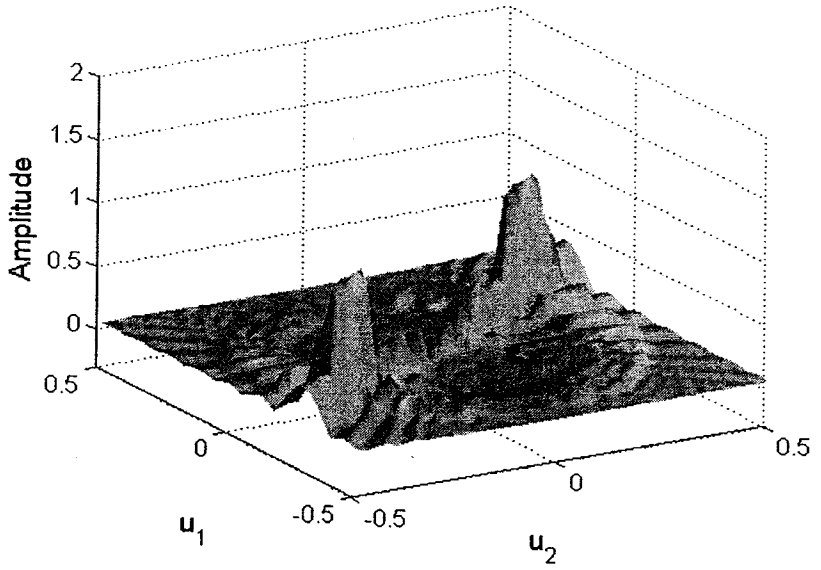
$$r_h = \frac{f_h}{c}\bar{d} \tag{3-10}$$

$$\bar{d} = \sqrt{d_1^2 \sin^2\phi_0 + d_2^2 \cos^2\phi_0} \tag{3-11}$$

หลังจากการกำหนดขอบเขตที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างฟังก์ชันเป้าหมาย $H(u_1,u_2)$ ในที่นี้จะใช้ฟังก์ชัน Sinc เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าอัตราขยายสูงสุดในทิศทางเป้าหมาย (DOA = ϕ_0) ซึ่งเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 3-3 การกำหนดค่าทิศทางของลำคลื่นหลักและช่วงความถี่เป้าหมายให้กับฟังก์ชันเป้าหมาย



รูปที่ 3-4 ฟังก์ชันเป้าหมายของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้สายอากาศแถวลำดับจำนวน 41×41 ต้นในช่วงความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายของลำคลื่นหลักคือ 10°

$$H(u_1,u_2)=\frac{\sin\left[\alpha\pi\left(\frac{u_1}{u_2}-\tan\phi_0\right)\right]}{\alpha\pi\left(\frac{u_1}{u_2}-\tan\phi_0\right)}\times\begin{cases}1 & \textit{desired region}\\ 1/\sqrt{10} & \textit{otherwise}\end{cases} \qquad (3\text{-}12)$$

สมการ (3-12) ถูกกำหนดขึ้นมาเฉพาะในช่วง $r_l<|r|<r_h$ และ $\xi=\tan^{-1}(d_1/d_2\tan\phi_0)$ เท่านั้น ค่า $\sqrt{10}$ ที่เห็นในสมการนั้นแสดงถึงการลดทอนของสัญญาณที่มีแถบความถี่นอกเหนือจากแถบเป้าหมาย รูปที่ 3-4 แสดงตัวอย่างของฟังก์ชันเป้าหมายของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้สายอากาศแถวลำดับจำนวน 41×41 ต้นในช่วงความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายของลำคลื่นหลักคือ 10°

หัวข้อต่อไปจะแสดงสมรรถนะของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสมรรถนะที่สนใจในที่นี้คือ ความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางเป้าหมาย โดยแสดงอยู่ในรูปแบบรูปการแผ่พลังงาน

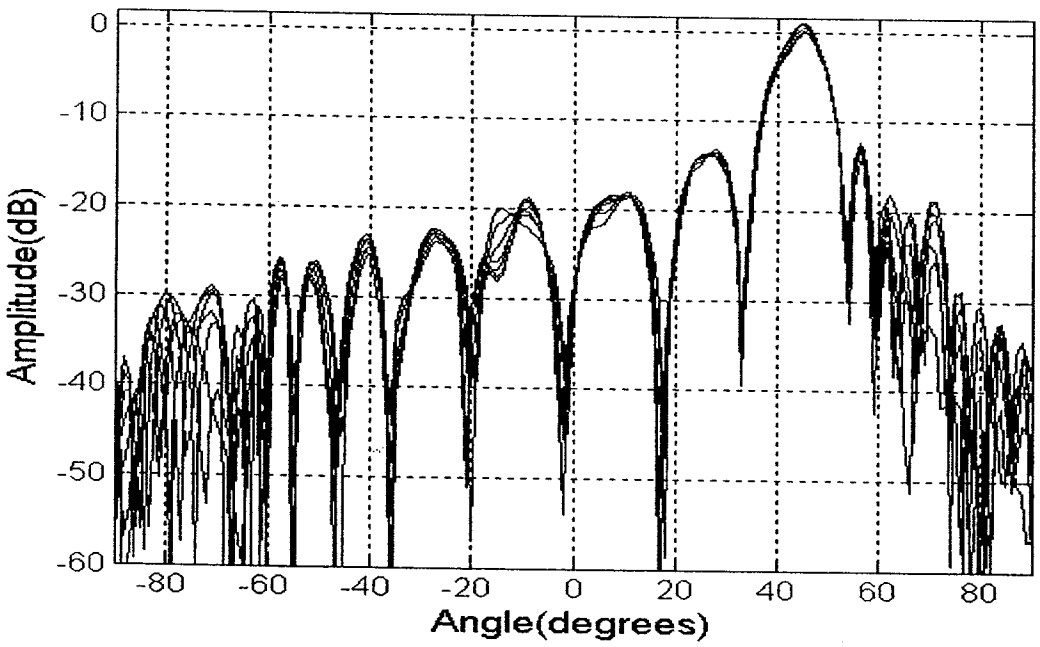
3.3 สมรรถนะในการก่อรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบ

จากทฤษฎีพื้นฐานของตัวก่อรูปลำคลื่นหรือสายอากาศฉลาดที่มีการใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงสมรรถนะของตัวก่อรูปลำคลื่นดังกล่าว ซึ่งสมรรถนะที่สนใจคือ ความสามารถในการก่อรูปคลื่นโดยกำหนดให้มีทิศทางของลำคลื่นหลักชี้ไปยังทิศทางเป้าหมายในช่วงความถี่ที่มีแถบกว้างที่กำหนดไว้ ในการพิจารณาสมรรถนะในครั้งนี้จะแบ่งออกเป็นสองกรณีได้แก่ กรณีที่ใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดใหญ่ และกรณีที่ใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

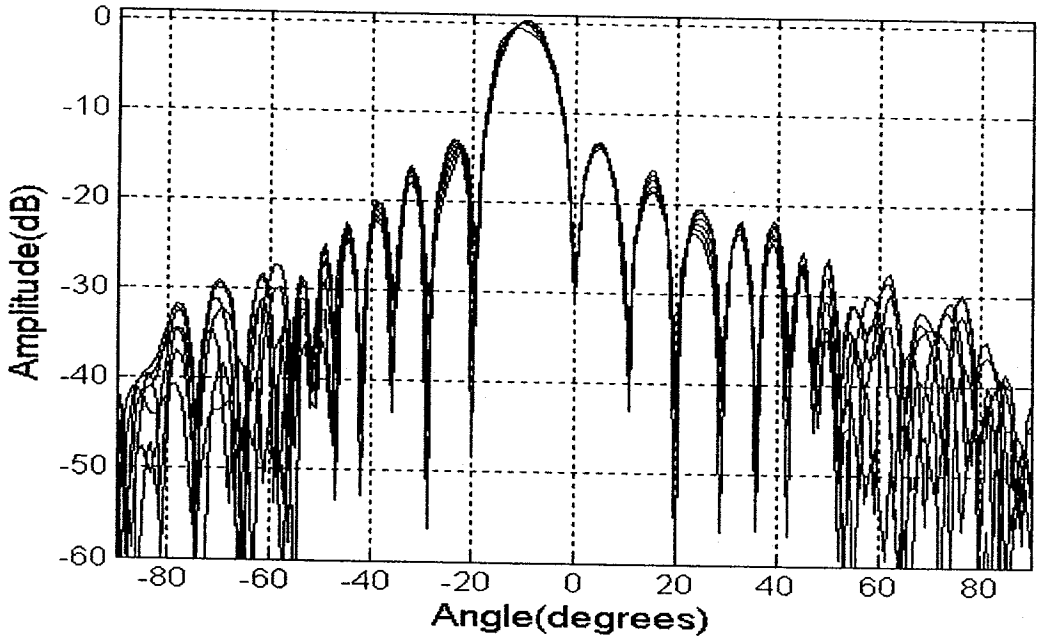
3.3.1 *สายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่*

ในการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในหัวข้อนี้ได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- สายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (squre planar monopole antenna) ขนาด 40×40 mm^2 [23-24]
- สายอากาศแถวลำดับแต่ละต้นวางห่างกันเท่ากับ 50 mm
- จำนวนสายอากาศที่นำมาวางเรียงกันเป็นสายอากาศแถวลำดับเท่ากับ 41×41 ต้น



รูปที่ 3-5 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 41×41 ที่ทำงานในแถบความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ 45°



รูปที่ 3-6 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 41×41 ที่ทำงานในแถบความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ -10°

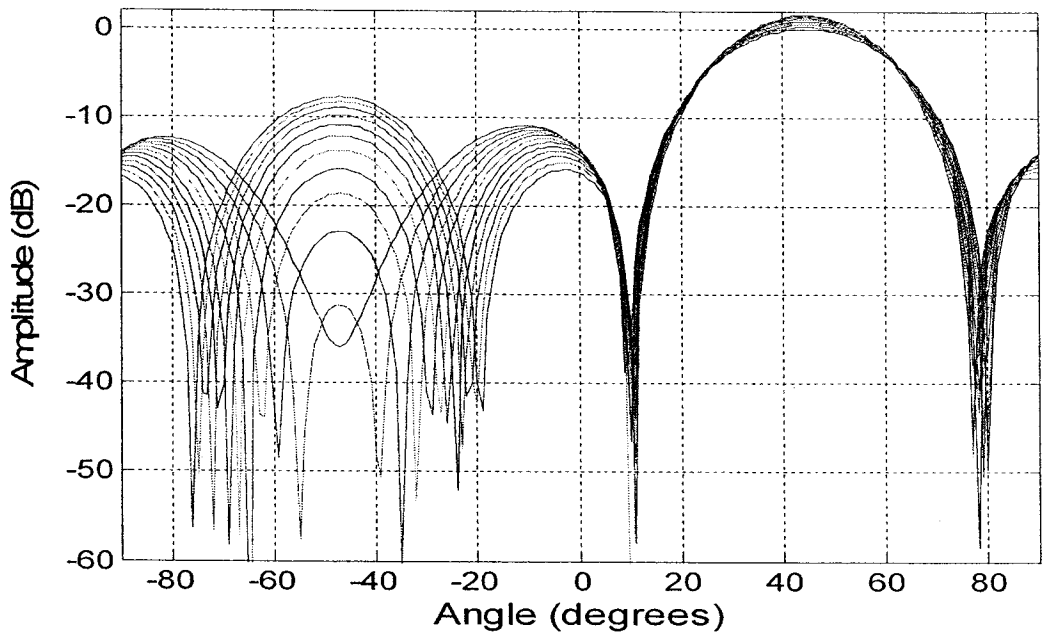
- แถบความถี่เป้าหมายอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 2.5 GHz
- จำนวนจุดข้อมูลบนระนาบ u_1-u_2 เท่ากับ $N_{u_1} = 41$ และ $N_{u_2} = 41$
- ทิศทางเป้าหมายแบ่งออกเป็นสองกรณีได้แก่ 45° และ -10°

จากรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6 จะเห็นว่าตัวก่อรูปลำคลื่นมีสมรรถนะในการก่อรูปลำคลื่นที่ดี ซึ่งสังเกตได้จากการที่สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ (45° และ -10° ตามลำดับ) ตลอดทั้งแถบความถี่กว้างที่กำหนดไว้ (1.9 ถึง 2.5 GHz) และยังสังเกตได้อีกว่าลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานค่อนข้างคงตัวสำหรับพูหลักและพูรองที่อยู่ภาย ±60° ตลอดทั้งแถบความถี่เป้าหมาย ซึ่งจะทำให้ระดับของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งแถบความถี่กว้างนั้นเอง

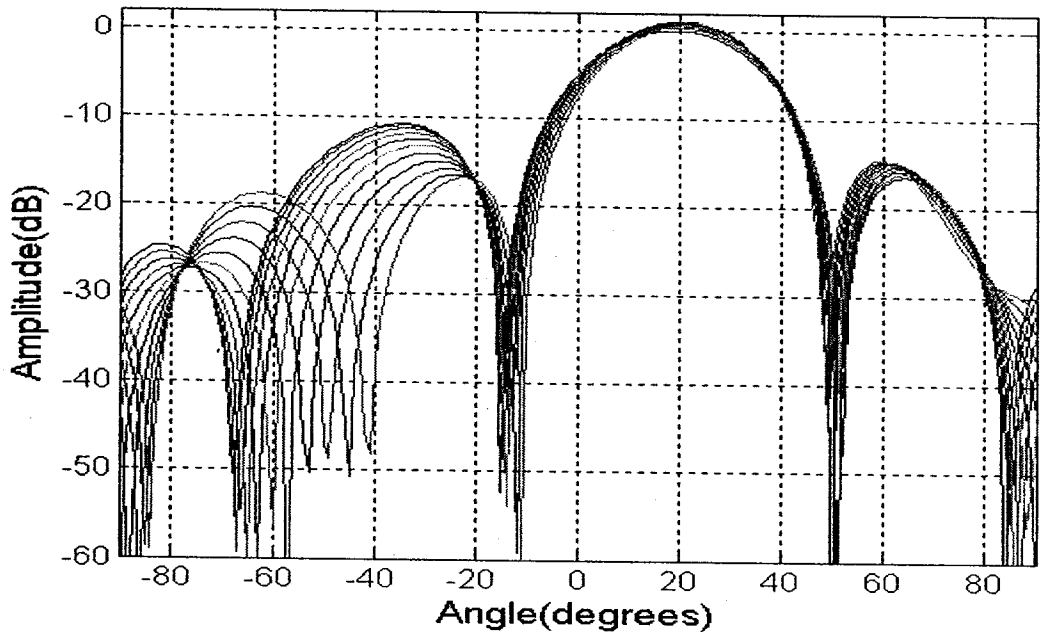
3.3.2 *สายอากาศแถวลำดับขนาดเล็ก*

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นได้ว่า เราต้องใช้สายอากาศถึง 41×41 ต้น (1681 ต้น) ในการก่อรูปลำคลื่นให้มีลักษณะคงตัวตลอดแถบความถี่กว้าง ซึ่งไม่เหมาะสมกับการสร้างและนำไปใช้งานจริง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ศึกษาสมรรถนะของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เมื่อใช้สายอากาศแถวลำดับเพียงไม่กี่ต้น โดยที่การจำลองแบบในหัวข้อนี้มีการกำหนดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- สายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (squre planar monopole antenna) ขนาด 40×40 mm^2 [23-24]
- สายอากาศแถวลำดับแต่ละต้นวางห่างกันเท่ากับ 50 mm
- จำนวนสายอากาศที่นำมาวางเรียงกันเป็นสายอากาศแถวลำดับจำนวน 4×4 ต้น
- แถบความถี่เป้าหมายอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 2.5 GHz
- จำนวนจุดข้อมูลบนระนาบ u1-u2 เท่ากับ $N_{u_1} = 41$ และ $N_{u_2} = 41$
- ทิศทางเป้าหมายแบ่งออกเป็นสองกรณีได้แก่ -40° และ 20°



รูปที่ 3-7 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 4×4 ที่ทำงานในแถบความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ 45°



รูปที่ 3-8 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 4×4 ที่ทำงานในแถบความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz เมื่อทิศทางเป้าหมายคือ 20°

รูปที่ 3-7 และ รูปที่ 3-8 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เมื่อกำหนดให้แถบความถี่เป้าหมายมีค่าความถี่ตั้งแต่ 1.9 ถึง 2.5 GHz และสายอากาศที่ใช้มีจำนวนเท่ากับ 4×4 ต้น (16 ต้น) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถึงแม้จะใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดเล็ก (จำนวนสายอากาศน้อย) ระบบก็ยังมีสมรรถนะในการก่อรูปลำคลื่นที่ดี ซึ่งจะสังเกตได้จากการที่สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางเป้าหมายได้ดีตลอดทั้งแถบความถี่กว้างที่กำหนด อย่างไรก็ตามผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ลำคลื่นหลักจะมีความกว้างลำคลื่นที่กว้างและยังมีระดับของพูรองที่สูง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้จำนวนสายอากาศที่น้อยนั้นเอง

3.4 กล่าวท้ายบท

ในช่วงเริ่มต้นของบทที่ 3 จะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐาน รวมถึงอัลกอริทึมในการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง ซึ่งการประมวลผลสัญญาณที่ได้กล่าวถึงเป็นการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ได้ออกมาจะเป็นค่าจริง (ไม่ใช่ค่าเชิงซ้อนเหมือนกับที่ใช้ในสายอากาศฉลาดทั่วไป) ส่งผลให้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นไม่มีความซับซ้อนแต่อย่างใด การทดสอบสมรรถนะของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ได้กล่าวถึงได้กระทำผ่านการจำลองแบบ

ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้ยืนยันว่า ตัวก่อรูปลำคลื่นมีประสิทธิภาพในการก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางเป้าหมายตลอดแถบความถี่กว้างที่ต้องการ ไม่ว่าจะใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดใหญ่ (จำนวนสายอากาศมาก) หรือจะใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดเล็ก (จำนวนสายอากาศน้อย) อย่างไรก็ตาม สมรรถนะที่ได้เป็นแค่เพียงการยืนยันความเป็นไปได้ทางทฤษฎีเท่านั้น ซึ่งผลการทดสอบจริงของตัวก่อรูปลำคลื่นจะถูกกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 4

ตัวต้นแบบของสายอากาศฉลาดที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยใช้การประมวลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

4.1 กล่าวนำ

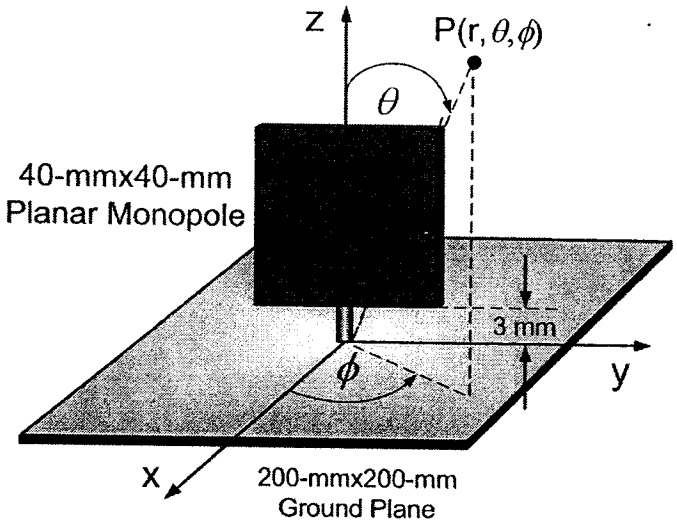
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสร้างตัวต้นแบบของระบบก่อรูปลำคลื่นที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งการสร้างจะแบ่งออกเป็นสองกรณีได้แก่ ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 4×4 ซึ่งสมรรถนะสำหรับตัวต้นแบบในกรณีจะเน้นไปที่ความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางที่กำหนด และตัวต้นแบบอีกตัวหนึ่งจะเป็นแบบ 2×2 ซึ่งเน้นสมรรถนะไปที่ความสามารถในการหาทิศทางของวัตถุเป้าหมาย หลังจากการกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละส่วนของตัวต้นแบบ ผลการทดสอบตัวต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจะถูกแสดงไว้ในส่วนถัดไป

4.2 ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 4×4

สำหรับรายละเอียดของการสร้างตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 4×4 จะเริ่มด้วยการสร้างตัวสายอากาศตามด้วยโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น โดยในแต่ละส่วนจะมีการแสดงผลการทดสอบจริงเพื่อยืนยันสมรรถนะขององค์ประกอบในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

4.2.1 *สายอากาศต้นเดียว*

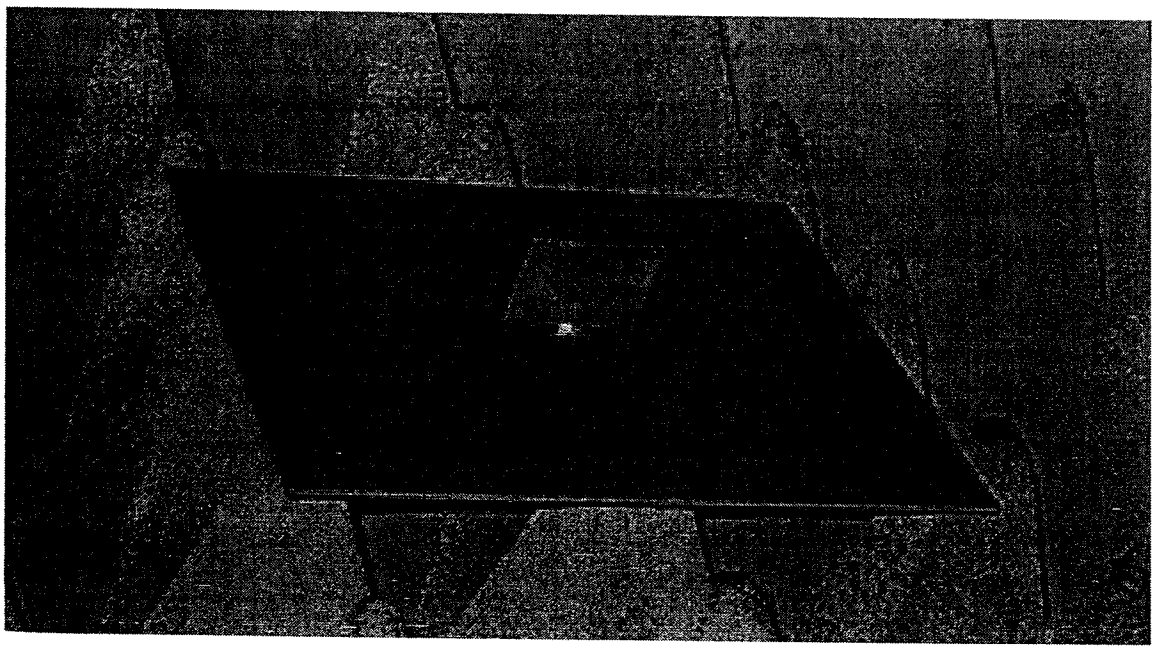
ในที่นี้สายอากาศที่ใช้จะเลือกเป็นชนิดโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-1 เนื่องจากเป็นสายอากาศที่สามารถทำงานในแถบความถี่กว้าง และด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงทำให้การสร้างสายอากาศชนิดนี้เป็นไปโดยง่ายและมีต้นทุนต่ำ ซึ่งอีกเหตุผลหนึ่งที่สำคัญในการเลือกสายอากาศชนิดนี้ก็คือ ความกว้างของสายอากาศที่สั้นกว่าครึ่งความยาวคลื่น จึงสามารถนำมาใช้เป็นสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ที่จำเป็นต้องมีระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ความถี่สูงสุดของแถบความถี่ที่เลือกใช้งาน จากรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้มีขนาดเท่ากับ 40×40 mm^2 และแผ่นโลหะของสายอากาศวางอยู่เหนือแผ่นโลหะที่



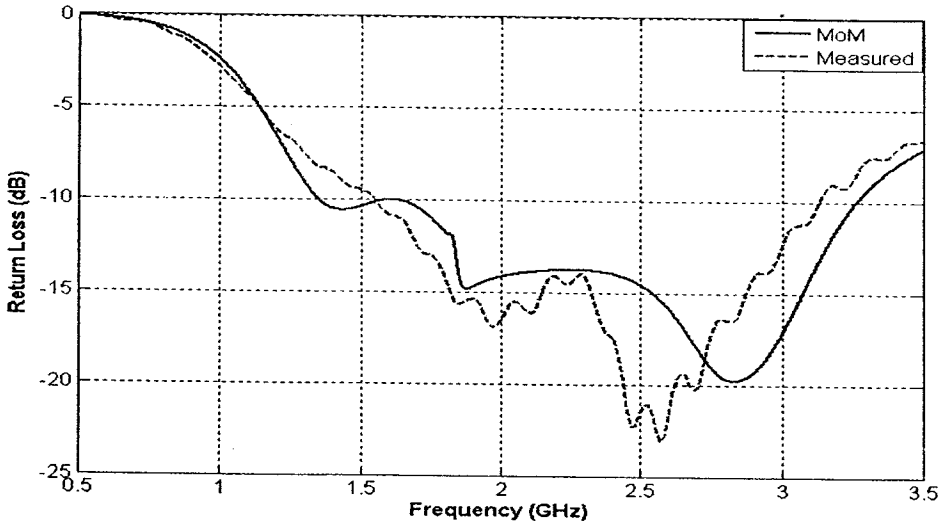
รูปที่ 4-1 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ทำหน้าที่เป็นกราว์ของสายอากาศเป็นระยะ 3 mm โดยที่แผ่นโลหะที่เป็นกราว์นมีขนาดเท่ากับ 200×200 mm^2

รูปที่ 4-2 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ขนาด 40×40 mm^2) นี้ทำด้วยทองเหลืองที่มีความหนาเท่ากับ 1.5 mm ส่วนแผ่นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นกราว์น (ขนาด 200×200 mm^2) ทำด้วยอะลูมิเนียมหนา 3.12 mm



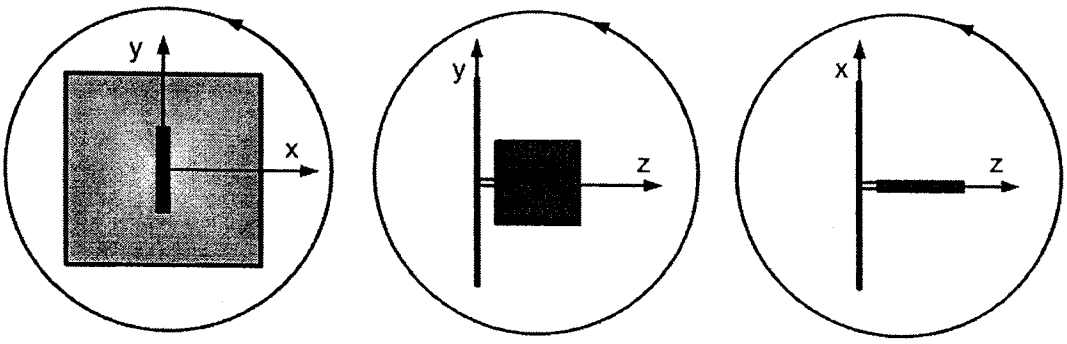
รูปที่ 4-2 ภาพถ่ายของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4-3 ผลการทดสอบเทียบกับผลจากการจำลองแบบของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-2

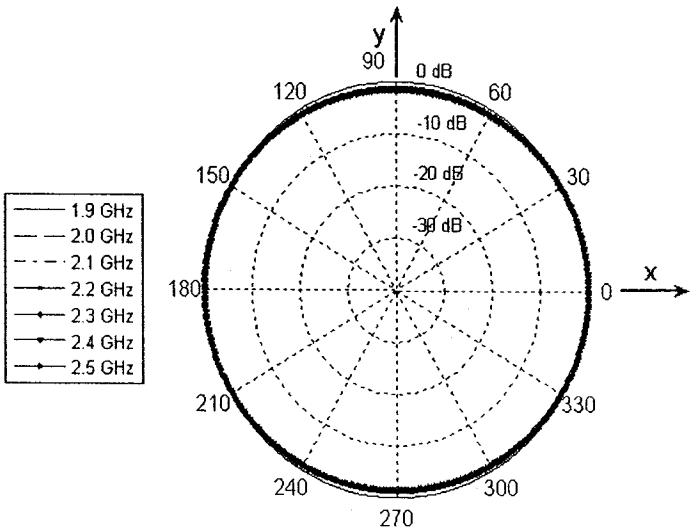
รูปที่ 4-3 แสดงผลการทดสอบจริงเทียบกับผลจากการจำลองแบบของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-2 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงและการจำลองแบบมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศดังกล่าวใช้งานในช่วงแถบความถี่กว้างได้ถึง 66.7% ในช่วงที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB และครอบคลุมช่วงแถบความถี่ที่เราได้เลือกมาใช้งาน (1.9 ถึง 2.5 GHz)

ต่อไปจะเป็นผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในห้อง anechoic chamber โดยอ้างอิงลักษณะการวางสายอากาศตามรูปที่ 4-4 ดังนี้

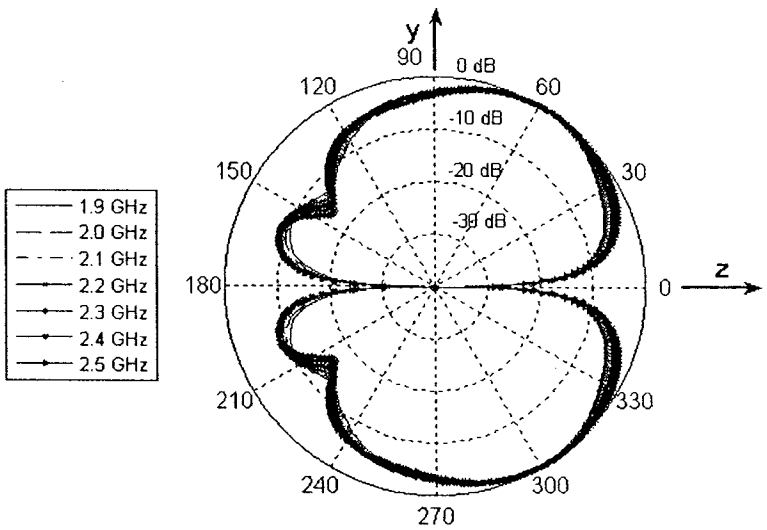


รูปที่ 4-4 ลักษณะการวางตัวของสายอากาศเพื่อใช้ในการอ้างอิงแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปที่ 4-5 ถึงรูปที่ 4-7

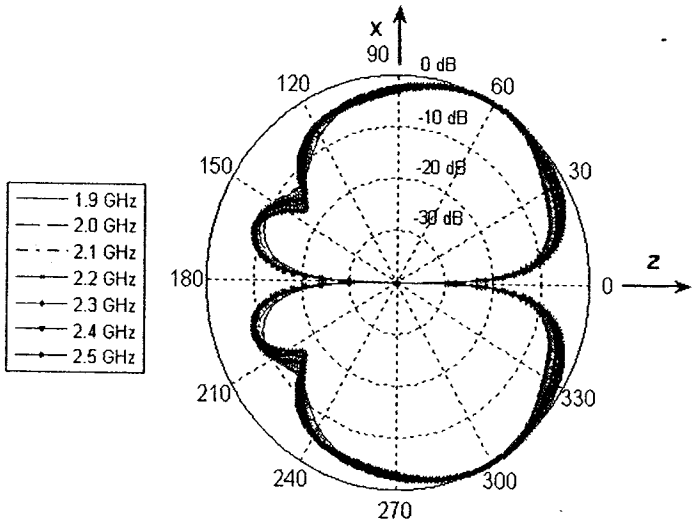
รูปที่ 4-5 4-6 และ4-7 แสดงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (40×40 mm^2) ในระนาบ H ที่ $E_\theta(\phi,\theta=90°)$ ระนาบ E ที่ E_θ $(\phi,\theta=90°)$ และระนาบ E ที่ $E_\theta(\theta,\phi=0°)$ ตามลำดับ ที่ความถี่ 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 และ 2.5 GHz จากรูปทั้ง 3 รูป เราสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า สายอากาศที่สร้างขึ้นมีแบบรูปการแผ่นพลังงานที่มีลักษณะเดียวกับายอากาศโมโนโพลทั่วไป และการแผ่พลังงานมีลักษณะคงตัวตลอดแถบความถี่ที่เราจะนำไปใช้งาน



รูปที่ 4-5 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-2 ในระนาบ H ที่ $E_\theta(\phi,\theta=90°)$ ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz



รูปที่ 4-6 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-2 ในระนาบ E ที่ E_θ $(\phi,\theta=90°)$ ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz

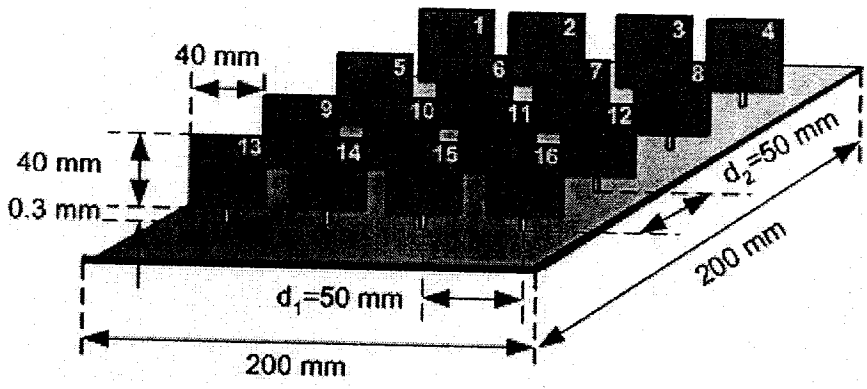


รูปที่ 4-7 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-2 ในระนาบ E ที่ $E_\theta(\theta,\phi=0°)$ ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz

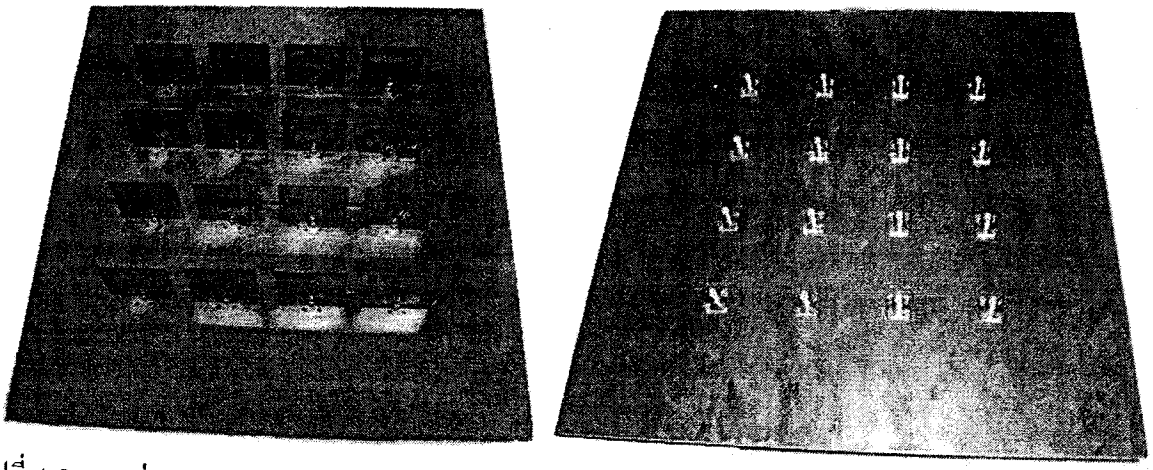
4.2.2 *สายอากาศแถวลำดับ*

หลังจากที่ได้ออกแบบสายอากาศต้นเดียวจนถึงได้ทดสอบสมรรถนะของสายอากาศเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น ต่อไปจะเป็นการสร้างและทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 4×4 เพื่อนำไปใช้งานจริง จากโครงสร้างของการจัดวางสายอากาศแถวลำดับที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-8 สายอากาศแต่ละต้นวางห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ความถี่ 3 GHz ซึ่งเป็นระยะ 50 mm เหตุผลที่เลือกความถี่ 3 GHz แทนที่จะเป็นความถี่ 2.5 GHz ที่เป็นความถี่สูงสุดที่ใช้งานจริง เนื่องจากเราต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาของความไม่แน่นอนที่ขอบของฟังก์ชันเป้าหมาย $H(u_1,u_2)$ นั้นเอง ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่ได้ออกแบบนี้วางอยู่บนแผ่นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นกราวน์ขนาด 200×200 mm^2 รูปที่ 4-9 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศแถวลำดับที่สร้างขึ้นตามการออกแบบจาก เมื่อตัวสายอากาศทำจากทองเหลืองหนา 1.5 mm และแผ่นกราวน์ทำจากอะลูมิเนียมหนา 3.12 mm ซึ่งสายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณผ่านหัวต่อชนิด SMA

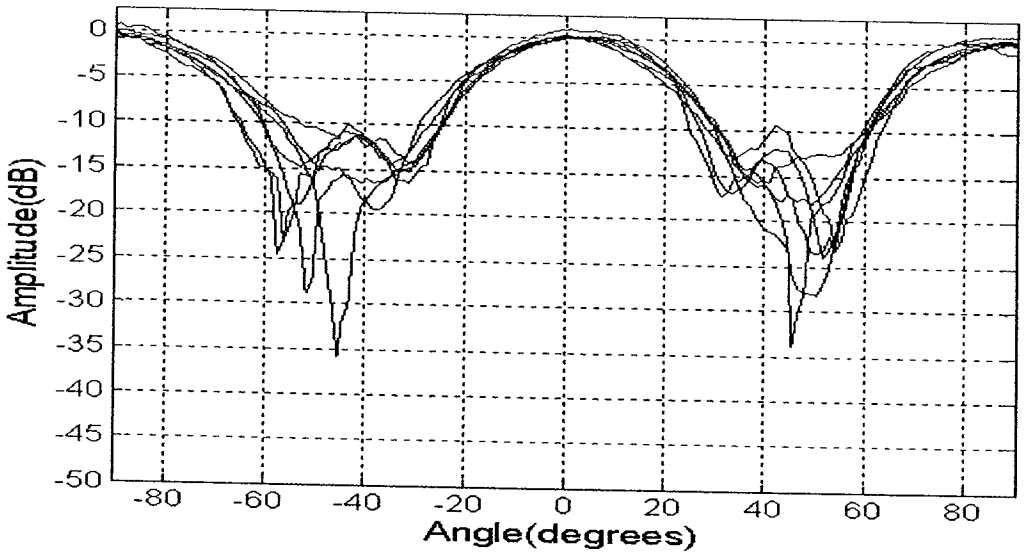
รูปที่ 4-10 แสดงผลการวัดจริงของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่แสดงใน ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz จะเห็นได้ว่าความสามารถในการแผ่พลังงานในทิศทางของพูหลักค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งแถบความถี่ที่สนใจ แต่ขนาดความลึกของจุดศูนย์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนความถี่ในการใช้งาน ซึ่งการวัดในครั้งนี้คือการวัดธรรมชาติของตัวสายอากาศแถวลำดับโดยไม่มีการถ่วงน้ำหนักแต่อย่างใด เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบลักษณะการแผ่พลังงานหลังจากการถ่วงน้ำหนักแล้วซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อ 4.2.4 ต่อไป



รูปที่ 4-8 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับ 4×4 ของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 4-9 ภาพถ่ายของสายอากาศสายอากาศแถวลำดับ 4×4 ของสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

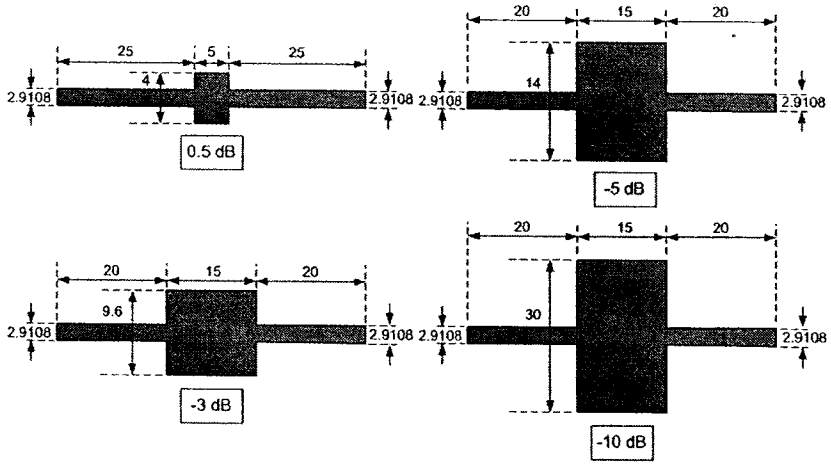


รูปที่ 4-10 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่แสดงใน ที่ความถี่ 1.9 ถึง 2.5 GHz

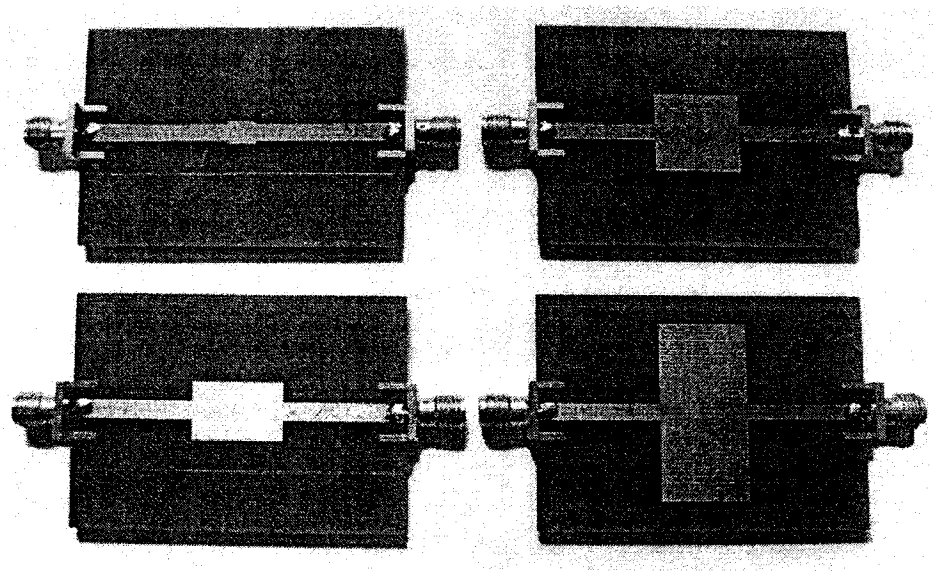
4.2.3 *โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น*

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้วว่า โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้เกิดการก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่เราต้องการ ซึ่งโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นในที่นี้ประกอบไปด้วยตัวถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้น และจากอัลการิทึมในการก่อรูปลำคลื่นที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ได้ออกมาเป็นค่าจริง (ไม่ใช่ค่าเชิงซ้อนเหมือนที่ใช้กับสายอากาศฉลาดทั่วๆ ไป) ดังนั้นเพื่อความง่ายและประหยัดต้นทุนจึงเลือกตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator) มาเป็นตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวต้นแบบที่จะสร้างขึ้นแทนที่จะเป็นตัวขยายสัญญาณ (amplifier)

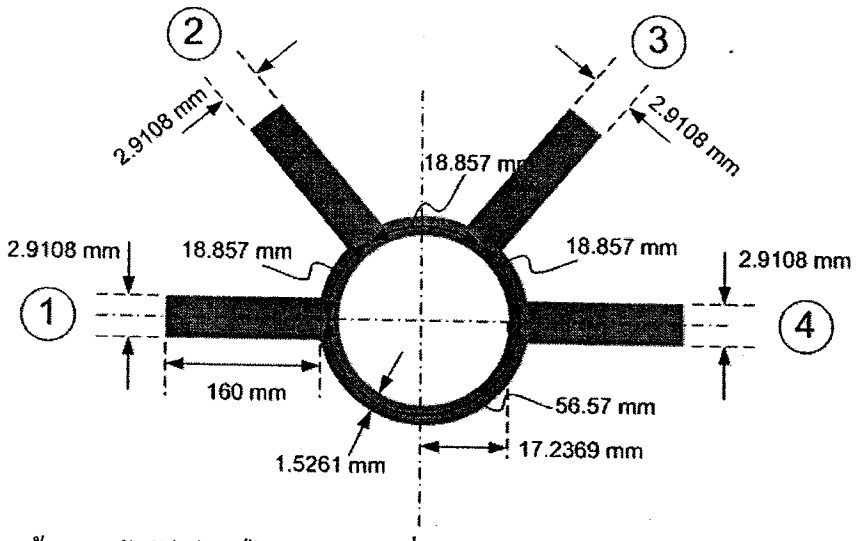
ทิศทางที่ต้องการทดสอบการก่อรูปลำคลื่นของตัวต้นแบบจะจำกัดเพียง ±45° เท่านั้น ด้วยสาเหตุที่ว่าเมื่อเราใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะสมมาตร เช่น 4×4 การก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางที่นอกเหนือจาก ±45° จากด้านหนึ่งของสายอากาศนั้นจะกลายเป็นทิศทางที่อยู่ภายใน ±45° เมื่อพิจารณาจากอีกด้านที่ตั้งฉากกัน ตัวอย่างเช่น ทิศทาง 60° จากด้านหนึ่งจะกลายเป็นทิศทาง -30° ของอีกด้านที่ตั้งฉากกัน ดังนั้นเราจะทดสอบการก่อรูปลำคลื่นจาก -45° ถึง +45° เท่านั้น ซึ่งเมื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักจากสมการ (3-6) จะได้ว่าตัวลดทอนสัญญาณที่ต้องการในการถ่วงน้ำหนักตลอดแถบความถี่จาก 1.9 ถึง 2.5 GHz มีค่าที่แตกต่างกันเพียง 4 ค่าเท่านั้นซึ่งได้แก่ 0.5 5 3 และ 10 dB ซึ่งตัวลดทอนสัญญาณที่มีต้นทุนในการสร้างที่ได้ถูกเลือกใช้ได้แก่ ตัวลดทอนที่ทำด้วยไมโครสตริปแบบ stepped-impedance ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-11 รูปที่ 4-12 แสดงภาพถ่ายของตัวลดทอน (0.5 3 5 และ 10 dB) แบบ stepped-impedance ที่สร้างขึ้นเพื่อถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่คำนวณออกมาได้นั้นมีบางค่าเป็นค่าติดลบ ดังนั้นเราจึงต้องอาศัยการเลื่อนเฟสของสัญญาณออกไป 180° ซึ่งในที่นี่เราจะใช้ตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริงที่มีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-13 ซึ่งสร้างได้โดยง่ายด้วยไมโครสตริปดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-14 หลังจากที่สัญญาณจากสายอากาศได้ถูกถ่วงน้ำหนักอย่างเหมาะสมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังตัวรวมสัญญาณที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-15 เพื่อรวมออกไปเป็นสัญญาณขาออกต่อไป



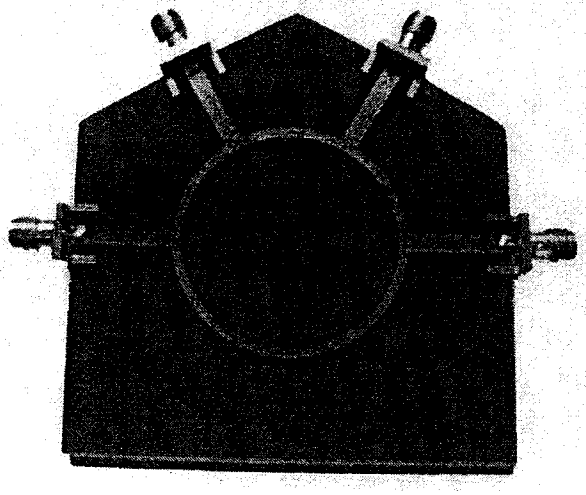
รูปที่ 4-11 โครงสร้างของตัวลดทอน 0.5 5 3 และ 10 dB



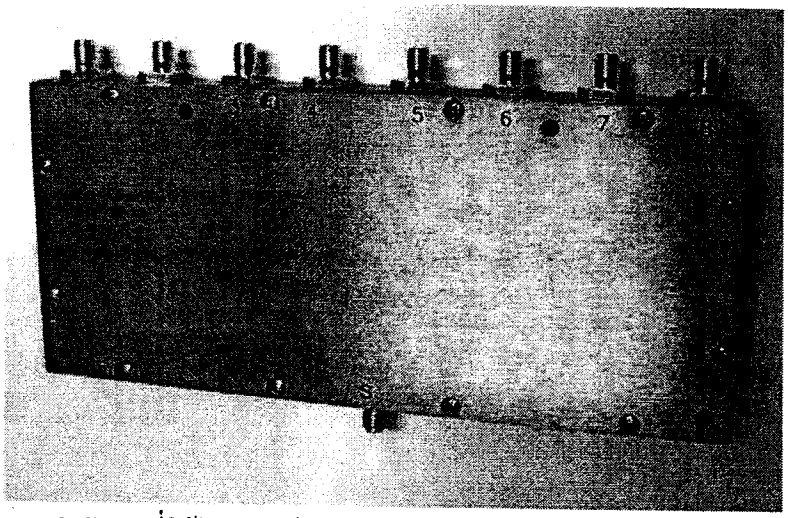
รูปที่ 4-12 ภาพถ่ายของตัวลดทอน (0.5 3 5 และ 10 dB) แบบ stepped-impedance ที่สร้างขึ้นเพื่อถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ



รูปที่ 4-13 โครงสร้างของตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริงที่ออกแบบไว้



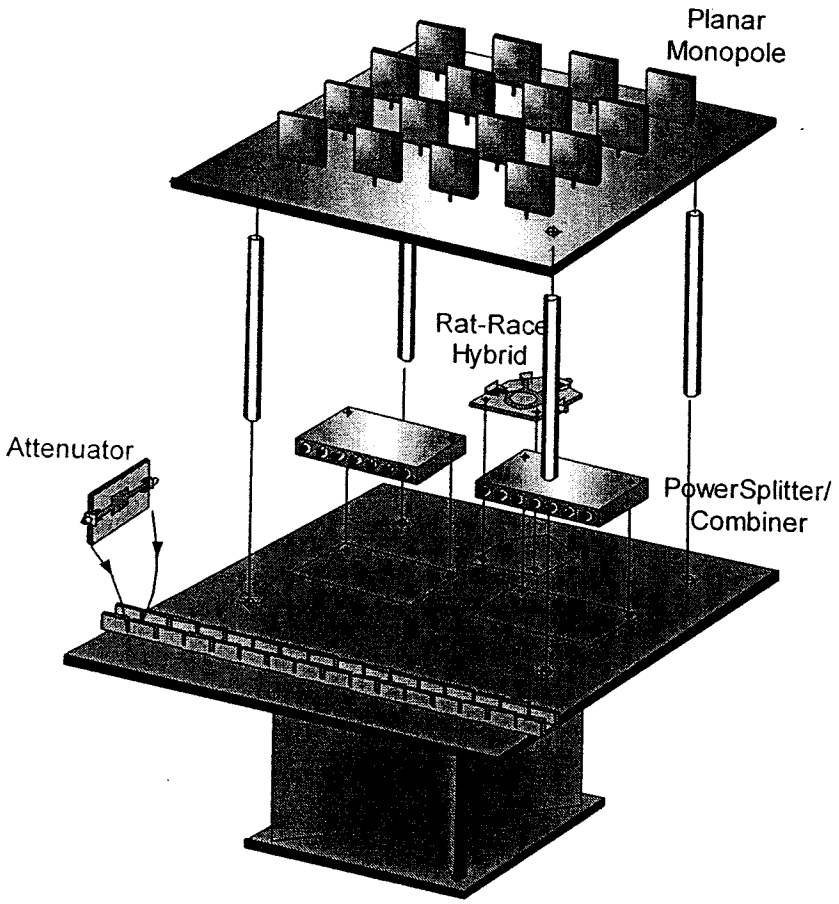
รูปที่ 4-14 ภาพถ่ายของตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริงที่ออกแบบไว้ใน



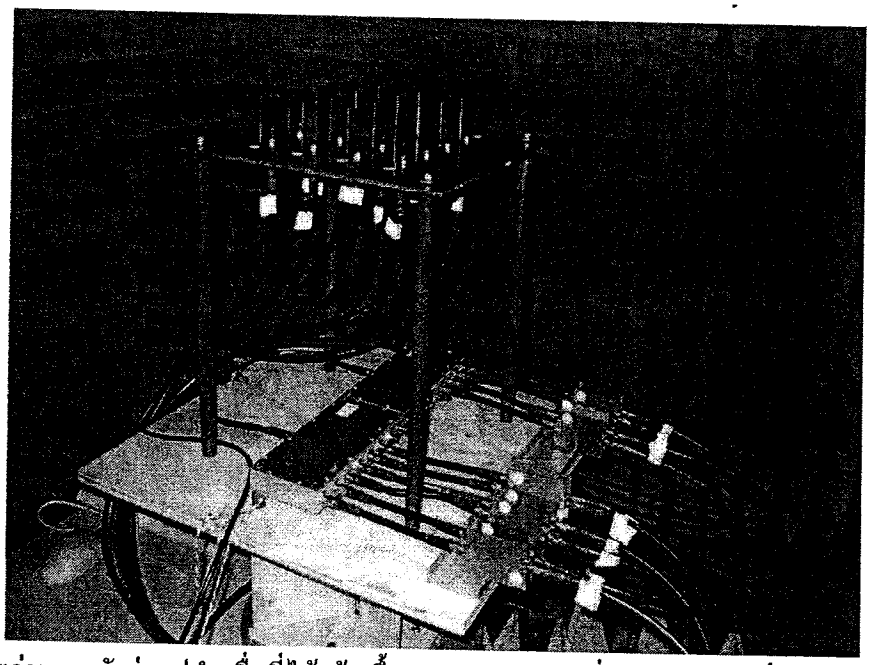
รูปที่ 4-15 ตัวแบ่ง/รวมกำลังงานที่ใช้ในการสร้างตัวต้นแบบ

4.2.4 *ตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 4x4*

หลักจากที่ได้องค์ประกอบทั้งหมดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ขั้นต่อไปก็จะเป็นการประกอบตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ทำงานในแถบความถี่กว้างโดยมีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-16 จากรูป สายอากาศแถวลำดับถูกยึดด้วยเสาพลาสติกที่สูง 60 cm บนฐานที่ทำด้วยไม้ ซึ่งบนฐานดังกล่าวจะมีช่องพลาสติกที่เตรียมไว้สำหรับการวางตัวลดทอนที่ใช้เป็นตัวถ่วงน้ำหนัก ตัวรวมสัญญาณและตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริงจะถูกติดไว้กับฐานไม้ดังรูป อุปกรณ์ทั้งหมดเชื่อมต่อกันด้วยสายส่งชนิดแกนร่วม หลังจากที่ออกแบบโครงสร้างโดยรวมเสร็จแล้วตัวต้นแบบก็ได้ถูกสร้างขึ้นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-17 ซึ่งพร้อมที่จะทดสอบสมรรถนะการก่อรูปลำคลื่นในห้อง anechoic chamber

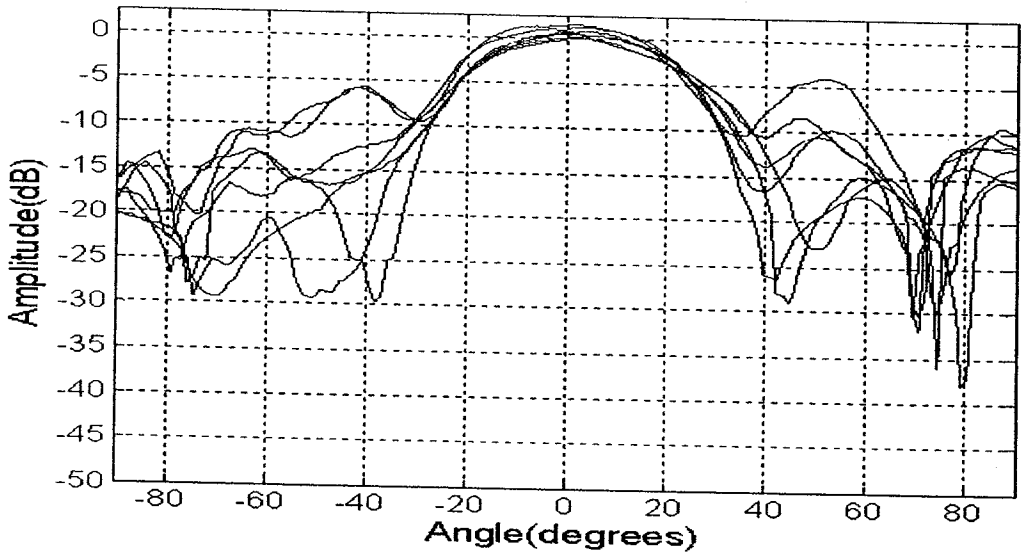


รูปที่ 4-16 โครงสร้างของตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ทำงานในแถบความถี่กว้างโดยใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว



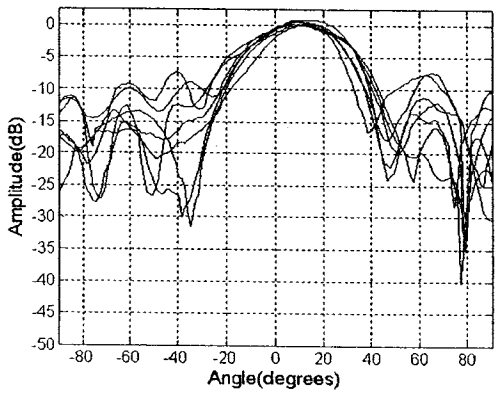
รูปที่ 4-17 ภาพถ่ายของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ได้สร้างขึ้นจากการออกแบบที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-16

ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบจะเริ่มด้วยการกำหนดให้ทิศทางเป้าหมายอยู่ที่ 0° ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-18 ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการทดสอบในรูปที่ 4-10 (ไม่มีการถ่วงน้ำหนัก) จะเห็นได้ว่าตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการก่อรูปลำคลื่นในทิศทาง 0° ได้ดี

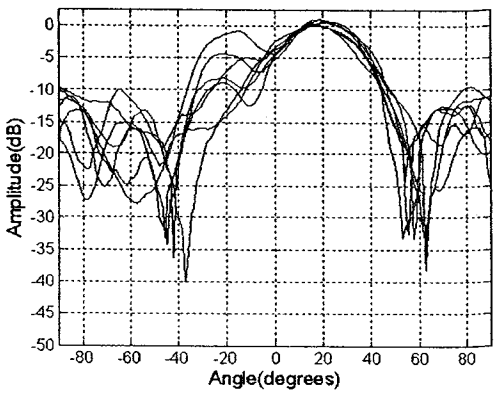


รูปที่ 4-18 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบเมื่อทิศทางเป้าหมายอยู่ที่ 0°

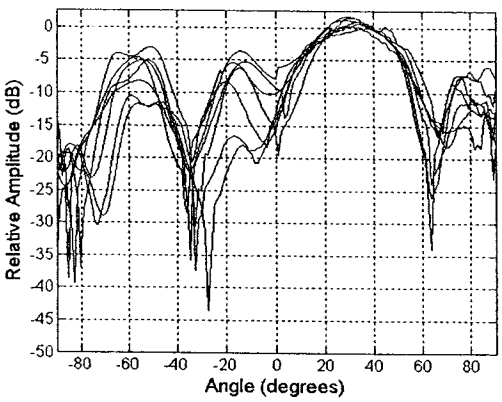
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการก่อรูปลำคลื่นของตัวต้นแบบในทิศทางอื่นๆ (ทางด้านบวก) รูปที่ 4-19 แสดงให้เห็นว่า ตัวต้นแบบมีความสามารถในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่กำหนดตลอดทั้งแถบความถี่กว้างที่ได้ออกแบบไว้ ถึงแม้ว่าพูรองจะค่อนข้างมีระดับที่สูงอยู่ก็ตาม และการทดสอบสมรรถนะในลักษณะเดียวกันนี้ในทิศทางที่เป็นมุมติดลบแสดงไว้ในรูปที่ 4-20 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวต้นแบบก็ยังคงให้คุณสมบัติในการแผ่พลังงานที่คงตัวตลอดแถบความถี่กว้างที่ได้ออกแบบไว้ และตัวต้นแบบก็ยังคงสามารถหันทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางเป้าหมายได้ดี



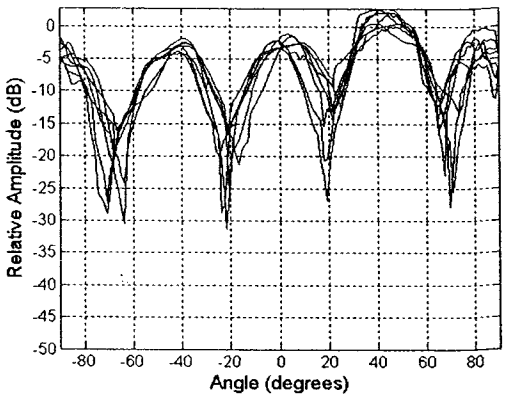
สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ 10°



สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ 20°

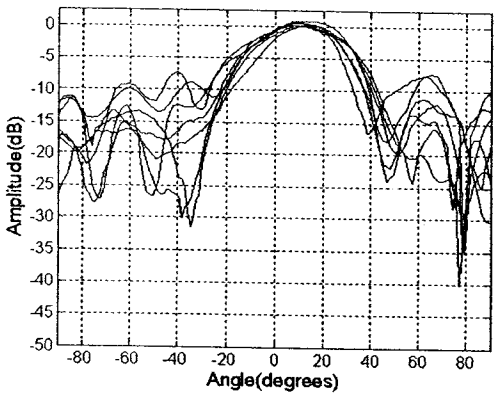


สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ 30°

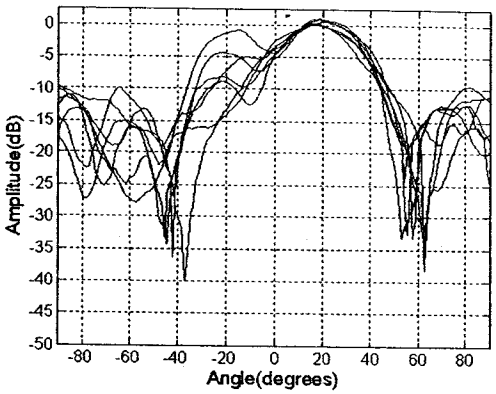


สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ 45°

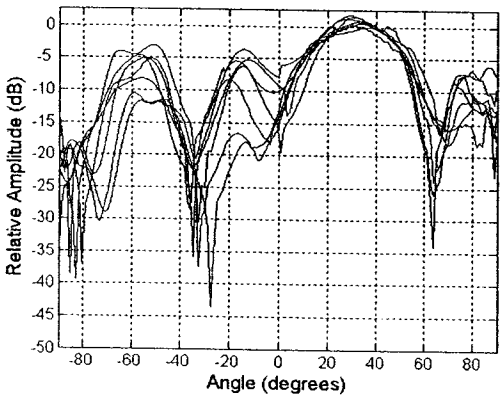
รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบเมื่อทิศทางเป้าหมายอยู่ที่ 10° 20° 30° และ 45°



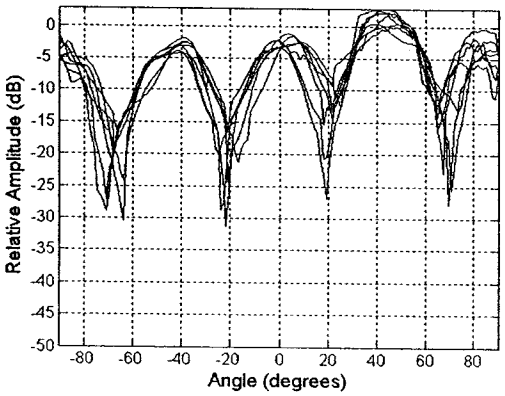
สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ -10°



สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ -20°



สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ -30°

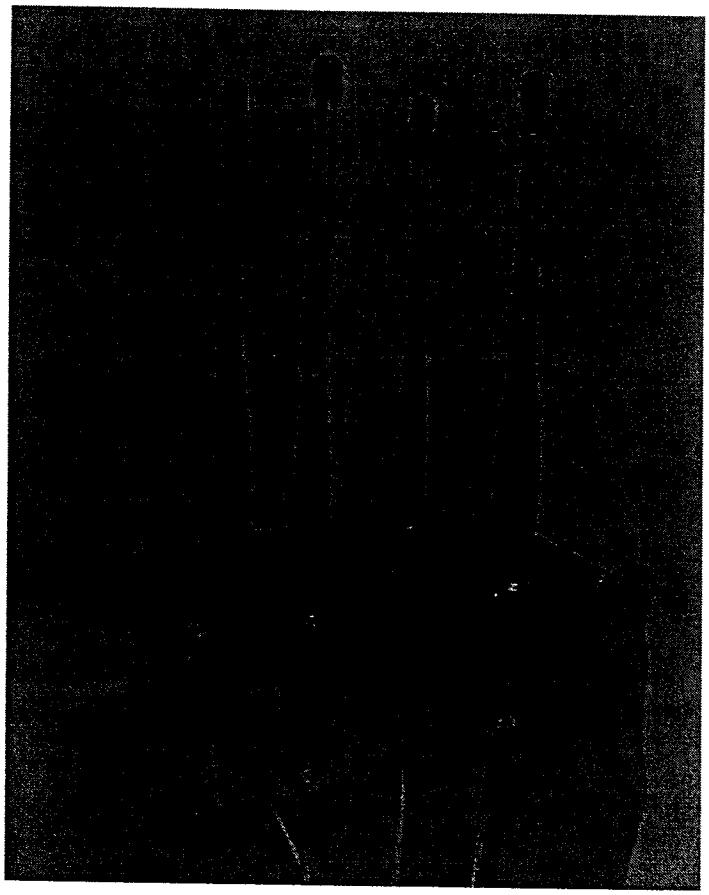


สัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ -45°

รูปที่ 4-20 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวต้นแบบเมื่อทิศทางเป้าหมายอยู่ที่ -10° -20° -30° และ -45°

4.3 ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบ 2×2

การประยุกต์ใช้งานอย่างหนึ่งสำหรับตัวก่อรูปลำคลื่นที่กำลังมีผู้ให้ความสนใจเป็นอย่างมากได้แก่ ความสามารถในการหาทิศทางของวัตถุแบบไร้สาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างตัวต้นแบบที่มีขนาดกระทัดรัดเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในการทิศทางของวัตถุที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



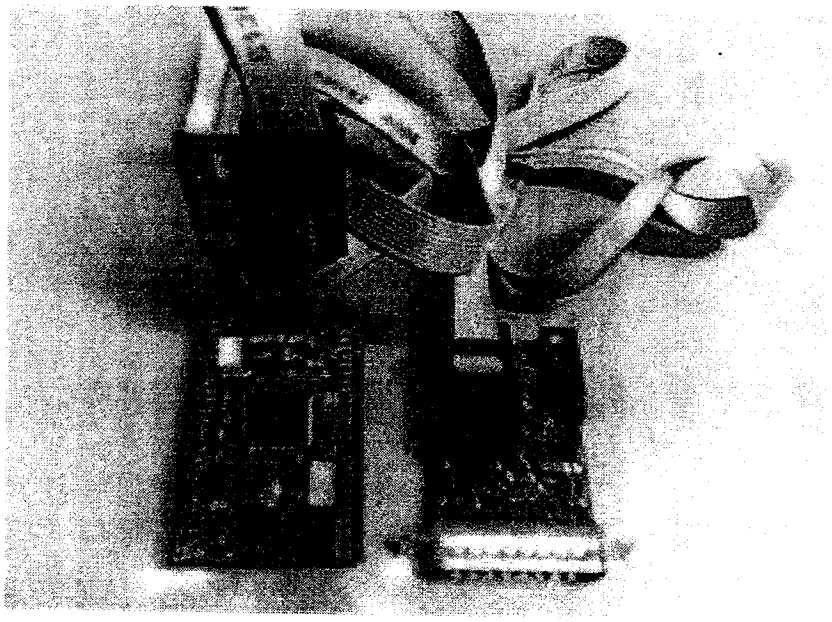
รูปที่ 4-21 ภาพถ่ายของสายอากาศแถวลำดับ 2×2 ที่วางห่างกัน 3.06 cm

4.3.1 *สายอากาศแถวลำดับ*

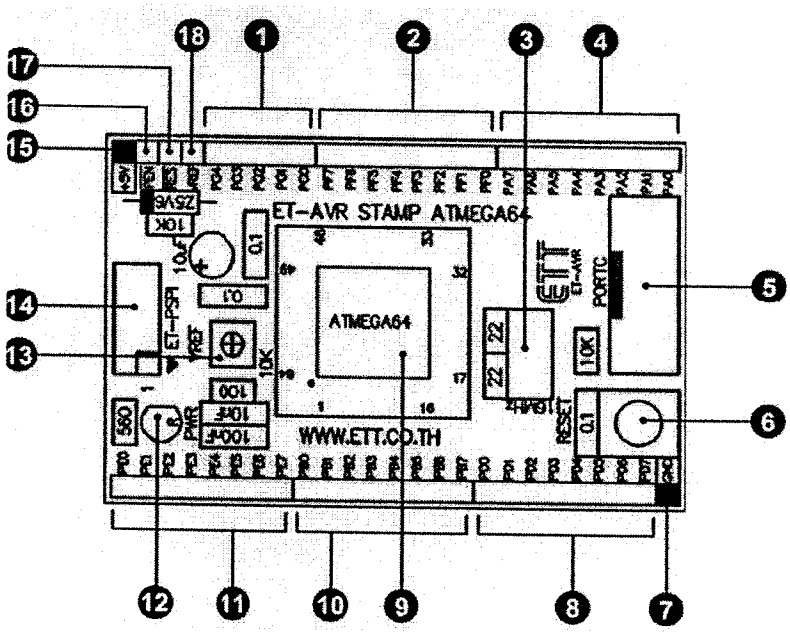
สายอากาศโมโนโพล ASUS WL-ANT ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 5 dBi ได้ถูกเลือกใช้ เพื่อนำมาจัดวางเรียงกันเป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีขนาด 2×2 โดยที่สายอากาศแต่ละต้นวางห่างกันเป็นระยะ 3.06 cm ($\lambda/4$ ที่ความถี่ 2.4 GHz) ดังที่แสดงในรูปที่ 4-21

4.3.2 *บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์*

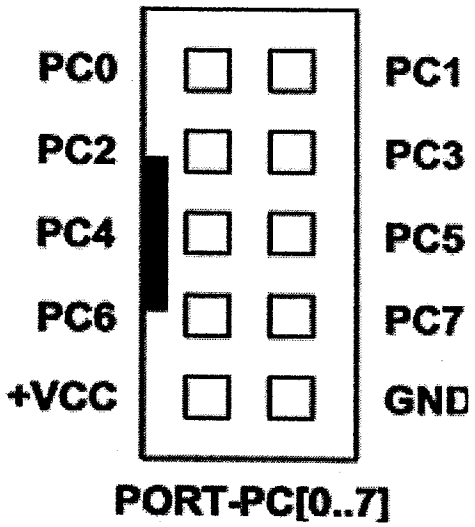
โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นในตัวก่อรูปลำคลื่นในครั้งนี้จะกระทำผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ ซึ่งมีหน้าในการถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่รับได้มาจากสายอากาศ บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ที่เลือกใช้เป็นรุ่น ET-AVR STAMP ATmega128 ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-22 ซึ่งมีโครงสร้างและคุณสมบัติดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-22 บอร์ดไมโครคอนโทลเลอร์รุ่น ET-AVR STAMP ATmega128 ที่ใช้สำหรับประมวลผล



รูปที่ 4-23 โครงสร้างของบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega128



รูปที่ 4-24 การจัดเรียงขาของพอร์ต C

- หมายเลข 1 คือ พอร์ต G ซึ่งประกอบไปด้วย PG0 – PG4 จำนวน 5 Pins
- หมายเลข 2 คือ พอร์ต F ซึ่งประกอบไปด้วย PF0 – PF7 จำนวน 8 Pins
- หมายเลข 3 คือ Crystal 16 MHz
- หมายเลข 4 คือ พอร์ต A ซึ่งประกอบไปด้วย PA0 – PA7
- หมายเลข 5 คือ พอร์ต C ซึ่งประกอบไปด้วย PC0 – PC7 โดยพอร์ตนี้จะถูกเชื่อมต่อออกมารอไว้ยังหัวต่อขนาด 10 PIN แบบ IDE โดยการจัดเรียงขาเป็นดังรูปที่ 4-24
- หมายเลข 6 คือ สวิตช์ RESET
- หมายเลข 7 คือ จุดต่อ GND
- หมายเลข 8 คือ พอร์ต D ซึ่งประกอบไปด้วย PD0 – PD7
- หมายเลข 9 คือ MCU ATMEGA64 ของ Atmel
- หมายเลข 10 คือ พอร์ต B ซึ่งประกอบไปด้วย PB0 – PB7
- หมายเลข 11 คือ พอร์ต E ซึ่งประกอบไปด้วย PE0 – PE7
- หมายเลข 12 คือ LED PWR (สีแดง) แสดงสถานะของไฟเลี้ยงบอร์ด
- หมายเลข 13 คือ ตัวต้านทานปรับค่าได้ สำหรับปรับค่าแรงดันอ้างอิงของ ADC ที่ขา AREF
- หมายเลข 14 คือ พอร์ต ET-PSPI สำหรับเชื่อมต่อกับวงจร ISP PROGRAMMER เพื่อโปรแกรม Hex File ให้กับ AVR โดยการจัดเรียงขาแบบเดียวกันกับชุด STKxxx ของ Atmel
- หมายเลข 15 คือ จุดต่อ Power Supply +5V ของบอร์ด
- หมายเลข 16 คือ ขา PEN ใช้สำหรับเข้าโหมด SPI Serial Programming (ปกติไม่ได้ใช้-งาน)

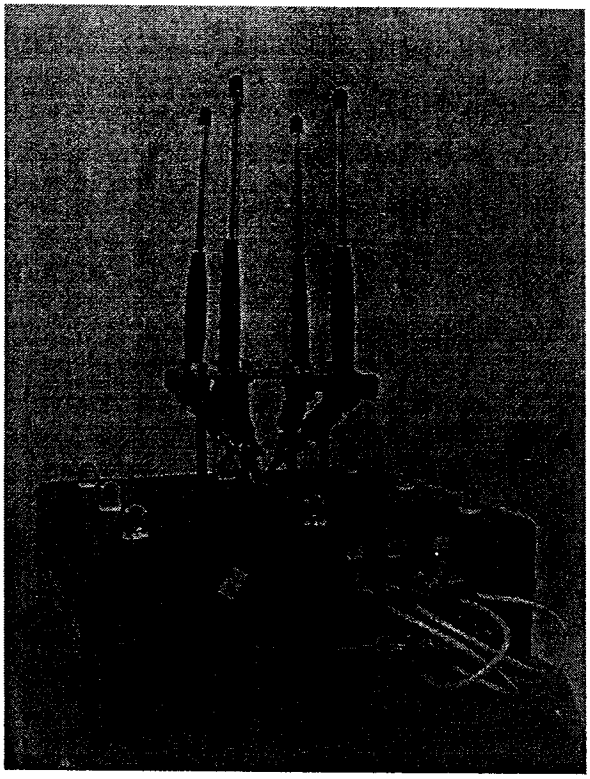
- หมายเลข 17 คือ จุดต่อสัญญาณ RESET สำหรับใช้ RESET จากอุปกรณ์ภายนอก
- หมายเลข 18 คือ จุดต่อขา AREF สำหรับใช้วัดค่าแรงดันอ้างอิงที่ขา AREF

คุณสมบัติของบอร์ด ET-AVR STAMP ATmega128

1. ใช้ MCU ขนาด 8–Bit
2. ความเร็วสัญญาณนาฬิกา Crystal 16 MHz
3. รองรับการโปรแกรมแบบ SPI และ JTAG (ต้องใช้ร่วมกับบอร์ด ET-AVR START KIT V1.0)
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้แรงดันไฟฟ้า 4.5 - 5.5 V
5. ภายใน MCU มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 128KB หน่วยความจำข้อมูล RAM ขนาด 4 KB หน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 4KB ซึ่งสามารถลบและเขียนซ้ำได้กว่า 100,000 ครั้ง
6. จำนวน I/O สูงสุดถึง 53 I/O Pins ซึ่งขาสัญญาณ I/O จะมีการใช้งานร่วมกันของฟังก์ชันอื่น ๆ อีก ดังนี้
   - SPI จำนวน 1 ช่อง I2C จำนวน 1 ช่อง และ 10-Bit ADC จำนวน 8 ช่อง
   - Programmable Serial USARTs จำนวน 2 ช่อง
   - Timers/Counters 8-Bit จำนวน 2 ช่อง และ Timers/Counters 16-Bit จำนวน 2 ช่อง 8-Bit PWM 2 ช่อง Watchdog Timer และ Real Time Counter
7. ทนอุณหภูมิใช้งานระหว่าง -40 ถึง +85°C
8. ขนาด: - PCB Size 1653.543 mil x 2559 mil (42 x 65 mm)
   - ระยะขา ความกว้าง 1500 mil ความยาว 2400 mil (~ 38.1 x 61 mm)
   - ระยะระหว่างขา 2 x 25 Pins I/O Connector 100 mil (~ 2.54 mm)

4.3.3 *ตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่น 2x2*

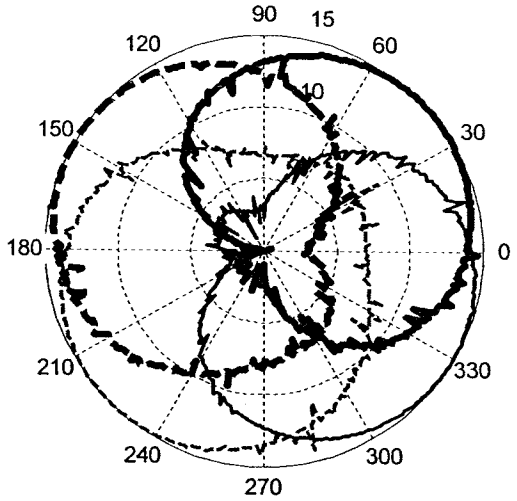
ตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่น 2×2 ถูกประกอบขึ้นจากอุปกรณ์ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งภาพถ่ายของตัวต้นแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-25 ซึ่งการทดสอบจริงจะกระทำในสองลักษณะได้แก่ การทดสอบความสามารถในการแผ่พลังงานในรูปของแบบรูปการแผ่พลังงาน และความสามารถในการหาทิศทางของวัตถุ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



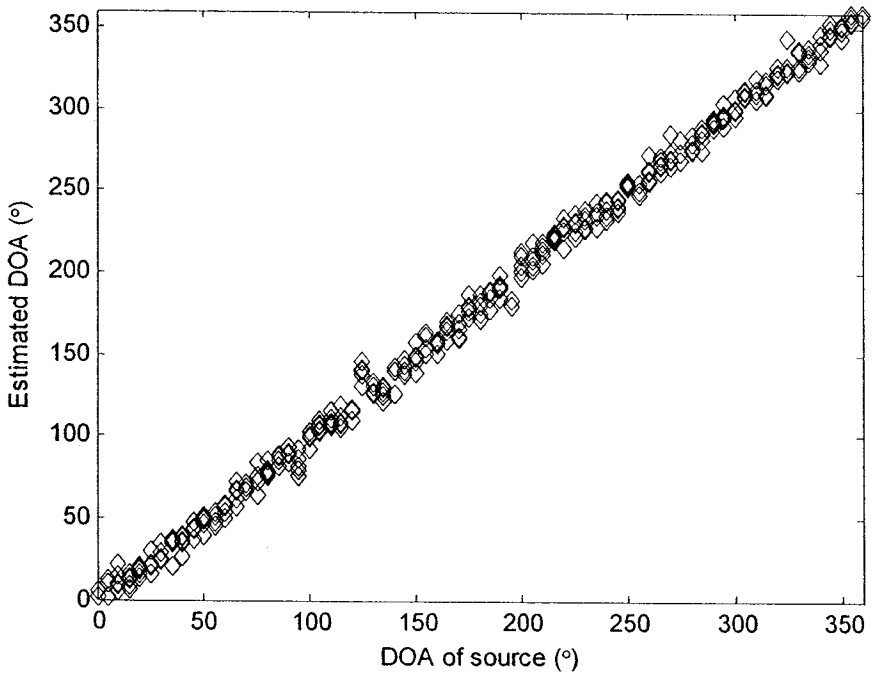
รูปที่ 4-25 ตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่น 2×2

รูปที่ 4-26 แสดงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 2×2 ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-25 ที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวก่อรูปลำคลื่นสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง 45° 135° 225° และ 315° ซึ่งเป็นการเฉลี่ยให้มีพื้นที่ครอบคลุมเท่าๆ กันตลอดทิศทางตั้งแต่ 0° ถึง 360°

การทดสอบตัวต้นแบบในครั้งนี้จะทดสอบความแม่นยำในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดที่ความถี่ 2.4 GHz โดยจะหมุนแหล่งกำเนิดสัญญาณไปรอบๆ ตัวต้นแบบ (0° ถึง 360°) จากนั้นข้อมูลที่ถูกประมวลผลแล้วจะถูกส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่าทิศทางผ่านทางพอร์ต RS-232 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะมีการทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดจะถูกประมาณจากการก่อรูปลำคลื่นไปที่ยังทิศทางที่กำหนดไว้ในการออกแบบ และตรวจสอบดูว่าทิศทางใดให้ค่ากำลังงานที่สูงสุด ซึ่งทิศทางนั้นเองจะถูกประมาณให้เป็นทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณถูกพลอตอยู่ในรูปที่ 4-27 เมื่อข้อมูลแต่ละจุดเป็นข้อมูลที่เฉลี่ยมาจากการทำซ้ำ 5 ครั้ง จากรูป แกนนอนคือทิศทางการมาถึงจริงของสัญญาณ ในขณะที่แกนตั้งแสดงถึงทิศทางที่ตัวต้นแบบประมาณออกมาได้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวต้นแบบมีสมรรถนะในการประมาณทิศทางค่อนข้างดี ซึ่งเมื่อคำนวณค่าความผิดพลาดในการหาทิศทางได้เท่ากับ ±5°



รูปที่ 4-26 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปลำคลื่น 2×2 ที่ความถี่ 2.4 GHz



รูปที่ 4-27 ผลการทดสอบการหาทิศทางของตัวต้นแบบที่ความถี่ 2.4 GHz

4.4 กล่าวท้ายบท

ในช่วงเริ่มต้นของบทที่ 4 จะเป็นการอธิบายถึงรายละเอียดในการออกแบบในแต่ละส่วนของตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง โดยใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ตัวต้นแบบที่ถูกออกแบบขึ้นประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ 4×4 ตัวลดทอนสัญญาณซึ่งถูกใช้ให้เป็นตัวถ่วงน้ำหนัก ตัวคัปเปลอร์ไฮบริดแบบริง และตัวรวมสัญญาณ ตัวต้นแบบของตัวก่อรูปลำคลื่นดังกล่าวได้ถูกสร้างขึ้น และทดสอบจริงในห้อง anechoic chamber ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการก่อรูปลำคลื่นที่ดีตลอดช่วงแถบความถี่กว้างที่กำหนด และในส่วนท้ายของบทได้แสดงถึงรายละเอียดของตัวต้นแบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับ 2×2 โดยการประยุกต์ใช้งานนั้นมุ่งความสนใจไปที่การหาหรือประมาณทิศทางของวัตถุไร้สายที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งผลจากการทดสอบจริงแสดงให้เห็นว่า ตัวต้นแบบมีความสามารถค่อนข้างดีในการประมาณทิศทางโดยที่มีความผิดพลาดเพียง ±5°

บทที่ 5

การพัฒนาอัลกอริทึมในการกำหนดจุดศูนย์ของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ทำงานบนแถบความถี่กว้าง โดยใช้การประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

5.1 กล่าวนำ

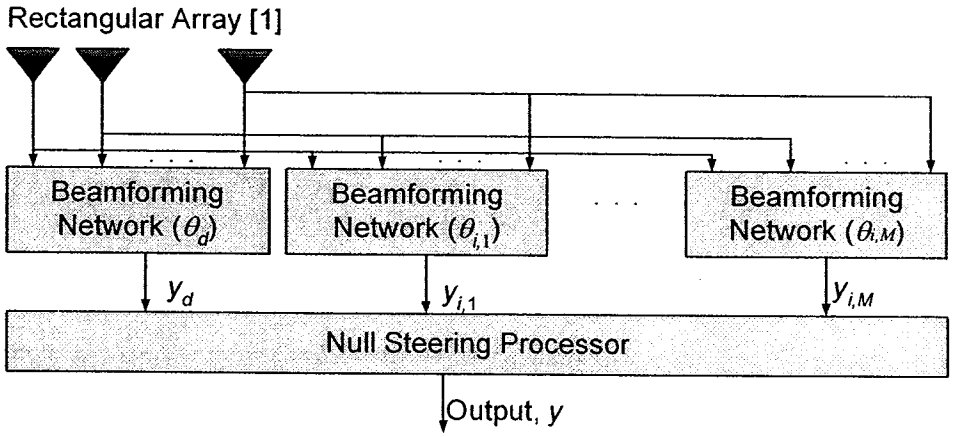
จากที่ได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียของสายอากาศฉลาด (หรือตัวก่อรูปลำคลื่น) ที่ทำงานบนแถบความถี่กว้างทั้ง 3 ชนิดในบทที่ผ่านๆ มาจนในที่สุดพบว่า ระบบที่มีการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวเป็นระบบที่น่าสนใจที่สุด เนื่องจากไม่มีความซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาระบบดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งจากบทที่ 3 และ 4 พบว่าตัวก่อรูปลำคลื่นมีสมรรถนะในการก่อรูปลำคลื่นหลักไปในทิศทางเป้าหมาย แต่จะสังเกตไว้ว่าจุดศูนย์ (null) มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงตัว ซึ่งอาจจะทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (SIR) มีค่าต่ำ ส่งผลให้คุณภาพของระบบลดลง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาอัลกอริทึมในการกำหนดจุดศูนย์ให้กับสายอากาศฉลาดที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว และทำงานบนแถบความถี่กว้าง

5.2 อัลกอริทึมในการกำหนดจุดศูนย์

เนื่องจากความสำเร็จในการกำหนดจุดศูนย์ให้อยู่ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดของระบบสายอากาศฉลาดเป็นกุญแจสำคัญที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดี และงานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้มุ่งเน้นให้ระบบสามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง ดังนั้นในไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้จึงได้มีนักวิจัยให้ความสนใจในการพัฒนาอัลกอริทึมในการกำหนดจุดศูนย์ให้กับสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่ว้าง แต่อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่จะใช้อัลกอริทึมที่ทำงานกับระบบสายอากาศฉลาดที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งและเวลา ซึ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถทำงานได้กับระบบที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่าวเดียว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

รูปที่ 5-1 แสดงโครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถกำหนดศูนย์ได้บนแถบความถี่กว้าง เมื่อโครงสร้างในส่วนของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้เป็นแบบเชิงระนาบ และในส่วนของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นยังคงเป็นเหมือนระบบที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่

การก่อรูปลำคลื่นในครั้งนี้จะกระทำมากกว่า 1 ครั้ง โดยจะก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางเป้าหมาย (θ_d) และทิศทางของสัญญาณแทรกสอด M ทิศทาง ($\theta_{i,m}$) ซึ่งสัญญาณขาออกจากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแต่ละโครงข่ายมีค่าดังนี้



รูปที่ 5-1 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถกำหนดศูนย์ได้บนแถบความถี่กว้าง

$$y_d = \mathbf{w}_d(\mathbf{s}+\mathbf{n}) \tag{5-1}$$

และ
$$y_{i.m} = \mathbf{w}_{i,m}(\mathbf{s}+\mathbf{n}) \tag{5-2}$$

เมื่อ
$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_d + \mathbf{s}_{i,1} + \ldots + \mathbf{s}_{i,m} + \ldots + \mathbf{s}_{i,M} \tag{5-3}$$

โดยที่ y_d และ $y_{i.m}$ คือสัญญาณขาออกจากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่หันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางเป้าหมาย ($\mathbf{s}_d$) และทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ($\mathbf{s}_{i,m}$) ตามลำดับ จากสมการ (5-1) และ (5-2) $\mathbf{n}$ คือสัญญาณรบกวน (noise) ของระบบ และสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักในทิศทางของสัญญาณเป้าหมายและทิศทางของสัญญาณแทรกสอดแทนด้วย $\mathbf{w}_d$ และ $\mathbf{w}_{i,m}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-6) จากสมการ (5-1) ถึง (5-3) สัญญาณขาออกจากตัวกำหนดจุดศูนย์ (null steering processor) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$y = y_d + \alpha_1 y_{i,1} + \ldots + \alpha_M y_{i,M} \tag{5-4}$$

เมื่อแทนค่าสมการ (5-1) ถึง (5-3) ลงในสมการ (5-4) จะได้

$$
\begin{aligned}
y = \mathbf{s}_d\left(\mathbf{w}_d + \alpha_1\mathbf{w}_{i,1} + \ldots + \alpha_M\mathbf{w}_{i,M}\right) \\
+ \sum_{m=1}^{M}\mathbf{s}_{i,m}\left(\mathbf{w}_d + \alpha_1\mathbf{w}_{i,1} + \ldots + \alpha_M\mathbf{w}_{i,M}\right) \\
+ \mathbf{n}M\left(\mathbf{w}_d + \alpha_1\mathbf{w}_{i,1} + \ldots + \alpha_M\mathbf{w}_{i,M}\right)
\end{aligned}
\tag{5-5}
$$

เมื่อ α คือแฟกเตอร์ในการลดทอนสัญญาณแทรกสอด (interfernce suppression factor) ถ้าหากการกำจัดสัญญาณแทรกสอดประสบความสำเร็จ พจน์ที่ 2 และ 3 ในสมการ (5-5) จะมีค่าดังนี้

$$
\begin{aligned}
\sum_{m=1}^{M}\mathbf{s}_{i,m}\left(\mathbf{w}_d + \alpha_1\mathbf{w}_{i,1} + \ldots + \alpha_M\mathbf{w}_{i,M}\right) = 0 \\
+ \mathbf{n}M\left(\mathbf{w}_d + \alpha_1\mathbf{w}_{i,1} + \ldots + \alpha_M\mathbf{w}_{i,M}\right)
\end{aligned}
\tag{5-6}
$$

จากสมการ (5-6) ทำให้เราสามารถหาค่าแฟกเตอร์ในการลดทอนสัญญาณแทรกสอดได้ดังนี้

$$
\begin{bmatrix}
w_{i,1}s_{i,1} + w_{i,1}\,n/M & \cdots & w_{i,M}s_{i,1} + w_{i,M}\,n/M \\
\vdots & \ddots & \vdots \\
w_{i,1}s_{i,M} + w_{i,1}\,n/M & \cdots & w_{i,M}s_{i,M} + w_{i,M}\,n/M
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}\alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_M\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
-w_d s_{i,1} - w_d\,n/M \\ \vdots \\ -w_d s_{i,M} - w_d\,n/M
\end{bmatrix}
\tag{5-7}
$$

และ

$$
\begin{bmatrix}\alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_M\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
w_{i,1}s_{i,1} + w_{i,1}\,n/M & \cdots & w_{i,M}s_{i,1} + w_{i,M}\,n/M \\
\vdots & \ddots & \vdots \\
w_{i,1}s_{i,M} + w_{i,1}\,n/M & \cdots & w_{i,M}s_{i,M} + w_{i,M}\,n/M
\end{bmatrix}^{-1}
\begin{bmatrix}
-w_d s_{i,1} - w_d\,n/M \\ \vdots \\ -w_d s_{i,M} - w_d\,n/M
\end{bmatrix}
\tag{5-8}
$$

จากสมการ (5-8) จะเห็นได้ว่า ในความเป็นจริงแล้วเป็นการยากที่จะได้ค่าแฟกเตอร์ในการลดทอนสัญญาณแทรกสอด เนื่องจากสัญญาณรบกวนเป็นค่าที่คาดเดาไม่ได้ทางปฏิบัติ ดังนั้นวิธีเดียวที่จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้คือ การประมาณคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนของระบบ ตัวอย่างเช่น เราสมมติให้สัญญาณรบกวนของระบบมีการกระจายตัวแบบ random Guassian ที่มี zero mean และ unit vairance ด้วยเหตุนี้แล้วในทางปฏิบัติเราจึงสามารถได้ค่าในสมการ (5-8) ด้วยการเฉลี่ยนเทียบกับเวลา และทำการประมาณจนในที่สุดเราสามรถหาค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ในการลดทอนสัญญาณแทรกสอดดังนี้

$$
\begin{bmatrix}\overline{\alpha}_1 \\ \vdots \\ \overline{\alpha}_1\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\mathbf{w}_{i,1}\mathbf{s}_{i,1} & \cdots & \mathbf{w}_{i,M}\mathbf{s}_{i,1} \\
\vdots & \ddots & \vdots \\
\mathbf{w}_{i,1}\mathbf{s}_{i,1} & \cdots & \mathbf{w}_{i,M}\mathbf{s}_{i,M}
\end{bmatrix}^{-1}
\begin{bmatrix}
-\mathbf{w}_d\mathbf{s}_{i,1} \\ \vdots \\ -\mathbf{w}_d\mathbf{s}_{i,M}
\end{bmatrix}
\tag{5-9}
$$

เมื่อ $\bar{\alpha}$ คือค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ในการลดทอนสัญญาณแทรกสอด, $\bar{\alpha} = E\{\alpha\}$, เมื่อ $E\{\cdot\}$ คือตัวดำเนินการเฉลี่ยเทียบกับเวลา

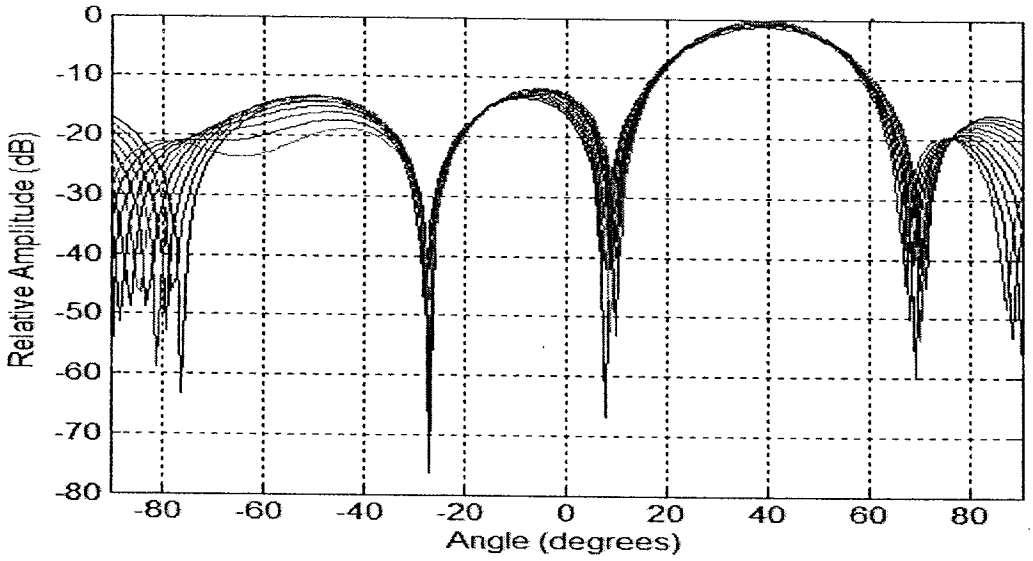
จากค่าที่แสดงในสมการ (5-9) เป็นค่าที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีความจำเป็นในการใช้สายถ่วงเวลาต่อแยก หรือแม้กระทั่งตัวกรองสัญญานแต่อย่างใด ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

5.3 ผลการจำลองแบบ

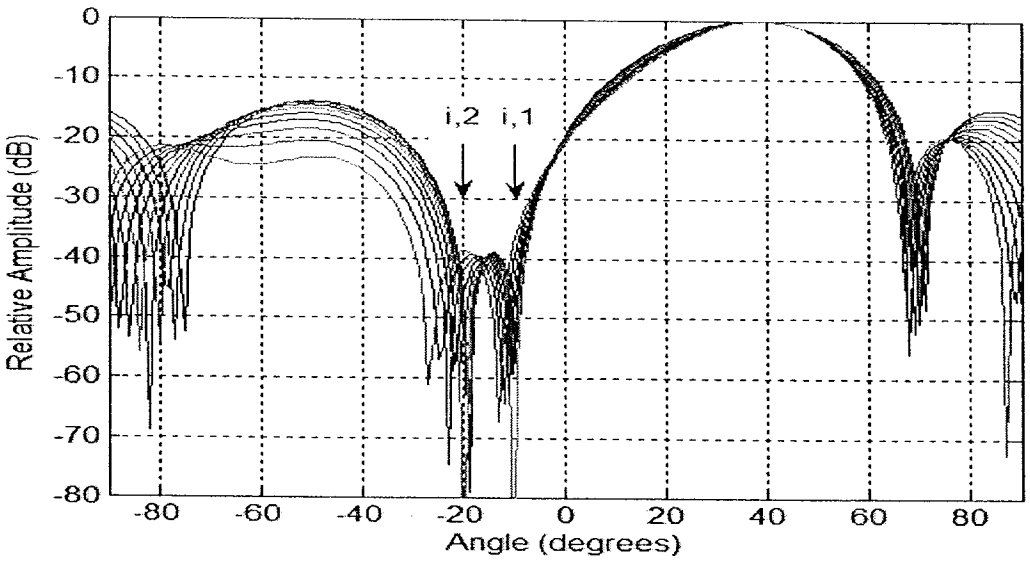
สมรรถนะในการกำหนดจุดศูนย์ของอัลการิทึมที่กล่าวในหัวข้อที่แล้วจะถูกแสดงในรูปของแบบรูปการแผ่พลังงาน เมื่อค่าพารามิเตอร์ในการจำลองแบบในครั้งนี้มีดังนี้

- สัญญาณแทรกสอดมีจำนวน 2 สัญญาณ
- สายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศโมโนโพลแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40×40 mm^2
- สายอากาศแถวลำดับแต่ละต้นวางห่างกันเท่ากับ 50 mm
- จำนวนสายอากาศที่นำมาวางเรียงกันเป็นสายอากาศแถวลำดับเท่ากับ 5×5 ต้น
- แถบความถี่กว้างเป้าหมายอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 2.5 GHz
- จำนวนจุดข้อมูลบนระนาบ u_1-u_2 เท่ากับ $N_{u_1} = 41$ และ $N_{u_2} = 41$
- ทิศทางของสัญญาณเป้าหมายอยู่ที่ 40°
- ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 1 อยู่ที่ -20° และสัญญาณแทรกสอดที่ 2 อยู่ที่ -10°

รูปที่ 5-2 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปคลื่น 5×5 โดยที่สัญญาณถูกประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เมื่อสัญญาณเป้าหมายเข้ามาที่ 40° และไม่มีสัญญาณแทรกสอดในระบบ จะเห็นได้ว่าตัวก่อรูปลำคลื่นสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางเป้าหมาย (40°) ได้ดีตลอดแถบความถี่ที่ได้กำหนดไว้ (1.9 ถึง 2.5 GHz) แต่เมื่อมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาในระบบจากทิศทาง -20° และ -10° ในรูปที่ 5-3 จะเห็นได้ชัดว่า ไม่เพียงแต่ระบบจะยังสามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมาย (40°) แต่ยังสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดทั้งสองสัญญาณได้อีกด้วย (เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่แสดงในรูปที่ 5-2)



รูปที่ 5-2 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปคลื่น 5×5 เมื่อมีสัญญาณเป้าหมายเข้ามาที่ 40° และไม่มีสัญญาณแทรกสอดในระบบ



รูปที่ 5-3 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวก่อรูปคลื่น 5×5 เมื่อมีสัญญาณเป้าหมายเข้ามาที่ 40° โดยมีสัญญาณแทรกสอด 2 สัญญาณเข้ามาที่ -20° และ -10°

5.4 กล่าวท้ายบท

บทนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมในการกำหนดจุดศูนย์ที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวเหมาะสมกับสายอากาศฉลาดที่ใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากไม่ต้องการสายถ่วงเวลาต่อแยก หรือตัวกรองสัญญาณ สมรรถนะของอัลกอริทึมถูกทดสอบผ่านการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมทำให้ระบบมีความสามารถหันจุดศูนย์ไปในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ดี ในขณะที่ยังคงความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณเป้าหมายได้ ซึ่งความสามารถดังกล่าวมีลักษณะคงตัวตลอดแถบความถี่กว้างที่ได้กำหนดไว้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

รายงานวิจัยฉบันนี้ได้นำเสนอเรื่องราวที่เกี่ยวกับระบบสายอากาศฉลาด ซึ่งเริ่มต้นด้วยรายละเอียดของหลักการพื้นฐานของระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้าง แต่เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันจะมุ่งเน้นระบบที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง เพราะผู้ใช้บริการการสื่อสารไร้สายต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง ดังนั้นประเด็นหลักของรายงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นระบบสายอากาศฉลาดที่ทำงานในแถบความถี่กว้าง รายละเอียดรวมถึงข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศฉลาดดังกล่าวที่แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แสดงเอาไว้ในส่วนแรกของรายงาน ซึ่งสรุปได้ว่าระบบที่มีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด สร้างง่าย และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ดังนั้นเนื้อหาในส่วนถัดมาจึงเป็นการพัฒนาระบบสายอากาศฉลาดที่มีการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ประเด็นในการพัฒนาระบบเพื่อให้สามารถทำงานในแถบความถี่กว้างที่ผู้วิจัยได้ทำได้แก่ พัฒนาคุณสมบัติในการก่อรูปลำคลื่นที่เน้นเฉพาะทิศทางของลำคลื่นหลัก พัฒนาความสามารถในการหาทิศทางของวัตถุแบบไร้สายที่ความถี่ 2.4 GHz และพัฒนาการกำหนดจุดศูนย์เพื่อให้ระบบสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่มีแถบความถี่กว้างได้ ในสองส่วนแรกการทดสอบสมรรถนะจะกระทำผ่านการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์และการสร้างตัวต้นแบบเพื่อทดสอบจริง ส่วนประเด็นสุดท้ายจะกระทำผ่านการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว ซึ่งผลที่ได้ยืนยันสมรรถนะของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ได้วิจัยขึ้นกล่าวคือ ตัวก่อรูปลำคลื่นสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่กำหนดได้ หรือแม้แต่กระทั่งสามารถกำหนดให้จุดศูนย์หันไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ตลอดทั้งแถบความถี่กว้าง และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไร้สายก็ให้สมรรถนะที่ดี

6.2 ข้อแสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อ

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อที่ได้จากการทำงานวิจัยฉบับนี้แบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลักๆ ได้แก่ การพัฒนาคุณสมบัติในการก่อรูปลำคลื่น การพัฒนาการหาทิศทาง และการพัฒนาการกำหนดจุดศูนย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 *การพัฒนาคุณสมบัติในการก่อรูปลำคลื่น*

จากการทดสอบสมรรถในการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศฉลาดที่มีการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวที่ได้ไม่ว่าจะเป็นจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ หรือแม้กระทั่งจากการทดสอบจริง จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติหนึ่งของตัวก่อรูปลำคลื่นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ การมีระดับของพูรอง (sidelobe) ที่สูง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวอาจส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบต่ำลง และอาจจะทำให้การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายเกิดความผิดเพี้ยนได้

ผู้วิจัยมีความคิดเห็นในประเด็นนี้ว่า คุณสมบัติดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก 2 สาเหตุหลักๆ ดังนี้ สาเหตุแรกได้แก่ การใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดเล็ก (จำนวนสายอากาศน้อย) ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับผู้ที่ต้องการความกะทัดรัดของระบบ และอีกสาเหตุหนึ่งก็คือ การใช้ฟังก์ชันเป้าหมาย $H(u_1, u_2)$ เป็นฟังก์ชัน Sinc เนื่องฟังก์ชันเป้าหมายเป็นพารามิเตอร์ที่จะกำหนดลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบ และเมื่อเราใช้ฟังก์ชัน Sinc ซึ่งไม่มีการกำหนดระดับของพูรองแต่อย่างใด จึงทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้มีระดับพูรองที่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการพัฒนาต่อไปด้วยการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อให้สามารถลดระดับของพูรองให้ต่ำลง

6.2.2 *การพัฒนาตัวหาทิศทาง*

จะเห็นได้ว่าตัวหาทิศทางที่ได้พัฒนาขึ้นทำงานได้ดีในสภาวะที่มีสัญญาณเป้าหมายเข้ามาในระบบเพียงสัญญาณเดียว ถ้าหากมีสัญญาณเข้ามามากกว่า 1 สัญญาณอาจส่งผลให้ระบบเกิดความผิดพลาดในการหาทิศทางได้

ผู้วิจัยมีแนวคิดในการพัฒนาต่อดังนี้ การพัฒนาควรมุ่งเน้นที่อัลกอริทึมเพื่อให้สามารถรองรับการประมวลผลที่ซับซ้อนขึ้น และจำเป็นต้องเปลี่ยนไมโครคอนโทรเลอร์เป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า หรือเป็นบอร์ดประมวลผลสัญญาณที่มีสามารถรองรับการทำงานที่ซับซ้อนมากขึ้นได้

6.2 ข้อแสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อ

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อที่ได้จากการทำงานวิจัยฉบับนี้แบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลักๆ ได้แก่ การพัฒนาคุณสมบัติในการก่อรูปลำคลื่น การพัฒนาการหาทิศทาง และการพัฒนาการกำหนดจุดศูนย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 *การพัฒนาคุณสมบัติในการก่อรูปลำคลื่น*

จากการทดสอบสมรรถในการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศฉลาดที่มีการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวที่ได้ไม่ว่าจะเป็นจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ หรือแม้กระทั่งจากการทดสอบจริง จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติหนึ่งของตัวก่อรูปลำคลื่นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ การมีระดับของพูรอง (sidelobe) ที่สูง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวอาจส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบต่ำลง และอาจจะทำให้การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายเกิดความผิดเพี้ยนได้

ผู้วิจัยมีความคิดเห็นในประเด็นนี้ว่า คุณสมบัติดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก 2 สาเหตุหลักๆ ดังนี้ สาเหตุแรกได้แก่ การใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีขนาดเล็ก (จำนวนสายอากาศน้อย) ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับผู้ที่ต้องการความกะทัดรัดของระบบ และอีกสาเหตุหนึ่งก็คือ การใช้ฟังก์ชันเป้าหมาย $H(u_1, u_2)$ เป็นฟังก์ชัน Sinc เนื่องฟังก์ชันเป้าหมายเป็นพารามิเตอร์ที่จะกำหนดลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบ และเมื่อเราใช้ฟังก์ชัน Sinc ซึ่งไม่มีการกำหนดระดับของพูรองแต่อย่างใด จึงทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้มีระดับพูรองที่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการพัฒนาต่อไปด้วยการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อให้สามารถลดระดับของพูรองให้ต่ำลง

6.2.2 *การพัฒนาตัวหาทิศทาง*

จะเห็นได้ว่าตัวหาทิศทางที่ได้พัฒนาขึ้นทำงานได้ดีในสภาวะที่มีสัญญาณเป้าหมายเข้ามาในระบบเพียงสัญญาณเดียว ถ้าหากมีสัญญาณเข้ามามากกว่า 1 สัญญาณอาจส่งผลให้ระบบเกิดความผิดพลาดในการหาทิศทางได้

ผู้วิจัยมีแนวคิดในการพัฒนาต่อดังนี้ การพัฒนาควรมุ่งเน้นที่อัลกอริทึมเพื่อให้สามารถรองรับการประมวลผลที่ซับซ้อนขึ้น และจำเป็นต้องเปลี่ยนไมโครคอนโทรเลอร์เป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า หรือเป็นบอร์ดประมวลผลสัญญาณที่มีสามารถรองรับการทำงานที่ซับซ้อนมากขึ้นได้

6.2.3 *การพัฒนาการกำหนดจุดศูนย์*

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การกำหนดจุดศูนย์ด้วยการประมวลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามผลที่กล่าวถึงนั้นเป็นผลที่ได้มาจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ซึ่งผู้จัยมีความคิดเห็นว่า ควรมีการพัฒนาต่อในการสร้างตัวต้นแบบเพื่อทดสอบคุณสมบัติของการกำหนดจุดศูนย์ดังกล่าวในสถานการณ์จริง

บรรณานุกรม

[1] M. Kang, M. S. Alouini, and L. Yang, "Outage probability and spectrum efficiency of cellular mobile radio systems with smart antennas," IEEE Transaction on Communications, vol. 50, no. 12, pp. 1871-1877, Dec. 2002.

[2] Y. Jiang and V. K. Bhargava, "Application of smart antenna techniques in cellular mobile systems," IEEE Pacific Conference on Communications, Computers and Signal Processing, vol. 1, 20-22 Aug. 1997, pp. 362-365.

[3] W. Shao, J. Xie, and G. Xang, "Structure and implementation of smart antennas based on software radio," IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 2, 5-8 Oct. 2003, pp. 1938-1943.

[4] M. Uthansakul and M. E. Bialkowski, "Impact of wideband signals on smart antenna system," in Proc. 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, vol. 2, 17-19 May 2004, pp. 501-504.

[5] M. Hefnawi and G. Y. Delisle, "Impact of wideband CDMA signals on smart antenna systems," in Proc. IEEE International Conf. on Personal Wireless Communications, 17-20 Dec. 2000, pp. 5-8.

[6] A. Alexiou and M. Haardt, "Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges", IEEE Communication Magazine, vol. 42, no. 9, Sept. 2004, pp. 90-97.

[7] R. S. Kawitkar and R. K. Shevgaonkar, "Design of smart antenna testbed prototype", International Symposium on Antennas, Propagations and EM Theory, 28 Oct. - 1 Nov. 2003, pp. 299-302.

[8] J. A. Stine, "Exploiting smart antennas in wireless mesh networks using contention access", IEEE Wireless Communications, vol. 13, no. 2, Apr. 2006, pp. 38-49.

[9] J. Rugamba, L. W. Snyman and A. Kurien, "Viability of using intelligent (smart) antenna systems in GSM cellular networks in Africa", International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 8-9 Nov. 2004, pp. 124-130.

[10] J. C. Leberti and T. S. Rappaport, *Smart antenna for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*, Prentie Hall PTR, 1999.

[11] C. C. Chang, T. Y. Chin, J. C. Wu and S. F. Chang, "Novel Design of a 2.5-GHz Fully Integrated CMOS Butler Matrix for Smart-Antenna Systems", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, no. 8, Aug. 2008, pp. 1757-1763.

[12] C. Collado, A. Grau and F. D. Flaviis, "Dual-band Butler matrix for WLAN systems", IEEE MTT-S International Micrwave Symposium, 12-17 Jun. 2005, pp. 4.

[13] T. D. Hong and P. Russer, "Signal processing for wideband smart antenna array applications," IEEE Microwave Magazine, vol. 5, pp. 57—67, Mar. 2004.

[14] H. J. Li and T. Y. Liu, "Comparison of beamforming techniques for W-CDMA communication systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 52, pp. 752—760, July 2003.

[15] L. C. Godara and M. R. S. Jahromi, "Limitations and capabilities of frequency domain broadband constrained beamforming schemes," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 47, pp. 2386—2395, no. 9, 1999.

[16] F. W. Vook and R. T. Compton, "Bandwidth performance of linear adaptive arrays with tapped delay-line processing," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, vol. 28, no. 3, pp. 901—908, July 1992.

[17] J. T. Mayhan, A. J. Simmons and W. C. Cummings, "Wide–band Adaptive Antenna Nulling Using Tapped Delay Lines," IEEE Transactions on Antenna and Propagation, vol. AP–29, no. 6, pp. 923–936, Nov. 1981.

[18] L. Y. Materum and J. S. Marciano, "Wideband Nulling Capability Estimate of a Tapped Delay Line Beamformer," IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology, 2003, pp. 386–387.

[19] M. Hefnawi and G. Y. Delisle, "Performance analysis of wideband smart antenna systems using different frequency compensation techniques," IEEE Symposium on Computers and Communications, 3-5 July 2001, pp. 237-242.

[20] M. Hefnawi and G. Y. Delisle, "Adaptive array performance with focussing technique," in digest IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 2, 13-18 July 1997, pp. 1016-1019.

[21] M. Uthansakul and M. E. Bialkowski, "A smart antenna with non-uniform components for a wideband communication system," in proc. Asia-Pacific Microwave Conference, vol. 3, 4-7 Nov. 2003, pp. 1542-1545.

[22] M. Uthansakul and M. E. Bialkowski, "Frequency-angle dependence compensation of non-uniform components for wideband smart antenna," in digest IEEE MTT-S International Microwave Symposium, vol. 2, 6-10 June 2004, pp. 1253-1256.

[23] M. J. Ammann, "Square planar monopole antenna," in poc. IEE Conference on Antennas and Propagation, 31 Mar. -1 Apr. 1999, pp. 37-40.

[24] K. L. Wong, C. H. Wu and S. W. Su, "Ultrawide-band square planar metal-plate monopole antenna with a trident-shaped feeding strip," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 4, pp. 1262-1269, Apr. 2005.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. M. Uthansakul and M. E. Bialkowski. (2007). Suppression of Multiple Wideband Interferers with the Use of a Wideband Spatial Beamformer. IEEE International Symposium on Antenna and Propagations, Honolulu, Hawaii, USA, pp.948-951.

2. M. Uthansakul and P. Uthansakul. (2007). Null Steering Scheme for Wideband Spatial Beamformer. 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, Thailand, pp.1-4.

ประวัติผู้วิจัย

ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปี พ.ศ. 2540 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia จนสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ Narrowband/Wideband Smart Antenna, Phased Array Processing, DOA Estimation Method, Null Steering Scheme จนถึงปัจจุบันตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 8 บทความ และบทความในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 27 บทความ และในปี 2551 ได้เป็นผู้เขียน Book Chapter ในหนังสือ Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, IGI GLOBAL, USA ในบท Wideband Smart Antenna avoiding Tapped-Delay Lines and Filters

ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ได้รับรางวัลที่สองของ Young Scientist Contest Award จากงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 16th International Conference Microwaves, Radar and Wireless Communications ปี พ.ศ. 2549 ณ ประเทศโปแลนด์ และได้รับรางวัล Highly Recommended prize in the Student Presentation Competition จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ 9th Australian Symposium on Antanna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย