



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบวิทยิกเพื่อรองรับสัญญาณแถบกว้างมาก

Data Transmission Enhancement for Ultra-Wideband Signal in WiGig Systems

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบวิทยุเพื่อรองรับสัญญาณแถบกว้างมาก

Data Transmission Enhancement for Ultra-Wideband Signal in WiGig Systems

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูทาสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับ
โครงการวิจัยนี้



ผู้วิจัย

ธันวาคม 2557

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันผู้ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) ต้องการอัตราข้อมูล (data rate) ที่สูงเพื่อรับส่งข้อมูลที่มีความละเอียดสูง ระบบไวไฟกิก (Wireless Gigabit: WiGig) เป็นระบบที่รองรับการสื่อสารไร้สายความเร็วสูงระดับ Gbps ภายใต้การใช้งานในแถบความถี่ 60 GHz ทางสถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) ได้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า IEEE 802.11ad ที่กำหนดขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว โดยให้อัตราข้อมูลสูงถึงระดับ Gbps สำหรับการใช้งานในพื้นที่จำกัด มาตรฐาน IEEE 802.11ad ถูกกำหนดให้ใช้ความถี่สูงบนแถบความถี่ 60 GHz แต่แต่ละประเทศได้จัดสรรสเปกตรัมที่แตกต่างกันไปโดยมีความกว้างแถบ (bandwidth) ไม่น้อยกว่า 3.5 GHz ซึ่งมากพอที่จะส่งข้อมูลในอัตราข้อมูลระดับ Gbps นอกจากนี้มาตรฐานนี้ยังกำหนดให้ใช้การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ในระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) เพื่อช่วยในการลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ปัญหาหนึ่งของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมคือ ผู้ใช้งานจะได้รับอัตราขยายสัญญาณ (signal gain) ต่ำในบางทิศทางทำให้ระบบไวไฟกิกมีอัตราผิดพลาดบิตสูง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดในการสร้างรูปแบบการก่อรูปลำคลื่นที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณเฉพาะในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำให้กับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม โดยการนำอัตราขยายสัญญาณของสองลำคลื่นที่อยู่ติดกันมาคำนวณด้วยวิธีการรวมแบบอัตราส่วนสูงสุด (Maximal Ratio Combining: MRC) เพื่อให้ได้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ และเลือกใช้ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิทช์ลำคลื่น (switched-beam antennas) เนื่องจากมีการคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณที่เข้าใจง่าย นอกจากนี้ยังได้ออกแบบอัลกอริทึมที่นำเสนอเพื่อให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นสามารถตัดสินใจได้ว่าต้องใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมหรือการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ หลังจากนั้นได้แสดงผลการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอที่ดีว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม ในแง่ของอัตราขยายสัญญาณที่มากขึ้นและอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำลง

Abstract

As Wireless Local Area Networks (WLANs) users recently demand plenty of high data rate for high definition information, Wireless Gigabit (WiGig) Alliance is an organization promoting the adoption of multi-gigabit speed wireless communications technology with IEEE 802.11ad standard. The standard has been approved working within 60 GHz band and also its spectrum has been differently allocated in various countries. In addition, the bandwidth spans over 3.5 GHz to support ultra-high rate transmission for indoor wireless applications. Also, the standard has been approved to utilize a beamforming technic based on smart antenna systems in order to mitigate interference signal. However, a signal loss is introduced at some direction when employing only original beamforming, hence the systems provide high bit error rate. Therefore, this thesis proposes a beamforming schemes to avoid the signal drop in some directions. The proposed signal gain value is calculated by maximal ratio combining method of two original signal gain values from two adjacent beams. This thesis work focus on the use of switched-beam antennas as it is not complicated. Moreover, the proposed algorithm help making a decision whether original or proposed beamforming scheme has to be employed in various scenarios. From computer simulation, the utilization of proposed beamforming provides higher performance in terms of signal gain and bit error rate comparing to original beamforming.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	5
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	5
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	5
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1	กล่าวนำ.....	7
2.2	ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	7
2.2.1	รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	7
2.2.1.1	การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว.....	7
2.2.1.2	การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง.....	8
2.2.2	เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณไร้สาย.....	9
2.2.2.1	ประเภทที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ.....	9
2.2.2.2	ประเภทที่ใช้สัญญาณอินฟราเรด.....	14
2.2.3	มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	14
2.3	ระบบวายกิก.....	17
2.3.1	ประวัติและความเป็นมาของระบบวายกิก.....	17
2.3.2	คุณลักษณะของระบบวายกิก.....	18
2.3.3	ช่องสัญญาณของระบบวายกิก.....	19
2.3.4	การส่งผ่านสัญญาณในระบบวายกิก.....	20
2.3.4.1	ภาคส่งของระบบวายกิก.....	21
2.3.4.2	ภาครับของระบบวายกิก.....	24
2.4	สายอากาศแฉวลำดับ.....	25
2.4.1	สายอากาศแฉวลำดับแบบเส้น.....	26
2.4.2	สายอากาศแฉวลำดับระนาบ.....	29
2.5	การก่อรูปลำคลื่นสำหรับระบบวายกิก.....	32
2.5.1	โครงสร้างของระบบการก่อรูปลำคลื่น.....	32
2.5.2	การกำหนดรหัสในการก่อรูปลำคลื่น.....	32
2.6	สรุป.....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การออกแบบอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณ	
	ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ.....	39
3.1	กล่าวนำ.....	39
3.2	การออกแบบการก่อรูปลำคลื่น.....	39
3.2.1	การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม.....	41
3.2.1.1	แบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 2 ต้น.....	43
3.2.1.2	แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 3 ต้น.....	46
3.2.1.3	แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น.....	52
3.2.2	การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ.....	60
3.3	การออกแบบอัลกอริทึมที่นำเสนอ.....	65
3.4	สรุป.....	72
4	การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์และวิเคราะห์ผล.....	75
4.1	กล่าวนำ.....	75
4.2	ผลการจำลองแบบของแถบกว้าง.....	75
4.3	ผลการจำลองแบบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ.....	80
4.3.1	การพิจารณาอัตราขยายสัญญาณ.....	81
4.3.1.1	ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณเทียบกับจำนวนครั้ง ในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน.....	81
4.3.1.2	อัตราขยายสัญญาณเทียบกับขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น.....	84
4.3.2	การพิจารณาเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม และแบบที่นำเสนอ.....	87
4.3.2.1	เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่ นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน.....	87
4.3.2.2	เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่ นำเสนอเทียบกับขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น.....	90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3 การพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอ.....	92
4.3.3.1 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน.....	92
4.3.3.2 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับขอบเขตการสวิทช์ลำคลื่น.....	94
4.3.4 การพิจารณาคัดเลือกหลายวิถี.....	96
4.3.5 การพิจารณาอัตราผิดพลาดบิต.....	99
4.4 สรุป.....	101
5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	103
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	104
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	109

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว.....8
2.2	การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง.....9
2.3	เทคโนโลยีการส่งผ่านสัญญาณวิทยุโดยใช้แถบแคบและ การแผ่สเปกตรัมที่มีการใช้ความกว้างแถบต่างกัน..... 10
2.4	การเปลี่ยนความถี่ของระบบการแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่.....11
2.5	การทำงานของมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ด้วยลำดับตรง.....13
2.6	การทำงานของมอดูเลตแบบสเปกตรัมแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก..... 14
2.7	การใช้งานในระบบวิทยุ..... 19
2.8	การจัดสรรความถี่แถบบนแถบความถี่ 60 GHz ของแต่ละพื้นที่.....20
2.9	สเปกตรัมของมาตรฐาน IEEE 802.11ad.....20
2.10	แผนภาพของภาคส่งของระบบวิทยุ.....21
2.11	แผนภาพของภาครับของระบบวิทยุ.....24
2.12	สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น.....26
2.13	สายอากาศแถวลำดับระนาบจำนวน 2×230
2.14	โครงสร้างของระบบการก่อรูปลำคลื่น.....33
2.15	แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น.....37
3.1	ระบบสายอากาศเก่ง.....40
3.2	โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น.....40
3.3	สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น.....42
3.4	แบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 2 ต้น.....46
3.5	แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 3 ต้น.....51
3.6	แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น.....59
3.7	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 และ 2 สำหรับการสร้างแบบรูป การแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น.....63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	แบบรูปการแผ่พลังงานที่อยู่ติดกันที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น.....68
3.9	แผนภาพการทำงานจากระบบการก่อรูปลำคลื่นที่นำเสนอ.....69
3.10	อัตรายายสัญญาณของ 4 ลำคลื่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับ 4 ต้น เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทาง 30°70
3.11	การกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น.....70
4.1	แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น จำนวน 4 ต้น โดยพิจารณาความถี่ 57-64 GHz78
4.2	อัตรายายสัญญาณสูงสุดในแต่ละความถี่.....79
4.3	อัตราผิดพลาดบิตของระบบวิทยุที่ใช้การส่งสัญญาณแบบการรวมส่งสัญญาณ แบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบบีพีเอสเค เมื่อพิจารณาผลกระทบของแถบกว้าง.....80
4.4	ค่าเฉลี่ยของอัตรายายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอ เทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์อุดมคติ.....82
4.5	ค่าเฉลี่ยของอัตรายายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอ เทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์ที่มี อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน.....83
4.6	การกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น.....84
4.7	ค่าเฉลี่ยของอัตรายายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขต การสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์อุดมคติ.....85
4.8	ค่าเฉลี่ยของอัตรายายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขต การสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณ ต่อสัญญาณรบกวน.....86
4.9	เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับ

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	อัตราผิดพลาดบิตของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเค เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทุกทิศทาง.....99
4.21	อัตราผิดพลาดบิตของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเค เมื่อผู้ใช้งาน อยู่ในทิศทางจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นเดิม.....99



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11.....	16
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาผลกระทบของแถบกว้าง.....	76
4.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาอัตราผิดพลาดบิตของแถบกว้าง.....	79
4.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาประสิทธิภาพของอัลกอริทึม.....	81
4.4	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาอัตราผิดพลาดบิตเมื่อใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอ.....	99



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายภายในพื้นที่จำกัด เช่น ในอาคารหรือที่พำนักอาศัย ปัจจุบันเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งจะเห็นได้จากอาคารส่วนใหญ่มีการติดตั้งระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายไว้เป็นส่วนหนึ่งของอาคาร การเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่ายจะต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ (access points)

มาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นมาตรฐานสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มาตรฐานล่าสุดที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่ IEEE 802.11n ซึ่งถูกพัฒนาให้มีอัตราข้อมูล (data rate) สูงสุดที่ 600 Mbps แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้งานที่ต้องการอัตราข้อมูลที่สูงขึ้นเพื่ออัตราข้อมูลที่มีความละเอียดสูง หรือที่เรียกว่าข้อมูลแบบเอชดี (High Definition: HD) ทำให้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่เรียกว่า IEEE 802.11ad ที่กำหนดขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว โดยให้อัตราข้อมูลสูงถึงระดับ Gbps มาตรฐาน IEEE 802.11ad ถูกกำหนดให้ใช้ความถี่สูงที่ความถี่ 60 GHz ซึ่งมาตรฐานนี้ทำงานในระบบวิทยุ (Wireless Gigabit: WiGig) ระบบวิทยุนี้จะจัดการเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายให้อัตราข้อมูลในระดับ Gbps ภายใต้การใช้งานที่ความถี่ 60 GHz แต่แต่ละประเทศได้จัดสรรสเปกตรัม (spectrum allocation) สำหรับความถี่ 60 GHz ที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา 57-64 GHz ประเทศญี่ปุ่น 59-66 GHz ประเทศจีน 59-64 GHz และประเทศในสหภาพยุโรป 57-66 GHz สังเกตได้ว่าการจัดสรรดังกล่าวมีความกว้างแถบ (bandwidth) ไม่น้อยกว่า 3.5 GHz ซึ่งมากพอที่จะสามารถรับส่งข้อมูลในอัตราข้อมูลระดับ Gbps

นอกจากนี้มาตรฐาน IEEE 802.11ad ยังได้กำหนดให้ใช้การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ในระบบเสาอากาศเก่ง (smart antenna systems) เพื่อช่วยในการลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ระบบเสาอากาศเก่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยเสาอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างสองส่วนหลักที่ได้กล่าวมา ทำให้ระบบสามารถก่อรูปลำคลื่นหลัก (main beam) ไปยัง

ทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) ที่สนใจ ในขณะที่เดียวกันระบบสามารถหันพูข้าง (sidelobes) หรือจุดศูนย์ (nulls) ไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางอื่นที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้ในเวลาเดียวกัน กระบวนการนี้เองเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ใช้สื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจมีคุณภาพดี และยังสามารถลดปัญหาของการแทรกสอดของช่องสัญญาณร่วม (co-channel interference) ลงได้

โดยทั่วไประบบสายอากาศเก่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สายอากาศแบบปรับตัว (adaptive antennas) และ สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched-beam antennas) องค์ประกอบหลักของสองระบบดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ และส่วนประมวลผลสัญญาณ แต่ส่วนที่ต่างกันก็คือรายละเอียดของส่วนประมวลผลสัญญาณ ส่วนประมวลผลสัญญาณของสายอากาศแบบปรับตัวจำเป็นต้องใช้ระบบประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลที่มีความสามารถในการประมวลผลขั้นสูง และยังต้องมีความเร็วสูงอีกด้วย ซึ่งต่างจากส่วนประมวลผลสัญญาณของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่อาศัยเพียงการกักแรงแวงจรมิพ้อย่างง่าย เพื่อนำมาสร้างเป็นโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ในทิศทางที่กำหนดไว้ก่อน จากนั้นลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณ (signal strength) สูงที่สุดจะถูกเลือกโดยตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ที่ไม่ต้องมีความเร็วสูงมากนัก เนื่องจากการใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำและไม่ซับซ้อน ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เมื่อเทียบกับสายอากาศแบบปรับตัว

สำหรับรูปแบบพื้นฐานของสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น โดยมีกลไกการทำงานคือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อทำการถ่วงน้ำหนักเนื่องจากสัญญาณที่มาตกกระทบยังสายอากาศแต่ละต้นมีมุมเฟสที่ต่างกันออกไป และสร้างลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด โดยอาศัยตัวเลือกลำคลื่นทำหน้าที่เลือกลำคลื่นไปยังสัญญาณที่เราต้องการ จึงทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้จากทิศทางของสัญญาณที่เราไม่ต้องการได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาได้มีการนำเสนองานวิจัยของ Junyi, W., Zhou, L., Chin-Sean, S., Chang-Woo, P., Jing, G., Baykas, T., Rahman, A., Funada, R., Kojima, F., Lakkis, I., Harada, H., and Kato, S. (2009). ได้ออกแบบสมการรหัสในการก่อรูปลำคลื่น (beamforming codebook) อย่างง่ายที่สามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงานได้เพียงกำหนดจำนวนสายอากาศที่ใช้และจำนวนลำคลื่น (beam) ที่ต้องการ แต่เนื่องจากแต่ละลำคลื่นนั้นให้อัตราขยายสัญญาณ (signal gain) สูงสุดที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณในทุกทิศทางมีค่า

ไม่สูงมากนัก จึงได้มีงานวิจัยของ Weixia, Z., Zhifang, C., Bin, L., Zheng, Z., and Yucong, Hu. (2011). ได้นำเสนอการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแต่ละลำคลื่นให้เท่าเทียมกัน ทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณในทุกทิศทางมีค่ามากขึ้น ส่วนงานวิจัยของ Li, C., Ying, Y., Xiaohui, C., and Weidong, W. (2011). ได้นำเสนอขั้นตอนการเลือกลำคลื่นเพื่อทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นทำงานได้เร็วขึ้น ซึ่งจากการศึกษาปริศน์วรรณกรรมที่กล่าวข้างต้นยังไม่พบการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางของจุดตัดระหว่างสองลำคลื่น นั่นคือตัวเลือกลำคลื่นไม่สามารถตัดสินใจได้ว่า จะเลือกลำคลื่นใด ทำให้ทิศทางนี้เป็นทิศทางที่ให้อัตราขยายต่ำสุดเมื่อเทียบกับทิศทางข้างเคียง ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากหากผู้ใช้งานจำเป็นต้องอยู่ในทิศทางนี้ตลอดเวลา

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดในการสร้างรูปแบบการก่อรูปลำคลื่นที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณเฉพาะในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำให้กับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม โดยการนำอัตราขยายสัญญาณของสองลำคลื่นที่อยู่ติดกันมาคำนวณด้วยวิธีการรวมแบบอัตราส่วนสูงสุด (Maximal Ratio Combining: MRC) เพื่อให้ได้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระบบวอยกิก ซึ่งประเภทของสายอากาศกึ่งที่ใช้ในการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์คือสายอากาศกึ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นด้วยเหตุผลที่ว่า สายอากาศกึ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นจะมีการคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณที่เข้าใจง่าย นอกจากนี้ยังได้ออกแบบอัลกอริทึมที่นำเสนอเพื่อให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นสามารถตัดสินใจได้ว่า จะใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมหรือการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ หลังจากนั้นจะแสดงผลการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอที่ดีกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม ในแง่ของอัตราขยายสัญญาณที่มากขึ้นและอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบอัลกอริทึม และจำลองผลการก่อรูปลำคลื่นในระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระบบวอยกิก

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 รูปแบบการก่อรูปลำคลื่นในระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานระบบวอยกิกได้

1.3.2 สามารถออกแบบอัลกอริทึมในการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับระบบวอยกิก

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) ในการจำลองผลการก่อรูปลำคลื่นด้วยวิธีการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำให้กับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม

1.4.2 ออกแบบอัลกอริทึมในการก่อรูปลำคลื่นที่เพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางดังกล่าว

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 จำลองผลการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้โปรแกรมแมทแลบ

1.5.2 ออกแบบอัลกอริทึมในการก่อรูปลำคลื่นที่เพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ

1.5.3 วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่างการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นด้วยวิธีการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบสายอากาศกึ่ง และมาตรฐาน IEEE 802.11ad
- 3) ศึกษาปัญหาในการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม
- 4) ศึกษาการเขียนโปรแกรมจำลองผลโดยใช้โปรแกรมแมทแลบ
- 5) ออกแบบรูปแบบการก่อรูปลำคลื่นที่สามารถแก้ปัญหาในการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม
- 6) สร้างแบบจำลองการก่อรูปลำคลื่นที่สามารถแก้ปัญหาในการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม โดยเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำให้กับการก่อรูป ลำคลื่นแบบเดิม

7) ออกแบบอัลกอริทึมในการก่อรูปลาคี้นด้วยวิธีการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ เพื่อนำไปสู่การสร้างชิ้นงานจริงในอนาคต

8) วิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2) ใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองผลการก่อรูปลาคี้นด้วยวิธีการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการก่อรูปลาคี้นสำหรับระบบวายกิก

3) วิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

2) โปรแกรมแมทแลบ

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้จากการจำลองผลการก่อรูปลาคี้นจะถูกนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยในรูปแบบของกราฟ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลาคี้นที่นำเสนอซึ่งจะสามารถเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำให้กับการก่อรูปลาคี้นแบบเดิมที่ใช้งานในระบบวายกิกได้

1.7.2 ได้อัลกอริทึมที่ช่วยให้ระบบการก่อรูปลาคี้นสามารถตัดสินใจเลือกลาคี้นที่ให้อัตราขยายสัญญาณสูงสุดได้อย่างถูกต้อง

1.7.3 สามารถนำแนวคิดนี้ไปสร้างชิ้นงานจริงในอนาคต

1.8 ส่วนประกอบของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบวายกิกสายอากาศแถวลำดับ และการก่อรูปลำคลื่นสำหรับระบบวายกิก

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบการก่อรูปลำคลื่นที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ และการออกแบบอัลกอริทึมที่นำเสนอ

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์จากโปรแกรมแมทแล็บ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของอัลกอริทึมโดยพิจารณาแถบความถี่กว้าง อัตราขยายสัญญาณ เฟอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่น เฟอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอ คลื่นหลายวิถี และอัตราผิดพลาดบิต

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

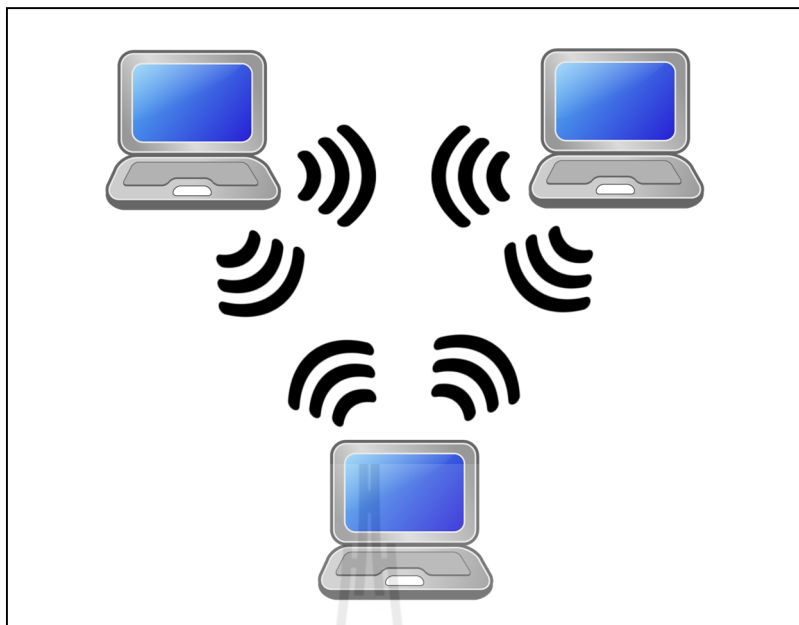
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมด 6 ส่วน ส่วนแรกคือการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองจะเป็นเรื่องของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยจะกล่าวถึงรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณไร้สาย และมาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ต่อมาในส่วนที่สามจะเป็นส่วนของระบบวายกิก โดยกล่าวถึงประวัติและความเป็นมาของระบบวายกิก คุณลักษณะของระบบวายกิก ช่องสัญญาณของระบบวายกิก และการส่งสัญญาณในระบบวายกิก ในส่วนที่สี่จะกล่าวถึงสายอากาศแถวลำดับที่ใช้ในระบบสายอากาศแก่ง โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเส้นและระนาบ ในส่วนที่ห้าจะกล่าวถึงการก่อรูปลำคลื่นสำหรับระบบวายกิก โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบการก่อรูปลำคลื่น การกำหนดครห์สในการก่อรูปลำคลื่น และตัวอย่างการก่อรูปลำคลื่น และส่วนสุดท้ายในส่วนที่หกจะเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

2.2 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) เป็นระบบที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง หรือกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่ายไร้สายเข้าด้วยกัน โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในแถบความถี่ที่แตกต่างกันไป เพื่อเป็นตัวกลางในการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายแทนการใช้สายเคเบิล ทำให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้งานเพราะไม่ต้องมีการเดินสายส่งสัญญาณ และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายเรื่องสายได้อีกด้วย ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Crow, B.P., Kim, L.G., Sakai, P.T., and Widjaja, I. (1997)

2.2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

2.2.1.1 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว (peer-to-peer หรือ ad hoc mode) เป็นการสื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ไร้สายตั้งแต่ 2 เครื่องเป็นต้นไป ซึ่งจะทำการ



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว

เชื่อมต่อกัน โดยตรงไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึง (access point) เครื่องคอมพิวเตอร์จะสื่อสารกัน โดยการแพร่ไฟล์ และติดต่อสื่อสารกันได้ภายในวงแลน แต่การเชื่อมต่อแบบนี้เครือข่ายไร้สายจะไม่สามารถติดต่อกับเครือข่ายมีสายได้ นอกจากนี้จะติดตั้งจุดเข้าถึงเพื่อให้จุดเข้าถึงทำการเชื่อมต่อและส่งข้อมูลไปยังเครือข่ายมีสายแทน รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว ซึ่งประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ทำการติดต่อสื่อสารกันโดยไม่ผ่านจุดเข้าถึง ข้อดีคือ ติดตั้งง่าย สะดวก และประหยัด แต่การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัวก็ยังมีข้อเสียในเรื่องของความปลอดภัยของข้อมูล เนื่องจากไม่มีการป้องกันในรูปแบบของบัญชีผู้ใช้ และรหัสผ่าน

2.2.1.2 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง (infrastructure) เป็นการเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยจุดเข้าถึงเป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณของข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์เครือข่ายไร้สายไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เครือข่ายมีสาย ถ้ามีการเข้าใช้เครือข่ายไร้สายโดยมีลูกข่ายจำนวนมากก็จะส่งผลทำให้ความเร็วในการสื่อสารไร้สายช้าลง ซึ่งในปัจจุบันการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้างได้รับความนิยมสูง และมีการพัฒนาเครือข่ายอย่างต่อเนื่องทั้งด้านความเร็วและความปลอดภัย รูปที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง โดยการติดต่อสื่อสารของเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะต้องผ่านจุดเข้าถึงเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างกันซึ่งมี



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อแบบกลุ่ม โครงสร้าง

ข้อดีคือ มีความปลอดภัยในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีระบบป้องกันในรูปแบบบัญชีผู้ใช้และการเข้ารหัส

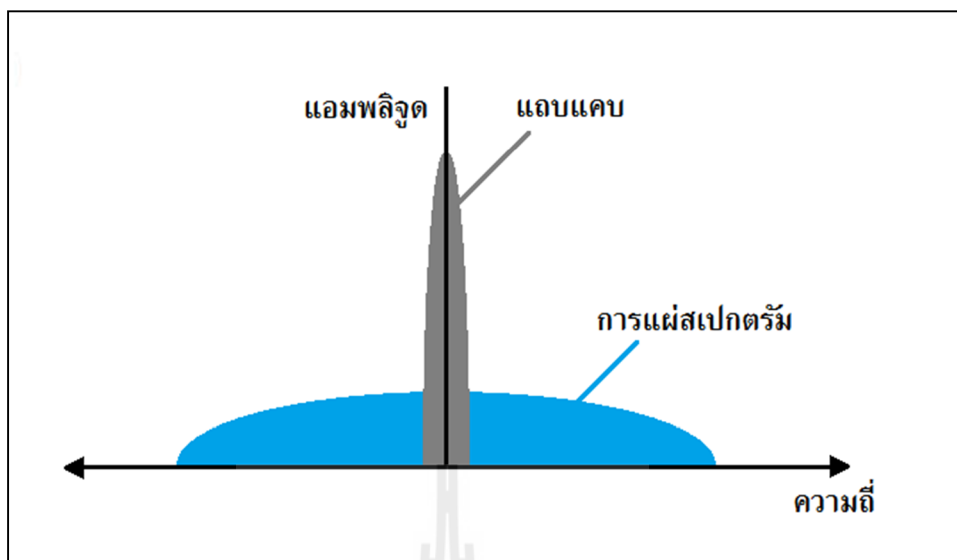
2.2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณไร้สาย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณไร้สาย แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.2.1 ประเภทที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ แบ่งเป็น

ก) เทคโนโลยีแถบแคบ (narrowband technology) : เมื่อปริมาณผู้ใช้งานมากขึ้น หนทางที่จะเพิ่มปริมาณช่องสัญญาณไว้ใช้สื่อสารคือ การแบ่งช่องให้เล็กลงและใช้ความกว้างแถบแคบลง จึงเป็นที่มาของคำว่า “แถบแคบ” เช่น โทรศัพท์มือถือระบบเอเอ็มพี (Advanced Mobile Phone Service: AMPS) ย่าน 800 MHz ที่นิยมใช้กันมากเมื่อสิบกว่าปีที่แล้ว ที่มีการแบ่งช่องสัญญาณเป็นช่องละ 30 kHz ต่อมาเมื่อมีผู้ใช้งานมากขึ้นการขอความถี่จากทางภาครัฐก็ลำบากวิธีหนึ่งที่ใช้กันก็คือ การเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ใช้ช่องสัญญาณเพียงช่องละ 10 kHz นั่นหมายความว่าสามารถเพิ่มความจุได้ถึง 3 เท่า

ด้วยวิธีการใช้ความกว้างแถบแบบแคบแบบนี้จะช่วยเพิ่มปริมาณผู้ใช้งานได้ แต่ก็ติดปัญหาคือ ต้องมีหน่วยงานจัดสรรคลื่นความถี่ ความถี่นั้นต้องถูกใช้งานและบริหารโดย

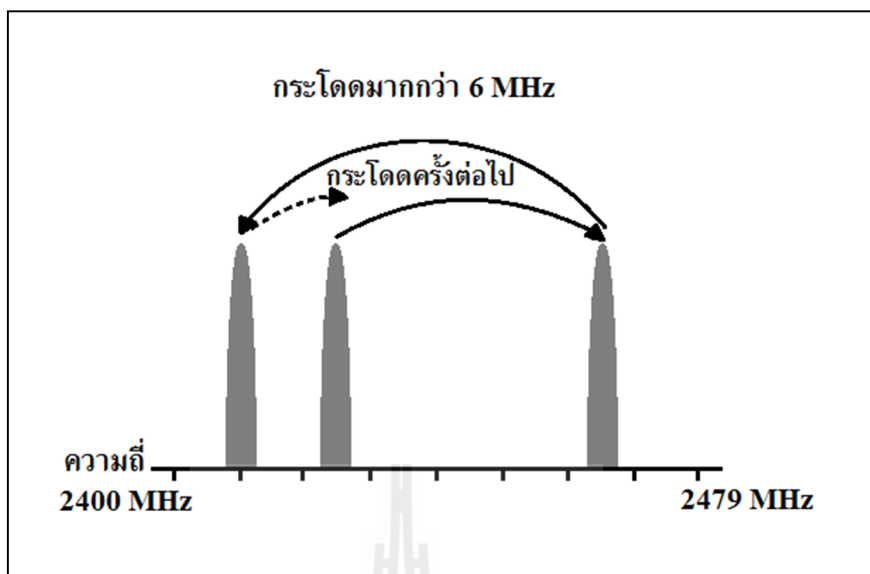


รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีการส่งผ่านสัญญาณวิทยุโดยใช้แถบแคบและการแผ่สเปกตรัม
ที่มีการใช้ความถี่ต่างกัน

ผู้ให้บริการเพียงรายเดียว จึงจะไม่เกิดปัญหาการรบกวนกัน หากปราศจากการบริหารความถี่ในระบบแถบแคบแล้ว มักจะใช้ช่องสัญญาณซ้ำกัน ทำให้รบกวนกัน ส่งผลให้ระบบสื่อสารล้มเหลว แต่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายนั้นยากที่จะบริหารความถี่เนื่องจากมีอุปกรณ์ไร้สายที่เราสามารถบริหารจัดการได้ และบริหารจัดการไม่ได้เนื่องจากเป็นของผู้อื่น

ข) เทคโนโลยีการแผ่สเปกตรัม (spread spectrum technology) : การใช้แถบกว้าง (wideband) ในการสื่อสารนั้นข้อมูลได้ถูกเข้ารหัสพิเศษที่จะมีการกระจายออกไปที่ความถี่ต่าง ๆ หากถูกรบกวนโดยคลื่นความถี่ที่ใช้ความถี่แถบไม่มาก ระบบก็จะสามารถกู้ข้อมูลหลักที่เสียหายไปกลับมาได้ นอกจากนี้ระบบการแผ่สเปกตรัมยังส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่ต่ำกว่าอีกด้วย นั่นหมายความว่า จะสามารถใช้ความถี่ซ้ำกันได้ในพื้นที่ห่างกันไม่มาก เพียงรื้อยกว่าเมตร ต่างจากระบบแถบแคบที่จะใช้กำลังส่งสูงมาก การใช้ความถี่ซ้ำนั้นจะอยู่ในระดับสิบกิโลเมตรขึ้นไป

ด้วยข้อดีที่มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี และสามารถใช้ความถี่ซ้ำได้ ในระยะไม่ไกลมาก การแผ่สเปกตรัมจึงถูกเลือกมาใช้ในการสื่อสารในระบบเครือข่ายไร้สายในย่านไอเอสเอ็ม (Industrial Sciences Medicine: ISM) หรือคลื่นความถี่สาธารณะสำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ ซึ่งการสื่อสารในย่านนี้เต็มไปด้วยสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์รอบข้าง เทคโนโลยีการแผ่สเปกตรัมมีวิธีการใช้ช่องสัญญาณ หลัก ๆ อยู่ 2 วิธีคือ การแผ่ -



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนความถี่ของระบบการแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่

สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS) ที่จะมีการกระโดดความถี่ไปเรื่อย ๆ เพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวน และการแผ่สเปกตรัมด้วยลำดับตรง (Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) ที่จะใช้การเข้ารหัสข้อมูลให้กระจายเต็มช่องสัญญาณ โดยรหัสนี้จะช่วยกู้ข้อมูลที่เสียหายจากการถูกรบกวนได้อีกด้วย

การแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่ เป็นเทคนิคที่ลดการชนกันของคลื่นวิทยุกลางอากาศ โดยการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการรับส่งไปเรื่อย ๆ เทคนิคนี้ถูกใช้งานกันมากในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยทหารมีจุดประสงค์หลักเพื่อไม่ให้ฝ่ายตรงข้ามดักฟังข้อมูลได้ ทางฝั่งผู้ส่งและผู้รับจะต้องรู้ลำดับในการเปลี่ยนคลื่นความถี่ หากฝ่ายตรงข้ามดักฟังก็ต้องเปลี่ยนความถี่ตามไปให้ได้ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่อีกฝ่ายจะรู้ลำดับการเปลี่ยนช่อง นั่นก็คือ การเปลี่ยนความถี่นี้ นอกจากจะช่วยป้องกันการดักฟังแล้ว ยังช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย เนื่องจากสัญญาณรบกวนมักจะเกิดที่ความถี่หนึ่ง ๆ การเปลี่ยนความถี่จึงสามารถหลบสัญญาณรบกวนได้

เทคนิคการแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่นี้ได้ถูกนำมาใช้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในยุคแรก ๆ ในมาตรฐาน 802.11 มีอัตราข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ 1 ถึง 2 Mbps มีข้อดีคือ วงจรนั้นออกแบบได้ง่ายมาก คล้ายคลึงกับการใช้งานอยู่ในวิทยุรับส่งทั่วไป เพียงแค่เพิ่มวงจรการเปลี่ยนช่องให้เป็นลำดับเข้าไป แม้ว่าเทคนิคการแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่จะถูกนำมาใช้งานเพียงช่วงสั้น ๆ เพราะรองรับความเร็วได้ไม่สูงมากนัก แต่ใน

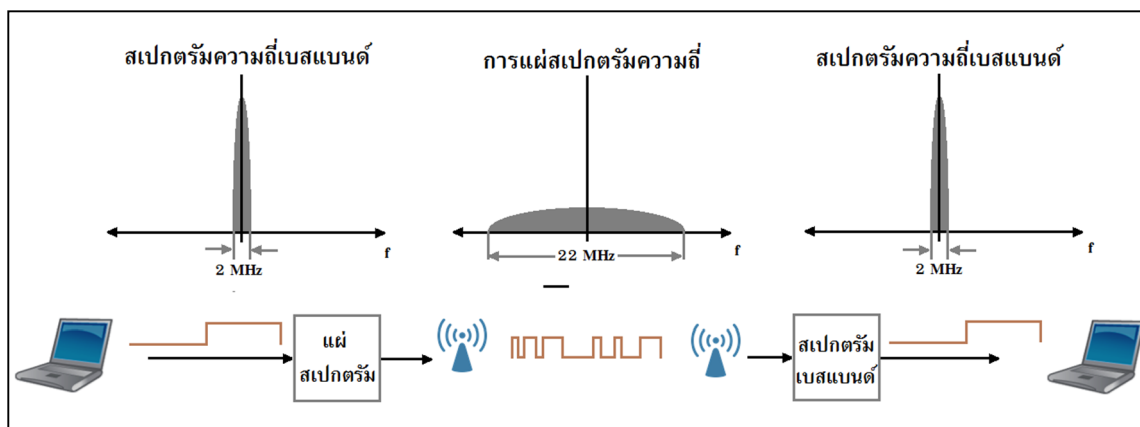
ปัจจุบันเทคนิคนี้ยังถูกนำมาใช้กับบลูทูธ (bluetooth) เนื่องจากต้นทุนต่ำ วงจรไม่ซับซ้อน และช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่ง

การทำงานของเทคนิคการแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่ดังรูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนความถี่ของระบบการแผ่สเปกตรัมด้วยการกระโดดเปลี่ยนความถี่ ซึ่งจะกระโดดเปลี่ยนความถี่โดยใช้ความกว้างแถบเท่ากับ 1 MHz และมีการกระโดดไปที่ความถี่ถัดไปโดยห่างจากความถี่เดิมอย่างน้อย 6 MHz ซึ่งจะกระโดดไปข้างหน้าหรือถอยหลังก็ได้ สาเหตุที่ต้องห่างจากความถี่เดิมถึง 6 MHz เนื่องจากวงจรภาคส่งนั้นไม่ได้ถูกใส่วงจรกรองความถี่ (filter) คุณภาพสูงมาด้วยเพื่อลดต้นทุน การเว้นระยะไว้มาก ๆ จะช่วยเป็นแถบกัน (guard band) ที่ช่วยลดปัญหาการรบกวนกันได้

การแผ่สเปกตรัมด้วยลำดับตรง เนื่องจากหนึ่งในปัญหาของระบบสื่อสารคือ เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในช่องสัญญาณที่ใช้งานจะทำให้ระบบสื่อสารล้มเหลว หนึ่งในวิธีแก้ปัญหานี้ก็คือ การกระจายพลังงานของสัญญาณออกไปในแถบกว้าง นั่นทำให้ความแรงของสัญญาณนั้นไม่สูงมาก ซึ่งก็คือ เทคนิคการแผ่สเปกตรัมที่เรียกว่า การแผ่สเปกตรัมด้วยลำดับตรง หมายถึง การใช้ลำดับตรงในการกระจายสเปกตรัมออกไปในแถบกว้าง ซึ่งเทคนิคนี้ถูกใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในมาตรฐาน 802.11 (DSSS) ในยุคเริ่มต้นที่มีความเร็ว 1 ถึง 2 Mbps และ 802.11b (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum: HR-DSSS) โดยคำว่า HR นั้น หมายถึง อัตราสูง (high rate) ซึ่งมีอัตราข้อมูลเท่ากับ 5.5 ถึง 11 Mbps

การทำงานของการทำงานของการแผ่สเปกตรัมด้วยลำดับตรงนั้นจะใช้ลำดับตรง หรือที่เรียกว่า “ชิปโค้ด (chip code)” มาเอ็กซ์คลูซีฟออร์ (Exclusive OR: XOR) กับข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ ข้อมูลใหม่ที่มีจำนวนบิตมากขึ้น และสเปกตรัมของสัญญาณจะกระจายออกไปในแถบกว้างอีกด้วย ในระบบเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน 802.11 นั้นจะใช้ชิปโค้ดที่แทนด้วยบาร์เกอร์โค้ด (barker code) ที่เป็นตัวเลข 10110111000 มาเอ็กซ์คลูซีฟออร์กับข้อมูล ทำให้ข้อมูลต้นฉบับที่ส่งเข้ามากระจายตัวจนเต็มช่องสัญญาณขนาด 22 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ค) การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) : เทคนิคที่ใช้ในการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากคือ แทนที่จะใช้ความถี่เดียวในการส่งผ่านสัญญาณดังเช่น ระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing: FDM) การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากจะแบ่งข้อมูลแล้วส่งออกไปตามคลื่นพาห่อย่อย (subcarrier) ข้อมูลก็จะกระจายตัวไปขนานจากต้นทางไปยังปลายทาง ต่างจากระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ที่ใช้คลื่นความถี่เดียวส่งอนุกรมกันไป การส่งผ่านสัญญาณในระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่นั้น นอกจากจะ

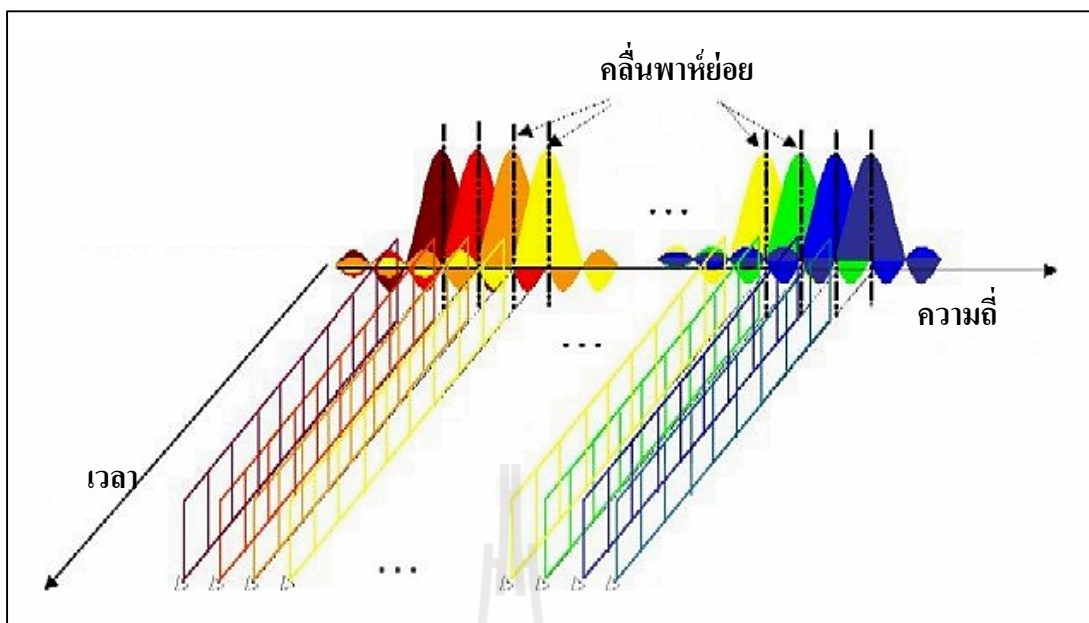


รูปที่ 2.5 การทำงานของการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ด้วยลำดับตรง

ต้องมีแถบกันป้องกันการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณแล้ว ยังเกิดปัญหาการใช้ความถี่แถบมากอีกด้วย จึงมีประสิทธิภาพในการใช้คลื่นความถี่ที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่จึงเริ่มหายไปจากท้องตลาด

ในกระบวนการการมอดูเลตทั่วไปจะต้องมีการเว้นระยะแถบกันเอาไว้ระหว่างช่องความถี่ต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณนั้น ๆ ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ความถี่แถบค่อนข้างต่ำ แต่สำหรับระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากนั้นจะอาศัยคลื่นพาห่อย่อยที่มีคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (orthogonal) กล่าวคือ คลื่นพาห่อย่อยจะไม่รบกวนกันแม้จะอยู่ในช่วงความถี่ที่มีการซ้อนทับกัน จึงสามารถเรียงคลื่นพาห่อย่อยนี้ได้มากกว่าในระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ทั่วไป

รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของ การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่ไม่มีการรบกวนกันระหว่างคลื่นพาห่อย่อย สังเกตได้จาก ณ จุดที่คลื่นพาห่อย่อยที่ 1 (subcarrier 1) มีค่าสูงสุด แต่คลื่นพาห่อย่อยอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเท่ากับ 0 และลักษณะนี้ก็จะเกิดขึ้นกับทุก ๆ คลื่นพาห่อย่อย หมายความว่า เมื่อเราวางคลื่นพาห่อย่อยไว้ใกล้กันก็จะไม่รบกวนกัน แต่คลื่นพาห่อย่อยนั้นต้องมีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากซึ่งสามารถสรุปง่าย ๆ คือ คลื่นพาห่อย่อยแต่ละตัวนี้จะต้องมีความถี่เป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่เป็นเท่าของกันและกัน ตัวอย่างเช่น คลื่นพาห่อย่อยที่ 1 มีความถี่เท่ากับ 1 kHz คลื่นพาห่อย่อยที่ 2 ต้องมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความถี่แรก และคลื่นพาห่อย่อยที่ 3 ต้องมีค่าเท่ากับ 3 เท่าของความถี่แรก โดยจำนวนเลขนี้จะเป็นเลขจุดทศนิยมไม่ได้ หมายความว่า เมื่อระบบมีคลื่นพาห่อย่อยอยู่ที่ 1 kHz แล้วเราจะสามารถส่งสัญญาณในระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากโดยใช้คลื่นพาห่อย่อยนี้ขนานกันไปบนความถี่ 1 kHz 2 kHz 3 kHz ลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 2.6 การทำงานของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก

จนถึงความถี่ของคลื่นพหุย่อยสุดท้าย โดยมีจำนวนคลื่นพหุย่อยตามต้องการ ระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความถี่ได้ เพราะไม่ต้องเว้นช่วงแถบกันไว้ดังเช่นระบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เดิม

2.2.2.2 ประเภทที่ใช้สัญญาณอินฟราเรด

ลำแสงอินฟราเรด (infrared) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราไม่สามารถมองเห็นได้เนื่องจากอยู่ในแถบความถี่ของแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงที่เรามองเห็นได้ ลำแสงอินฟราเรด ถูกนำมาใช้เพื่อการสื่อสารระยะใกล้ ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมแบบไร้สาย (wireless remote control) ที่ควบคุมเครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องเล่นวีดีโอ เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา คุณสมบัติเด่นของคลื่นอินฟราเรดและคลื่นสั้น คือ คลื่นเดินทางเป็นแนวตรง ราคาถูก และง่ายต่อการผลิตใช้งาน แต่คลื่นประเภทนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้

2.2.3 มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้น ได้ถูกกำหนดขึ้น โดยสถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือที่เรียกว่า ไอทริปเฟลิตี (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) ปัจจุบันนี้มีมาตรฐานออกมาหลายมาตรฐาน แต่ที่ได้รับความนิยมทั้งในอดีตและปัจจุบันนั้น แบ่งออกเป็น 7 มาตรฐานด้วยกัน ได้แก่

มาตรฐาน IEEE 802.11a เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี ค.ศ. 1999 โดยออกเผยแพร่ชื่อว่า มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก เพื่อปรับปรุงอัตราข้อมูลให้สูงถึง 54 Mbps โดยมีความกว้างแถบเท่ากับ 20 MHz ทำงานบนแถบความถี่ 5 GHz ซึ่งจะมีคลื่นรบกวนน้อยกว่าแถบความถี่ 2.4 GHz ที่มาตรฐานอื่นใช้กัน ที่อัตราข้อมูลนี้สามารถทำการแพร่ภาพและข่าวสารที่ต้องการความละเอียดสูงได้ สามารถปรับระดับของอัตราข้อมูลให้ช้าลงได้ เพื่อเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้มากขึ้น แต่ทว่าข้อเสียก็คือ แถบความถี่ 5 GHz นั้น หลาย ๆ ประเทศไม่อนุญาตให้ใช้ เช่น ประเทศไทย เพราะได้จัดสรรให้อุปกรณ์ประเภทอื่นไปแล้ว และเนื่องด้วยการที่มาตรฐานนี้ใช้การเชื่อมต่อที่ความถี่สูง ๆ ทำให้มาตรฐานนี้ มีระยะการรับส่งที่ค่อนข้างใกล้ คือ ประมาณ 35 เมตร ในโครงสร้างปิด (เช่น ในตึก ในอาคาร) และ 120 เมตรในที่โล่งแจ้ง และด้วยความที่การส่งข้อมูล (data transmission) ด้วยความถี่สูงนี้ ทำให้การส่งข้อมูลนั้นไม่สามารถทะลุทะลวงโครงสร้างของตึกได้มากนัก อุปกรณ์ไร้สายที่รองรับเทคโนโลยี IEEE 802.11a นี้ไม่สามารถเข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่จะอธิบายด้านล่างนี้ได้ อีกทั้งอุปกรณ์ของ IEEE 802.11a ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b มาก จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร

มาตรฐาน IEEE 802.11b เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี ค.ศ. 1999 ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า ซีซีเค (Complimentary Code Keying: CCK) ผสมการแผ่สเปกตรัมด้วยลำดับตรง เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราข้อมูลสูงสุดที่ 11 Mbps ทำงานบนแถบความถี่ 2.4 GHz เนื่องจากการใช้คลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11a ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้มาตรฐานนี้จะมีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณไปได้ไกลกว่าคือประมาณ 38 เมตรในโครงสร้างปิดและ 140 เมตรในที่โล่งแจ้ง รวมถึงสัญญาณสามารถทะลุทะลวงโครงสร้างตึกได้มากกว่าอุปกรณ์ที่รองรับกับมาตรฐาน IEEE 802.11a ด้วย ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายภายใต้มาตรฐานนี้ได้รับการผลิตออกมามีจำนวนมาก โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้เช่น IEEE 802.11 บลูทูธ โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ และที่สำคัญแต่ละผลิตภัณฑ์มีความสามารถทำงานร่วมกันได้ อุปกรณ์ของผู้ผลิตทุกยี่ห้อต้องผ่านการตรวจสอบจากพันธมิตรรายพาย (Wireless Fidelity Alliance: Wi-Fi) เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต ปัจจุบันนี้นิยมนำอุปกรณ์เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มาตรฐาน 802.11b ไปใช้ในองค์กรธุรกิจ สถาบันการศึกษา สถานที่สาธารณะ และกำลังแพร่เข้าสู่สถานที่พักอาศัยมากขึ้น มาตรฐานนี้มีระบบเข้ารหัสข้อมูลแบบความเป็นส่วนตัวเสมือนระบบที่ใช้สาย (Wired Equivalent Privacy: WEP) ที่ 128 บิต

มาตรฐาน IEEE 802.11g เสร็จสมบูรณ์ในปี ค.ศ. 2003 ทางคณะกรรมการ IEEE 802.11g ได้นำเอาเทคโนโลยีการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากของ 802.11a มาพัฒนาบนแถบความถี่ 2.4 GHz จึงทำให้ใช้อัตราข้อมูล 36-54 Mbps ซึ่งเป็นอัตราข้อมูลที่สูงกว่ามาตรฐาน 802.11b โดย 802.11g สามารถปรับระดับของอัตราข้อมูลลงเหลือ 2 Mbps ได้ตามสภาพแวดล้อมของเครือข่ายที่ใช้งาน มาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมากและเข้ามาแทนที่ 802.11b นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีบางผลิตภัณฑ์ใช้เทคโนโลยีเฉพาะตัวเข้ามาเสริม ทำให้อัตราข้อมูลเพิ่มขึ้นจาก 54 Mbps เป็น 108 Mbps แต่ต้องทำงานร่วมกันเฉพาะอุปกรณ์ที่ผลิตจากบริษัทเดียวกันเท่านั้น ซึ่งความสามารถนี้เกิดจากชิป (chip) กระจายสัญญาณของตัวอุปกรณ์ที่ผู้ผลิตบางรายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณเป็น 2 เท่าของการรับส่งสัญญาณได้ แต่ปัญหาของการกระจายสัญญาณนี้จะมีผลทำให้อุปกรณ์ ไร้สายในมาตรฐาน 802.11b มีประสิทธิภาพลดลงด้วยเช่นกัน

มาตรฐาน IEEE 802.11n เสร็จสมบูรณ์ในปี ค.ศ. 2009 ทำงานบนแถบความถี่ 2.4 และ 5 GHz ซึ่งเพิ่มความกว้างแถบเป็น 40 MHz โดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า ไม โม (Multiple Input Multiple Output: MIMO) เทคโนโลยีนี้จะใช้สายอากาศเก่งเพื่อทำการรับส่งข้อมูลเร็วยิ่งขึ้น และยังทำให้ระบบเกิดความเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มระยะทางในการใช้งานระบบได้มากขึ้น ทั้งยังมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงกว่า IEEE 802.11g ถึง 10 เท่า โดยมีอัตราข้อมูลสูงสุดที่ 600 Mbps มีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณได้ระยะประมาณ 70 เมตรในโครงสร้างปิด และ 250 เมตรในที่โล่งแจ้ง เพิ่มความสามารถในการกันสัญญาณกวนจากอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้แถบความถี่ 2.4 GHz เหมือนกัน และสามารถรองรับอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ได้

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน	ความถี่ (GHz)	ความกว้างแถบ (MHz)	การมอดูเลต	เทคโนโลยีทางสายอากาศ	ความเร็วสูงสุด
802.11	2.4	20	DSSS, FHSS	-	2 Mbps
802.11b	2.4	20	DSSS	-	11 Mbps
802.11a	5	20	OFDM	-	54 Mbps
802.11g	2.4	20	DSSS, OFDM	-	54 Mbps
802.11n	2.4, 5	20, 40	OFDM	ไม โม	600 Mbps
802.11ad	60	2160	SC, OFDM	การก่อรูปลำคลื่น	6.76 Gbps
802.11ac	5	40, 80, 160	OFDM	ไม โม (หลายผู้ใช้งาน)	6.93 Gbps

มาตรฐาน IEEE 802.11ad หรือวิทยิก ทำงานบนแถบความถี่สูงถึง 60 GHz และขยายความกว้างแถบเป็น 2.16 GHz ซึ่งจะเป็นการยกระดับมาตรฐานการเชื่อมต่อเครือข่ายในบ้าน (home networking) ที่สามารถเชื่อมต่อด้วยความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดถึง 7 Gbps เนื่องจากการใช้ความถี่ที่สูงมาก สัญญาณจึงถูกลดทอนมาก นั่นคือความสามารถในการทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางต่ำมาก ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้มาตรฐานนี้มีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณไปได้ในระยะทางสั้น ๆ เท่านั้น มาตรฐานนี้รองรับการทำงานทั้ง 3 แถบความถี่ (tri-band) ได้แก่ 2.4 GHz 5 GHz และ 60 GHz จึงสามารถทำงานกับระบบเก่าได้ นอกจากนี้ยังใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น ที่ใช้สายอากาศเก่งเช่นเดียวกับเทคโนโลยีโมโม แต่จะแตกต่างกันที่จำนวนสายอากาศของตัวรับสัญญาณ เทคโนโลยีการก่อรูปลำคลื่นนั้นช่วยลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอด ทั้งยังเพิ่มความแรงของสัญญาณ ทำให้เพิ่มระยะทางในการใช้งานระบบได้มากขึ้น

มาตรฐาน IEEE 802.11ac เป็นมาตรฐานที่ใช้แถบความถี่ 5 GHz และเพิ่มความกว้างแถบเป็น 2 เท่าหรือ 80 MHz และขยายความกว้างแถบเป็น 160 MHz จึงช่วยให้ความเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า โดยใช้เทคโนโลยีโมโมเช่นเดียวกับ IEEE 802.11n ในกรณีที่ตัวส่งสัญญาณมีสายอากาศ 8 ต้น และตัวรับสัญญาณมีสายอากาศ 2 ต้น จำนวน 4 ชุด จะสามารถใช้งาน 802.11ac ได้ด้วยอัตราข้อมูลเต็มທີ່ 6.93 Gbps แต่กับการใช้งานแบบทั่วไปน่าจะเป็นแบบตัวส่งสัญญาณมีสายอากาศ 2 ต้น และตัวรับสัญญาณมีสายอากาศ 2 ต้น จะทำให้อัตราข้อมูลสูงสุดของ 802.11ac ที่จะสามารถใช้งานได้อยู่ที่ 867 Mbps และ 1.73 Gbps สำหรับความกว้างแถบ 80 MHz และ 160 MHz ตามลำดับ

2.3 ระบบวิทยิก

2.3.1 ประวัติและความเป็นมาของระบบวิทยิก

เมื่อช่วงต้นปี ค.ศ. 2009 พันธมิตรวิทยิก (Wireless Gigabit Alliance: WiGig) ซึ่งมีสมาชิกเป็นบริษัทใหญ่หลายราย เช่น บอร์ดคอม อินเทล เอเอ็มดี ไมโครซอฟต์ ซิสโก้ ซัมซุง ควอลคอมม์ ได้รวมกันเป็นองค์กรเพื่อมุ่งเป้าพัฒนาการสื่อสารไร้สายสำหรับแถบความถี่ของคลื่นระดับมิลลิเมตร (millimeter wave frequency band) เพื่อสร้างมาตรฐานการเชื่อมต่อความเร็วสูงสำหรับใช้ภายในบริเวณจำกัด เช่น ภายในที่พักอาศัย ทั้งในสภาพแวดล้อมที่อยู่ในแนวสายตา (Line-of-Sight: LOS) และไม่อยู่ในแนวสายตา (Non-Line-of-Sight: NLOS) ภายใต้เครื่องหมายการค้าเพื่อบ่งบอกเทคโนโลยีนี้ที่มีชื่อเรียกว่า “วิทยิก”

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 2010 พันธมิตรวิทยิกได้ออกมาตรฐานแรกคือ วิทยิก รุ่น 1.0 ที่แสดงคุณสมบัติในชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (media access control layer) และชั้นกายภาพ

(physical layer) และต่อมาในช่วงต้นปี ค.ศ. 2011 จึงได้ออกมาตรฐานวายกิก รุ่น 1.1 ตามมา การเสนอข้อกำหนดของวายกิก รุ่น 1.0 มีส่วนทำให้ทางกลุ่ม IEEE 802.11 Task Group 'ad' (TGad) ได้นำเสนอคุณสมบัติฉบับสมบูรณ์ออกมาเช่นกันในชื่อ TGad รุ่น D0.1 ในช่วงกลางปี ค.ศ. 2010

ก่อนหน้านี้พันธมิตรวายกิกได้พัฒนาการสื่อสารไร้สายสำหรับสัญญาณความถี่สูงมากแข่งกับพันธมิตรวายไฟ แต่หลังจากที่มาตรฐาน IEEE 802.11ad-2012 ของทางพันธมิตรวายไฟได้ประกาศใช้ในช่วงปลายปี ค.ศ. 2012 ทั้งสองหน่วยงานได้มีความร่วมมือกันเปิดตัวมาตรฐานดังกล่าวด้วยการสนับสนุนจากพันธมิตรวายไฟ ซึ่งเป็นมาตรฐานเครือข่ายไร้สายที่คุ้นเคยกันอย่างดี ทั้งสองพันธมิตรได้ตกลงที่จะร่วมกันแบ่งปันในรายละเอียดของการพัฒนาเทคโนโลยีวายไฟใหม่ ๆ และวายกิกด้วยกัน ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันได้ทั้งสองมาตรฐาน ทำให้เครื่องรับส่งสัญญาณไร้สายตามบ้าน และสำนักงานสามารถรองรับความถี่ได้ทั้ง 2.4 GHz 5 GHz และ 60 GHz จึงใช้ได้ทั้งระบบเดิมและระบบใหม่

จุดเด่นของวายกิก เครือข่ายไร้สายความเร็วสูงกับความกว้างแถบที่มามากขึ้นทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลขนาดมหาศาลได้อย่างรวดเร็ว เหมาะสำหรับสตรีมมิ่งมัลติมีเดียโดยเฉพาะความบันเทิงภายในบ้านที่กำลังเข้าหาระบบ “เอชดี (High Definition: HD)” หรือความคมชัดสูงเชื่อมต่อได้ทั้งเครื่องเล่นบลูเรย์ เซ็ตท็อปบ็อกซ์ เครื่องเล่นเกม โทรศัพท์มือถือ และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั่วไป ซึ่งมีการชี้ให้เห็นภาพก็คือการถ่ายโอนข้อมูล ภาพยนตร์ดีวีดีขนาด 1 แผ่นสามารถถ่ายโอนข้อมูลได้เพียงไม่ถึง 10 วินาทีเท่านั้นเอง ทั้งนี้ความคืบหน้าของวายกิกนั้นได้รับการสนับสนุนจากสมาคมมาตรฐานอิเล็กทรอนิกส์วีดีโอ (Video Electronics Standards Association: VESA) เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของพอร์ตต่อพ่วงกับอุปกรณ์เครื่องเล่นทั้งหลาย ทั้งภาพเสียง และข้อมูลที่จะใช้เทคโนโลยีของวายกิกได้ ซึ่งทางวายกิกจะประกาศคุณสมบัติของแอปพลิเคชัน ซึ่งหมายถึงการถืออินเตอร์เฟซการแสดงผลและอุปกรณ์ต่อพ่วงคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังมีกลุ่มผู้สนับสนุนรายใหม่เข้ามาคือ ค่ายเอเอ็มดีโดยค่ายยักษ์อย่าง อินเทล ไมโครซอฟท์ ซัมซุง เดล โตชิบา โนเกีย เอ็นวีเดีย เอ็นอีซี และซิสโก้ เป็นต้น ได้ร่วมกันอยู่ในบอร์ดบริหารของวายกิกเรียบร้อยแล้ว

2.3.2 คุณลักษณะของระบบวายกิก

พันธมิตรวายกิกที่ได้กำหนดมาตรฐานเครือข่ายไร้สายความเร็วสูงในยุคต่อไปได้ออกมาตรฐานวายกิก 1.0 โดยมีคุณลักษณะเด่นดังนี้

- ก) รองรับอัตราข้อมูลสูงสุด 7 Gbps
- ข) เข้ากันได้กับมาตรฐาน IEEE 802.11 หรือวายไฟที่เราใช้กันทุกวันนี้
- ค) รองรับการทำงานแบบประหยัดพลังงาน และการทำงานประสิทธิภาพสูง

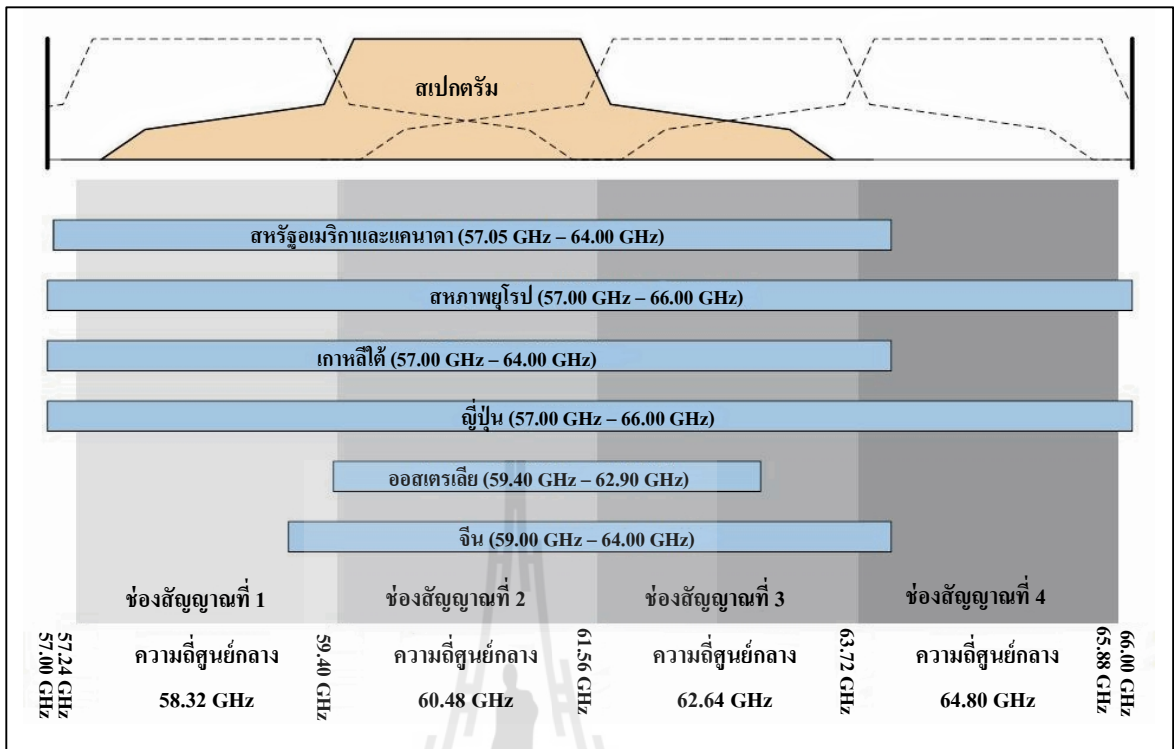


รูปที่ 2.7 การใช้งานในระบบไวไฟ

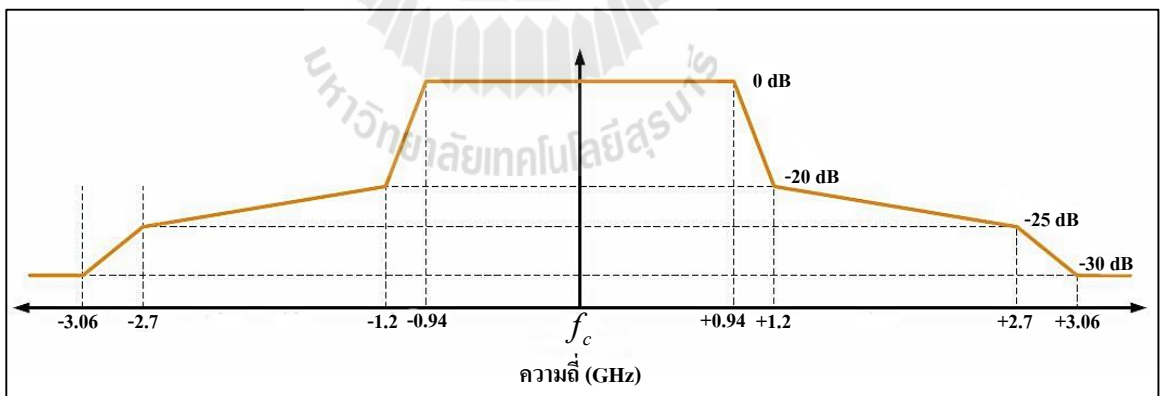
- ง) มีโปรโตคอลสำหรับการทำงานกับอุปกรณ์เฉพาะ เช่น จอภาพแบบเอชดี
- จ) รองรับการส่งข้อมูลแบบกำหนดทิศทางทำให้ทำงานได้ไกลขึ้น
- ฉ) มีมาตรฐานการเข้ารหัสและการจัดการพลังงานในตัว
- ช) รองรับการทำงานบนความถี่ 2.4 GHz 5 GHz และ 60 GHz

2.3.3 ช่องสัญญาณของระบบไวไฟ

รูปที่ 2.8 แสดงการจัดสรรความกว้างแถบบนแถบความถี่ 60 GHz ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ แต่ทุกพื้นที่จะมีความกว้างแถบไม่ต่ำกว่า 3.5 GHz อย่างเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดาได้จัดสรรความกว้างแถบอยู่ในช่วง 57.05 - 64.00 GHz มีความกว้างแถบเท่ากับ 6.95 GHz ส่วนประเทศจีนได้จัดสรรความกว้างแถบอยู่ในช่วง 59.40 - 62.90 GHz มีความกว้างแถบเท่ากับ 3.5 GHz สำหรับสเปกตรัมของมาตรฐาน IEEE 802.11ad แสดงดังรูปที่ 2.9 มาตรฐานดังกล่าวกำหนดว่าในหนึ่งช่องสัญญาณจะมีการกำหนดขนาดความกว้างแถบช่องละ 2.16 GHz ซึ่งช่องสัญญาณมีการซ้อนทับกันอยู่ โดยมีความถี่ศูนย์กลาง (center frequency: f_c) อยู่ที่ 58.32 GHz 60.48 GHz 62.64 GHz และ 64.80 GHz ตามลำดับ มีความกว้างด้านบนเท่ากับ 0.94 GHz ห่างจากความถี่ศูนย์กลางออกไปด้านละ 1.2 GHz จะต้องมีความแรงไม่เกินที่ -20 dB (1/100 เท่า) ห่างจากความถี่ศูนย์กลางออกไปด้านละ 2.7 GHz จะต้องมีความแรงไม่เกินที่ -25 dB (3.16 /1000 เท่า)



รูปที่ 2.8 การจัดสรรความถี่แถบความถี่ 60 GHz ของแต่ละพื้นที่



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของมาตรฐาน IEEE 802.11ad

2.3.4 การส่งผ่านสัญญาณในระบบวิทยุ

ระบบวิทยุใช้การส่งผ่านสัญญาณทั้งแบบคลื่นพาห์เดี่ยว (single carrier transmission) และแบบหลายคลื่นพาห์ (multi-carrier transmission) แต่อย่างไรก็ตามการที่จะบรรลุเป้าหมายของ

อัตราข้อมูลในระดับ Gbps ได้นั้นจำเป็นต้องใช้การส่งผ่านสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห์ ซึ่งการส่งผ่านสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห์นั้นระบบวายกิกใช้เทคโนโลยีการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ภาคส่งและภาครับ

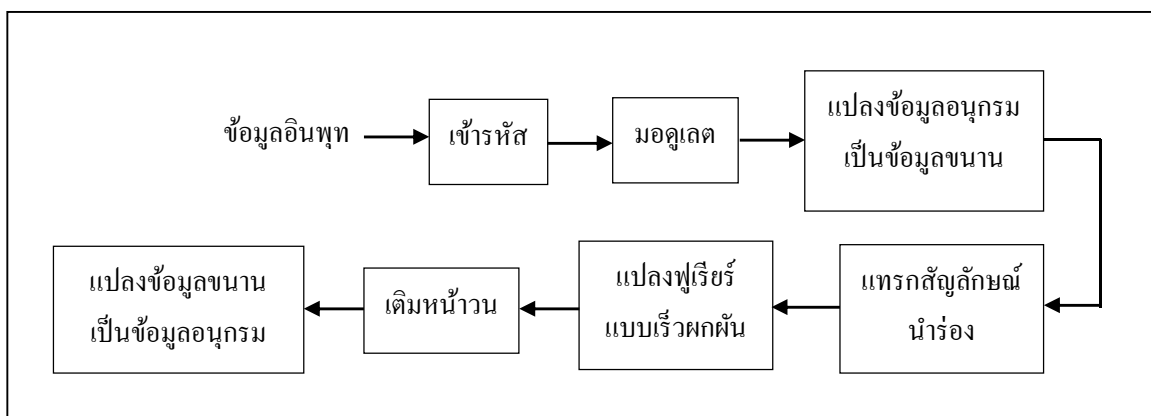
รูปที่ 2.10 สามารถแสดงแผนภาพของภาคส่งในระบบวายกิกได้ดังนี้ คือ ขั้นตอนแรกข้อมูลอินพุตจะเป็นข้อมูลเชิงสุ่ม (randomized) จากนั้นก็จะทำการเข้ารหัส (coding) แล้วก็ทำการมอดูเลตสัญญาณ ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีคลื่นพาห์ย่อยจำนวน 512 คลื่น

2.3.4.1 ภาคส่งของระบบวายกิก

ในหนึ่งสัญลักษณ์ (symbol) ของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก จะประกอบไปด้วยคลื่นพาห์ย่อยข้อมูล (data subcarriers) จำนวน 336 คลื่น คลื่นพาห์ย่อยว่าง (null subcarriers) จำนวน 157 คลื่น คลื่นพาห์ย่อยนำร่อง (pilot subcarriers) จำนวน 16 คลื่น และคลื่นพาห์ย่อยดีซี (DC subcarriers) จำนวน 3 คลื่น จากนั้นก็จะทำการรวมคลื่นพาห์ย่อยทุก ๆ คลื่นเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นก็จะทำกระบวนการการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วผกผัน (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) สุดท้ายก็จะทำการเติมหน้าวน (cyclic prefix) เข้าไปเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการรบกวนกันระหว่างสัญญาณ

ก) แหล่งกำเนิด (source)

ข้อมูลจะถูกสร้างขึ้นเป็นบิต จากนั้นก็จะทำการสุ่มข้อมูล ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเข้ารหัส (encryption) ในระดับเลขอร์แรกๆของข้อมูล เพื่อสร้างความปลอดภัยจากการดักฟังข้อมูลต่าง ๆ หลังจากนั้นก็จะส่งต่อไปยังส่วนการเข้ารหัส



รูปที่ 2.10 แผนภาพของภาคส่งของระบบวายกิก

ข) การเข้ารหัส

เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูล จึงต้องมีการเพิ่มความสามารถที่จะตรวจจับและแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด ในส่วนการเข้ารหัสนี้จะประกอบไปด้วย การเข้ารหัสแบบตัวเข้ารหัสความเร็วสูงและแบบรีดโซโลมอนที่ใช้ในระบบวายกิก

การเข้ารหัสแบบตัวเข้ารหัสความเร็วสูง (Low Density Parity

Check: LDPC)

ในระบบทั่วไปจะมีการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาดแบบการเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบไบนารี (binary convolutional coding) แต่เมื่อข้อมูลที่ต้องการส่งมีอัตราข้อมูลมากกว่า 300 Mbps นั้น ก็ต้องมีการแยกออกเป็น 2 ชุด เพื่อเข้ารหัสขนานกันไป เพราะการเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบไบนารีนั้นจะทำงานไม่ทัน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีผู้เสนอวิธีใหม่คือ การเข้ารหัสแบบตัวเข้ารหัสความเร็วสูง ซึ่งเป็นวิธีเข้ารหัสความเร็วสูงที่ถูกคิดค้นขึ้นมาโดย Gallager ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 โดยมีคุณสมบัติเด่นคือ ทำงานได้เร็วมาก สามารถถอดรหัสได้ง่ายกว่า และใช้พลังงานในการประมวลผลต่ำกว่า เนื่องจากภายในประกอบไปด้วยเมทริกซ์ ที่มีค่า 0 กับ 1 โดยจำนวนของเลข 1 มีน้อยกว่า

การเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน (Reed Solomon Encoder: RS)

รหัสนี้เป็นรหัสวนที่ไม่เป็นไบนารี (nonbinary cyclic codes) ในส่วนสัญลักษณ์ ทำขึ้นบนลำดับ m -bit โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มบวกที่มีค่ามากกว่า 2 รหัส $RS(n, k)$ กระทำบนสัญลักษณ์ m -bit สำหรับทุก n และ k จะมีค่า $0 < k < n < 2^m + 2$ โดยที่ k คือ จำนวนสัญลักษณ์ของข้อมูลเริ่มต้นในการเข้ารหัส และ n คือ จำนวนรวมของสัญลักษณ์รหัสในบล็อกการเข้ารหัส สำหรับรูปแบบการเข้ารหัส $RS(n, k)$ ที่ได้เป็น $(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t)$ โดย t คือ สัญลักษณ์ความผิดพลาดที่สามารถแก้ไขได้ของรหัส $n - k = 2t$ เป็นจำนวนสัญลักษณ์ของรหัสแก้ไข สำหรับรหัสรีดโซโลมอนนี้มีระยะห่างระหว่าง 2 คำรหัส (code word) จะกำหนดที่จำนวนสัญลักษณ์ที่แตกต่างในลำดับจะได้ระยะห่างต่ำสุด (minimum distance) เป็น $d_{\min} = n - k + 1$ รหัส เหมาะแก่การตรวจสอบแก้ไขความผิดพลาดเท่ากับ t หรือมีข้อผิดพลาดที่น้อยกว่า t สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.1)

$$t = \left\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n - k}{2} \right\rfloor \quad (2.1)$$

ค) การมอดูเลต (Modulation)

ในการสื่อสารแบบไร้สายนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการมอดูเลตสัญญาณ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณออกไปได้ การมอดูเลตก็คือ การเปลี่ยนข้อมูลบิตให้มาอยู่ในรูปของแอมพลิจูดและเฟส ซึ่งสามารถแสดงได้ในแผนภาพดวงดาว (constellation diagram) ในมาตรฐานของระบบวิทยุใช้รูปแบบการมอดูเลต 4 รูปแบบ คือ บีพีเอสเค (Binary Phase Shift Keying: BPSK) คิวพีเอสเค (Quadrature Phase Shift Keying: QPSK) 16-คิวเอเอ็ม (16- Quadrature Amplitude Modulation: 16-QAM) และ 64-คิวเอเอ็ม (64- Quadrature Amplitude Modulation: 64-QAM)

ง) การแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน (deserialization)

หลังจากผ่านการมอดูเลตสัญญาณแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการจัดข้อมูลใหม่โดยการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน เพื่อแบ่งข้อมูลเตรียมส่งออกไปตามคลื่นพาห่อย่อย

จ) การทำสัญลักษณ์นำร่อง

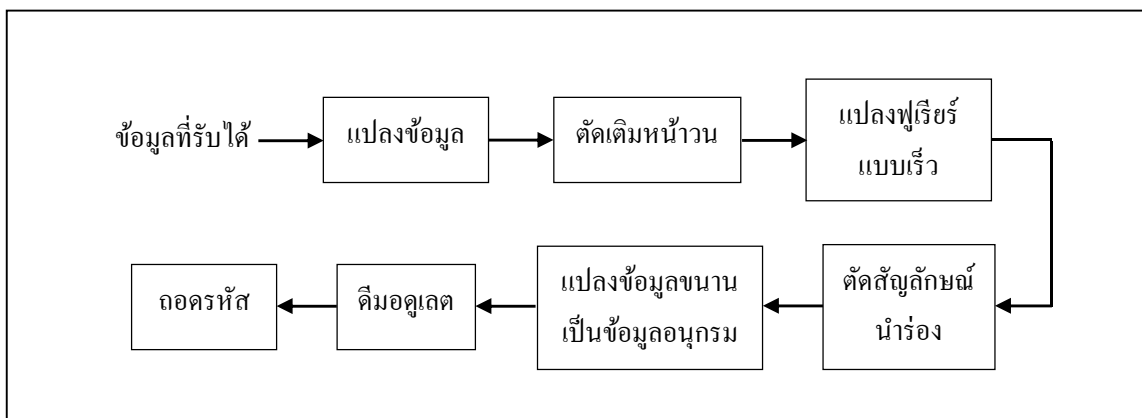
สัญลักษณ์นำร่องทำหน้าที่ในการชดเชยความถี่ (frequency offset) ที่ภากรับได้ และสามารถใช้ในการประมาณ ช่องสัญญาณ (channel estimation) ได้ สัญลักษณ์นำร่องนี้จะแทรกอยู่ในส่วนข้อมูลของคลื่นพาห่อย่อยของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก

ฉ) การทำกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วผกผัน

กระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วผกผันใช้สำหรับสร้างสัญญาณเชิงเวลา ซึ่งการมอดูเลตแบบนี้เป็นการมอดูเลตแบบขนาน เมื่อทำกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วผกผันแล้ว สัญญาณแต่ละคลื่นพาห่อย่อยจะตั้งฉากกัน ทำให้สเปกตรัมของแต่ละคลื่นพาห่อย่อยสามารถซ้อนทับ กันได้

ช) การเสริมสร้างการเติมหน้าวน

ในการจะทำให้สัญญาณของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากมีความทนทานต่อสัญญาณหลายวิถีและความหน่วงเวลา จะต้องทำให้สัญญาณของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากมีความหน่วงเวลามากกว่าสัญญาณที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญญาณ ในการจะเพิ่มให้สัญญาณของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากมีความหน่วงเวลามากขึ้นนั้นจะต้องทำการเพิ่มแถบกันเข้าไปในแต่ละสัญลักษณ์ของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก ซึ่งแถบกันนี้เป็นการคัดลอกส่วนท้ายของสัญลักษณ์ของการ



รูปที่ 2.11 แผนภาพของภาครับของระบบวายกิก

รวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากมาวางไว้ที่ส่วนหน้าของสัญญาณ หรือที่เรียกว่าการเดิมน้ำนวน

ข) การแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม (serialization)

เป็นกระบวนการย้อนกลับของการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน คือการจัดข้อมูลใหม่โดยการแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม เพื่อส่งออกข้อมูลไปยังช่องสัญญาณ

2.3.4.2 ภาครับของระบบวายกิก

รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพของภาครับในระบบวายกิก ซึ่งขั้นตอนแรกจะเป็นการเอาส่วนที่เป็นการเดิมน้ำนวนออก จากนั้นก็ทำกระบวนการการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ต่อจากนั้นก็ตัดส่วนน้ำนร่งออก ส่วนสุดท้ายก็จะเป็นการถอดรหัส (decoding)

ก) การแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน

หลังจากข้อมูลส่งผ่านช่องสัญญาณมายังภาครับแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการจัดข้อมูลใหม่โดยการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน เพื่อเตรียมทำการคัดแยกข้อมูล

ข) การตัดส่วนเดิมน้ำนวนออก

หลังจากแปลงเป็นข้อมูลขนานแล้ว จากนั้นจะตัดส่วนที่เป็นเดิมน้ำนวนที่อยู่ส่วนหน้าของสัญญาณออก เพื่อเข้าสู่กระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

ค) การทำกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

หลังจากข้อมูลที่ถูกตัดส่วนเต็มหน้าวนออก จากนั้นก็ทำกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว ซึ่งเป็นการทำกลับจากกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วผกผัน

ง) การตัดส่วนนำร่องออก

หลังจากทำกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วแล้ว จากนั้นจะตัดส่วนที่เป็นสัญลักษณ์นำร่องที่แทรกอยู่ในส่วนข้อมูลของคลื่นพาห่อย่อยของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากออก เพื่อจะได้ข้อมูลออกมา

จ) การแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม

เป็นกระบวนการย้อนกลับของการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน คือ การจัดข้อมูลใหม่โดยการแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม

ฉ) การดีมอดูเลต

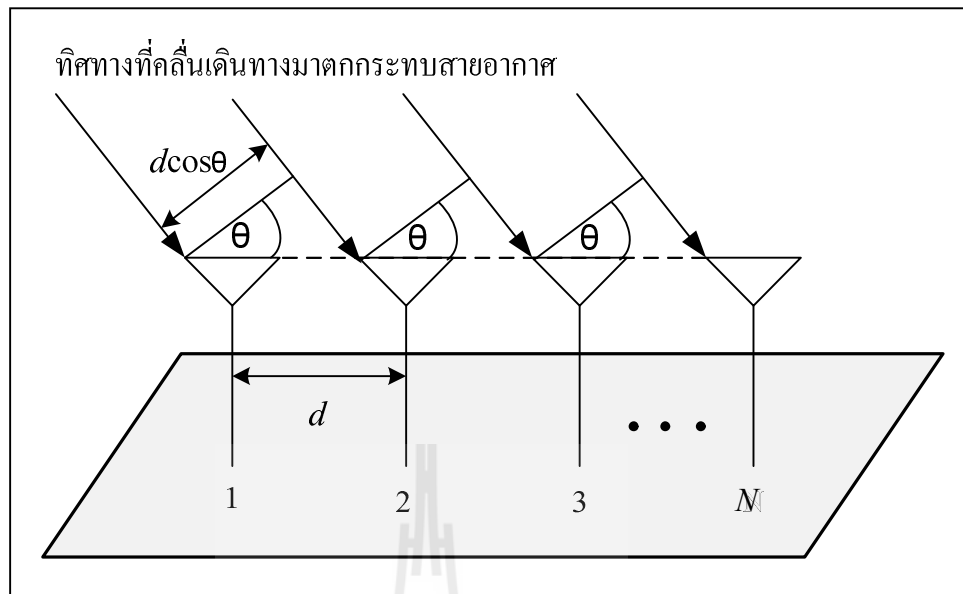
การดีมอดูเลตเป็นการเปลี่ยนจากสัญญาณในลักษณะรูปคลื่นเป็นสัญญาณในลักษณะตัวเลขหรือชุดของตัวเลข ซึ่งจะนำมาประมวลเป็นข้อมูลไบนารีหรือสัญลักษณ์เอ็มอะรี (M-ary) ต่อไป

ช) การถอดรหัส

ในส่วนนี้เป็นส่วนสุดท้ายในกระบวนการทางภาครับ เป็นการถอดรหัสเพื่อจะได้ข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่ง

2.4 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น เรียกว่า องค์ประกอบ (element) การนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งจะทำได้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่จำเป็นมากต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรอง (side lobes) หรือจุดศูนย์ (nulls) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น สายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นและสายอากาศแถวลำดับระนาบ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.12 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

2.4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (linear array antennas) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.12 เป็นสายอากาศแบบแบบเส้นจำนวน N ต้นหรือ $N \times 1$ ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการ (2.2)

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น

ในรูปที่ 2.12 แสดงถึงสายอากาศแบบแบบเส้น $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและมีแอมพลิจูดเท่ากัน ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน

มีการป้อนกระแสให้กับทุกองค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่า ๆ กัน เราสามารถหาค่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ (U_{array}) นี้จากการคูณกันระหว่างค่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิด (U_{ant}) กับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor: AF) ดังแสดงในสมการ (2.3)

$$U_{array} = U_{ant} \times AF \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปแล้วในตำราต่าง ๆ จะนิยมใช้สายอากาศต้นเดียวเป็นจุดกำเนิดสัญญาณหรือสายอากาศไอโซทรอปิก (isotropic antenna) ที่มีคุณสมบัติแผ่พลังงานในทุกทิศทางรอบตัวเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับจึงมีค่าเท่ากับตัวประกอบแถวลำดับนั่นเอง ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.4)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.5)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.6)$$

เมื่อ $\psi = kd \cos \theta + \beta$ k คือหมายเลขคลื่น (wave number) เท่ากับ $2\pi/\lambda$ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นและ β คือ ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการ (2.6) เราสามารถลดรูปของสมการได้ดังนี้

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j\psi(N-1)} + e^{jN\psi} \quad (2.7)$$

แทนสมการ (2.6) ลงใน (2.7) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

$$(AF)(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.8)$$

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$\begin{aligned}
 AF &= \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] \\
 &= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right] \\
 &= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \tag{2.9}
 \end{aligned}$$

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ $d = 0$ และ $\beta = 0$ และ $\psi = kd \cos\theta + \beta = 0$ ดังนั้นสมการ (2.9) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \tag{2.10}$$

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

$$AF \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{\psi}{2}} \right] \tag{2.11}$$

ค่าสูงสุดของสมการ (2.10) และ (2.11) จะมีค่าเท่ากับ N เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเป็นมาตรฐาน เราจึงต้องกำหนดให้ค่าสูงสุดของแต่ละสมการเท่ากับหนึ่ง ดังนั้น

สมการมาตรฐานของตัวประกอบแวลด์ำดับคือ

$$AF_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.12)$$

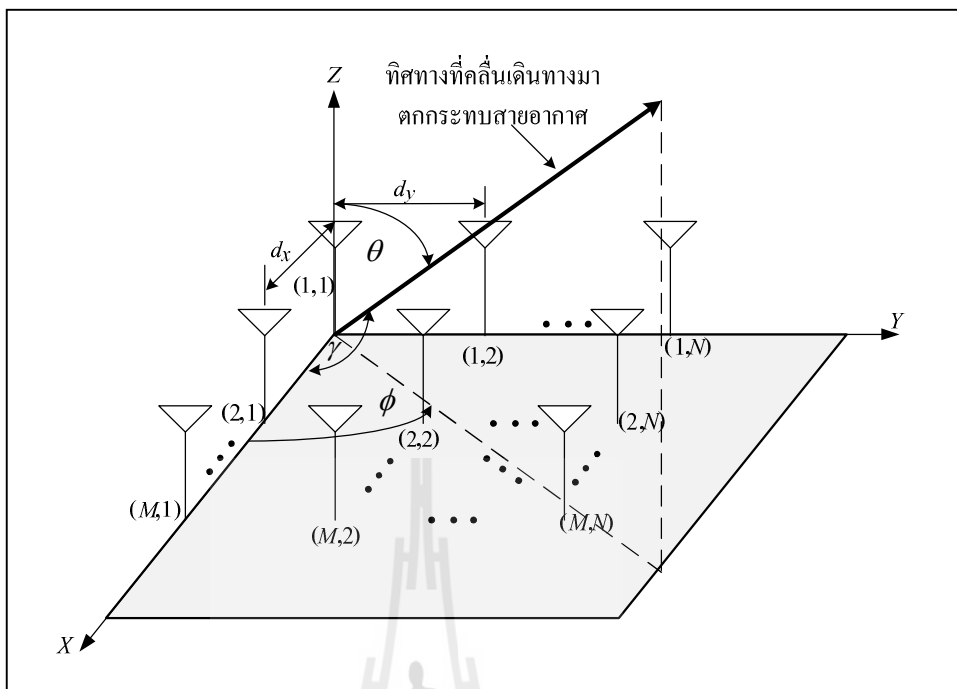
$$AF_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.13)$$

2.4.2 สายอากาศแวลด์ำดับระนาบ

สายอากาศแวลด์ำดับระนาบ (planar array antennas) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจาก รูปแบบสายอากาศแวลด์ำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายในหัวข้อย่อยที่ 2.4.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าสายอากาศแวลด์ำดับระนาบ สายอากาศแวลด์ำดับระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบแบบเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้ ดังนั้นสายอากาศแวลด์ำดับระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแวลด์ำดับระนาบสามารถที่จะหันพูหลักในมุมเงยและทุก ๆ ทิศรอบตัว 360° ดังนั้นสายอากาศแวลด์ำดับระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาห์ การชี้ทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สายและรวมถึงระบบสายอากาศเก่งด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ Allen, B., and Ghavami, M. (2005).

เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแวลด์ำดับระนาบโดยใช้สมการ (2.13) ได้เช่นเดียวกับสายอากาศแวลด์ำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแวลด์ำดับแตกต่างกันซึ่งสามารถหาได้ โดยเริ่มจากพิจารณามุม γ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะได้

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \hat{a}_x \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.13 สายอากาศแถวลำดับระนาบจำนวน 2x2

เมื่อ \hat{a}_x , \hat{a}_y , \hat{a}_z และ \hat{a}_r คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน x , y , z และ r ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

$$AF_x = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \cos \gamma + \beta_x)}$$

$$= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \quad (2.15)$$

เมื่อ I_{m1} คือค่าสัมประสิทธิ์ที่กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_x คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ β_x คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

$$AF_y = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.16)$$

เมื่อ I_{1n} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y รวมกันหรือที่เรียกว่าระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.17)$$

สมมติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \quad (2.18)$$

และกำหนดให้แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยจะได้ $I_{mn} = I_0$ ดังนั้นเราสามารถลดรูปสมการ (2.17) ลงเหลือเท่ากับ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.19)$$

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการ (2.12) และ (2.13) ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2.20)$$

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (2.21)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y \quad (2.22)$$

2.5 การก่อรูปลำคลื่นสำหรับระบบวายกิก

ระบบวายกิกเป็นระบบที่รองรับด้วยมาตรฐาน IEEE 802.11ad ที่ได้กำหนดให้ใช้ความถี่สูงในย่าน 60 GHz โดยการใช้คลื่นความถี่สูงนี้แสดงถึงความยาวคลื่นที่สั้นทำให้คลื่นไม่สามารถผ่านสิ่งกีดขวางได้ คลื่นจึงถูกกีดขวางมากและเดินทางไปได้ไม่ไกล ดังนั้นมาตรฐานดังกล่าวจึงได้กำหนดให้ใช้เทคโนโลยีการก่อรูปลำคลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สัญญาณมีความแรงมากขึ้นและยังช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้อีกด้วย

2.5.1 โครงสร้างของระบบการก่อรูปลำคลื่น

โครงสร้างของการก่อรูปลำคลื่นนั้นแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยที่ตัวส่งสัญญาณประกอบด้วยสายอากาศจำนวน N_t ต้น ในขณะที่ตัวรับประกอบด้วยสายอากาศจำนวน N_r ต้น ตัวส่งสัญญาณจะส่งชุดข้อมูลที่ถูกประมวลผลสัญญาณแล้วไปยังช่องสัญญาณ โดยที่มุมเฟส (phase) ของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามการปรับเวกเตอร์น้ำหนัก (weight vector) ที่สายอากาศแต่ละต้นของตัวส่งสัญญาณ ต่อจากนั้นตัวรับสัญญาณจะได้รับสัญญาณที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้นของตัวรับสัญญาณ

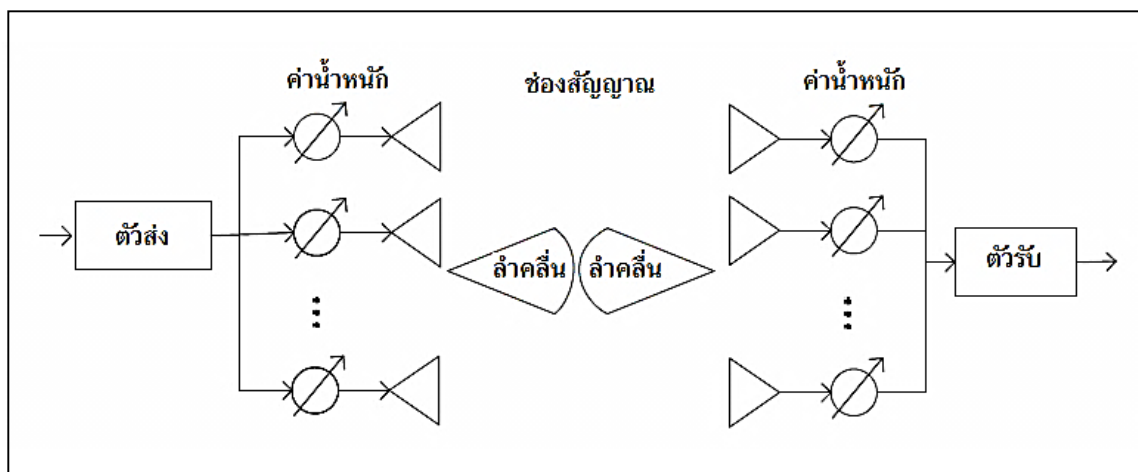
การก่อรูปลำคลื่นมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ เช่น ผลกระทบของสัญญาณรบกวน ความจุของช่องสัญญาณ เป็นต้น โดยการเลือกเวกเตอร์น้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ การถ่วงน้ำหนักในการก่อรูปลำคลื่นนั้นมีความสามารถในการหันพู่คลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ (desired signal) และหันพู่รอง (side lobe) หรือตำแหน่งศูนย์ (null) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด

2.5.2 การกำหนดรหัสในการก่อรูปลำคลื่น

การกำหนดรหัสในการก่อรูปลำคลื่น (beamforming codebook) สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นใน 1 มิติ โดยใช้สายอากาศจำนวน N ต้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$W = \begin{bmatrix} w(1,1) & w(1,2) & \dots & w(1,K) \\ w(2,1) & \dots & \dots & w(2,K) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w(N,1) & w(N,2) & \dots & w(N,K) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

สมการ (2.23) แสดงรหัสในการก่อรูปลำคลื่นที่อยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด $N \times K$ สำหรับการใส่สายอากาศแถวลำดับจำนวน N ต้น โดยที่แต่ละคอลัมน์ของเมทริกซ์บ่งบอกถึงเวกเตอร์น้ำหนัก ซึ่งจะได้แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานออกมาทั้งหมด K แบบ จะเห็นว่าใน 1 คอลัมน์ มีค่าน้ำหนักทั้งหมด N ค่า ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้นใน



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของระบบการก่อรูปลำคลื่น

จำนวน N ต้น ยกตัวอย่างคอลัมน์ที่ 1 เป็นค่าน้ำหนักของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 1 โดยที่สายอากาศต้นที่ 1 จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าน้ำหนักในตำแหน่ง $w(1,1)$ ส่วนสายอากาศต้นที่ 2 จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าน้ำหนักในตำแหน่ง $w(2,1)$ ส่วนสายอากาศต้นที่ 3 จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าน้ำหนักในตำแหน่ง $w(3,1)$ เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงสายอากาศต้นที่ N จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าน้ำหนักในตำแหน่ง $w(N,1)$

เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้ได้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ ซึ่งตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการ (2.24)

$$AF(k, \theta) = \sum_{n=1}^N w(n, k) e^{j2\pi(n-1)(d/\lambda_2) \cos \theta} \quad (2.24)$$

ค่าน้ำหนักคำนวณได้จากสมการ (2.25)

$$w(n, k) = e^{j2\pi(n-1)((k-1)/N)}$$

เมื่อ $n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K$ (2.25)

โดยที่ $w(n, k)$ คือรหัสในการก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศต้นที่ n และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบที่ k ส่วน N คือจำนวนสายอากาศที่วางตัวเรียงกันเป็นแนวตรงหรือวางตัวแบบ

$N \times 1$ ต้น ส่วน d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น ส่วน λ_2 คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศ และ θ คือมุมตกกระทบของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น

จากสมการ (2.25) เราสามารถหาค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ N และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ K ได้ สมมติว่าเราต้องการค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 3 และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} w(3,4) &= e^{j2\pi(3-1)((4-1)/4)} \\ &= e^{j3\pi} = -1 \end{aligned} \quad (2.26)$$

หากเรากำหนดหารหัสในการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4 ต้น และต้องการแบบรูปพลังงานทั้งหมด 4 แบบ จะได้ผลดังนี้

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & j & -1 & -j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -j & -1 & j \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

อีกแนวคิดของการออกแบบค่าน้ำหนักในเมทริกซ์ของรหัสในการก่อรูปลำคลื่นที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศคือ แนวคิดจากงานวิจัยของ J. Wang, Z. Lan, C-S. Sum, C-W Pyo, J. Gao, T. Baykas, A. Rahman, R. Funada, F. Kojima, I. Lakkis, H. Harada and S. Kato (2009) ที่มีแนวคิดการออกแบบดังสมการ (2.28)

$$w(n,k) = j^{\text{floor}\left\{\frac{(n-1) \times \text{mod}((k-1)+(K/2),K)}{K/4}\right\}}$$

$$\text{เมื่อ } n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \quad (2.28)$$

โดยที่ $w(n,k)$ คือรหัสในการก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศต้นที่ n และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบที่ k ส่วน N คือจำนวนสายอากาศที่วางตัวเรียงกันเป็นแนวตรงหรือวางตัวแบบ

$N \times 1$ ต้น ส่วน d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น j มีค่าเท่ากับ $\sqrt{-1}$ ส่วนฟังก์ชัน $\text{floor}()$ จะแสดงค่าจำนวนเต็มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าในวงเล็บ ส่วนฟังก์ชัน $\text{mod}(X, Y)$ มีค่าเท่ากับสมการ $X - mY$ เมื่อ m คือค่าจำนวนเต็มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่า X/Y หรือ $m = \text{floor}(X/Y)$ และ $Y \neq 0$

จากสมการ (2.28) เราสามารถคำนวณหารหัสในการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศ แถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4 ต้น และต้องการแบบรูปพลังงานทั้งหมด 4 แบบ จะได้ผลดังนี้

$$W_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -j & 1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & j & 1 & -j \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เมื่อเปรียบเทียบรหัสในการก่อรูปลำคลื่นในสมการ (2.27) และ (2.29) พบว่าค่า น้ำหนักมีความคล้ายคลึงกัน คือ $w_1(n,1) = w_2(n,3)$ $w_1(n,2) = w_2(n,4)$ $w_1(n,3) = w_2(n,1)$ และ $w_1(n,4) = w_2(n,2)$ นั่นแสดงว่าทั้งสองสมการจะให้แบบรูปการแผ่พลังงานออกมาเหมือนกัน ทั้ง 4 แบบ ดังนั้นเราจึงสามารถเลือกใช้ได้ทั้งสองสมการ สำหรับงานวิจัยฉบับนี้เราได้เลือกใช้ แนวคิดของ J. Wang, Z. Lan, C-S. Sum, C-W Pyo, J. Gao, T. Baykas, A. Rahman, R. Funada, F. Kojima, I. Lakkis, H. Harada and S. Kato (2009) เนื่องจากไม่มีฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนน้อย และเพื่ออ้างอิงผลการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ว่าได้ผลเหมือนกับ แนวคิดนี้

หลังจากที่เราได้รหัสในการก่อรูปลำคลื่นจากสมการ (2.29) แล้ว เราสามารถ คำนวณหาแบบรูปการแผ่พลังงานได้จากสมการ (2.24)

$$\begin{aligned} AF(k, \theta) &= \sum_{n=1}^4 w_2(n, k) e^{j2\pi(n-1)(d/\lambda_2) \cos \theta} \\ &= \sum_{n=1}^4 w_2(n, k) e^{j2\pi(n-1)((\lambda_1/2)/\lambda_2) \cos \theta} \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยที่ W_2 คือรหัสในการก่อรูปลำคลื่นที่แสดงในสมการ (2.29) ส่วน N คือจำนวนสายอากาศที่ วางตัวเรียงกันเป็นแนวตรงหรือวางตัวแบบ $N \times 1$ ต้น ส่วน d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น λ_1 คือความยาวคลื่นของสายอากาศแต่ละต้น ส่วน λ_2 คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่ เข้า

มาตกกระทบสายอากาศ และ θ คือมุมตกกระทบของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น

สมการความยาวคลื่นของสายอากาศแต่ละต้นมีค่าเท่ากับ

$$\lambda_1 = c / f_1 \quad (2.31)$$

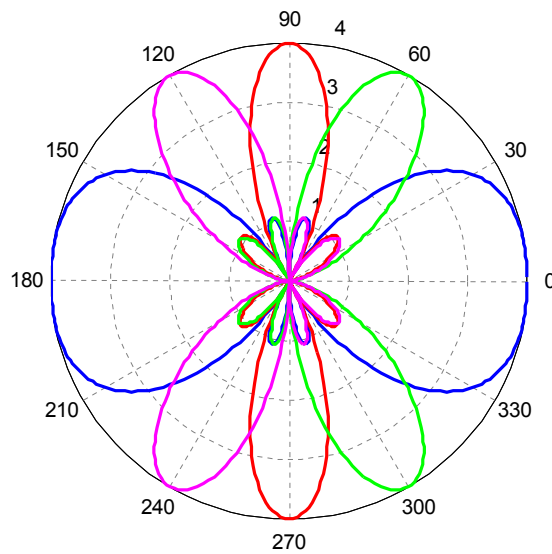
สมการความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศมีค่าเท่ากับ

$$\lambda_2 = c / f_2 \quad (2.32)$$

โดยที่ c คือความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s ส่วน f_1 และ f_2 คือความถี่ในส่วนของสายอากาศแต่ละต้นและความถี่ของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศ ตามลำดับ เนื่องจาก f_1 และ f_2 มีค่าเท่ากับ 60 GHz ดังนั้น $\lambda_1 = \lambda_2$ เราจึงสามารถลดรูปสมการ (2.30) ได้ดังสมการ (2.33)

$$\begin{aligned} AF(k, \theta) &= \sum_{n=1}^4 w_2(n, k) e^{j2\pi(n-1)(1/2)\cos\theta} \\ &= \sum_{n=1}^4 w_2(n, k) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \end{aligned} \quad (2.33)$$

เมื่อแทนค่า θ เท่ากับ 1 องศาจนถึง 360 องศา ลงในสมการ (2.33) เราจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานออกมาทั้งหมด 4 แบบ โดยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 1 คำนวณจากค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 ของเมทริกซ์ W_2 จะได้กราฟเส้นเรียบ แบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 2 คำนวณจากค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 2 ของเมทริกซ์ W_2 จะได้กราฟเส้นจุด แบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 3 คำนวณจากค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 3 ของเมทริกซ์ W_2 จะได้กราฟเส้นประ และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 4 คำนวณจากค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 4 ของเมทริกซ์ W_2 จะได้กราฟเส้นประผสมจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะสังเกตเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานหรือลำคลื่นทั้ง 4 แบบ มีอัตราขยายสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ทิศทาง 40 องศา 75 องศา 105 องศา 140 องศา 220 องศา 255 องศา 285 องศา และ 320 องศา ซึ่งเป็นทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 2.15 แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น

2.6 สรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ จะเห็นว่า ระบบวิทยุเป็นระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่เกิดจากความร่วมมือระหว่างพันธมิตรวิทยุและพันธมิตรสายไฟ เพื่อเป้าหมายในการพัฒนาการสื่อสารไร้สาย โดยมีมาตรฐาน IEEE 802.11ad รองรับการทำงาน ซึ่งกำหนดให้ระบบวิทยุทำงานบนแถบความถี่ 60 GHz แต่ละประเทศได้จัดสรรสเปกตรัมอยู่ในช่วง 57 - 66 GHz จะเห็นได้ว่าความกว้างแถบมีมากที่สุดถึง 9 GHz จึงส่งผลให้ระบบวิทยุสามารถส่งผ่านสัญญาณโดยให้อัตราข้อมูลได้สูงสุดในระดับ Gbps แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้ความถี่สูงก็คือสัญญาณจะเดินทางไปได้ไม่ไกล เนื่องจากสัญญาณจะถูกลดทอนจากสภาพแวดล้อม ดังนั้นการสื่อสารในระบบวิทยุจึงเน้นไปที่การใช้งานในพื้นที่จำกัด เช่น ในบริเวณที่พักอาศัย

นอกจากนี้มาตรฐานดังกล่าวยังได้กำหนดให้ใช้เทคโนโลยีการก่อรูปลำคลื่นในระบบสายอากาศแก่ที่มีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบวิทยุ ระบบสายอากาศแก่เป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแฉลัดและระบบประมวลผลสัญญาณ สายอากาศแต่ละต้นจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ ด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างสองส่วนหลักนี้ทำให้ระบบสามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจ ในขณะที่เดียวกันระบบสามารถหันพู่ข้างหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางอื่นที่ถือว่าเป็น

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้ในเวลาเดียวกัน กระบวนการนี้เองเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น ซึ่งจะ
ทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ใช้สื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจมีคุณภาพดี และยังสามารถลดปัญหาของการแทรกสอดของช่องสัญญาณร่วมลงได้

งานวิจัยฉบับนี้จึงต้องการปรับปรุงการก่อรูปลำคลื่นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากการ
สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า งานวิจัยอื่น ๆ ไม่ได้คำนึงถึงอัตราขยายสัญญาณต่ำในบางทิศทาง
นั่นคือทิศทางที่อยู่ระหว่างจุดตัดของลำคลื่นที่อยู่ติดกัน ซึ่งจะมีผลอย่างมากหากผู้ใช้งานต้องอาศัย
อยู่ในทิศทางนั้นตลอดเวลา จากปัญหาดังกล่าวเราจึงได้มีแนวคิดในการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับ
การสร้างลำคลื่นใหม่เพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางนั้น โดยเลือกใช้สายอากาศแถวลำดับ
แบบเส้นเพื่อใช้ในการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อย สำหรับแนวคิดใน
การก่อรูปลำคลื่นที่จะนำเสนอ นั้นจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3

การออกแบบอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณ ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ

3.1 กล่าวนำ

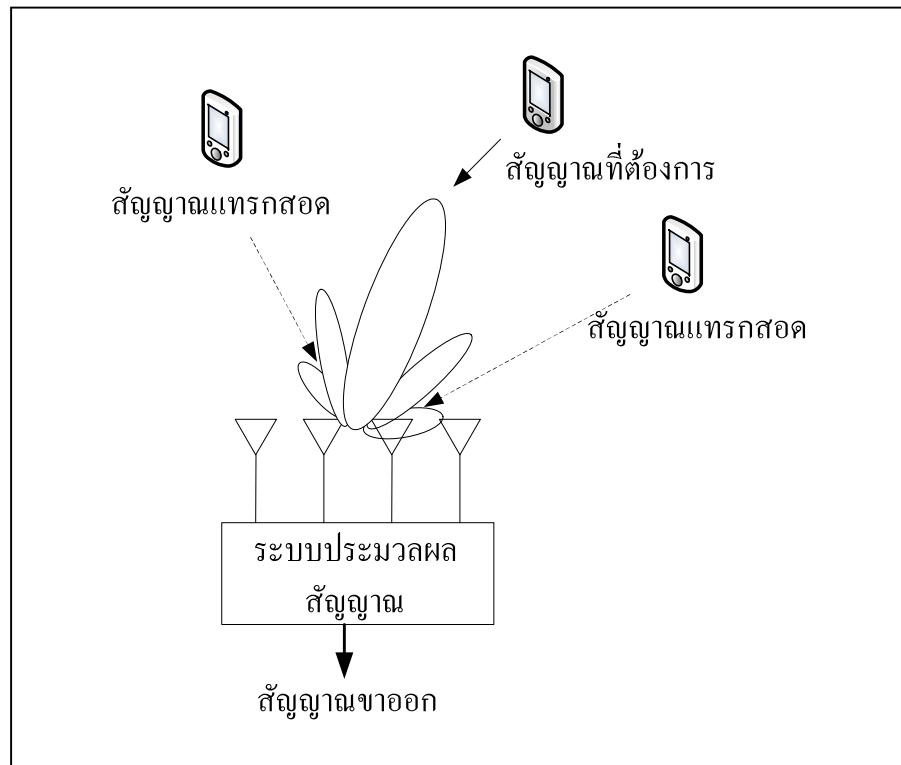
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ เพื่อนำไปใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในระบบวิทยุคมนาคมความถี่ 60 GHz งานงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเนื่องจากมีการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าสายอากาศแถวลำดับระนาบ โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ และใช้ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ในส่วนของการออกแบบอัลกอริทึมดังกล่าวเราจะใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองผลเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอและเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์จริงต่อไป

3.2 การออกแบบการก่อรูปลำคลื่น

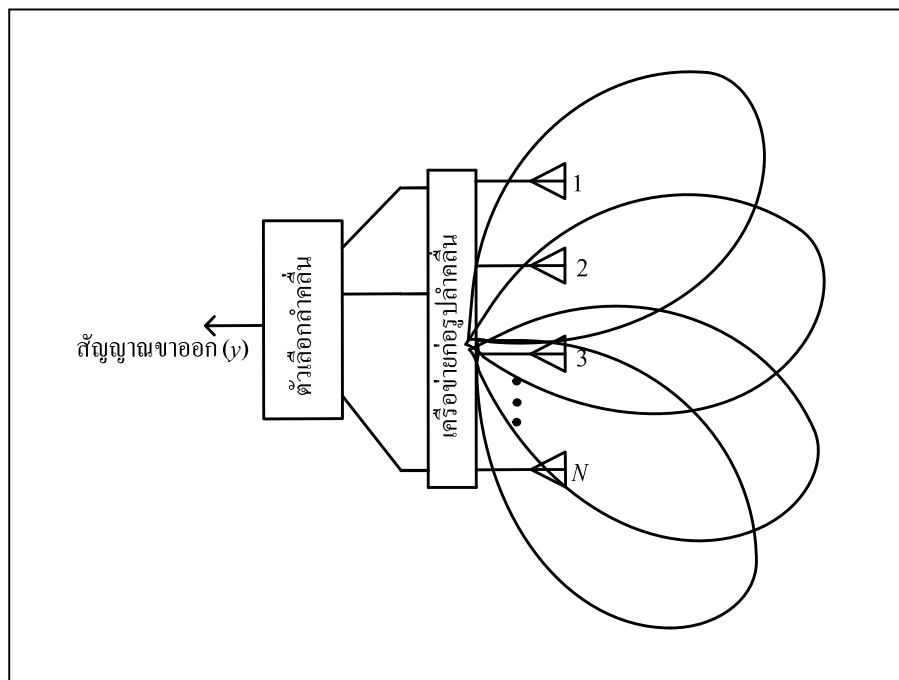
การก่อรูปลำคลื่นเป็นกระบวนการที่เกิดจากการทำงานของระบบสายอากาศเก่งดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่ประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับและระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ซึ่งในระบบประมวลผลสัญญาณจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction-of-Arrival: DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น

งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีหลักการทำงานที่มีความซับซ้อนน้อยคือ สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจะเลือกลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงสุดไปยังสัญญาณที่ต้องการได้ โดยใช้เพียงเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming networks) ที่ถูกกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้นประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) โดยมีหลักการทำงานดังนี้

- ก) สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจสอบหาทิศทางความแรงของสัญญาณ



รูปที่ 3.1 ระบบสายอากาศแก่่ง



รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแก่่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

- ข) ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นในทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด
- ค) ใช้ลำคลื่นที่ตัวเลือกลำคลื่นได้ทำการเลือกไว้เมื่อผู้ใช้งานไม่มีการเคลื่อนที่
- ง) ทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นใหม่เมื่อมีความแรงของสัญญาณมาจากทิศทางอื่น ๆ

3.2.1 การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม

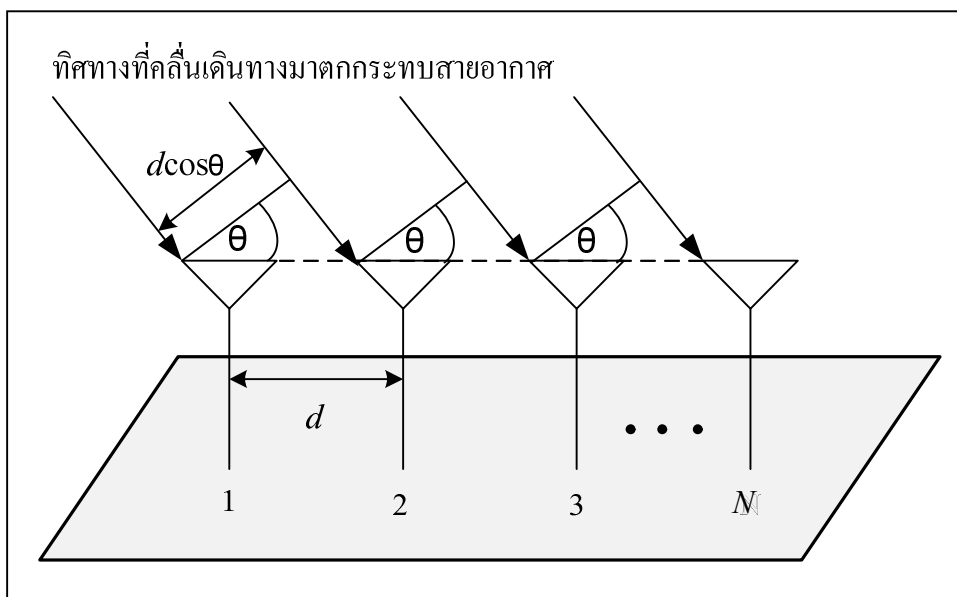
การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมของระบบวายกิกจะประกอบด้วยส่วนสำคัญในสมการตัวประกอบแถวลำดับ นั่นคือ ค่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น โดยระบบวายกิกจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่หลายชุดในรูปของเมทริกซ์ขนาด $N \times K$ ดังแสดงในสมการ (3.1) เราเรียกเมทริกซ์นี้ว่า หนักในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่ง N คือจำนวนสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น ส่วน K คือจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานหรือจำนวนลำคลื่นที่เราต้องการ เราสามารถหารหนักในการก่อรูปลำคลื่นได้เพียงกำหนดจำนวนสายอากาศที่ใช้และจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ

$$W = \begin{bmatrix} w(1,1) & w(1,2) & \dots & w(1,K) \\ w(2,1) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w(N,1) & w(N,2) & \dots & w(N,K) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

หลังจากที่ได้รหนักในการก่อรูปลำคลื่นแล้ว เราสามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงานได้โดยใช้สมการตัวประกอบแถวลำดับ โดยทั่วไปแล้วในตำราต่าง ๆ จะนิยมใช้สายอากาศไอโซทรอปิก (isotropic antenna) ที่มีคุณสมบัติแผ่พลังงานในทุกทิศทางรอบตัวทำกัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับจึงมีค่าเท่ากับตัวประกอบแถวลำดับนั่นเอง ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการ (3.2)

$$AF(k, \theta) = \sum_{n=1}^N w(n, k) e^{j2\pi(n-1)(d/\lambda_2)\cos\theta} \quad (3.2)$$

โดยที่ $w(n, k)$ คือรหนักในการก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศต้นที่ n และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบที่ k ส่วน N คือจำนวนสายอากาศที่วางตัวเรียงกันเป็นแนวตรงหรือวางตัวแบบ $N \times 1$ ต้น ส่วน d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น λ_2 คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่ -



รูปที่ 3.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศ และ θ คือมุมตกกระทบบนของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศแต่ละต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3

รหัสในการก่อรูปลำคลื่นอย่างง่ายสามารถหาได้จากสมการ (3.3)

$$w(n, k) = j^{\text{floor}\left\{\frac{(n-1) \times \text{mod}((k-1) + (K/2), K)}{K/4}\right\}}$$

เมื่อ $n = 1, \dots, N$; $k = 1, \dots, K$ (3.3)

โดยที่ j มีค่าเท่ากับ $\sqrt{-1}$ ส่วนฟังก์ชัน $\text{floor}()$ จะแสดงค่าจำนวนเต็มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าในวงเล็บ ส่วนฟังก์ชัน $\text{mod}(X, Y)$ มีค่าเท่ากับสมการ $X - mY$ เมื่อ m คือค่าจำนวนเต็มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่า X/Y หรือ $m = \text{floor}(X/Y)$ และ $Y \neq 0$

งานวิจัยชิ้นนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ ($\lambda_1/2$) โดยที่ λ_1 คือความยาวคลื่นของสายอากาศ เนื่องจากความถี่ในส่วนของสายอากาศและความถี่ของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศมีค่าเท่ากันคือ 60 GHz ($f_1 = f_2$) ดังนั้นความยาวคลื่นของสายอากาศและความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบบนสายอากาศจะมีค่าเท่ากันด้วย ($\lambda_1 = \lambda_2$) สมการ (3.2) จึงสามารถลดรูปได้ดังสมการ (3.4)

$$\begin{aligned}
 AF(k, \theta) &= \sum_{n=1}^N w(n, k) e^{j2\pi(n-1)(1/2)\cos\theta} \\
 &= \sum_{n=1}^N w(n, k) e^{j\pi(n-1)\cos\theta}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานได้หลากหลายไม่ว่าจะใช้สายอากาศกี่ต้น และต้องการแบบรูปการแผ่พลังงานกี่แบบ ซึ่งจำนวนสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นไม่ควรมากเกินไป เนื่องจากจะทำให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณหรืออุปกรณ์รับสัญญาณมีขนาดใหญ่เกินไป สำหรับจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นก็ควรมากเกินไปเช่นกัน เนื่องจากระบบจะมีการเปรียบเทียบอัตราขยายสัญญาณและปรับเปลี่ยนแบบรูปการแผ่พลังงานอยู่ตลอดเวลา หากมีจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานมากเกินไป อาจทำให้ระบบทำงานช้าลงได้ งานงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้แสดงตัวอย่างการจำลองแบบโดยใช้จำนวนสายอากาศและจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันไป พร้อมทั้งแสดงการคำนวณดังนี้

3.2.1.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 2 ต้น

กำหนดให้ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 2 ต้น ($N = 2$) โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศ (d) เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ และต้องการแบบรูปการแผ่พลังงานออกมาทั้งหมด 2 แบบ ($K = 2$) สมการของค่าน้ำหนักหาได้โดยแทนค่า $K = 2$ ลงในสมการ (3.3) ดังสมการ (3.5)

$$\begin{aligned}
 w_1(n, k) &= j^{\text{floor}\left\{\frac{(n-1) \times \text{mod}((k-1)+(2/2), 2)}{2/4}\right\}} \\
 &= j^{\text{floor}\{2 \times (n-1) \times \text{mod}((k-1)+1, 2)\}} \\
 &= j^{\text{floor}\{2 \times (n-1) \times \text{mod}(k, 2)\}} \\
 &= j^{\text{floor}\left\{(2n-2) \times \left(k - \left(\text{floor}\left(\frac{k}{2}\right)\right)^2\right)\right\}}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

จากสมการ (3.5) เราสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักที่อยู่ในเมทริกซ์ของรหัสในการก่อรูปลำคลื่นได้ดังสมการต่อไปนี้

ก) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1

$$\begin{aligned} w_1(1,1) &= j^{\text{floor}\left\{(2(1)-2)\times\left(1-\left(\text{floor}\left(\frac{1}{2}\right)\right)2\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(0)\times(1-(0)2)\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} w_1(2,1) &= j^{\text{floor}\left\{(2(2)-2)\times\left(1-\left(\text{floor}\left(\frac{1}{2}\right)\right)2\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(2)\times(1-(0)2)\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{2\}} = -1 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ข) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2

$$\begin{aligned} w_1(1,2) &= j^{\text{floor}\left\{(2(1)-2)\times\left(2-\left(\text{floor}\left(\frac{2}{2}\right)\right)2\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(0)\times(2-(1)2)\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} w_1(2,2) &= j^{\text{floor}\left\{(2(2)-2)\times\left(2-\left(\text{floor}\left(\frac{2}{2}\right)\right)2\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(2)\times(2-(1)2)\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.9)$$

เราสามารถนำค่าน้ำหนักในสมการ (3.6) จนถึงสมการ (3.9) เขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ ได้ดังสมการ (3.10)

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.10) จะเห็นได้ว่ารหัสในการก่อรูปลำดับ \$W_1\$ เป็นเมทริกซ์ขนาด \$2 \times 2\$ ซึ่งค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 และ

ต้นไม้ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 และ -1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 2 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นไม้ที่ 1 และต้นไม้ที่ 2 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 ($k = 1$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 1 ดังสมการ (3.11)

$$\begin{aligned} AF(1, \theta) &= w(1,1)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,1)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\ &= (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (-1)e^{j\pi(1)\cos\theta} \end{aligned} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.11) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 90^\circ$

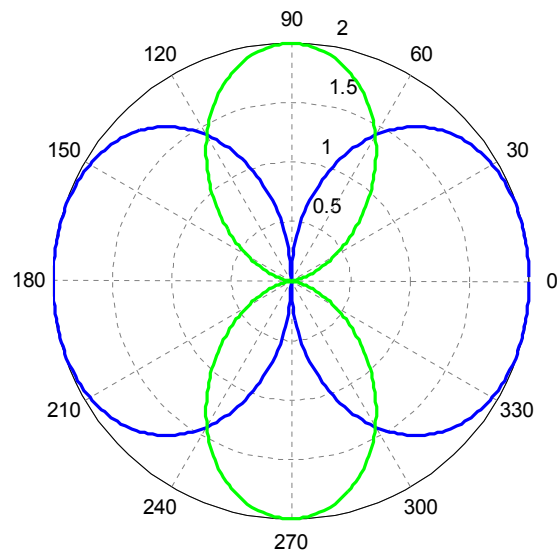
$$\begin{aligned} AF(1, 0^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 0^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 0^\circ} \\ &= 1 - (\cos\pi + j\sin\pi) = 1 - (-1) = 2 \end{aligned} \quad (3.11ก)$$

$$\begin{aligned} AF(1, 90^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 90^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 90^\circ} \\ &= 1 - 1 = 0 \end{aligned} \quad (3.11ข)$$

เมื่อแทนค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 2 ($k = 2$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 2 ดังสมการ (3.12)

$$\begin{aligned} AF(2, \theta) &= w(1,2)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,2)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\ &= (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (1)e^{j\pi(1)\cos\theta} \end{aligned} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 90^\circ$



รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 2 ต้น

$$\begin{aligned}
 AF(2,0^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 0^\circ} + (1)e^{j\pi(1)\cos 0^\circ} \\
 &= 1 + (\cos\pi + j\sin\pi) = 1 + (-1) = 0 \quad (3.12ก)
 \end{aligned}$$

$$AF(2,90^\circ) = (1)e^{j\pi(0)\cos 90^\circ} + (1)e^{j\pi(1)\cos 90^\circ} = 1 + (1) = 2 \quad (3.12ข)$$

จากสมการ (3.11) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 (เส้นเขียว) และจากสมการ (3.12) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2 (เส้นประ) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

จากรูปที่ 3.3 จะสังเกตเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานหรือลำคลื่นทั้ง 2 แบบ มีอัตราขยายสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ทิศทาง 60° 120° 240° และ 300° ซึ่งเป็นทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่น

3.2.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 3 ต้น

กำหนดให้ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 3 ต้น ($N=3$) โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ และต้องการแบบรูปการแผ่พลังงานออกมาทั้งหมด 2 แบบ ($K=3$) สมการของค่าน้ำหนักหาได้โดยแทนค่า $K=3$ ลงในสมการ (3.3) ดังสมการ (3.13)

$$\begin{aligned}
w_2(n, k) &= j^{\text{floor}\left\{\frac{(n-1) \times \text{mod}((k-1)+(3/2), 3)}{3/4}\right\}} \\
&= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4n-4}{3}\right) \times \left(\left(k-1+\frac{3}{2}\right) - \left(\text{floor}\left(\frac{(k-1)+(3/2)}{3}\right)\right)3\right)\right\}} \\
&= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4n-4}{3}\right) \times \left(\frac{2k+1}{2} - \left(\text{floor}\left(\frac{2k+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

จากสมการ (3.13) เราสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักที่อยู่ในเมทริกซ์ของรหัสในการก่อรูปลำดับคลื่นได้ดังสมการต่อไปนี้

ก) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1

$$\begin{aligned}
w_2(1,1) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(1)-4}{3}\right) \times \left(\left(\frac{2(1)+1}{2}\right) - \left(\text{floor}\left(\frac{2(1)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\
&= j^{\text{floor}\left\{0 \times \left(\left(\frac{3}{2}\right) - (0)3\right)\right\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
w_2(2,1) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(2)-4}{3}\right) \times \left(\left(\frac{2(1)+1}{2}\right) - \left(\text{floor}\left(\frac{2(1)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\
&= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4}{3}\right) \times \left(\left(\frac{3}{2}\right) - (0)3\right)\right\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{2\}} = -1
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
w_2(3,1) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(3)-4}{3}\right) \times \left(\left(\frac{2(1)+1}{2}\right) - \left(\text{floor}\left(\frac{2(1)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\
&= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{8}{3}\right) \times \left(\left(\frac{3}{2}\right) - (0)3\right)\right\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{4\}} = 1
\end{aligned} \tag{3.16}$$

ข) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2

$$w_2(1,2) = j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(1)-4}{3}\right) \times \left(\left(\frac{2(2)+1}{2}\right) - \left(\text{floor}\left(\frac{2(2)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}}$$

$$= j^{\text{floor}\left\{\left(0\right)\times\left(\left(\frac{5}{2}\right)-(0)3\right)\right\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{0\}} = 1 \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} w_2(2,2) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(2)-4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{2(2)+1}{2}\right)-\left(\text{floor}\left(\frac{2(2)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{5}{2}\right)-(0)3\right)\right\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{3.33\}} = -j \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} w_2(3,2) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(3)-4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{2(2)+1}{2}\right)-\left(\text{floor}\left(\frac{2(2)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{8}{3}\right)\times\left(\left(\frac{5}{2}\right)-(0)3\right)\right\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{6.67\}} = -1 \end{aligned} \quad (3.19)$$

ค) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 3

$$\begin{aligned} w_2(1,3) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(1)-4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{2(3)+1}{2}\right)-\left(\text{floor}\left(\frac{2(3)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\left\{\left(0\right)\times\left(\left(\frac{7}{2}\right)-(1)3\right)\right\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} w_2(2,3) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(2)-4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{2(3)+1}{2}\right)-\left(\text{floor}\left(\frac{2(3)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{7}{2}\right)-(1)3\right)\right\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{0.67\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} w_2(3,3) &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{4(3)-4}{3}\right)\times\left(\left(\frac{2(3)+1}{2}\right)-\left(\text{floor}\left(\frac{2(3)+1}{6}\right)\right)3\right)\right\}} \\ &= j^{\text{floor}\left\{\left(\frac{8}{3}\right)\times\left(\left(\frac{7}{2}\right)-(1)3\right)\right\}} = \left(\sqrt{-1}\right)^{\text{floor}\{1.33\}} = j \end{aligned} \quad (3.22)$$

เราสามารถนำค่าน้ำหนักในสมการ (3.14) จนถึงสมการ (3.22) เขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ ได้ดังสมการ (3.23)

$$W_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -j & 1 \\ 1 & -1 & j \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.23) จะเห็นได้ว่ารหัสในการก่อรูปลำดับคลื่น W_2 เป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 ซึ่งค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 -1 และ 1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 2 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 $-j$ และ -1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 3 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 1 และ j ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 ($k=1$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 1 ดังสมการ (3.24)

$$\begin{aligned} AF(1, \theta) &= w(1,1)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,1)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} + w(3,1)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} \\ &= (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (-1)e^{j\pi(1)\cos\theta} + (1)e^{j\pi(2)\cos\theta} \end{aligned} \quad (3.24)$$

จากสมการ (3.24) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 90^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$

$$\begin{aligned} AF(1, 90^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 90^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 90^\circ} + (1)e^{j\pi(2)\cos 90^\circ} \\ &= 1 - 1 + 1 = 1 \end{aligned} \quad (3.24ก)$$

$$\begin{aligned} AF(1, 180^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ} + (1)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} \\ &= 1 - (\cos(-\pi) + j \sin(-\pi)) + (\cos(-2\pi) + j \sin(-2\pi)) \\ &= 1 - (-1) + (1) = 3 \end{aligned} \quad (3.24ข)$$

เมื่อแทนค่าหน้าหน้าในคอลัมน์ที่ 2 ($k = 2$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 2 ดังสมการ (3.25)

$$\begin{aligned} AF(2, \theta) &= w(1,2)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,2)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\ &\quad + w(3,2)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} \\ &= (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (-j)e^{j\pi(1)\cos\theta} + (-1)e^{j\pi(2)\cos\theta} \end{aligned} \quad (3.25)$$

จากสมการ (3.25) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 90^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$

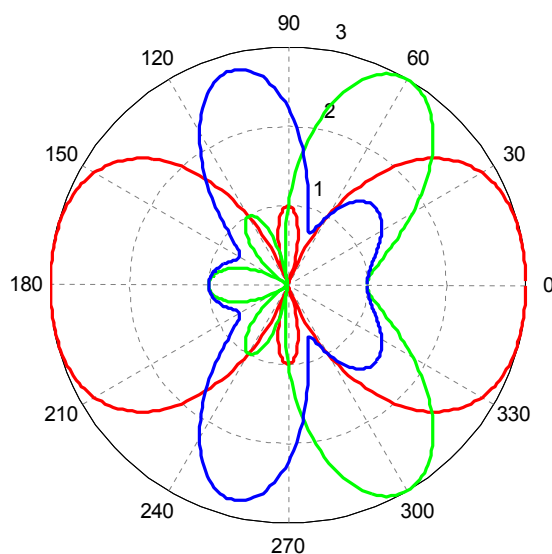
$$\begin{aligned} AF(2, 90^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 90^\circ} + (-j)e^{j\pi(1)\cos 90^\circ} + (-1)e^{j\pi(2)\cos 90^\circ} \\ &= |1 - j - 1| = |-j| = 1 \end{aligned} \quad (3.25ก)$$

$$\begin{aligned} AF(2, 180^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ} + (1)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} \\ &= 1 - (\cos(-\pi) + j \sin(-\pi)) + (\cos(-2\pi) + j \sin(-2\pi)) \\ &= 1 - (-1) + (1) = 3 \end{aligned} \quad (3.25ข)$$

เมื่อแทนค่าหน้าหน้าในคอลัมน์ที่ 3 ($k = 3$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 3 ดังสมการ (3.26)

$$\begin{aligned} AF(3, \theta) &= w(1,3)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,3)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} + w(3,3)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} \\ &= (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (1)e^{j\pi(1)\cos\theta} + (j)e^{j\pi(2)\cos\theta} \end{aligned} \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 90^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงาน 3 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 3 ต้น

$$\begin{aligned}
 AF(3,90^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 90^\circ} + (1)e^{j\pi(1)\cos 90^\circ} + (j)e^{j\pi(2)\cos 90^\circ} \\
 &= |1 + 1 + j| = |2 + j| = 2.24 \qquad (3.26ก)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 AF(3,180^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (1)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ} + (j)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} \\
 &= 1 + (\cos(-\pi) + j\sin(-\pi)) + (\cos(-2\pi) + j\sin(-2\pi)) \\
 &= 1 + (-1) + (1) = 1 \qquad (3.26ข)
 \end{aligned}$$

จากสมการ (3.24) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 (เส้นเรียบ) จากสมการ (3.25) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2 (เส้นประ) จากสมการ (3.26) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 3 (เส้นจุด) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

จากรูปที่ 3.5 จะสังเกตเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานหรือลำคลื่นทั้ง 3 แบบ มีอัตราขยายสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ทิศทาง 40° 85° 130° 230° 275° และ 320° ซึ่งเป็นทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกัน

3.2.1.3 แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น

กำหนดให้ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4 ต้น ($N = 4$) โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ และต้องการแบบรูปการแผ่พลังงานออกมาทั้งหมด 2 แบบ ($K = 4$) สมการของค่าน้ำหนักหาได้โดยแทนค่า $K = 4$ ลงในสมการ (3.3) ดังสมการ (3.27)

$$\begin{aligned}
 w_3(n, k) &= j^{\text{floor}\left\{\frac{(n-1) \times \text{mod}((k-1)+(4/2), 4)}{4/4}\right\}} \\
 &= j^{\text{floor}\left\{(n-1) \times \left((k-1) - \left(\text{floor}\left(\frac{k+1}{4}\right) 4\right)\right)\right\}} \quad (3.27)
 \end{aligned}$$

จากสมการ (3.27) เราสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักที่อยู่ในเมทริกซ์ของรหัสในการก่อรูปลำคลื่นได้ดังสมการต่อไปนี้

ก) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1

$$\begin{aligned}
 w_3(1,1) &= j^{\text{floor}\left\{(1-1) \times \left((1+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{1+1}{4}\right) 4\right)\right)\right\}} \\
 &= j^{\text{floor}\{(0) \times ((2)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_3(2,1) &= j^{\text{floor}\left\{(2-1) \times \left((1+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{1+1}{4}\right) 4\right)\right)\right\}} \\
 &= j^{\text{floor}\{(1) \times ((2)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{2\}} = -1 \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_3(3,1) &= j^{\text{floor}\left\{(3-1) \times \left((1+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{1+1}{4}\right) 4\right)\right)\right\}} \\
 &= j^{\text{floor}\{(2) \times ((2)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{4\}} = 1 \quad (3.30)
 \end{aligned}$$

$$w_3(4,1) = j^{\text{floor}\left\{(4-1) \times \left((1+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{1+1}{4}\right) 4\right)\right)\right\}}$$

$$= j^{\text{floor}\{(3) \times ((2)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{6\}} = -1 \quad (3.31)$$

ข) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2

$$\begin{aligned} w_3(1,2) &= j^{\text{floor}\left\{(1-1) \times \left((2+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{2+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(0) \times ((3)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} w_3(2,2) &= j^{\text{floor}\left\{(2-1) \times \left((2+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{2+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(1) \times ((3)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{3\}} = -j \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} w_3(3,2) &= j^{\text{floor}\left\{(3-1) \times \left((2+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{2+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(2) \times ((3)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{6\}} = -1 \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} w_3(4,2) &= j^{\text{floor}\left\{(4-1) \times \left((2+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{2+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(3) \times ((3)-(0)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{9\}} = j \end{aligned} \quad (3.35)$$

ค) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 3

$$\begin{aligned} w_3(1,3) &= j^{\text{floor}\left\{(1-1) \times \left((3+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{3+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(0) \times ((4)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$w_3(2,3) = j^{\text{floor}\left\{(2-1) \times \left((3+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{3+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}}$$

$$= j^{\text{floor}\{(1) \times ((4)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} w_3(3,3) &= j^{\text{floor}\left\{(3-1) \times \left((3+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{3+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(2) \times ((4)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} w_3(4,3) &= j^{\text{floor}\left\{(4-1) \times \left((3+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{3+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(3) \times ((4)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.39)$$

ง) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 4

$$\begin{aligned} w_3(1,4) &= j^{\text{floor}\left\{(1-1) \times \left((4+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{4+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(0) \times ((5)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{0\}} = 1 \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} w_3(2,4) &= j^{\text{floor}\left\{(2-1) \times \left((4+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{4+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(1) \times ((5)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{1\}} = j \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} w_3(3,4) &= j^{\text{floor}\left\{(3-1) \times \left((4+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{4+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(2) \times ((5)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{2\}} = -1 \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} w_3(4,4) &= j^{\text{floor}\left\{(4-1) \times \left((4+1) - \left(\text{floor}\left(\frac{4+1}{4}\right) \right) 4 \right) \right\}} \\ &= j^{\text{floor}\{(3) \times ((5)-(1)4)\}} = (\sqrt{-1})^{\text{floor}\{3\}} = -j \end{aligned} \quad (3.43)$$

เราสามารถนำค่าน้ำหนักในสมการ (3.28) จนถึงสมการ (3.43) เขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ ได้ดังสมการ (3.44)

$$W_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -j & 1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & j & 1 & -j \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

จากสมการ (3.44) จะเห็นได้ว่ารหัสในการก่อรูปลำดับ W_3 เป็นเมทริกซ์ขนาด 4×4 ซึ่งค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 -1 1 และ -1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 2 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ $1 -j -1$ และ j ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 3 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 1 1 และ 1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 4 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ $1 j -1$ และ $-j$ ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 ($k=1$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 1 ดังสมการ (3.45)

$$\begin{aligned} AF(1, \theta) &= w(1,1)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,1)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\ &\quad + w(3,1)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} + w(4,1)e^{j\pi(4-1)\cos\theta} \\ &= (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (-1)e^{j\pi(1)\cos\theta} \\ &\quad + (1)e^{j\pi(2)\cos\theta} + (-1)e^{j\pi(3)\cos\theta} \end{aligned} \quad (3.45)$$

จากสมการ (3.45) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 180^\circ$ และ $\theta = 270^\circ$

$$AF(1, 180^\circ) = (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ}$$

$$\begin{aligned}
& + (1)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} + (-1)e^{j\pi(3)\cos 180^\circ} \\
& = 1 - (\cos(-\pi) + j \sin(-\pi)) + (\cos(-2\pi) + j \sin(-2\pi)) \\
& \quad - (\cos(-3\pi) + j \sin(-3\pi)) \\
& = 1 - (-1) + (1) - (-1) = 4 \tag{3.45ก}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
AF(1, 270^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 270^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 270^\circ} \\
& \quad + (1)e^{j\pi(2)\cos 270^\circ} + (-1)e^{j\pi(3)\cos 270^\circ} \\
& = 1 - 1 + 1 - 1 = 0 \tag{3.45ข}
\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่านำหนักในคอลัมน์ที่ 2 ($k=2$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 2 ดังสมการ (3.46)

$$\begin{aligned}
AF(2, \theta) &= w(1,2)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,2)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\
& \quad + w(3,2)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} + w(4,2)e^{j\pi(4-1)\cos\theta} \\
& = (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (-j)e^{j\pi(1)\cos\theta} \\
& \quad + (-1)e^{j\pi(2)\cos\theta} + (j)e^{j\pi(3)\cos\theta} \tag{3.46}
\end{aligned}$$

จากสมการ (3.46) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta=180^\circ$ และ $\theta=270^\circ$

$$AF(2, 180^\circ) = (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (-j)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ}$$

$$\begin{aligned}
& + (-1)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} + (j)e^{j\pi(3)\cos 180^\circ} \\
& = 1 - j(\cos(-\pi) + j\sin(-\pi)) - (\cos(-2\pi) + j\sin(-2\pi)) \\
& \quad + j(\cos(-3\pi) + j\sin(-3\pi)) \\
& = 1 - j(-1) - (1) + j(-1) = 0 \tag{3.46ก}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
AF(2, 270^\circ) & = (1)e^{j\pi(0)\cos 270^\circ} + (-j)e^{j\pi(1)\cos 270^\circ} \\
& \quad + (-1)e^{j\pi(2)\cos 270^\circ} + (j)e^{j\pi(3)\cos 270^\circ} \\
& = 1 - j - 1 + j = 0 \tag{3.46ข}
\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าหน้าหน้าในคอลัมน์ที่ 3 ($k=3$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 3 ดังสมการ (3.47)

$$\begin{aligned}
AF(3, \theta) & = w(1,3)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,3)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\
& \quad + w(3,3)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} + w(4,3)e^{j\pi(4-1)\cos\theta} \\
& = (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (1)e^{j\pi(1)\cos\theta} \\
& \quad + (1)e^{j\pi(2)\cos\theta} + (1)e^{j\pi(3)\cos\theta} \tag{3.47}
\end{aligned}$$

จากสมการ (3.47) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta=180^\circ$ และ $\theta=270^\circ$

$$AF(3, 180^\circ) = (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (1)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ}$$

$$\begin{aligned}
& + (1)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} + (1)e^{j\pi(3)\cos 180^\circ} \\
& = 1 + (\cos(-\pi) + j \sin(-\pi)) + (\cos(-2\pi) + j \sin(-2\pi)) \\
& \quad + (\cos(-3\pi) + j \sin(-3\pi)) \\
& = 1 + (-1) + (1) + (-1) = 0 \tag{3.47ก}
\end{aligned}$$

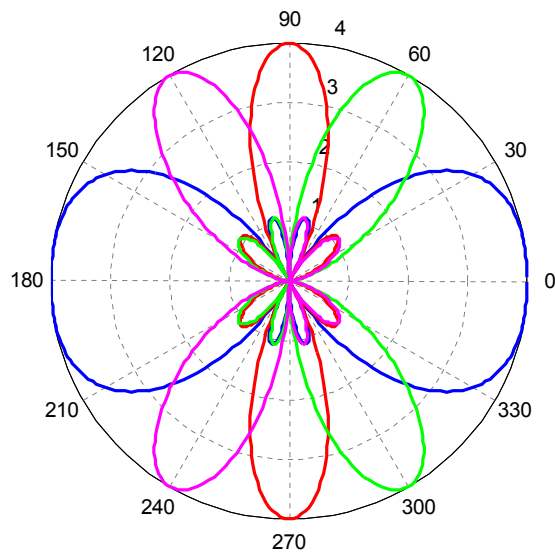
$$\begin{aligned}
AF(3, 270^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 270^\circ} + (1)e^{j\pi(1)\cos 270^\circ} \\
& \quad + (1)e^{j\pi(2)\cos 270^\circ} + (1)e^{j\pi(3)\cos 270^\circ} \\
& = 1 + 1 + 1 + 1 = 4 \tag{3.47ข}
\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าหน้าหนักในคอลัมน์ที่ 4 ($k = 4$) ลงในสมการ (3.4) เราจะได้สมการของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบที่ 4 ดังสมการ (3.48)

$$\begin{aligned}
AF(4, \theta) &= w(1,4)e^{j\pi(1-1)\cos\theta} + w(2,4)e^{j\pi(2-1)\cos\theta} \\
& \quad + w(3,4)e^{j\pi(3-1)\cos\theta} + w(4,4)e^{j\pi(4-1)\cos\theta} \\
& = (1)e^{j\pi(0)\cos\theta} + (j)e^{j\pi(1)\cos\theta} \\
& \quad + (-1)e^{j\pi(2)\cos\theta} + (-j)e^{j\pi(3)\cos\theta} \tag{3.48}
\end{aligned}$$

จากสมการ (3.48) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อ $\theta = 180^\circ$ และ $\theta = 270^\circ$

$$AF(4, 180^\circ) = (1)e^{j\pi(0)\cos 180^\circ} + (j)e^{j\pi(1)\cos 180^\circ}$$



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น

$$\begin{aligned}
 & +(-1)e^{j\pi(2)\cos 180^\circ} + (-j)e^{j\pi(3)\cos 180^\circ} \\
 & = 1 + j(\cos(-\pi) + j\sin(-\pi)) - (\cos(-2\pi) + j\sin(-2\pi)) \\
 & \quad - j(\cos(-3\pi) + j\sin(-3\pi)) \\
 & = 1 + j(-1) - (1) - j(-1) = 0 \tag{3.48ก}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 AF(4, 270^\circ) & = (1)e^{j\pi(0)\cos 270^\circ} + (j)e^{j\pi(1)\cos 270^\circ} \\
 & \quad + (-1)e^{j\pi(2)\cos 270^\circ} + (-j)e^{j\pi(3)\cos 270^\circ} \\
 & = 1 + j - 1 - j = 0 \tag{3.48ข}
 \end{aligned}$$

จากสมการ (3.45) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 (เส้นเรียบ) จากสมการ (3.46) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2 (เส้นจุด) จากสมการ (3.47) จะได้แบบรูปการแผ่

พลังงานที่ 3 (เส้นประ) จากสมการ (3.48) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 4 (เส้นประผสมจุด) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

จากรูปที่ 3.6 จะสังเกตเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานหรือลำคลื่นทั้ง 4 แบบ มีอัตราขยายสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ทิศทาง 41° 75° 105° 140° 220° 255° 285° และ 320° ซึ่งเป็นทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกัน

3.2.2 การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ

จากการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานทั้ง 3 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ที่กล่าวในหัวข้อย่อยข้างต้น พบว่า อัตราขยายสัญญาณต่ำสุดจะอยู่ในทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกัน ทำให้งานงานวิจัยชิ้นนี้มีแนวคิดที่จะเพิ่มอัตราขยายหรือความแรงสัญญาณในทิศทางดังกล่าว รวมไปถึงได้เพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณจุดตัดนี้ด้วย โดยใช้วิธีการรวมแบบอัตราส่วนสูงสุด (Maximal Ratio Combining: MRC) ขั้นตอนการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีดังนี้

ก) กำหนดจำนวนสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ใช้ และจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ แล้วคำนวณหารหัสในการก่อรูปลำคลื่นที่คำนวณได้จากสมการ (3.3)

ข) นำค่ารหัสในการก่อรูปลำคลื่นไปคำนวณหาแบบรูปการแผ่พลังงานจากสมการ (3.4) และนำไปพล็อตกราฟแบบรูปการแผ่พลังงาน

ค) สังเกตกราฟแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา จะเห็นว่า ลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,1)$ จะตัดกับลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,2)$ ส่วนลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,2)$ จะตัดกับลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,3)$ และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,K)$ จะอยู่ติดกับลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,1)$ ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าลำคลื่นที่อยู่ติดกันคือ ลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,k_a)$ และลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,k_a + 1)$ ยกเว้นลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,K)$ จะอยู่ติดกับลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนัก $w(n,1)$ เมื่อ k_a คือ ลำดับของแบบรูปการแผ่พลังงาน เราสามารถเขียนป็นสมการของตัวประกอบแถวลำดับได้ดังต่อไปนี้

$$AF(k_a, \theta) = \sum_{n=1}^N w(n, k_a) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \quad (3.49)$$

กรณี $k_a \neq K$ ลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแถวลำดับจากสมการ (3.49) จะอยู่ติดกับลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

$$AF(k_b, \theta) = \sum_{n=1}^N w(n, k_a + 1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \quad (3.50)$$

กรณี $k_a = K$ ลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแฉวลำดับจากสมการ (3.49) จะอยู่ติดกับลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแฉวลำดับเท่ากับ

$$AF(k_b, \theta) = \sum_{n=1}^N w(n, 1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \quad (3.51)$$

ง) หลังจากทราบว่าลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนักใดติดกับลำคลื่นที่ใช้ค่าน้ำหนักใดแล้ว ต่อมาเราจะพิจารณาตัวประกอบแฉวลำดับ ถึงแม้ 2 ลำคลื่นจะมีตัวประกอบแฉวลำดับที่เท่ากัน ในหลายทิศทาง แต่เราจะเลือกทิศทางที่มีค่าตัวประกอบแฉวลำดับมากที่สุดเท่านั้น เนื่องจากความเป็นจริงแล้วระบบจะเปรียบเทียบและเลือกลำคลื่นที่ให้อัตราขยายสัญญาณสูงกว่า กำหนดให้ θ_{ab} คือ ทิศทางที่เป็นจุดตัดของลำคลื่น a และลำคลื่น b ที่อยู่ติดกัน ส่วน A_{eq} คือ ค่าตัวประกอบแฉวลำดับที่เท่ากันของลำคลื่น a และลำคลื่น b จะได้ว่า

$$AF(k_a, \theta = \theta_{ab}) = AF(k_b, \theta = \theta_{ab}) = A_{eq} \quad (3.52)$$

โดยที่

$$AF(k_a, \theta = \theta_{ab}) = \sum_{n=1}^N w(n, k_a) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{ab}} \quad (3.53)$$

กรณี $k_a \neq K$ ลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแฉวลำดับจากสมการ (3.53) จะอยู่ติดกับลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแฉวลำดับเท่ากับ

$$AF(k_b, \theta = \theta_{ab}) = \sum_{n=1}^N w(n, k_a + 1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{ab}} \quad (3.54)$$

กรณี $k_a = K$ ลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแฉวลำดับจากสมการ (3.53) จะอยู่ติดกับลำคลื่นที่มีสมการตัวประกอบแฉวลำดับเท่ากับ

$$AF(k_b, \theta = \theta_{ab}) = \sum_{n=1}^N w(n,1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{ab}} \quad (3.55)$$

จ) ต่อจากนั้นเราจะนำค่าตัวประกอบแอมพลิจูดในทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นนั้นมาหาสังยุค (conjugate) แล้วนำไปคูณกับค่าตัวประกอบแอมพลิจูดในทิศทางของทั้งสองสมการของแบบรูปการแผ่พลังงานที่อยู่ติดกัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$AF_{new}(k_a, \theta) = \sum_{n=1}^N \bar{A}_{eq} \cdot w(n, k_a) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \quad (3.56)$$

กรณี $k_a \neq K$

$$AF_{new}(k_b, \theta) = \sum_{n=1}^N \bar{A}_{eq} \cdot w(n, k_a + 1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \quad (3.57)$$

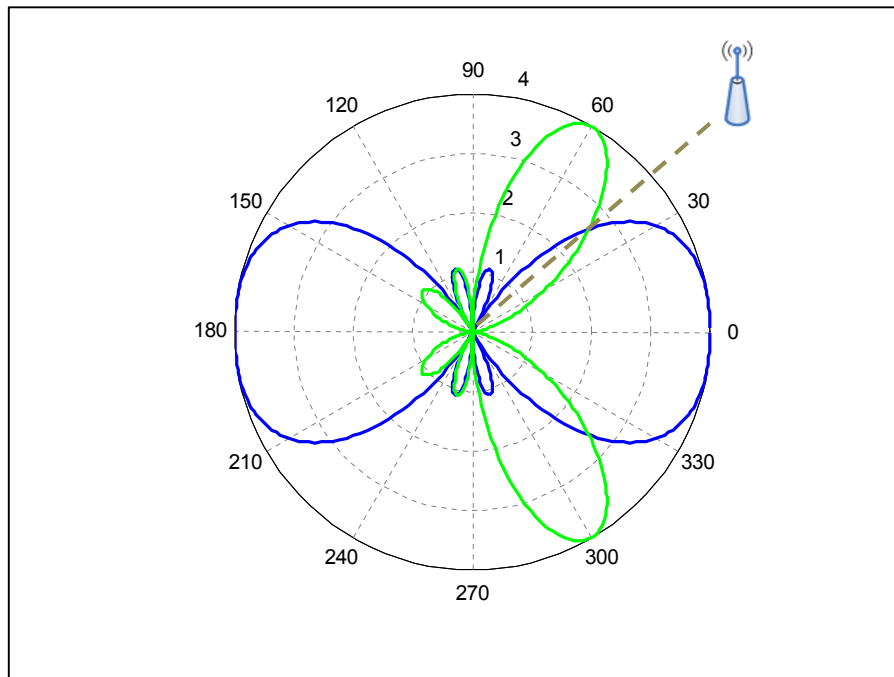
กรณี $k_a = K$

$$AF_{new}(k_b, \theta) = \sum_{n=1}^N \bar{A}_{eq} \cdot w(n,1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta} \quad (3.58)$$

ฉ) เมื่อได้สมการตัวประกอบแอมพลิจูดของ 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกันที่ถูกคูณด้วยค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่เท่ากันของ 2 ลำคลื่นดังสมการ (3.56) และสมการ (3.57) หรือสมการ (3.58) แล้ว เราจะนำทั้ง 2 สมการมาบวกกัน พร้อมทั้งทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization) ดังสมการต่อไปนี้

$$AF_{proposed} = \frac{\max\{AF(k, \theta)\}}{AF_{new}(k_a, \theta_{ab}) + AF_{new}(k_b, \theta_{ab})} \left[\begin{array}{l} AF_{new}(k_a, \theta) + \\ AF_{new}(k_b, \theta) \end{array} \right] \quad (3.59)$$

เนื่องจากอัตราขยายสัญญาณสูงสุดมีค่าเท่ากับจำนวนสายอากาศแอมพลิจูด และตัวประกอบแอมพลิจูดในทิศทางของจุดตัด ($\theta = \theta_{ab}$) ของลำคลื่นทั้งสองมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 และ 2 สำหรับการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น

ดังนั้น

$$AF_{proposed} = \frac{N}{2AF_{new}(k_a, \theta_{ab})} [AF_{new}(k_a, \theta) + AF_{new}(k_b, \theta)] \quad (3.60)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$AF_{proposed} = N \left[\frac{AF_{new}(k_a, \theta) + AF_{new}(k_b, \theta)}{2AF_{new}(k_a, \theta_{ab})} \right]$$

เมื่อ $k = 1, 2, \dots, K$ (3.61)

โดยที่ $AF_{proposed}$ คือ สมการตัวประกอบแอมพลิจูดที่นำเสนอเพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณเมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกันที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ ส่วน k_a และ k_b คือ

ลำดับของลําคลื่นที่อยู่ติดกัน ส่วน K คือ จำนวนแบบรูปการแผ่พลังงาน และ θ_{ab} คือ มุมที่เป็นจุดตัดของลําคลื่นที่อยู่ติดกัน

ตัวอย่างการคำนวณหาลําคลื่นที่นำเสนอเมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลําคลื่นที่อยู่ติดกัน โดยกำหนดให้ใช้สายอากาศ 4 ต้น และมีแบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบ จากการคำนวณในหัวข้อย่อยที่แล้ว เราจะได้แบบรูปพลังงานออกมา 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สมมติว่าผู้ใช้งานอยู่ในทิศทาง 41° ซึ่งเป็นทิศทางของจุดตัดระหว่างลําคลื่นที่ 1 และลําคลื่นที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากการคำนวณในหัวข้อย่อยที่แล้วในสมการ (3.45) เราสามารถหาตัวประกอบแวลลำดับได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 AF(1,41^\circ) &= (1)e^{j\pi(0)\cos 41^\circ} + (-1)e^{j\pi(1)\cos 41^\circ} \\
 &\quad + (1)e^{j\pi(2)\cos 41^\circ} + (-1)e^{j\pi(3)\cos 41^\circ} \\
 &= 1 - (\cos(2.371) + j\sin(2.371)) \\
 &\quad + (\cos(4.742) + j\sin(4.742)) \\
 &\quad - (\cos(7.113) + j\sin(7.113)) \\
 &= 1 - (-0.717 + j0.697) + (0.030 - j1) \\
 &\quad - (0.675 + j0.738) \\
 &= 1.072 - j2.435 \tag{3.62}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากเป็นจุดตัดของลําคลื่นที่ 1 และ 2 ดังนั้น

$$AF(1,41^\circ) = AF(2,41^\circ) = A_{eq} = 1.072 - j2.435 \tag{3.63}$$

สังยุคของจุดตัดมีค่าเท่ากับ

$$\bar{A}_{eq} = 1.072 + j2.435 \quad (3.64)$$

นำค่าตั้งยุคคูณเข้าไปในสมการตัวประกอบแถวลำดับของลำดับทั้งสอง

$$\begin{aligned} AF_{new}(1,41^\circ) &= (1.072 + j2.435)(1.072 - j2.435) \\ &= (2.660 \angle 1.156)(2.660 \angle -1.156) \\ &= 7.076 \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} AF_{new}(2,41^\circ) &= (1.072 + j2.435)(1.072 - j2.435) \\ &= (2.660 \angle 1.156)(2.660 \angle -1.156) \\ &= 7.076 \end{aligned} \quad (3.66)$$

จากสมการ (3.61) เราสามารถหาตัวประกอบแถวลำดับของลำดับที่นำเสนอได้ดังนี้

$$A_{proposed} = 4 \left[\frac{7.076 + 7.076}{2(7.076)} \right] = 4 \quad (3.67)$$

จากการคำนวณจะเห็นว่าอัตราขยายสัญญาณของลำดับเดิมมีค่าเท่ากับ $1.072 + j2.435$ หรือมีขนาดเป็น $\sqrt{1.072^2 + 2.435^2}$ ซึ่งเท่ากับ 2.660 สำหรับอัตราขยายสัญญาณของลำดับที่นำเสนอมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4 ดังนั้นผลการคำนวณสามารถยืนยันความสำเร็จของการก่อรูปลำดับที่นำเสนอได้ว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในบริเวณจุดตัดของ 2 ลำดับที่อยู่ติดกันได้ ซึ่งหากพิจารณาในทุกลำดับและทุกทิศทาง เราจะสามารถแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่นำเสนอได้ดังรูปที่ 3.8

3.3 การออกแบบอัลกอริทึมที่นำเสนอ

ความเป็นจริงแล้วภาคส่งในระบบการก่อรูปลำคลื่นไม่สามารถทราบทิศทางของภาครับ แต่ทราบเพียงความแรงสัญญาณหรืออัตราขยายสัญญาณที่ภาครับรับได้ ดังนั้นอัลกอริทึมที่ใช้ในการก่อรูปลำคลื่นจึงต้องเน้นพิจารณาที่อัตราขยายสัญญาณของแต่ละลำคลื่นเป็นหลัก เพื่อที่จะนำไปสู่การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบ ซึ่งอธิบายกระบวนการทำงานได้ดังนี้

ก) เมื่อมีการใช้งานระบบวอยกิก ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ มีการติดต่อสื่อสารกัน ตัวส่งสัญญาณที่ประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับและระบบประมวลผลสัญญาณนั้นจะทำการก่อรูปลำคลื่นไปยังตัวรับสัญญาณ โดยที่จะมีการคำนวณอัตราขยายสัญญาณของทุกลำคลื่นอยู่ตลอดเวลา รูปที่ 3.10 แสดงอัตราขยายสัญญาณของ 4 ลำคลื่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับ 4 ต้น เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทาง 30°

ข) ต่อมาระบบจะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายสัญญาณของแต่ละลำคลื่น

ค) ระบบทำการจัดลำดับค่าอัตราขยายสัญญาณจากสูงสุดไปต่ำสุด

ง) เพื่อให้ทราบว่าผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำหรือไม่ เราจึงได้

กำหนดขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น (beam switching margin: M_{BS}) ดังสมการ (3.68)

$$M_{BS} = G_{Major} - G_{Minor} \quad (3.68)$$

โดยที่ G_{Major} คือ อัตราขยายสัญญาณที่สูงที่สุดในทิศทางของที่จุดตัดระหว่างลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงที่สุดกับลำคลื่นที่นำเสนอ ส่วน G_{Minor} คือ อัตราขยายสัญญาณที่สูงรองลงมาในทิศทางของที่จุดตัดระหว่างลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงที่สุดกับลำคลื่นที่นำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 3.11

จ) ในกรณีที่ผลต่างระหว่างอัตราขยายสัญญาณที่สูงที่สุดและอัตราขยายสัญญาณที่สูงรองลงมามีค่ามากกว่าขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นระบบจะก่อรูปลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณที่สูงที่สุดนั้น หลังจากนั้นระบบจะกลับเข้าสู่การคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณใหม่ทุกระยะเวลาที่กำหนด เนื่องจากผู้ใช้งานอาจมีการเคลื่อนที่ออกจากทิศทางเดิมจนอาจเข้าสู่ทิศทางที่ให้อัตราขยายสัญญาณต่ำ ระบบจึงต้องเปลี่ยนลำคลื่นให้มีอัตราขยายสัญญาณที่ดีที่สุด

สำหรับกรณีที่ผลต่างระหว่างอัตราขยายสัญญาณที่สูงที่สุดและอัตราขยายสัญญาณที่สูงรองลงมา มีค่าน้อยกว่าขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นระบบจะสร้างลำคลื่นใหม่

ฉ) ก่อนที่จะสร้างลำคลื่นใหม่หรือลำคลื่นที่นำเสนอ ระบบต้องทราบก่อนว่าผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางระหว่างลำคลื่นใด โดยพิจารณาจากอัตราขยายสัญญาณที่คำนวณได้ของแต่ละลำคลื่น

โดยที่ผู้ใช้งานจะอยู่ในทิศทางระหว่างลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงที่สุดและลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงรองลงมาเสมอ หลังจากนั้นระบบจะเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของตัวประกอบแถวลำดับที่อยู่ในจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นนั้น

ข) ระบบจะนำค่าสัมประสิทธิ์คูณกับค่าอัตราขยายสัญญาณของทั้ง 2 ลำคลื่นนั้น จะได้ค่าอัตราขยายที่ผ่านการคูณด้วยสัมประสิทธิ์ออกมา 2 ค่า

ค) หลังจากได้ค่าอัตราขยายที่ผ่านการคูณด้วยสัมประสิทธิ์แล้ว ต่อมาระบบจะนำค่าทั้งสองมาบวกกัน

ง) สุดท้ายระบบจะนำค่านั้นมาทำให้เป็นบรรทัดฐาน หลังจากนั้นระบบจะกลับเข้าสู่การคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณใหม่ทุกระยะเวลาที่กำหนด เนื่องจากผู้ใช้งานอาจมีการเคลื่อนที่ออกจากทิศทางเดิมจนอาจเข้าสู่ทิศทางที่ให้อัตราขยายสัญญาณต่ำ ระบบจึงต้องเปลี่ยนลำคลื่นให้มีอัตราขยายสัญญาณที่ดีที่สุด

จากกระบวนการทำงานของการก่อรูปลำคลื่นที่นำเสนอ เราสามารถสรุปเป็นอัลกอริทึมที่นำเสนอ (proposed algorithm) ได้ดังนี้

กำหนดให้

N คือ จำนวนสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ใช้ โดยที่ $n = 1, 2, \dots, N$

K คือ จำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, K$

k_a และ k_b คือ ลำดับของแบบรูปการแผ่พลังงานหรือลำคลื่นที่อยู่ติดกัน

M_{BS} คือ ขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น

G_{Major} คือ อัตราขยายสัญญาณที่สูงที่สุดในทิศทางของที่จุดตัดระหว่างลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงที่สุดกับลำคลื่นที่นำเสนอ

G_{Minor} คือ อัตราขยายสัญญาณที่สูงรองลงมาในทิศทางของที่จุดตัดระหว่างลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงที่สุดกับลำคลื่นที่นำเสนอ

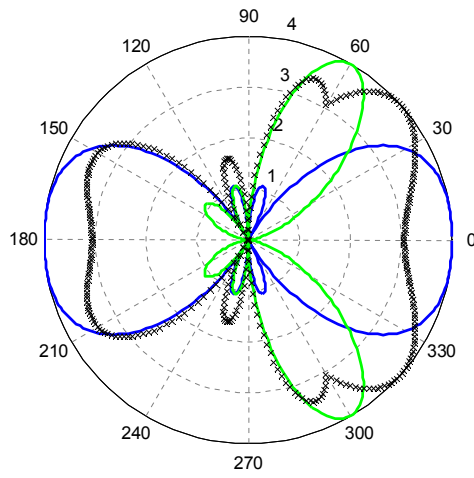
θ_{user} คือ มุมที่บ่งบอกทิศทางของผู้ใช้งาน

θ_{ab} คือ มุมจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกันที่กำลังพิจารณา

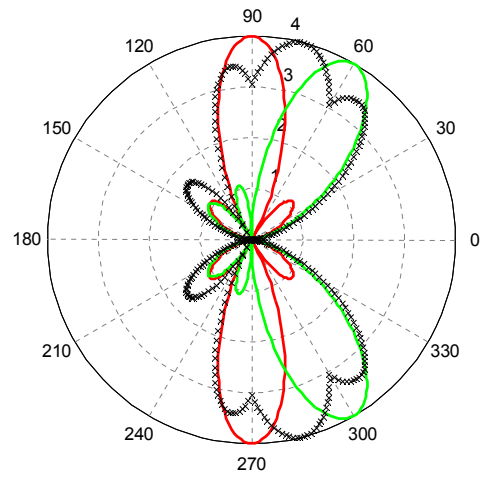
θ_M คือ มุมจุดตัดระหว่างอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่นที่นำเสนอและอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่นที่กำลังพิจารณา

ก) เปรียบเทียบอัตราขยายสัญญาณ: ระบบจะทราบค่าอัตราขยาย N ค่า ดังนี้

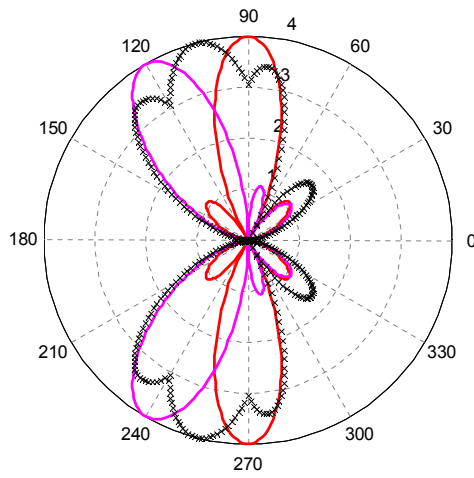
$$AF(k=1, \theta_{user}) = \sum_{n=1}^N w(n, k=1) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{user}}$$



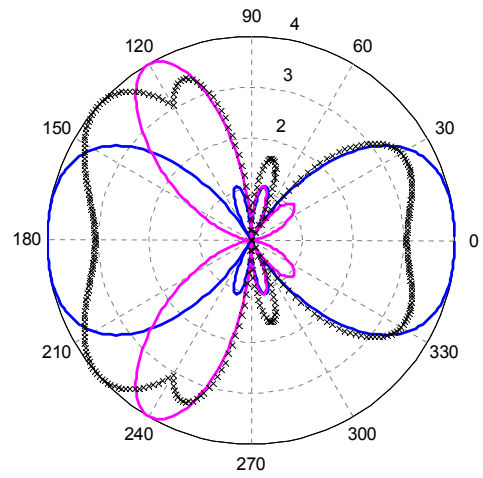
(ก)



(ข)



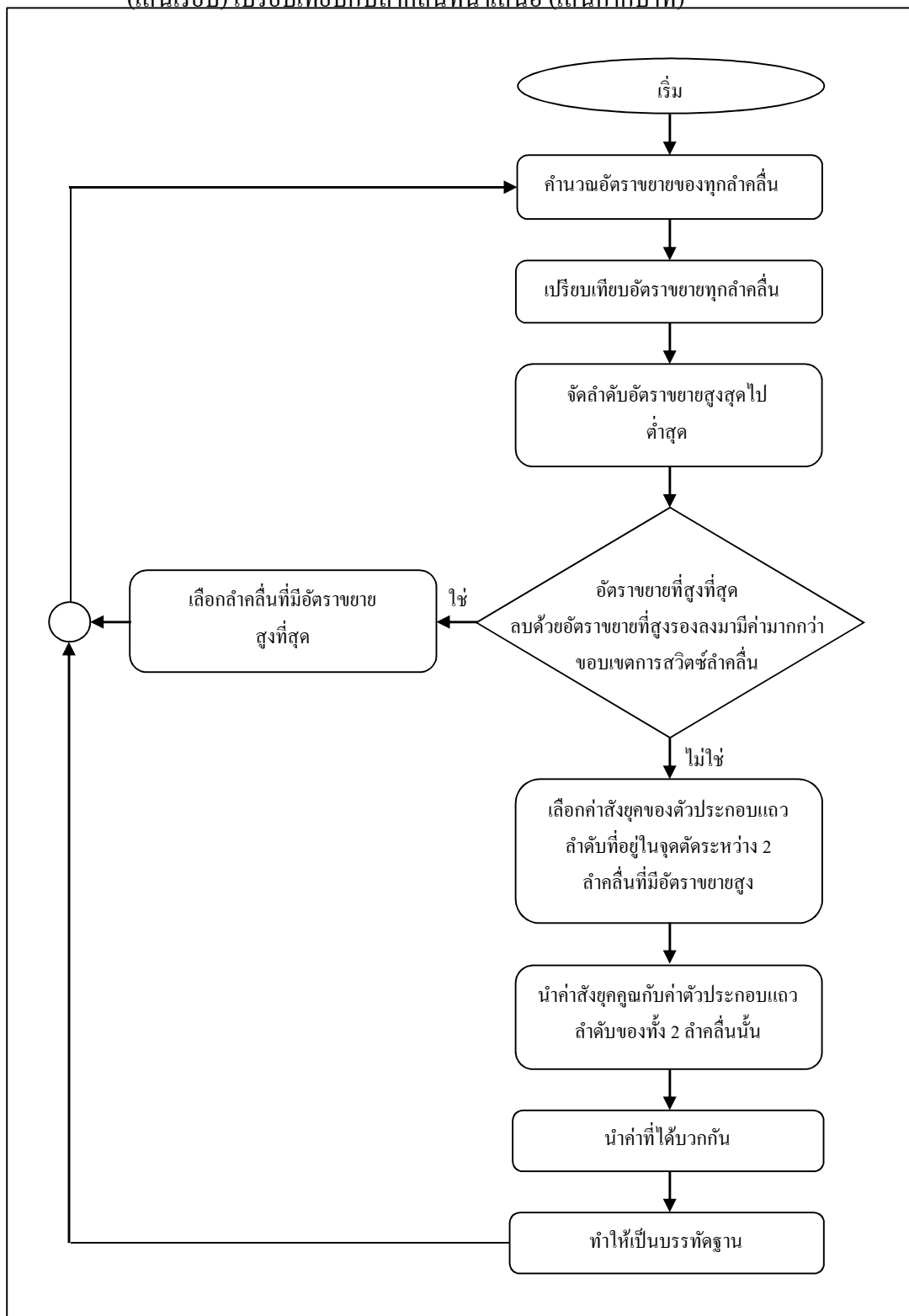
(ค)



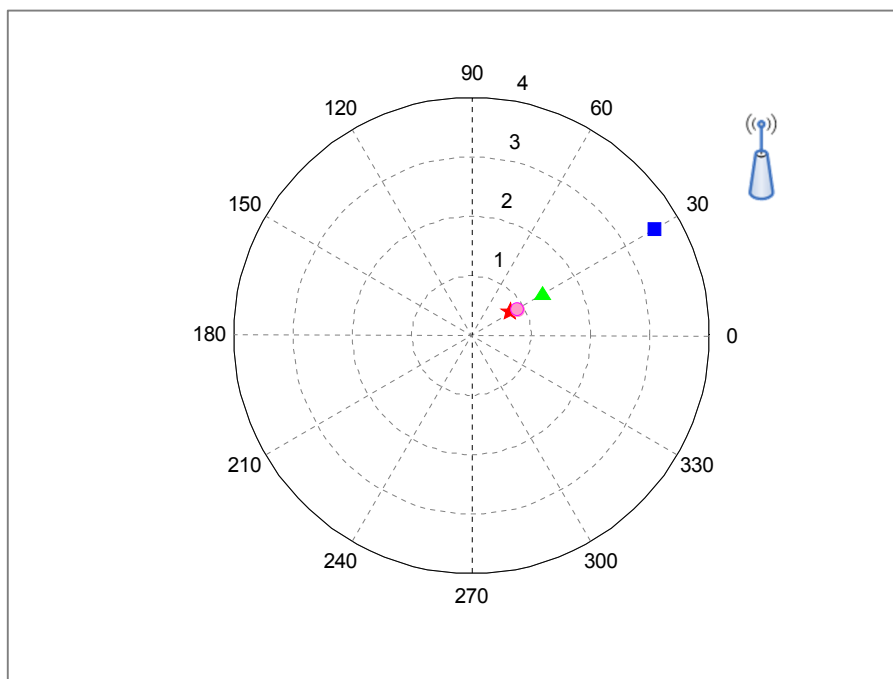
(ง)

รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานที่อยู่ติดกันที่เกิดจากสายอากาศ 4 ต้น (ก) ลำคลื่น 1 (เส้นเรียบ) และ 2 (เส้นจุด) เปรียบเทียบกับลำคลื่นที่นำเสนอ (เส้นกากบาท) (ข) ลำคลื่น 2 (เส้นจุด) และ 3 (เส้นประ) เปรียบเทียบกับลำคลื่นที่นำเสนอ (เส้นกากบาท) (ค) ลำคลื่น 3 (เส้นประ) และลำคลื่น 4 (เส้นประผสมจุด) เปรียบเทียบกับลำคลื่นที่นำเสนอ (เส้นกากบาท) (ง) ลำคลื่น 4 (เส้นประผสมจุด) และ 1

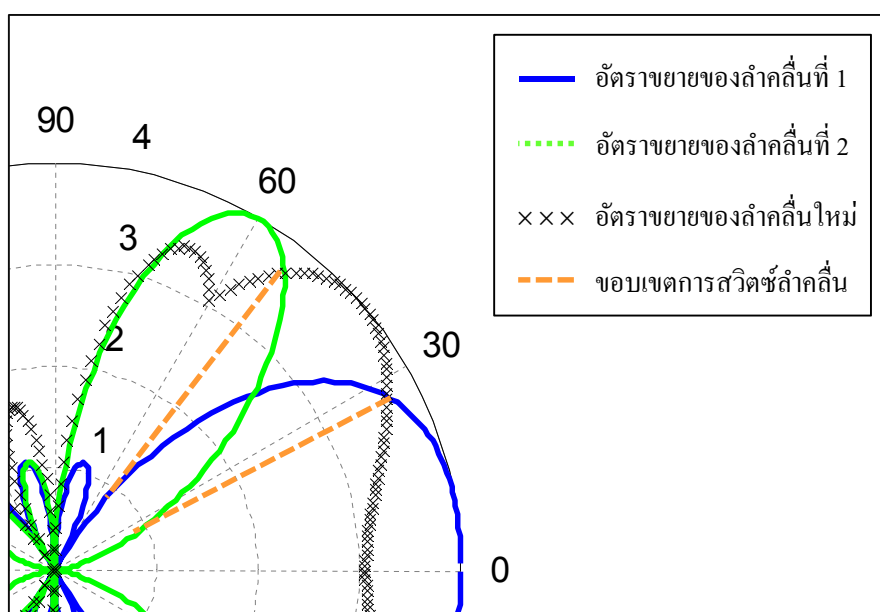
(เส้นเรียบ) เปรียบเทียบกับลำคิ่นที่นำเสนอ (เส้นกากบาท)



รูปที่ 3.9 แผนภาพการทำงานของระบบการก่อรูปลำคิ่นที่นำเสนอ



รูปที่ 3.10 อัตราขยายสัญญาณของ 4 ลำคลื่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับ 4 ต้น เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทาง 30° โดยจุดสี่เหลี่ยมแสดงอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่น 1 จุดสามเหลี่ยมแสดงอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่น 2 จุดดาวแสดงอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่น 3 ที่อยู่ซ้อนทับจุดกลมที่แสดงอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่น 4



รูปที่ 3.11 การกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น

$$AF(k=2, \theta_{user}) = \sum_{n=1}^N w(n, k=2) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{user}}$$

...

$$AF(k=N, \theta_{user}) = \sum_{n=1}^N w(n, k=N) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{user}}$$

ข) จัดลำดับอัตราขยายสัญญาณจากสูงไปต่ำ:

$$AF(k_a, \theta_{user}) \geq AF(k_b, \theta_{user}) \geq \dots \geq AF(k_N, \theta_{user})$$

ค) หาขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น:

$$M_{BS} = G_{Major} - G_{Minor} = AF(k_a, \theta_M) - AF(k_b, \theta_M)$$

ง) ตรวจสอบว่าผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำหรือไม่:
กรณีที่ 1 ผู้ใช้งาน ไม่ได้อยู่ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ

$$AF(k_a, \theta_{user}) - AF(k_b, \theta_{user}) > M_{BS}$$

ระบบจะเลือกลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงที่สุด คือ ลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ $AF(k_a, \theta_{user})$

กรณีที่ 2 ผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ ระบบจะคำนวณหาลำคลื่นใหม่

$$AF(k_a, \theta_{user}) - AF(k_b, \theta_{user}) \leq M_{BS}$$

จ) จากกรณีที่ 2 ในข้อที่แล้ว ต่อมาเลือกค่าอัตราขยายสัญญาณในทิศทางจุดตัดระหว่างลำคลื่นที่อยู่ติดกัน:

$$A_{eq} = AF(k_a, \theta = \theta_{ab}) = AF(k_b, \theta = \theta_{ab})$$

ก) นำค่าตั้งยุคของอัตราขยายสัญญาณในทิศทางจุดตัดระหว่างลำคลื่นที่อยู่ติดกันมาคูณกับอัตราขยายสัญญาณของทั้งสองลำคลื่นที่อยู่ติดกัน:

$$AF_{new}(k_a, \theta_{user}) = \sum_{n=1}^N \bar{A}_{eq} \cdot w(n, k_a) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{user}}$$

$$AF_{new}(k_b, \theta_{user}) = \sum_{n=1}^N \bar{A}_{eq} \cdot w(n, k_a) e^{j\pi(n-1)\cos\theta_{user}}$$

ข) หาอัตราขยายสัญญาณของลำคลื่นใหม่ที่น่าเสนอได้ดังนี้:

$$AF_{proposed} = N \left[\frac{AF_{new}(k_a, \theta) + AF_{new}(k_b, \theta)}{2AF_{new}(k_a, \theta_{ab})} \right]$$

จากอัลกอริทึมที่น่าเสนอจะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมหรือก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอ อัลกอริทึมจะดำเนินการเหมือนกันใน 3 ขั้นตอนแรก หลังจากนั้นขั้นตอนที่ 4 จะมีการใช้ขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นเพื่อตัดสินใจเลือกว่าจะใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบใด ซึ่งหากตัดสินใจได้ว่าเป็นการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมระบบการก่อรูปลำคลื่นจะเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดทันที แต่หากตัดสินใจได้ว่าเป็นการก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอระบบการก่อรูปลำคลื่นจะดำเนินการต่อตั้งแต่ขั้นตอนที่ 5 เป็นต้นไป โดยจะคำนวณหาลำคลื่นใหม่ที่มีอัตราขยายสัญญาณมากกว่าเดิม ดังนั้นการก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอจะมีอัตราขยายสัญญาณมากกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมอย่างแน่นอน

3.4 สรุป

ในบทนี้เราได้แสดงการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมของระบบวิทยุที่ทำงานบนแถบความถี่ 60 GHz โดยใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นจำนวน 2 3 และ 4 ต้น ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ ระบบวิทยุจะก่อรูปลำคลื่นโดยใช้ค่าน้ำหนักถ่วงที่สายอากาศแต่ละต้น ค่าน้ำหนักดังกล่าวจะมีหลายชุดที่แสดงในรูปของเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนสายอากาศคูณจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงาน ที่มีชื่อเรียกว่า รหัสในการก่อรูปลำคลื่น เพื่อให้ระบบ

สามารถเลือกค่าน้ำหนักที่เหมาะสมแล้วก่อรูปลำดับที่หันพู่หลักไปหาทิศทางของผู้ใช้งาน โดยเราได้แสดงการคำนวณหาค่าน้ำหนัก และตัวประกอบแถวลำดับที่บ่งบอกถึงอัตราขยายสัญญาณในแต่ละทิศทาง

เมื่อทำการวิเคราะห์อัตราขยายสัญญาณที่ผู้ใช้งานได้รับในทิศทางต่าง ๆ แล้วพบว่า มีบางทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ นั่นคือทิศทางของจุดตัดระหว่าง 2 ลำดับ ดังนั้นงานงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้เสนอการสร้างลำดับใหม่ที่แก้ปัญหาระดับอัตราขยายสัญญาณต่ำในทิศทางดังกล่าว โดยใช้วิธีการรวมแบบอัตราส่วนสูงสุด เพื่อสร้างลำดับใหม่ที่ให้อัตราขยายสัญญาณสูงขึ้นในทิศทางที่มีปัญหา จากผลการคำนวณยืนยันว่า การก่อรูปลำดับแบบที่นำเสนอได้เพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำให้กับการก่อรูปลำดับแบบเดิมได้ หลังจากนั้นเราได้ออกแบบอัลกอริทึมเพื่อแสดงกระบวนการทำงานของระบบ การออกแบบอัลกอริทึมนี้ได้คำนึงถึงอัตราขยายหรือความแรงสัญญาณเป็นสำคัญ โดยไม่ได้คำนึงถึงทิศทางของผู้ใช้งาน หากไม่มีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบวายกิกในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำจะมีผลอย่างมากถ้าผู้ใช้งานจำเป็นต้องอยู่ในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการสร้างลำดับที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงขึ้น ในบทความต่อไปเราจะนำเสนอผลการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบการก่อรูปลำดับที่นำเสนอในแง่มุมต่าง ๆ

บทที่ 4

การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์และวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในส่วนการพิจารณาผลกระทบของแถบความถี่กว้าง และในส่วนการหาประสิทธิภาพของอัลกอริทึม โดยพิจารณาอัตราขยายสัญญาณ เฟอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่น เฟอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอ ผลของคลื่นหลายวิถี และสุดท้ายพิจารณาอัตราผิดพลาดบิต เพื่อเป็นข้อมูลในการยืนยันประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอในระบบวายกิก

4.2 ผลการจำลองแบบของแถบกว้าง

ระบบวายกิกทำงานบนแถบความถี่ 60 GHz โดยมีความกว้างของสเปกตรัมสูงสุดอยู่ในช่วง 57-66 GHz งานวิจัยของ Chia-Chin, C., Watanabe, F., and Inamura, H. (2006). กล่าวว่าแถบกว้างจะมีค่าเศษส่วนความถี่แถบ (fractional bandwidth) สูงกว่า 10 เฟอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณหาเศษส่วนความถี่แถบได้จากสมการ (4.1)

$$B_f = 2 \left[\frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่ B_f คือ เศษส่วนความถี่แถบ f_H คือ ความถี่สูงสุด และ f_L คือ ความถี่ต่ำสุด เมื่อแทนค่าความถี่สูงสุดเท่ากับ 66 GHz และความถี่ต่ำสุดเท่ากับ 57 GHz จะได้ว่า

$$B_f = 2 \left[\frac{66 - 57}{66 + 57} \right] = 0.1463 = 14.63\% \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) ค่าเศษส่วนความถี่แถบของระบบวายกิกมีค่าเท่ากับ 14.63 % ดังนั้นระบบวายกิกจึงจัดอยู่ในแถบกว้าง งานวิจัยฉบับนี้จึงได้พิจารณาผลกระทบของแถบกว้าง ผู้เขียนได้จำลองแบบ โดยพิจารณา สเปกตรัม ในช่วง 57-64 GHz ซึ่งเป็น สเปกตรัมที่ใช้งานใน

ประเทศเกาหลีใต้ จากการคำนวณพบว่าสเปกตรัมดังกล่าวมีค่าเศษส่วนความกว้างแถบเท่ากับ 11.57 % จัดอยู่ในแถบกว้างเช่นเดียวกัน กำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองแบบตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาผลกระทบของแถบกว้าง

จำนวนสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น	4 ต้น
จำนวนแบบรูปการแผ่พลังงาน	4 แบบ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศ	ครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ
ความยาวคลื่นของสายอากาศ	5×10^{-3} เมตร
ความถี่ของสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ	57 GHz 58 GHz 59 GHz 60 GHz 61 GHz 62 GHz 63 GHz และ 64 GHz

จากพารามิเตอร์ที่กำหนดจะสามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงานได้โดยใช้สมการตัวประกอบแถวลำดับ โดยทั่วไปแล้วในตำราต่าง ๆ จะนิยมใช้สายอากาศไอโซทรอปิก (isotropic antenna) ที่มีคุณสมบัติแผ่พลังงานในทุกทิศทางรอบตัวเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับจึงมีค่าเท่ากับตัวประกอบแถวลำดับนั่นเอง ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการ (4.3)

$$AF(k, \theta) = \sum_{n=1}^N w(n, k) e^{j2\pi(n-1)(d/\lambda_2)\cos\theta} \quad (4.3)$$

โดยที่ $w(n, k)$ คือ รหัสในการก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศต้นที่ n และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบที่ k ส่วน N คือ จำนวนสายอากาศที่วางตัวเรียงกันเป็นแนวตรงหรือวางตัวแบบ $N \times 1$ ต้น ส่วน d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น ส่วน λ_2 คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศ และ θ คือ มุมตกกระทบของสัญญาณที่เข้ามาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น

รหัสในการก่อรูปลำคลื่นอย่างง่ายสามารถหาได้จากสมการ (4.4)

$$w(n, k) = j^{\text{floor}\left\{\frac{(n-1) \times \text{mod}((k-1) + (K/2), K)}{K/4}\right\}}$$

เมื่อ $n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K$ (4.4)

โดยที่ j มีค่าเท่ากับ $\sqrt{-1}$ ส่วนฟังก์ชัน $\text{floor}()$ จะแสดงค่าจำนวนเต็มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าในวงเล็บ ส่วนฟังก์ชัน $\text{mod}(X,Y)$ มีค่าเท่ากับสมการ $X - mY$ เมื่อ m คือ ค่าจำนวนเต็มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่า X/Y หรือ $m = \text{floor}(X/Y)$ และ $Y \neq 0$

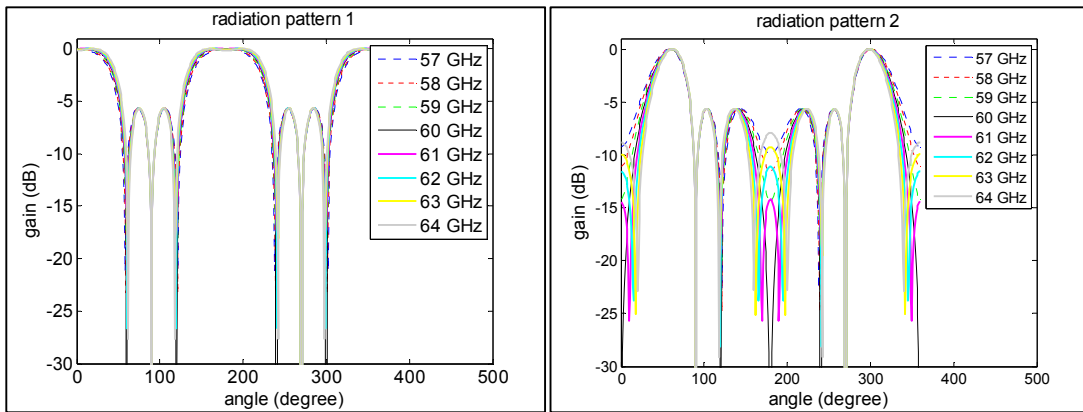
จากพารามิเตอร์ในการจำลองแบบดังตารางที่ 4.1 รหัสในการก่อรูปลำคลื่นที่ได้แสดงดังสมการ (4.5)

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -j & 1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & j & 1 & -j \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

จากสมการ (4.5) จะเห็นได้ว่ารหัสในการก่อรูปลำคลื่น W เป็นเมทริกซ์ขนาด 4×4 ซึ่งค่าน้ำหนักในคอลัมน์ที่ 1 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 -1 1 และ -1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 2 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ $1 -j -1$ และ j ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 3 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 1 1 และ 1 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 4 นั้นประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 ต้นที่ 2 ต้นที่ 3 และต้นที่ 4 ที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ $1 j -1$ และ $-j$ ตามลำดับ เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ (4.3) จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานออกมา 4 แบบดังรูปที่ 4.1

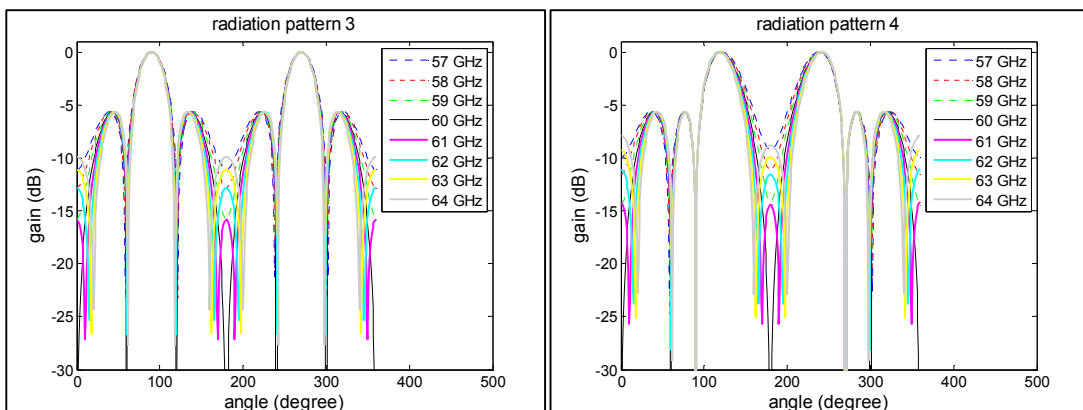
รูปที่ 4.1 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4 ต้น จะเห็นได้ว่าที่ทุกคลื่นหลักของแต่ละแบบรูปการแผ่พลังงานจะมีอัตราขยายสัญญาณใกล้เคียงกันในแต่ละความถี่ โดยอัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 อยู่ที่มุม 0° และ 180° อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2 อยู่ที่มุม 60° และ 300° อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ 3 อยู่ที่มุม 90° และ 270° อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ 4 อยู่ที่มุม 120° และ 240° เพื่อให้เห็นความแตกต่างของอัตราขยายสัญญาณสูงสุดในแต่ละความถี่ จึงได้จำลองแบบเพื่อหาความแตกต่างของอัตราขยายสัญญาณสูงสุดในแต่ละความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าอัตราขยายสัญญาณในแต่ละความถี่มีค่าแตกต่างกันน้อยมากในทุกแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังนั้นเพื่อหาประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นเมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นด้วยความถี่ของสัญญาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 57 GHz จนถึง



(ก)

(ข)



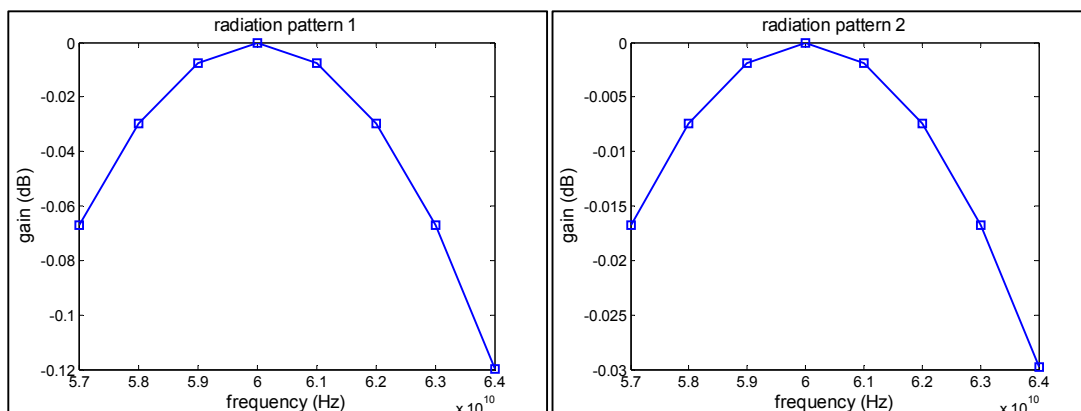
(ค)

(ง)

รูปที่ 4.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน 4 แบบที่เกิดจากสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4 ต้น โดยพิจารณาความถี่ 57-64 GHz (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 1 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 2 (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 3 (ง) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ 4

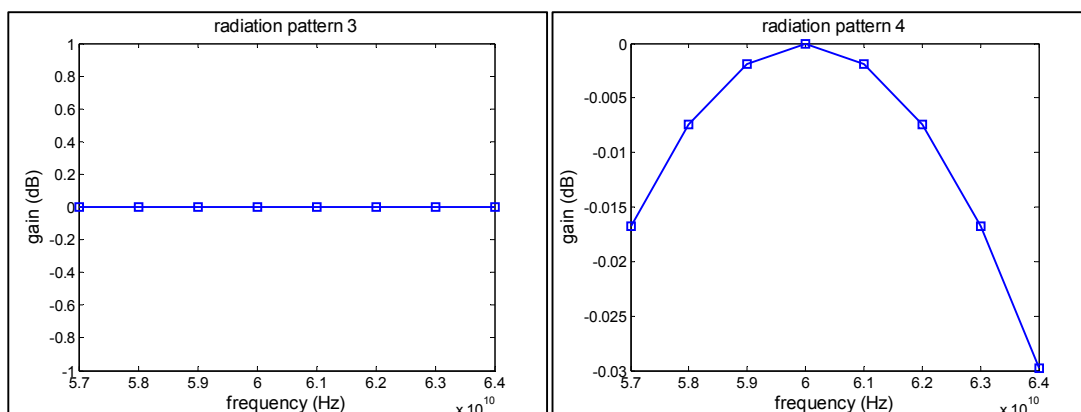
64 GHz นั้น จึงได้นำอัตราขยายสัญญาณเหล่านี้มาจำลองแบบหาอัตราผิดพลาดบิต โดยระบบวายกิกใช้การส่งสัญญาณแบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีคลื่นพาห่อย่อยจำนวน 512 คลื่น ซึ่งมีพารามิเตอร์ในการจำลองแบบตามตารางที่ 4.2

รูปที่ 4.3 แสดงอัตราผิดพลาดบิตของระบบวายกิกที่ใช้การส่งสัญญาณแบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบบีพีเอสเค เมื่อไม่มีผลกระทบของแถบกว้าง



(ก)

(ข)



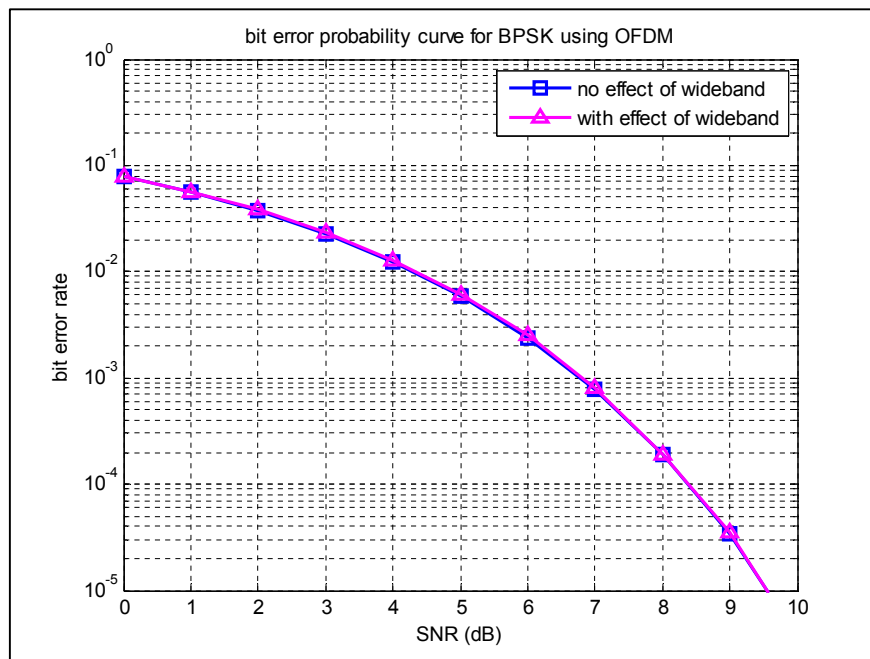
(ค)

(ง)

รูปที่ 4.2 อัตราขยายสัญญาณสูงสุดในแต่ละความถี่ (ก) อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบ
 รูปการแผ่พลังงานที่ 1 (ข) อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงาน
 ที่ 2 (ค) อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ 3
 (ง) อัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ 4

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาอัตราผิดพลาดบิตของแถบกว้าง

คลื่นพาห่อย่อยข้อมูล	336 คลื่น
คลื่นพาห่อย่อยนำร่อง	16 คลื่น
คลื่นพาห่อย่อยดีซี	3 คลื่น
รูปแบบการมอดูเลต	บีพีเอสเค



รูปที่ 4.3 อัตราผิดพลาดบิตของระบบวายกติกที่ใช้การส่งสัญญาณแบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบบีพีเอสเค เมื่อพิจารณาผลกระทบของแถบกว้าง

และเมื่อมีผลกระทบของแถบกว้าง จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราผิดพลาดบิตมีความใกล้เคียงกันมาก จนมองไม่เห็นความแตกต่าง ดังนั้นจึงสรุปผลการพิจารณาได้ว่าแถบกว้างไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของระบบวายกติก

4.3 ผลการจำลองแบบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

จากเนื้อหาในบทที่ผ่านมาผู้เขียนได้ออกแบบอัลกอริทึมที่นำเสนอเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการก่อรูปลำคลื่นในระบบวายกติก โดยกระบวนการออกแบบทั้งหมดได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.2.2 เพื่อหาขีดจำกัดในการใช้งานอัลกอริทึมที่นำเสนอ ผู้เขียนจึงพิจารณาประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นในแอมพลิจูดต่าง ๆ โดยกำหนดสถานการณ์ในการจำลองแบบเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) สถานการณ์อุดมคติ (ideal) หมายถึง สถานการณ์ที่ไม่มีการรบกวน และ 2) สถานการณ์ที่มีสัญญาณรบกวน โดยพิจารณาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) เท่ากับ 30 dB 20 dB 10 dB และ 0 dB พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบแสดงดังตารางที่ 4.3

ในการใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ไม่สามารถทราบได้เลยว่าผู้ใช้งานจะอยู่ในทิศทางใด ดังนั้นเพื่อความน่าเชื่อถือของการจำลองแบบจึงสุ่มทิศทางของผู้ใช้งานออกมาทั้งหมด -

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

จำนวนสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น	4 ต้น
จำนวนแบบรูปการแผ่พลังงาน	4 แบบ
ระยะห่างระหว่างสายอากาศ	ครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ
ความยาวคลื่นของสายอากาศ	5×10^{-3} เมตร
ความถี่ของสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ	60 GHz

100,000 ครั้ง เนื่องจากจำนวนการสุ่มในระดับนี้จะให้ค่าของกราฟค่อนข้างคงที่ แต่หากมีจำนวนการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งานน้อยเกินไปจะทำให้ค่าของกราฟในการจำลองแบบแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปจนไม่มีความน่าเชื่อถือ

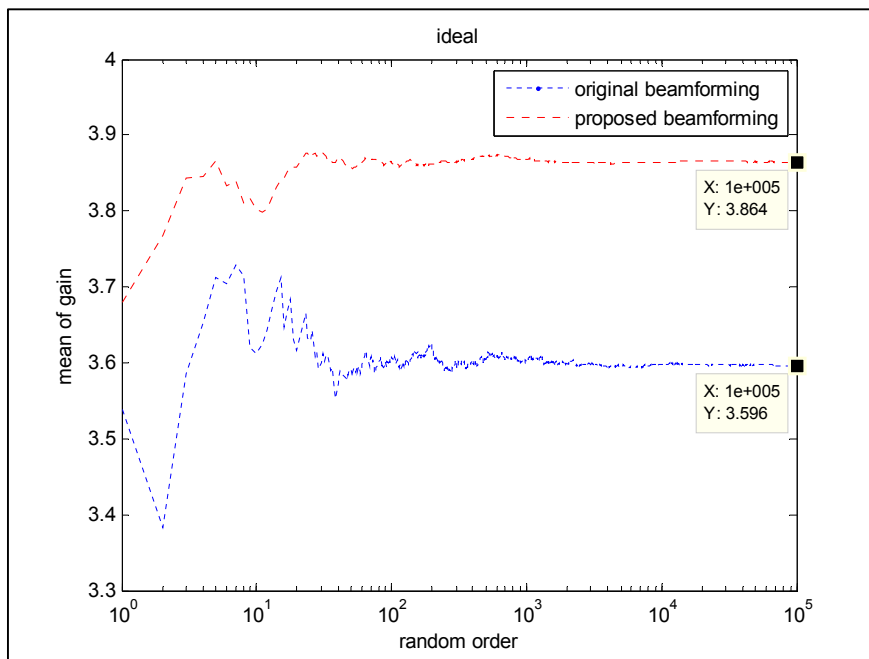
4.3.1 การพิจารณาอัตราขยายสัญญาณ

เป้าหมายสำคัญของการออกแบบอัลกอริทึมที่น่าเสนอก็คือการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ จึงเปรียบเทียบอัตราขยายสัญญาณจากการใช้เพียงการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอพร้อมด้วย

4.3.1.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน

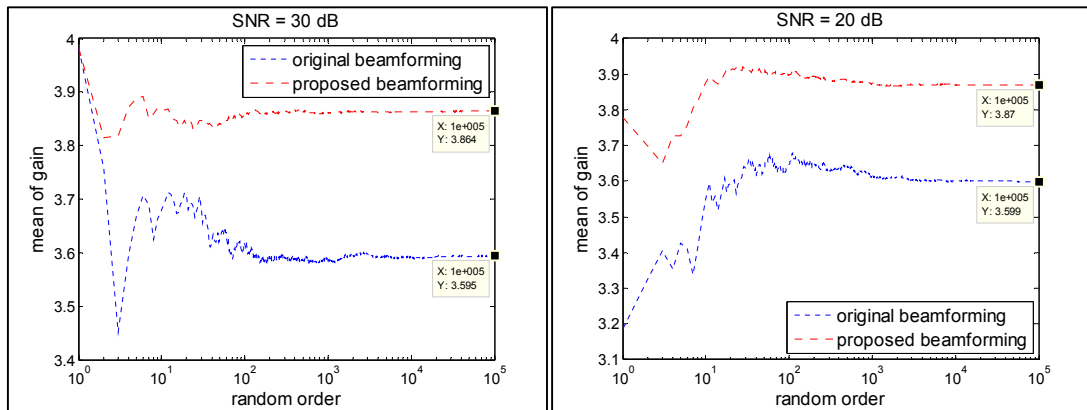
พิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณ (mean of gain) ของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่น่าเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทาง (random order) ของผู้ใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ว่าอัลกอริทึมที่น่าเสนอจะช่วยเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้กับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมได้หรือไม่

รูปที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมเทียบกับค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอ ในสถานการณ์ **อุดมคติ** จะเห็นได้ว่า หากแบ่งกราฟเป็น 2 ช่วง กราฟช่วงแรกจะมีการแกว่ง (swing) มากเนื่องจากจำนวนครั้งในการสุ่มยังไม่เพียงพอ ซึ่งหลังจากผ่านไปยังกราฟช่วงหลังแล้วกราฟจะมีการแกว่งน้อยลงจนกระทั่งหนึ่งค่า ๆ หนึ่ง ดังนั้นจึงเลือกค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณเมื่อมีการสุ่ม 100,000 ครั้ง สำหรับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 3.596 ส่วนการก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 3.864 ซึ่งจะเห็นว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบที่น่าเสนอสามารถเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้กับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมเท่ากับ 0.268 นั่นคืออัตราขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น 7.45 %



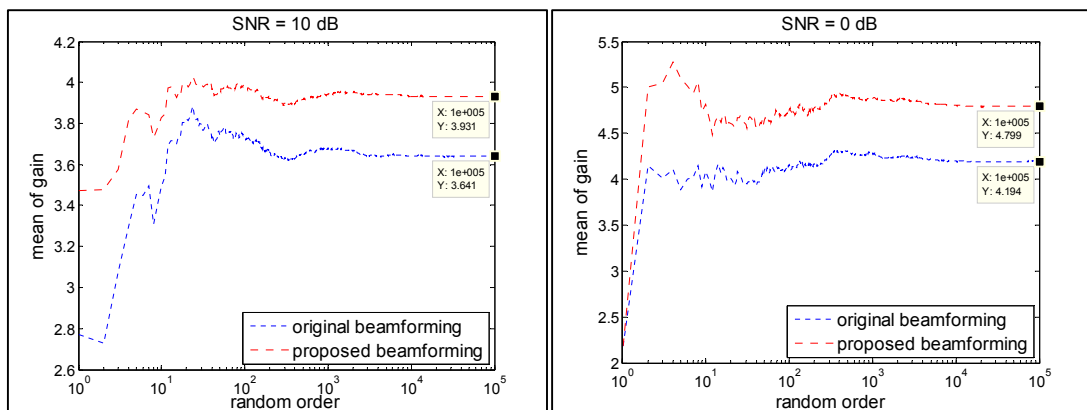
รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์อุดมคติ

หลังจากนั้นได้เปลี่ยนสถานการณ์ในการจำลองแบบ โดยกำหนดให้มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราขยายสัญญาณเมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 30 dB และ 20 dB จะมีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมประมาณ 3.6 และค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอประมาณ 3.9 แต่เมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10 dB และ 0 dB กลับมีแนวโน้มของค่าอัตราขยายสัญญาณสูงขึ้นตามการรบกวนที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของการก่อรูปลำคลื่นพบว่า เมื่อมีสัญญาณรบกวนมากเกินไปอาจทำให้อัตราขยายสัญญาณที่มีอยู่เดิมมีค่าเพิ่มขึ้นไปมาก โดยจะมีทั้งอัตราขยายสัญญาณที่สูงมากและอัตราขยายสัญญาณที่ต่ำมากกว่าอัตราขยายสัญญาณปกติ ซึ่งในกระบวนการก่อรูปลำคลื่นนั้นระบบการก่อรูปลำคลื่นจะเลือกลำคลื่นที่ให้อัตราขยายสัญญาณสูงในระดับที่กำหนดไว้ ดังนั้นอัตราขยายสัญญาณต่ำมากที่เกิดจากผลกระทบของสัญญาณรบกวนนั้นจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบการก่อรูปลำคลื่น แต่อัตราขยายสัญญาณสูงมากที่เกิดจากผลกระทบของ -



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ (ก) 30 dB (ข) 20 dB (ค) 10 dB (ง) 0 dB

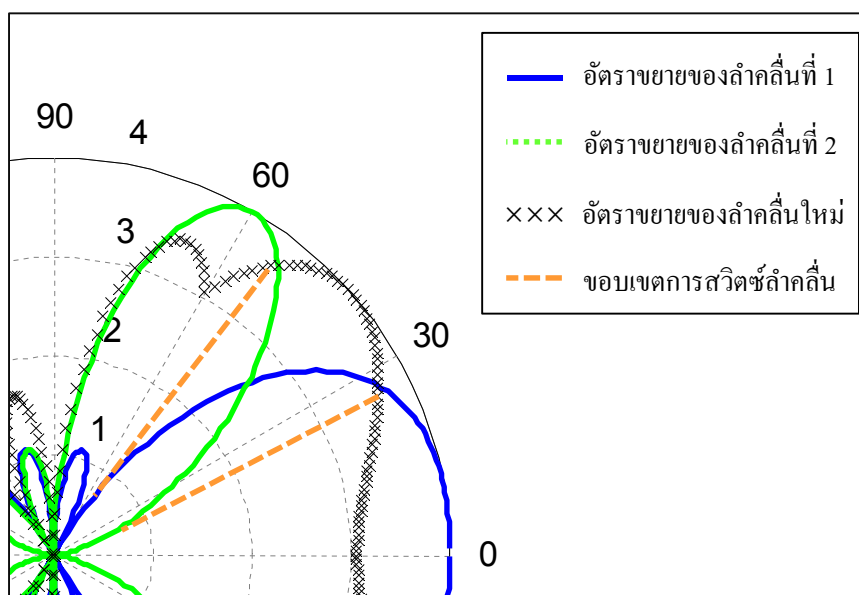
สัญญาณรบกวนนั้นการก่อรูปลำคลื่นจะถูกนำมาเปรียบเทียบหาอัตราขยายสัญญาณสูงสุด ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากเกินไปจนทำให้อัตราขยายสัญญาณเพิ่มขึ้นไปมากอาจทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมไม่ว่าจะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่าใดก็ตาม

4.3.1.2 อัตราขยายสัญญาณเทียบกับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น

ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้น (mean of increasing gain)

หมายถึงการนำอัตราขยายสัญญาณของการรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอด้วยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเมื่อมีการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน 100,000 ครั้ง โดยที่**ขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น** คือ ขอบเขตที่ใช้ตัดสินใจว่าระบบการก่อรูปลำคลื่นจะเลือกการก่อรูปลำคลื่นที่นำเสนอ ซึ่งสามารถหาได้จากการผลต่างของอัตราขยายสัญญาณของ 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกัน รูปที่ 4.6 แสดงการกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่หาได้จากผลต่างของอัตราขยายสัญญาณในทิศทางของจุดตัดระหว่างลำคลื่นเดิมและลำคลื่นใหม่ สำหรับการจำลองแบบจะมีการปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นให้สั้นลงและยาวขึ้นตามจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ โดยกำหนดให้ขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติมีค่าเป็น 1 เท่า เหตุผลของการปรับขนาดของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นก็เพื่อค่าของอัตราขยายสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป

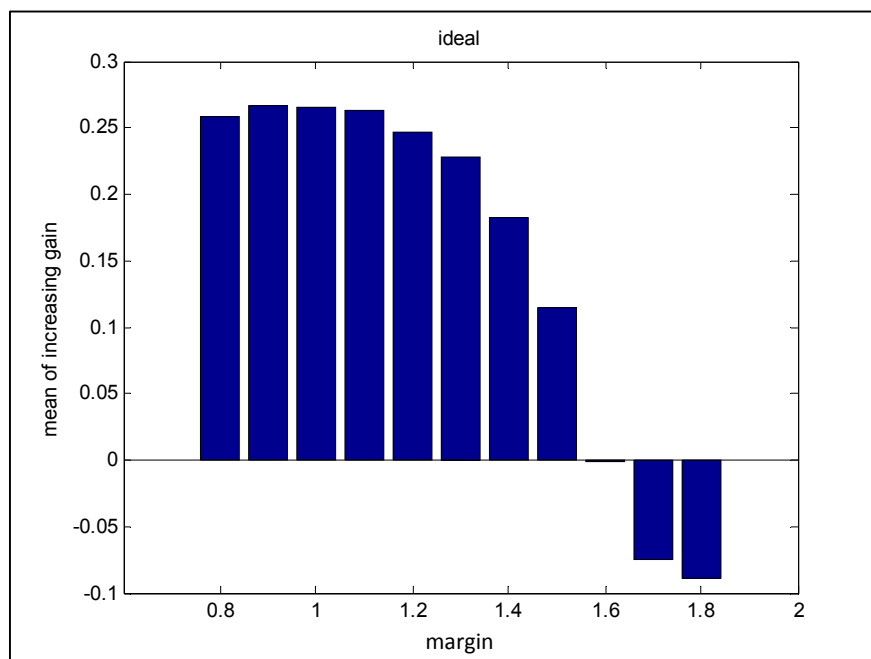
รูปที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์อุดมคติ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นที่ขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นเท่ากับ 0.9 และ 1 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.268 หรืออัตราขยายสัญญาณเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น



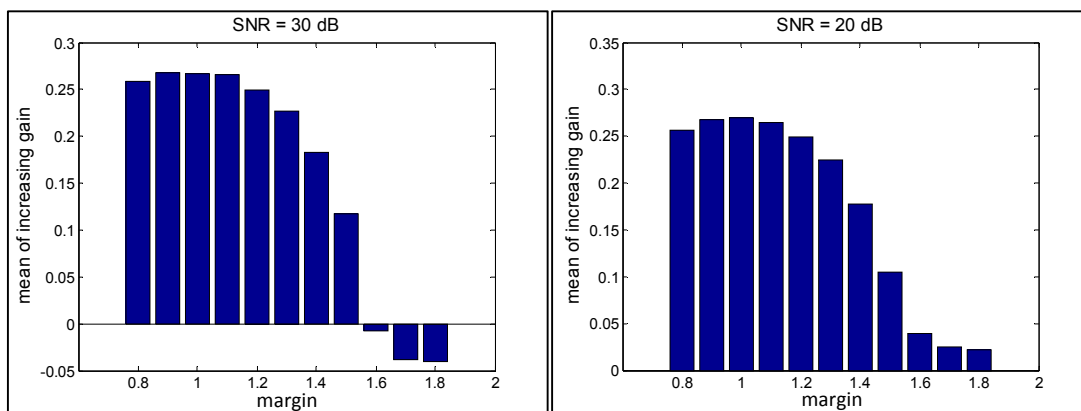
รูปที่ 4.6 การกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น

7.45 % แต่เมื่อมีการปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นเท่ากับ 0.8 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 และ 1.6 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นที่ต่ำกว่า 0.26 สำหรับการปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1.7 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติจะเป็นกรณีที่ใช้งานอัลกอริทึมที่นำเสนอล้มเหลว กล่าวคือค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมีค่าติดลบ หรือมีอัตราขยายสัญญาณต่ำกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม จึงไม่ควรกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นเท่ากับ 1.7 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ ดังนั้นขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.9 และ 1 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ

หลังจากนั้นได้เปลี่ยนสถานการณ์ในการจำลองแบบ โดยกำหนดให้มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ที่แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 30 dB 20 dB และ 10 dB กราฟจะมีลักษณะเหมือนภูเขาแต่จะโค้งลงไปทางขวาเรื่อย ๆ โดยขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด เหตุผลที่กราฟทางซ้ายของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติมี

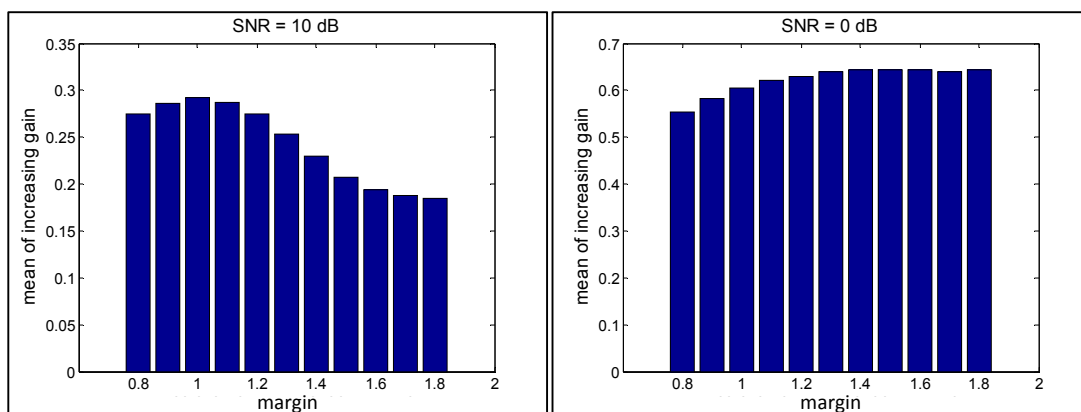


รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์อุดมคติ



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์
 ลำคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน
 เท่ากับ (ก) 30 dB (ข) 20 dB (ค) 10 dB (ง) 0 dB

แนวโน้มที่จะมีอัตราขยายสัญญาณต่ำลง เนื่องจากเมื่อกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นสั้นเกินไป จะทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมีโอกาสที่จะเลือกการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอเพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณน้อยลง จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณต่ำลง สำหรับเหตุผลที่กราฟทางขวาของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติมีแนวโน้มที่จะมีอัตราขยายสัญญาณต่ำลง เนื่องจากเมื่อกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นยาวเกินไปจะทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นตัดสินใจเลือกการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมากขึ้นจนไม่ได้คำนึงว่าในการเลือกการก่อรูปลำคลื่นที่นำเสนอบางครั้ง

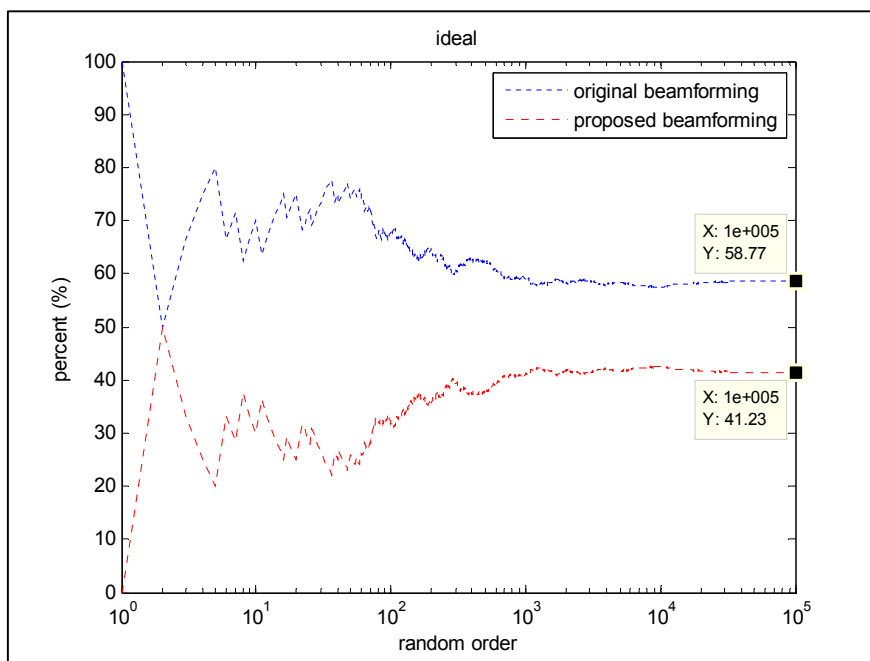
นั่นจะมีอัตราขยายสัญญาณต่ำกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม ทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมีค่าต่ำลงเช่นกัน ต่อมาเมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0 dB พบว่า กราฟมีลักษณะที่แตกต่างไปจากแนวโน้มที่กล่าวข้างต้นนั่นคือกราฟมีค่ามากขึ้นจากซ้ายไปขวา นั่นแสดงว่ายิ่งขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นยาวขึ้นเท่าใด ยิ่งทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากขึ้น จากการวิเคราะห์สามารถยืนยันถึงความเป็นไปได้เช่นเดียวกับหัวข้อย่อยที่แล้วได้ว่า เมื่อมีสัญญาณรบกวนมากเกินไปจนทำให้อัตราขยายสัญญาณเพี้ยนไปมากอาจทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมีผลต่างของอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอและอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมากขึ้น จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากขึ้น

4.3.2 การพิจารณาเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอ

4.3.2.1 เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน

เปอร์เซ็นต์การใช้งาน หมายถึง ปริมาณการเลือกลำคลื่นเดิมและการเลือกลำคลื่นใหม่เมื่อพิจารณาทุกทิศทาง เพื่อวิเคราะห์ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอจะต้องคำนวณหาลำคลื่นใหม่มากน้อยเพียงใด โดยจะสุ่มทิศทางของผู้ใช้งานออกมาทั้งหมด 100,000 ครั้ง แล้วนับว่ามีการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมกี่ครั้งและมีการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอกี่ครั้งจากทั้งหมด 100,000 ครั้ง แล้วคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากมีเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมากเกินไปอาจทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นทำงานช้าลง

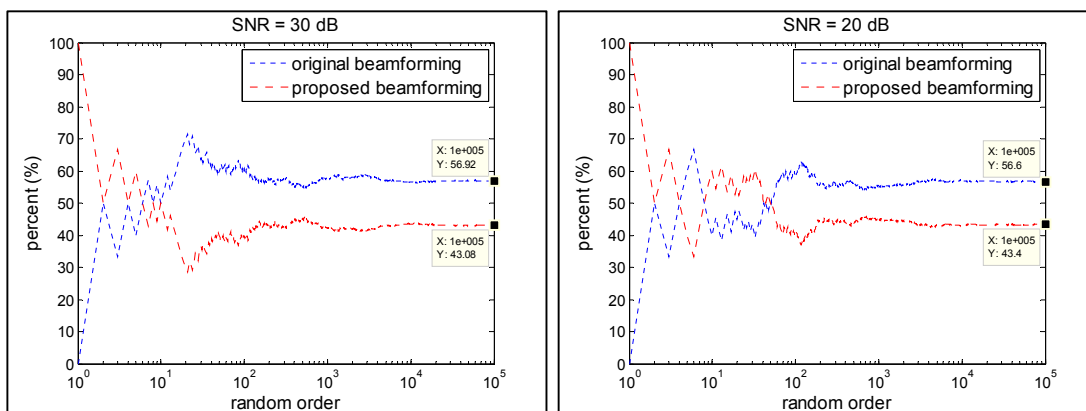
รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์อุดมคติ จะเห็นได้ว่ากราฟในช่วงแรกจะมีการแกว่งมาก เนื่องจากจำนวนการสุ่มยังไม่เพียงพอ จึงพิจารณากราฟช่วงหลังที่การสุ่ม 100,000 ครั้ง พบว่าเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมีค่าเท่ากับ 58.77 % ส่วนเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 41.23 % ดังนั้นสัดส่วนการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมต่อการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 3:2 หมายความว่าเมื่อผู้ใช้งานอยู่ใน 5 ทิศทางระบบการก่อรูปลำคลื่นจะมีการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม 3 ทิศทางและมีการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ 2 ทิศทาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการก่อรูปลำคลื่นจะใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมเป็นหลัก ถึงแม้การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจะมีอัตราขยายสัญญาณที่ค่อนข้างดีอยู่แล้ว แต่ก็ยังมีอัตราขยายสัญญาณต่ำในบางทิศทาง การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอจึงเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับบางทิศทางนั้น โดยไม่ทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมี



รูปที่ 4.9 เปรอ์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์อุดมคติ

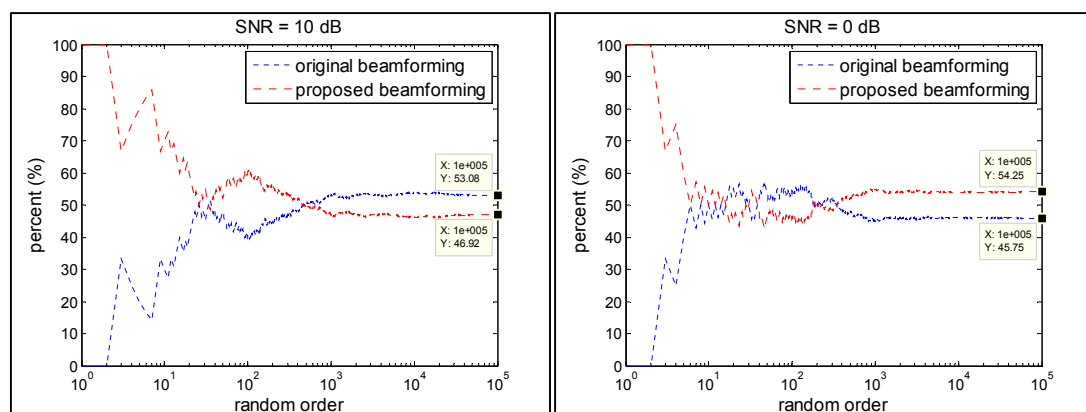
การคำนวณหาลำคลื่นใหม่บ่อยเกินไป เนื่องจากอาจทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นทำงานได้ช้าลง และจะส่งผลให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมีประสิทธิภาพต่ำ

หลังจากนั้นจึงได้พิจารณาว่าเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแต่ละแบบจะมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใดเมื่อได้รับผลกระทบของการรบกวน จึงกำหนดให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ดังรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 30 dB 20 dB 10 dB และ 0 dB พบว่า เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมีแนวโน้มลดลงตามการรบกวนที่มากขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการรบกวนที่มากขึ้น โดยเมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0 dB จะให้เห็นว่าระบบการก่อรูปลำคลื่นจะตัดสินใจเลือกการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมากกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาอาจทำให้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมีค่าต่ำลงจนตกอยู่ในขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น ระบบการก่อรูปลำคลื่นจึงต้องคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณใหม่ของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอทำให้เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมี



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

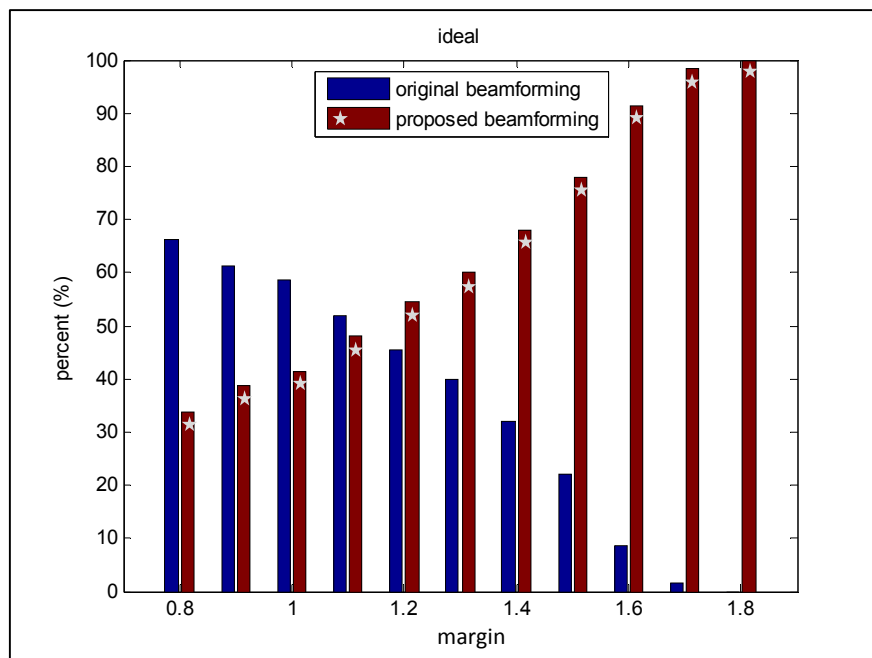
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ (ก) 30 dB (ข) 20 dB (ค) 10 dB (ง) 0 dB

ค่ามากขึ้น ซึ่งข้อเสียของการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมากเกินไปจะทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นต้องคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณใหม่บ่อยขึ้น อาจส่งผลให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นทำงานได้ช้าลง

4.3.2.2 เปรอ์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น

พิจารณาเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นให้สั้นลงหรือยาวขึ้นกว่าขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นปกติ เพื่อแสดงขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอ

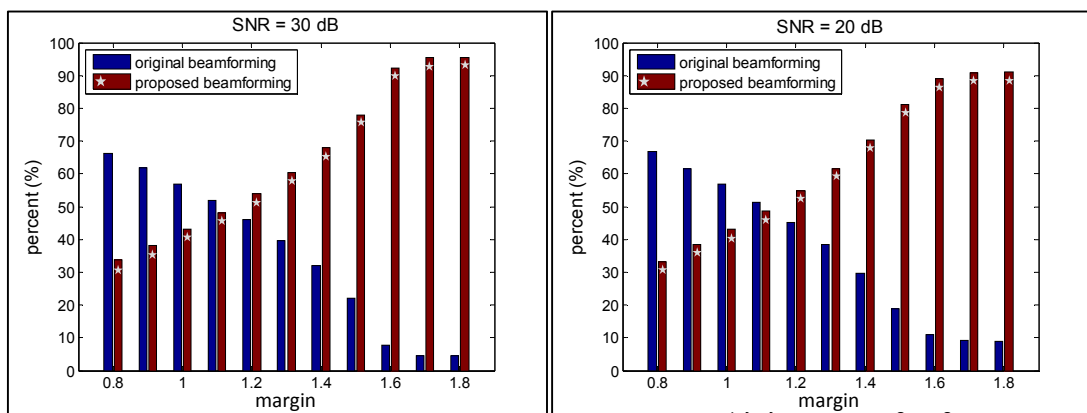
รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น ในสถานการณ์อุดมคติ จะเห็นได้ว่ากราฟเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมกับกราฟเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าสวนทางกัน โดยที่ขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.1 เท่าของขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นปกติจะมีเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมากกว่าเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ แต่ที่ขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับ 1.2 เท่าของขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นปกติจะมีเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ เหตุผลคือเมื่อกำหนดขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่นสั้นลงจะทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นตัดสินใจสร้างลำคลื่นใหม่น้อยลง



รูปที่ 4.11 เปรอ์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตซ์ลำคลื่น ในสถานการณ์อุดมคติ

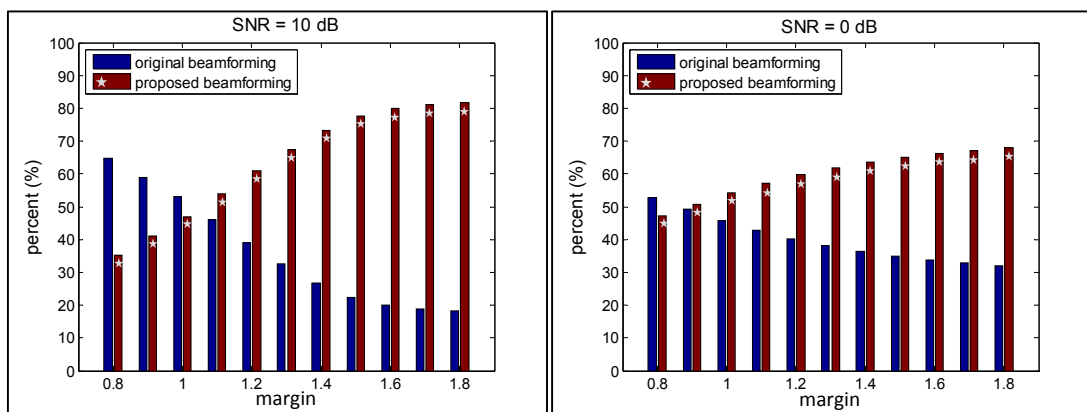
และเมื่อกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นขาขึ้นจะทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นตัดสินใจสร้างลำคลื่นใหม่มากขึ้น ขอบเขตการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมควรมีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.1 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ เนื่องจากมีการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมากกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ

รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมมีแนวโน้มลดลง



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

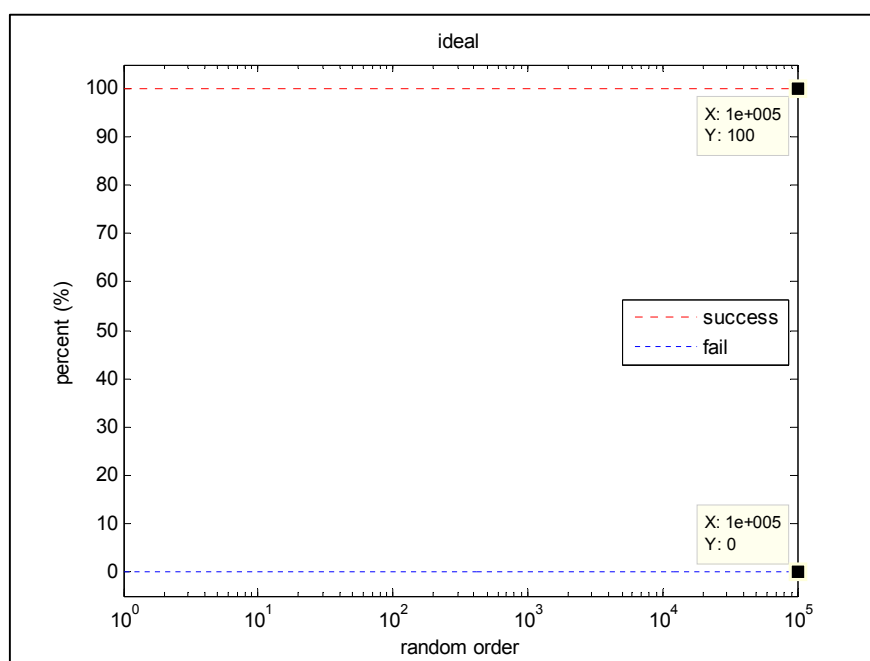
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เท่ากับ (ก) 30 dB (ข) 20 dB (ค) 10 dB (ง) 0 dB

ตามจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำดับที่มากขึ้นในทุกการรบกวน จึงสามารถยืนยันได้ว่ายังมีขอบเขตการสวิตช์ลำดับยาวขึ้น จะยิ่งทำให้มีการใช้งานการก่อรูปลำดับแบบเดิมลดลง แต่จะมีการใช้งานการก่อรูปลำดับแบบที่นำเสนอเพิ่มขึ้น

4.3.3 การพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

4.3.3.1 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน

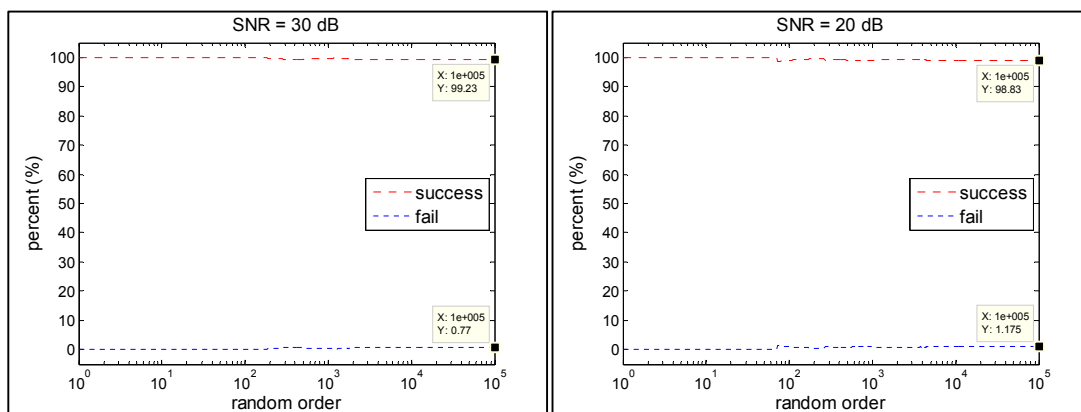
ความสำเร็จของอัลกอริทึม หมายถึง เมื่อระบบการก่อรูปลำดับตัดสินใจเลือกใช้การก่อรูปลำดับแบบที่นำเสนอแล้ว อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำดับแบบที่นำเสนอจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำดับแบบเดิมเสมอ โดยจะสุ่มทิศทางของผู้ใช้งานออกมาทั้งหมด 100,000 ครั้ง แล้วนับว่ามีความสำเร็จของอัลกอริทึมกี่ครั้ง และมีความผิดพลาดของอัลกอริทึมกี่ครั้งจากทั้งหมด 100,000 ครั้งแล้วคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ หากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอัลกอริทึมมากแสดงว่าระบบการก่อรูปลำดับตัดสินใจเลือกการก่อรูปลำดับผิดพลาดเนื่องจากให้อัตราขยายสัญญาณต่ำกว่าการใช้งานการก่อรูปลำดับแบบเดิม ดังนั้นจึงได้จำลองแบบหาเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ว่าอัลกอริทึมมีความน่าเชื่อถือมากเพียงใด



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์อุดมคติ

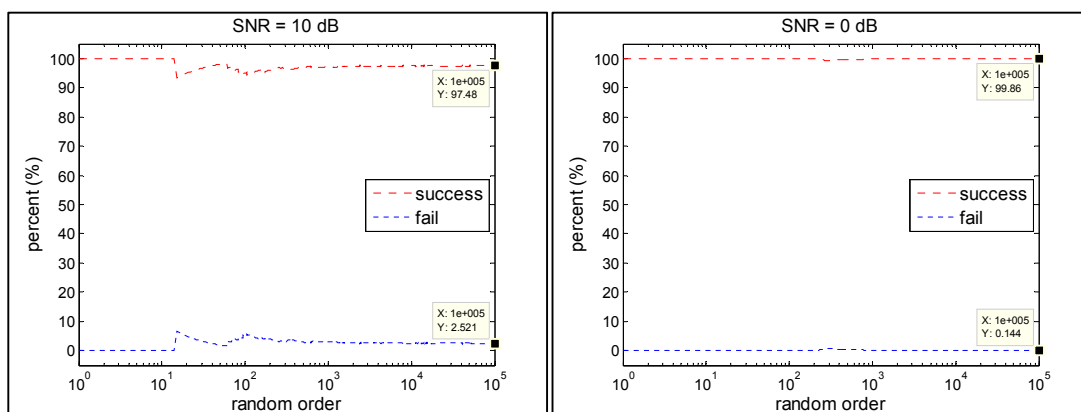
รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์อุดมคติ จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 100 % ส่วนเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 0 % หรือไม่มีความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเลย

รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณ



(ก)

(ข)



(ค)

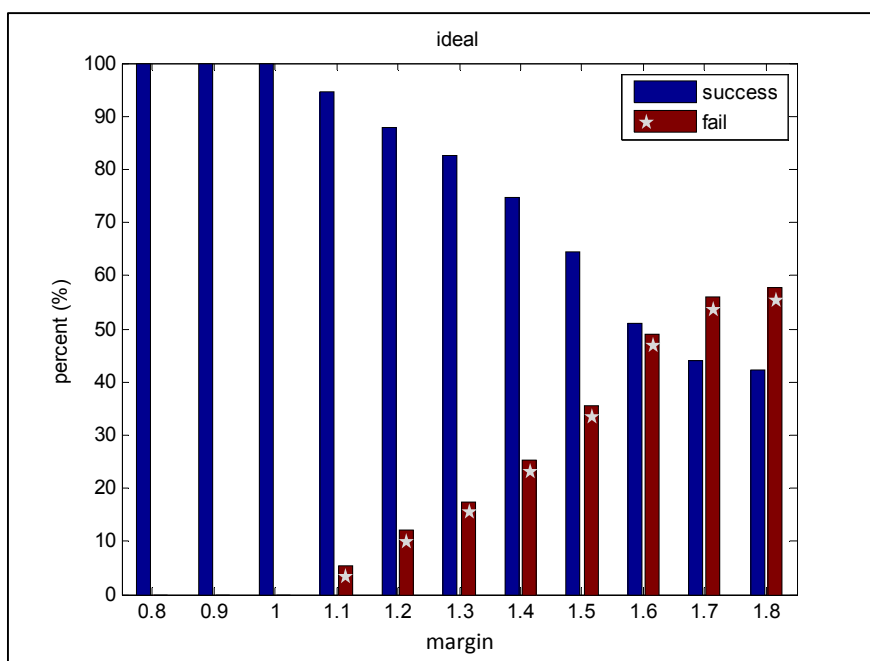
(ง)

รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มทิศทางของผู้ใช้งาน ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ (ก) 30 dB (ข) 20 dB (ค) 10 dB (ง) 0 dB

ต่อสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่า เมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 30 dB 20 dB และ 10 dB จะมีเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอเท่ากับ 99.23 % 98.83 % และ 97.48 % ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเนื่องอัลกอริทึมที่นำเสนอตัดสินใจผิดพลาดมากขึ้น แต่เมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10 dB พบว่า เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 99.86 % ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อมีการรบกวนมากเกินไปอาจทำให้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมต่ำลงมาก เมื่อนำอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจึงพบว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่ามากกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมในหลายทิศทางของผู้ใช้งาน

4.3.3.2 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น

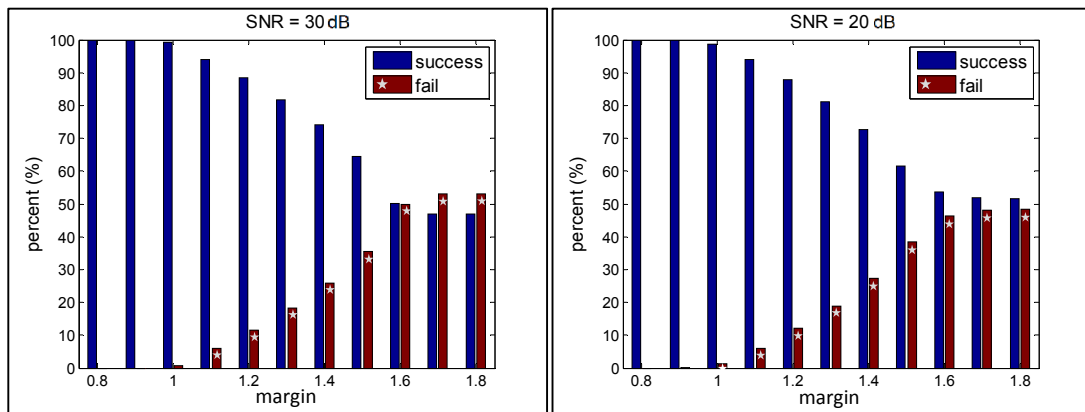
พิจารณาเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเมื่อมีการปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นให้สั้นลงหรือยาวขึ้นกว่าขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติเพื่อแสดงขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นมีเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์ฉุกเฉิน

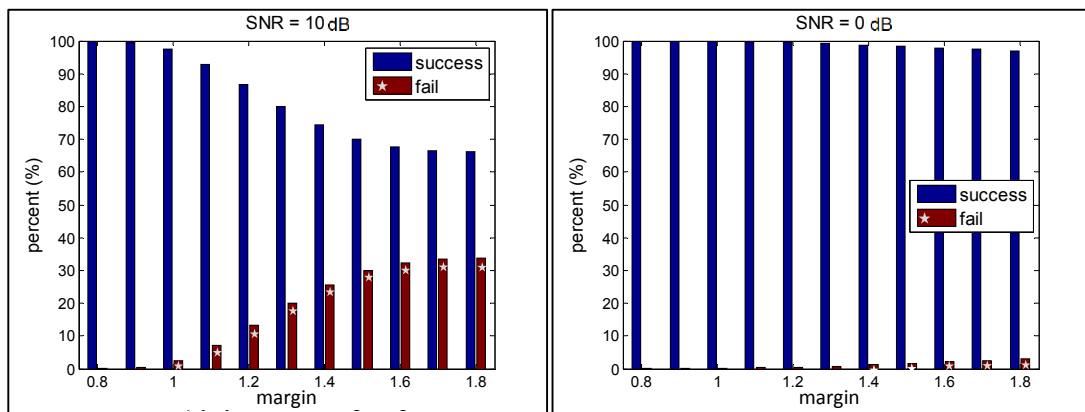
ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอมากที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนออย่างน้อยที่สุด

รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ค่าคลื่น ในสถานการณ์อุดมคติ จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการปรับขอบเขตการสวิตช์



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับขอบเขตการสวิตช์ค่าคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ (ก) 30 dB (ข) 20 dB (ค) 10 dB (ง) 0 dB

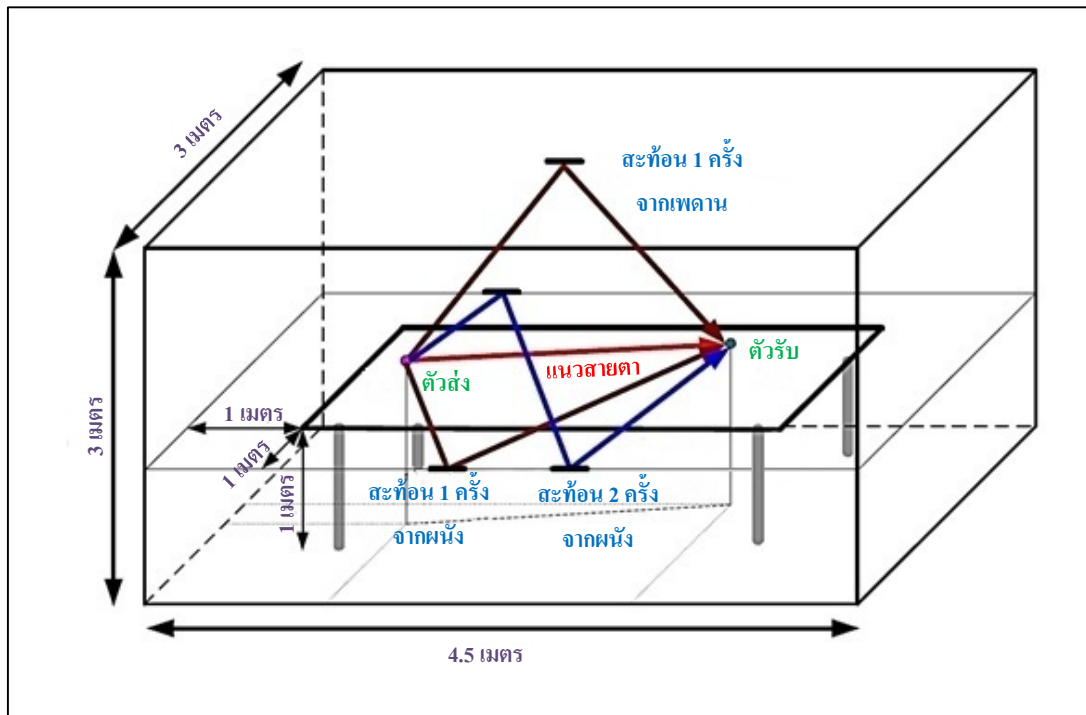
ลำคลื่นมากกว่า 1 เท่าของขอบเขตการก่อรูปลำคลื่นปกติ เนื่องจากเมื่อขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นยาวขึ้น ระบบการก่อรูปลำคลื่นจะตัดสินใจเลือกการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอทั้ง ๆ ที่การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีอัตราขยายสัญญาณต่ำกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม ทำให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นไม่มีประสิทธิภาพ

หลังจากนั้นจึงเพิ่มการรบกวนเข้าไปในระบบการก่อรูปลำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมที่นำเสนอเทียบกับจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น ในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 30 dB 20 dB และ 10 dB เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอจะมีแนวโน้มลดลงไปตามจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในสถานการณ์อุดมคติ โดยขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จจะน้อยกว่า 1 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ แต่เมื่อมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0 dB พบว่าเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จและความผิดพลาดของอัลกอริทึมมีค่าแตกต่างกันมากในทุกจำนวนเท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่น จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อมีการรบกวนมากเกินไปจะทำให้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นที่นำเสนอมีค่าแตกต่างกันมาก จึงสามารถปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นยาวขึ้นได้อีกเพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้กับทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำ โดยยังทำให้อัลกอริทึมที่นำเสนอมีเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอสูง

4.3.4 การพิจารณาคลื่นหลายวิถี

พิจารณาผลของคลื่นหลายวิถี (multipath) ซึ่งเกิดจากสัญญาณที่ต้องการมีหลายสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นในมุมที่แตกต่างกันไป โดยผู้เขียนได้ศึกษาจากงานวิจัยของ Tran, H. N., Jun, T., Suguru, K., Hiroyuki, N., Tadashi, T., and Kazuo, T. (2006). ที่เสนอคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นหลายวิถีในอาคาร (indoor multipath propagation) บนความถี่ 60 GHz ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และงานวิจัยของ Maltsev, A., Maslennikov, R., Sevastyanov, A., Lomayev, A., and Khoryaev, A. (2011). ที่เสนอแบบจำลองช่องสัญญาณ (channel model) ทางสถิติ ของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในสิ่งแวดล้อมที่เป็นห้องประชุม

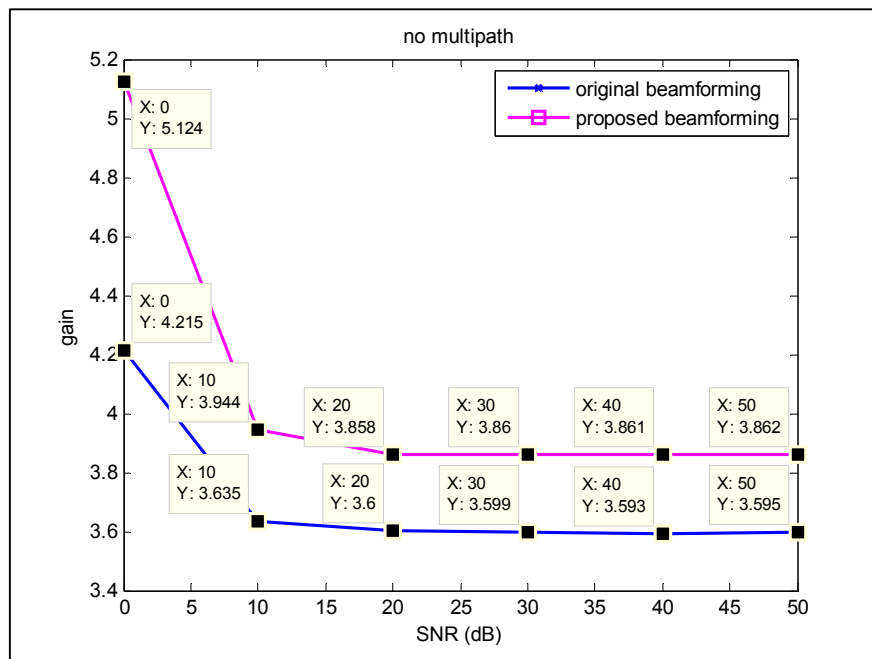
รูปที่ 4.17 แสดงแบบจำลอง 3 มิติของห้องประชุมที่มีขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 4.5 เมตร และสูง 3 เมตร โดยมีวิธีการสะท้อนของคลื่น 4 แบบคือ ไม่มีการสะท้อน การสะท้อน 1 ครั้ง จากเพดาน การสะท้อน 1 ครั้งจากผนัง และการสะท้อน 2 ครั้งจากผนัง ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น



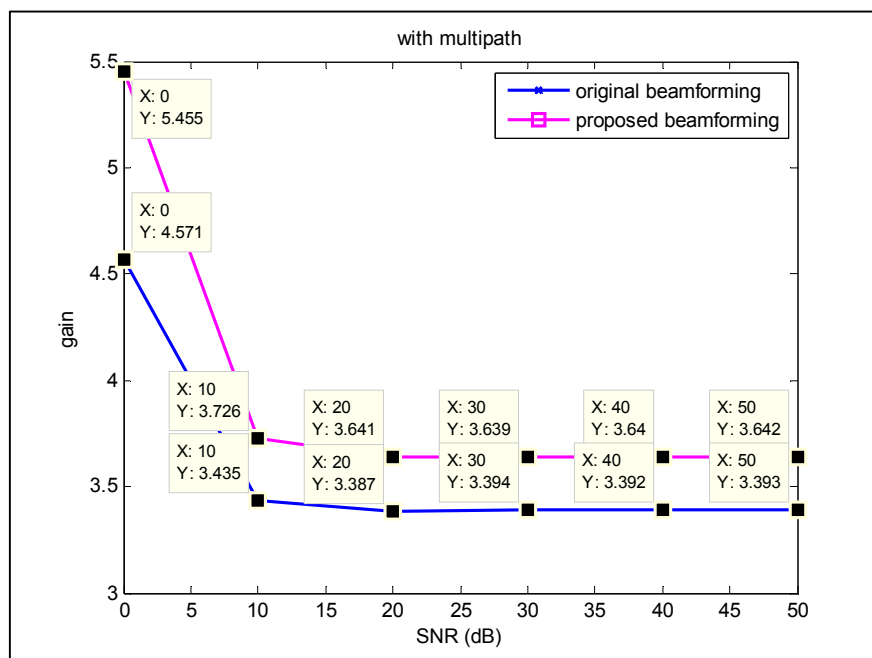
รูปที่ 4.17 แบบจำลอง 3 มิติของห้องประชุม

ข้างต้น ได้วิเคราะห์หาพลังงานเมื่อ ไม่มีการสะท้อนได้เท่ากับ 0 dB ส่วนพลังงานของการสะท้อน 1 ครั้งมีค่าเท่ากับ -10 dB และพลังงานของการสะท้อน 2 ครั้งมีค่าเท่ากับ -16 dB ดังนั้นจึงได้นำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาผลของคลื่นหลายวิถีเมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ

ผลการจำลองแบบของค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม และการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ ในสถานการณ์ที่ ไม่มีคลื่นหลายวิถี แสดงดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนเท่ากับ 50 dB 40 dB 30 dB และ 20 dB ค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 3.60 ส่วนค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอจะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 3.85 เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนมากขึ้นพบว่าจะทำให้อัตราขยายสัญญาณสูงและผิดเพี้ยนไปจากเดิมมาก สำหรับผลการจำลองของค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ ในสถานการณ์ที่ มีคลื่นหลายวิถี แสดงดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนเท่ากับ 50 dB 40 dB 30 dB และ 20 dB ค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าลดลงมา 0.20 และ 0.22 ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณที่ลดลง



รูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในสถานการณ์ที่ไม่มีคลื่นหลายวิถี



รูปที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในสถานการณ์ที่มีคลื่นหลายวิถี

5.56 % และ 5.70 ตามลำดับ ยกเว้นกรณีที่มียัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0 dB จะได้ผลที่แตกต่างคือ มียัตราขยายสัญญาณมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งจากการจำลองแบบในหลาย ๆ ครั้งพบว่าที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0 dB จะไม่สามารถประมาณแนวโน้มของอัตราขยายสัญญาณได้เช่นเดียวกับที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า 0 dB จากการจำลองแบบสามารถยืนยันได้ว่าคลื่นหลายวิธีมีผลกระทบทำให้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอลดลง

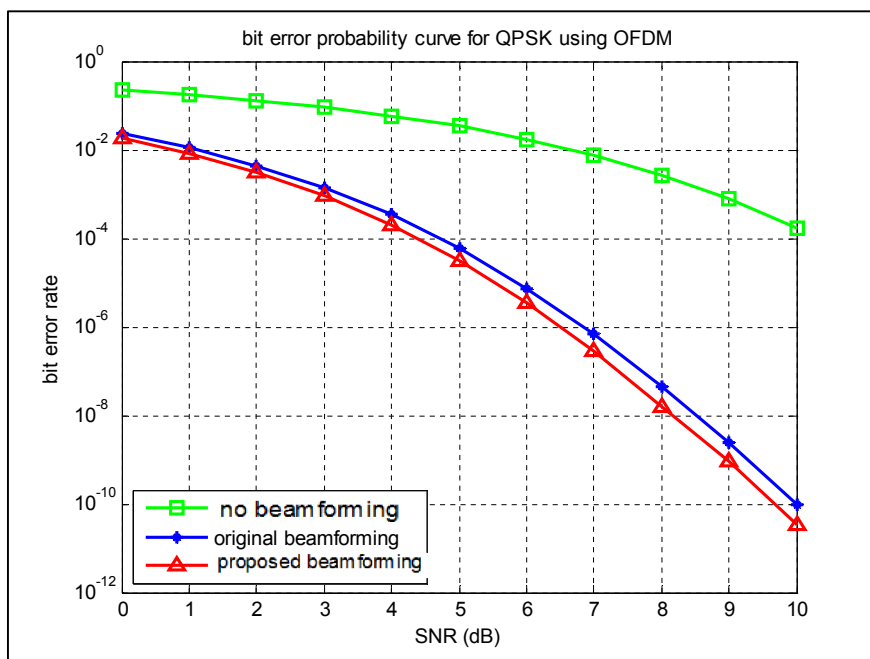
4.3.5 การพิจารณาอัตราผิดพลาดบิต

อัตราผิดพลาดบิต (Bit Error Rate: BER) หาได้จากจำนวนบิตที่ผิดพลาดหารด้วยจำนวนบิตทั้งหมด งานวิจัยฉบับนี้ได้จำลองแบบเพื่อหาอัตราผิดพลาดบิตโดยใช้การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีคลื่นพาห่อย่อยจำนวน 512 คลื่น ตามข้อกำหนดของระบบวิทยุ ซึ่งพิจารณาทั้งกรณีที่มีการก่อรูปลำคลื่นและกรณีที่ไม่มีการก่อรูปลำคลื่น สำหรับกรณีที่มีการก่อรูปลำคลื่นจะแบ่งเป็นการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอ โดยมีพารามิเตอร์ในการจำลองแบบตามตารางที่ 4.4

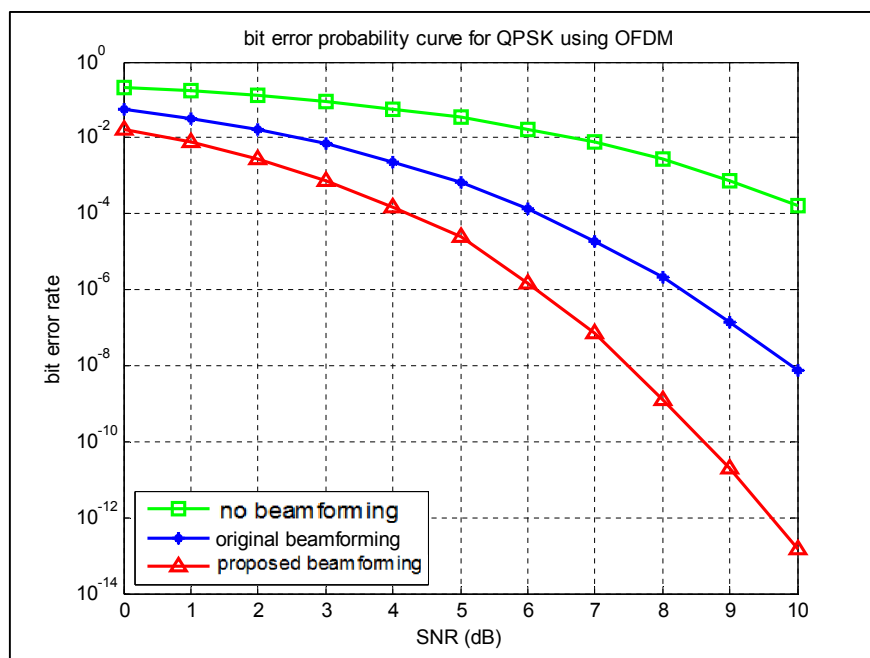
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาอัตราผิดพลาดบิตเมื่อใช้การก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอ

ความกว้างแถบของช่องสัญญาณ	2160 MHz
คลื่นพาห่อย่อยข้อมูล	336 คลื่น
คลื่นพาห่อย่อยนำร่อง	16 คลื่น
คลื่นพาห่อย่อยดีซี	3 คลื่น
รูปแบบการมอดูเลต	คิวพีเอสเค

รูปที่ 4.20 แสดงอัตราผิดพลาดบิตของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเค เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทุกทิศทาง พบว่าเมื่อไม่มีการก่อรูปลำคลื่นจะมีอัตราผิดพลาดบิตมากกว่ามีการก่อรูปลำคลื่นอย่างเห็นได้ชัด สังเกตที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10 dB จะเห็นว่า เมื่อไม่มีการก่อรูปลำคลื่นจะมีอัตราผิดพลาดบิตเท่ากับ 1.67×10^{-4} แต่เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นจะมีอัตราผิดพลาดบิตเท่ากับ 9.85×10^{-11} และ 3.32×10^{-11} สำหรับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอตามลำดับ



รูปที่ 4.20 อัตราผิดพลาดบิตของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบควิเอสเค เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทุกทิศทาง



รูปที่ 4.21 อัตราผิดพลาดบิตของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบควิเอสเค เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางจุดตัดระหว่าง 2 ล้อคลื่นเดิม

ซึ่งหากพิจารณาเพียงการก่อรูปลำคลื่นแล้วพบว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีอัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม 66.29 % นั้นแสดงให้เห็นว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม

รูปที่ 4.21 แสดงอัตราผิดพลาดบิตของการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉากที่มีการมอดูเลตแบบคิวพีเอสเค เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นเดิม พบว่าเมื่อไม่มีการก่อรูปลำคลื่นจะมีอัตราผิดพลาดบิตมากกว่ามีการก่อรูปลำคลื่นอย่างเห็นได้สังเกตที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10 dB จะเห็นว่า เมื่อไม่มีการก่อรูปลำคลื่นจะมีอัตราผิดพลาดบิตเท่ากับ 1.67×10^{-4} แต่เมื่อมีการก่อรูปลำคลื่นจะมีอัตราผิดพลาดบิตเท่ากับ 7.23×10^{-9} และ 1.49×10^{-13} สำหรับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอตามลำดับ ซึ่งหากพิจารณาเพียงการก่อรูปลำคลื่นแล้วพบว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีอัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม 99.99 % หรือประมาณ 1 เท่า นั้นแสดงให้เห็นว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงผลการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ และใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องระบบวายกิก จากการผลการจำลองแบบของแถบกว้างพบว่าการก่อรูปลำคลื่นในระบบวายกิกจะไม่มีผลกระทบของแถบกว้าง หลังจากนั้นได้พิจารณาผลการจำลองแบบของอัลกอริทึม เพื่อหาประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ซึ่งสามารถสรุปผลการพิจารณาได้ดังนี้

- 1) อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าสูงกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม 7.45 %
- 2) การปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นสั้นหรือยาวกว่าขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ จะทำให้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าต่ำลง โดยขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.9 และ 1 เท่าของขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติ
- 3) คลื่นหลายวิถีมีผลทำให้อัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมและแบบที่นำเสนอต่ำลง 5.56 % และ 5.70 ตามลำดับ
- 4) เปอร์เซนต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจะมีค่ามากกว่าเปอร์เซนต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอในสัดส่วน 3:2 และเปอร์เซนต์การใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจะมีค่าลดลงไปตามสัญญาณรบกวนที่มากขึ้น

- 5) ยังมีขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นยาวขึ้น จะยังทำให้มีการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมลดลง แต่จะมีการใช้งานการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมากขึ้น
- 6) เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าไม่น้อยกว่า 97 %
- 7) การปรับขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นยาวกว่าขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นปกติจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าน้อยลง
- 8) อัตราผิดพลาดบิตของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีค่าต่ำกว่าอัตราผิดพลาดบิตของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม 66.29 % เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทุกทิศทาง และ 99.99 % เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นเดิม

จากผลจำลองแบบและวิเคราะห์ผลสามารถยืนยันได้ว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพของสูงกว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม ดังนั้นอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้สามารถปรับปรุงข้อเสียของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมได้ สำหรับบทต่อไปจะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาที่มีในงานวิจัยฉบับนี้ทั้งหมด

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณในพื้นที่ต่าง ๆ มากขึ้น อีกทั้งระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายก็มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานของผู้ใช้งานที่ต้องการส่งข้อมูลที่มีความละเอียดสูง หลายองค์กรจึงได้พยายามคิดค้นแนวคิดของการสื่อสารไร้สายที่มีอัตราข้อมูลที่สูงขึ้น จนกระทั่งพันธมิตรรายกิกได้เปิดตัวมาตรฐานวายกิกที่ตอบสนองความต้องการดังกล่าวโดยการใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายหรือระบบวายกิกจะทำงานบนแถบความถี่สูงถึง 60 GHz ภายใต้การรบกวนที่มีอย่างมหาศาล และมีความกว้างแถบมากถึง 9 GHz เพื่อส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลระดับ Gbps หลังจากนั้นพันธมิตรรายพายได้เห็นความสำคัญของความต้องการดังกล่าวเช่นกัน ทั้งสองพันธมิตรจึงตกลงร่วมมือกันเพื่อเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ใช้งานภายในพื้นที่จำกัดและมีการออกมาตรฐาน IEEE 802.11ad ตามมาซึ่งได้กำหนดให้ใช้การก่อรูปลำคลื่นในระบบสายอากาศกึ่งเพื่อลดผลกระทบของการรบกวนและมีความแรงสัญญาณสูงขึ้น โดยระบบการก่อรูปลำคลื่นจะหันพู่คลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการและหันจุดศูนย์ไปยังสัญญาณแทรกสอด ด้วยความน่าสนใจของการก่อรูปลำคลื่นในระบบวายกิกจึงทำให้มีหลายงานวิจัยได้ออกแบบการก่อรูปลำคลื่นที่แตกต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็นการนำเสนอวิธีการปรับอัตราขยายสัญญาณสูงสุดของแต่ละลำคลื่นให้เท่าเทียมกัน หรือการนำเสนอขั้นตอนการเลือกลำคลื่นที่ทำให้ระบบทำงานได้เร็วขึ้น การก่อรูปลำคลื่นในระบบวายกิกจะมีการใช้รหัสในการก่อรูปลำคลื่นในรูปของเมทริกซ์เพื่อใช้ถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น ซึ่งระบบการก่อรูปลำคลื่นจะสวิตช์ลำคลื่นเพื่อหันลำคลื่นที่มีอัตราขยายสัญญาณสูงสุดไปยังสัญญาณที่ต้องการ หลังจากทำการวิจัยพบว่าการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมจะให้อัตราขยายสัญญาณต่ำในทิศทางบริเวณจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นที่อยู่ติดกัน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ออกแบบการก่อรูปลำคลื่นที่ช่วยเพิ่มอัตราขยายสัญญาณในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำด้วยวิธีการรวมแบบอัตราส่วนสูงสุดรวมทั้งออกแบบอัลกอริทึมโดยการกำหนดขอบเขตการสวิตช์ลำคลื่นเพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าระบบการก่อรูปลำคลื่นจะเลือกลำคลื่นที่เกิดจากการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอเมื่อใด โดยกระบวนการออกแบบทั้งหมดได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สำหรับการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์จะ

ใช้ระบบสายอากาศแ่งแบบสวิทช์ลำคลื่นเนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยและต้นทุนการผลิตต่ำ พารามิเตอร์ในการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ประกอบไปด้วยสายอากาศแ่งลำดับแบบเส้น จำนวน 2 3 และ 4 ต้น โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสายอากาศ และมีวิธีการคำนวณหารหัสในการก่อรูปลำคลื่นที่มีความซับซ้อนน้อย จากการจำลองแบบพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถเลือกลำคลื่นที่ให้อัตราขยายสัญญาณสูงสุดได้อย่างถูกต้องไม่ต่ำกว่า 97 % โดยที่การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอจะมีอัตราขยายสัญญาณสูงกว่าอัตราขยายสัญญาณของการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิม 7.45 % นอกจากนี้การก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอยังมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่าอัตราผิดพลาดบิตของการก่อรูปแบบเดิม 66.29 % เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทุกทิศทาง และ 99.99 % เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในทิศทางจุดตัดระหว่าง 2 ลำคลื่นเดิม ดังนั้นจากผลการจำลองแบบสามารถยืนยันประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอได้ว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้กับการก่อรูปลำคลื่นแบบเดิมในทิศทางที่มีอัตราขยายสัญญาณต่ำได้ โดยแนวคิดนี้ยังสามารถนำไปใช้ในระบบเครือข่ายไร้สายอื่น ๆ ได้อีกด้วย

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีการใช้งานระบบวิทยุอีกทั้งในสถานศึกษายังไม่มีเครื่องกำเนิดสเปกตรัมความถี่ 54-66 GHz จึงต้องทำการจำลองสถานการณ์ของระบบวิทยุและจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการก่อรูปลำคลื่น ในอนาคตเมื่อมีการใช้งานระบบวิทยุและมีเครื่องมือวัดที่เหมาะสมแล้วจะสามารถนำระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบที่นำเสนอไปวัดทดสอบผลเพื่อยืนยันว่าระบบการก่อรูปลำคลื่นที่นำเสนอสามารถใช้งานในระบบวิทยุได้จริง

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

ระบบการก่อรูปลำคลื่นในงานวิจัยนี้เสนอการก่อรูปลำคลื่นที่หันพู่คลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และยังสามารถปรับเปลี่ยนการก่อรูปลำคลื่นเพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณได้เองเมื่อมีอัตราขยายสัญญาณต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ ซึ่งในอนาคตอาจจะสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจริงในระบบวิทยุ รวมทั้งพัฒนาอัลกอริทึมให้ทนต่อการรบกวนมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- Agilent Technologies. (2013). **Wireless LAN at 60 GHz – IEEE 802.11ad Explained** [online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-9697EN.pdf>
- Allen, B., and Ghavami, M. (2005). **Adaptive Array System: Fundamentals and Applications**. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- Changming, Z., Zhenyu, X., Hao, W., Lieguang, Z., and Depeng, J. (2011). **Performance Analysis on the OFDM PHY of IEEE 802.11ad Standard**. International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), pp. 708-713.
- Chia-Chin, C., Watanabe, F., and Inamura, H. (2006). **Potential of UWB Technology for the Next Generation Wireless Communications**. 2006 IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA), pp. 422-429.
- Crow, B. P., Kim, L. G., Sakai, P.T., and Widjaja, I. (1997). **IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks**. IEEE Communications Magazine, Vol. 35, No. 9, pp. 116-126.
- Howarth, J.A., Lauterbach, A.P., Boers, M.J., Davis, L.M., Parker, A., Harrison, J., Rathmell, J., Batty, M., Cowley, W., Burnet, C., Hall, L., Abbott, D., and Weste, N. (2005). **60GHz Radios: Enabling Next Generation Wireless Applications**. 2005 IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 1-6.
- HuiKyu, L., Junyeong, B., Byung, G. J., Gwang, H. B., and Heung-Gyoon, R. (2012). **Indoor WPAN Communication System Using 2-Dimensional Array Antenna in 60GHz Frequency Band**. 2012 Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp), pp. 158-161.
- Junyi, W., Zhou, L., Chin-Sean, S., Chang-Woo, P., Jing, G., Baykas, T., Rahman, A., Funada, R., Kojima, F., Lakkis, I., Harada, H., and Kato, S. (2009). **Beamforming Codebook Design and Performance Evaluation for 60GHz Wideband WPANs**. IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), pp. 1-6.
- Krishna, S. (2008). **BPSK BER with OFDM Modulation** [online]. Available: <http://www.dsplog.com/2008/06/10/ofdm-bpsk-bit-error/>

- Li, C., Ying, Y., Xiaohui, C., and Weidong, W. (2011). **Multi-stage Beamforming Codebook for 60GHz WPAN**. 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), pp. 361-365.
- Liang, Z., Ohashi, Y. (2012). **Efficient Codebook-Based MIMO Beamforming for Millimeter-wave WLANs**. 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1885-1889.
- Maltsev, A., Maslennikov, R., Sevastyanov, A., Lomayev, A., and Khoryaev, A. (2011). **Statistical Channel Model for 60 GHz WLAN Systems in Conference Room**. The Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5.
- Ngoc, T.H., Takagi, J., Oguma, H., and Kameda, S. (2006). **Indoor Multipath Propagation Characteristic at 60GHz**. 2006 IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 1-4.
- Perahia, E., Cordeiro, C., Minyoung, P., and Yang, L. L. (2010). **IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi**. 2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), pp. 1-5.
- Singh, H., Jisung, O., ChangYeul, K., Xiangping, Q., Huai-Rong, S., and Chiu, N. (2008). **A 60 GHz Wireless Network for Enabling Uncompressed Video Communication**. 2008 IEEE Communications Magazine, Vol. 46, No. 12, pp.71-78.
- Smulders, P. (2002). **Exploiting the 60 GHz Band for Local Wireless Multimedia Access: Prospects and Future Directions**. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 1, pp. 140-147.
- Uthansakul, M., and Bialkowski, M.E. (2004). **Impact of Wideband Signals on Smart Antenna System**. 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2004), Vol. 2, pp. 501-504.
- Weixia, Z., Zhifang, C., Bin, L., Zheng, Z., and Yucong, Hu. (2011). **Beamforming Codebook Design and Performance Evaluation for 60GHz Wireless Communication**. 11th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), pp.30-35.
- Xin, Z., Liru, L., Funada, R., Chin-Sean, S., and Harada, H. (2010). **Physical Layer Design and Performance Analysis on Multi-Gbps Millimeter-wave WLAN System**. 2010 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), pp. 92-96.

- Yang, X. (2005). **IEEE 802.11n: Enhancements for Higher Throughput in Wireless LANs**. 2005 IEEE Wireless Communications, Vol. 12, No. 6, pp. 82-91.
- Zaaimia, M., Touhami, R., Hamza, A., and Yagoub, M. C. E. (2013). **Design and Performance Evaluation of 802.11ad PHYs in 60 GHz Multipath Fading Channel**. 2013 8th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WoSSPA), pp. 521-525.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Kongbuntad, A., Uthansakul, M., Uthansakul, P., (2013). **WiGig Performance Enhancement using Maximal Ratio Combining**. The 2013 Thailand-Japan MicroWave Conference (TJMW 2013), Bangkok, Thailand, December 2-4, 2013 : pp 328-331.

Kongbuntad, A., Uthansakul, M., Uthansakul, P., (2014). **Improved Beamforming Code Book for WiGig using Maximal Ratio Combining**. The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN 2014), Phuket, Thailand, February 10-12, 2014 : pp 112-115.