



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาการเคลื่อนที่ของจุดรับสัญญาณเสียงที่เกิดจากลำโพงแถวลำดับ

Development of Sound Spot Movement by Speaker Array

ดร.สุภวรรณ อ้นนันทน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาการเคลื่อนที่ของจุดรับสัญญาณเสียงที่เกิดจากลำโพงแถวลำดับ

Development of Sound Spot Movement by Speaker Array

ดร.สุภวรรณ อ้นนันทน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาการเคลื่อนที่ของจุดรับสัญญาณเสียงที่เกิดจากลำโพงแถวลำดับ

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1.5 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง มีนาคม 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

ดร.สุภวรรณ อันนันทน์ (หัวหน้าโครงการ) คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการจำลองสัญญาณเสียงที่ส่งจากลำโพงที่ถูกจัดวางเรียงเป็นแถวที่ผนังห้องด้านหนึ่ง ไปยังจุดรับเสียงภายในห้อง โดยที่จุดรับเสียงแต่ละตำแหน่งจะมีค่าระดับแรงดันของเสียงที่ได้รับแตกต่างกัน เราจะทำการพัฒนาโดยการกำหนดตำแหน่งของผู้ฟัง และทำการหน่วงและรวมสัญญาณเสียงก่อนที่จะกระจายไปยังจุดที่กำหนดนั้นให้ได้รับสัญญาณเสียงที่มีระดับแรงดันเสียงดีที่สุด ประสิทธิภาพของจุดรับเสียงที่กำหนดนั้นแสดงผลเป็นแผนผังการกระจายระดับสัญญาณเสียง

□□□□ □□□□□□

□□□□□□□□□□□□□□□□ □□ ลำโพงแถวลำดับ, จุดรับสัญญาณเสียง, เปลี่ยนรูปแบบสัญญาณด้วยการรวมและหน่วงเวลา

Research Title: Development of Sound Spot Movement by Speaker Array.....

Researcher: Dr. Supawan Annanab.....

Faculty: Information Technology

ABSTRACT

This research describes 3 omnidirectional speaker arrays which generate sound spot and sound capture. Sound capture by speaker array is achieved by Sum Delay Beamforming. The performance of sound localization is evaluated by using sound pressure distribution maps.

Keywords : Sum Delay Beamforming, speaker array, sound spot

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ. ดร. นพพร โชติกกำจร สำหรับแนวคิดและคำปรึกษาตลอดมา ผศ. ดร. พิชญ์ สุพรรณภูท ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับการให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในคณะเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับการทำงานที่สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้ด้วยดีตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดโครงการ

ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคการส่งคลื่นเสียงตามตำแหน่งของผู้ฟังในบริเวณที่กำหนด ด้วยลำโพงแบบ speaker array.....	1
1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ antenna array กับอัลกอริทึม smart signal processing ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเสียงที่เกิดจากลำโพงที่จัดวางแบบเรียงแถว.....	1
1.2.3 เพื่อศึกษาการนำคุณสมบัติของเสียงและอุปกรณ์ที่ทำให้กำเนิดเสียง.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.3.1 สร้างโปรแกรมโดยใช้อัลกอริทึมตามทฤษฎีที่มีอยู่มาเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงไปยังตำแหน่งที่ต้องการ.....	1
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	1
1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.4.2 สร้างโปรแกรมจำลองโดยใช้อัลกอริทึมที่เลือกมา.....	1
1.4.3 วิเคราะห์และสรุปผล.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5.1 ปรับปรุงคุณภาพจุดรับสัญญาณเสียงที่มีระดับสัญญาณต่ำ.....	2
1.5.2 สามารถเปลี่ยนตำแหน่งของจุดรับสัญญาณตามการเคลื่อนที่ของผู้รับฟังได้.....	2

1.5.3 สามารถนำเทคนิคนี้ไปพัฒนาต่อยอดในการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับเสียง.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความเร็วเสียง	3
2.2 ความยาวคลื่นเสียง	3
2.3 ความเข้มเสียง.....	4
2.4 ระดับความดันของเสียง (sound pressure level).....	4
2.5 กำลังงานของเสียง.....	5
2.6 การสูญเสียพลังงานของเสียง (Sound attenuation).....	5
2.7 การกระเจิงและการสะท้อน (Huygen's principle, diffraction and reflection).....	6
2.8 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect).....	7
2.9 ไมโครโฟน	7
2.9.1 Omni directional and Pressure Gradient Microphones	8
2.9.1.1 Pressure- Microphone	8
2.9.1.2 Pressure-gradient Microphone	8
2.9.1.3 First-order Directional Microphones	8
2.10 โมเดลการรับรู้ของเสียง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	14
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	16
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	23
เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก.....	25

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 2.1 First-order directivity microphones	9
ตาราง 3.1 เงื่อนไขการสร้างแบบจำลอง	15

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูป 2.1 directivity pattern of omnidirectional speaker	10
รูป 2.2 directivity pattern of subcardoid speaker	10
รูป 2.3 directivity pattern of cardoid speaker	11
รูป 2.4 directivity pattern of supercardoid speaker.....	11
รูป 2.5 directivity pattern of hypercardoid speaker	12
รูป 2.6 directivity pattern of figure-8 speaker.....	12
รูป 2.7 โมเดลการรับรู้ของเสียง.....	13
รูป 3.1 การจัดวางลำโพงในพื้นที่ขนาด 2x2 ตารางเมตร	15
รูป 4.1 จุดรับสัญญาณ 100 จุดที่ความถี่ 500 Hz	16
รูป 4.2 จุดโฟกัสที่ $x=1$ เมตร $y=0.2$ เมตร และความถี่ 500 Hz.....	17
รูป 4.3 จุดรับสัญญาณ 100 จุดที่ความถี่ 1 kHz	18
รูป 4.4 จุดโฟกัสที่ $x=0.6$ เมตร $y=0.5$ เมตร และความถี่ 1 kHz.....	19
รูป 4.5 จุดรับสัญญาณ 100 จุดที่ความถี่ 2 kHz	20
รูป 4.6 จุดโฟกัสที่ $x=1.4$ เมตร $y=1.35$ เมตร และความถี่ 2 kHz.....	20
รูป 4.7 จุดรับสัญญาณ 100 จุดที่ความถี่ 5 kHz	21
รูป 4.8 จุดโฟกัสที่ $x=1.4$ เมตร $y=1.6$ เมตร และความถี่ 5 kHz.....	22

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจัดวางลำโพงโดยทั่วไปจะให้เสียงครอบคลุมในบริเวณกว้าง ซึ่งถ้าบริเวณนั้นมีการใช้งานที่หลากหลายหรือเป็นบริเวณที่ต้องการความเงียบ เสียงที่สะท้อนออกไปนั้นไม่ได้เป็นที่ต้องการของทุกคนภายในห้องก็จะกลายเป็นเสียงรบกวน ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะจัดวางลำโพงที่สามารถส่งคลื่นเสียงออกไปได้เฉพาะผู้ที่ต้องการรับฟังเท่านั้น โดยที่จะจัดการวางของลำโพงให้เป็นแถว (Speaker array) และกำหนดบริเวณหนึ่งๆ ที่เมื่อผู้ฟังเข้ามาอยู่แล้ว ลำโพงสามารถส่งคลื่นเสียงที่มีประสิทธิภาพออกไปให้กับผู้ฟังได้ โดยที่ผู้ฟังจะสามารถเคลื่อนที่ได้ภายในบริเวณนั้นและลำโพงก็จะทำให้กำเนิดคลื่นเสียงที่ดีที่สุดไปตามตำแหน่งที่ผู้ฟังเคลื่อนที่ (Beam forming)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคการส่งคลื่นเสียงตามตำแหน่งของผู้ฟังในบริเวณที่กำหนด ด้วยลำโพงแบบ speaker array

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ antenna array กับอัลกอริทึม smart signal processing ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเสียงที่เกิดจากลำโพงที่จัดวางแบบเรียงแถว

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำคุณสมบัติของเสียงและอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดเสียง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สร้างโปรแกรมโดยใช้อัลกอริทึมตามทฤษฎีที่มีอยู่มาเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 สร้างโปรแกรมจำลองโดยใช้อัลกอริทึมที่เลือกมา

1.4.3 วิเคราะห์และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ปรับปรุงคุณภาพจตุรัสสัญญาณเสียงที่มีระดับสัญญาณต่ำ
- 1.5.2 สามารถเปลี่ยนตำแหน่งของจตุรัสสัญญาณตามการเคลื่อนที่ของผู้รับฟังได้
- 1.5.3 สามารถนำเทคนิคนี้ไปพัฒนาต่อยอดในการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับเสียง

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. คุณสมบัติของเสียง [3]

2.1 ความเร็วเสียง

$$c = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad 2.1$$

โดยที่ $C[Pa]$ ค่าความแข็งของตัวกลาง และเป็นค่าความหนาแน่นของตัวกลาง ดังนั้น ความเร็วเสียงจะแปรตามค่าความแข็งและแปรผกผันกับความหนาแน่นของตัวกลาง จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าความเร็วเสียงไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่เราจึงเรียกตัวกลางนี้ว่า non-dispersive แต่ถ้าความเร็วเสียงขึ้นอยู่กับความถี่ตัวกลางนั้นจะถูกเรียกว่า dispersive สำหรับความถี่ที่ไม่เกิน 28kHz มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับ non-dispersive

เนื่องจากตัวกลางมีคุณสมบัติหลากหลาย ถ้าเป็นของแข็งจะใช้สมการนี้ได้ แต่ถ้าเป็นของเหลว ความแข็งจะแทนที่ด้วยค่าความจุ K และถ้าตัวกลางเป็นก๊าซจะแทนค่าได้ดังนี้

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad 2.2$$

โดยที่ p ความกดอากาศ และ ρ คือ ค่าความหนาแน่น

2.2 ความยาวคลื่นเสียง

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 2.3$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่น คือ ความเร็วเสียง และ f คือ ความถี่เสียง มนุษย์สามารถรับเสียงที่ความถี่ในช่วง 20-20000 Hz ที่อุณหภูมิห้องความยาวคลื่นเสียงจะอยู่ระหว่าง 17.16 เมตร ที่ความถี่ 20 Hz ถึง 1.7 เซนติเมตร ที่ความถี่ 20 kHz ถ้าเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของแสงซึ่งมีค่าระหว่าง 740-360 นาโนเมตร จะเห็นว่ามีความแตกต่างอยู่สองประการนั่นคือ ความยาวคลื่นแสงนั้นมีขนาดเล็กกว่าวัตถุต่างๆมาก

ซึ่งทำให้เราเห็นการแพร่กระจายออกเป็นเส้นตรงและเกิด sharp shadow หลังวัตถุที่มันกระทบ แต่สำหรับคลื่นเสียงนั้นในห้องที่มีขนาด 3x4x5 เมตร เสียงจะเกิดการสะท้อน การกระจายและถูกรบกวน จะสังเกตได้จากการเกิดการลดทอน การหน่วงเวลาของเสียง

ประการที่สอง ความยาวคลื่นเสียงของความถี่ต่ำสุดที่มนุษย์ได้ยินเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นเสียงของความถี่สูงสุดที่มนุษย์ได้ยินแล้วนั้นมีความแตกต่างกันประมาณ 1000 เท่า นั่นหมายความว่า คลื่นเสียงนั้นมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างมากในช่วงความถี่ที่ต่างกัน เราเรียกว่า wide band

คุณลักษณะของแถบความถี่กว้างนี้ ปรากฏให้เห็น ความกว้างของสปีรุษประมาณ 10-20 เซนติเมตร สำหรับความถี่ต่ำกว่า 100 Hz สำหรับหูทั้งสองข้างจะได้ยินเสียงเหมือนกัน แต่ไม่สามารถรับรู้ทิศทางของต้นกำเนิดเสียงได้ สำหรับความถี่ประมาณ 1000 Hz มนุษย์ใช้ความแตกต่างระหว่างเฟสของเสียงของหูทั้งสองของเพื่อบอกทิศทางของต้นกำเนิดเสียง และความถี่มากกว่า 3500 Hz จะขึ้นอยู่กับพลังงานของเสียง

ถ้าวัตถุขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นเสียงจะเกิดปรากฏการณ์สะท้อนและถ้าวัตถุขนาดเล็กกว่าคลื่นเสียง จะเกิดปรากฏการณ์อ้อมรอบวัตถุ ซึ่งจากปรากฏการณ์เหล่านี้สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมใช้เสียงสะท้อนนี้เพื่อหาทิศทางของวัตถุที่คาง

2.3 ความเข้มเสียง

ระบุได้จากพลังงานของคลื่นตกกระทบในพื้นที่หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจาย มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร แสดงค่าความเข้มเสียงในหน่วยเดซิเบลจะถูกเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิง ซึ่งในที่นี้ค่ามาตรฐานคือระดับความเข้มของอากาศ ซึ่งประมาณเป็นความเข้มที่มนุษย์ได้ยินที่ความถี่ 1000 Hz ดังนั้นสมการความถี่แสดงดังนี้ (Tashev, 2009)

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad 2.4$$

2.4 ระดับความดันของเสียง (sound pressure level)

ความเข้มเสียงอ้างอิงในสมการที่ มีค่าแอมพลิจูดความดัน 28.9 สำหรับระนาบและทรงกลม sound pressure level คือ ค่าเฉลี่ย root mean square (RMS) ของคลื่นไซน์ ไซคดอล ซึ่งแอมพลิจูดถูกเฉลี่ยด้วย ซึ่งผลลัพธ์จะเท่ากับ 20 Pa ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงของ sound pressure level (Tashev, 2009)

$$A_{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad 2.5$$

2.5 กำลังงานของเสียง

กำลังเสียงของแหล่งกำเนิดเสียงสามารถประมาณได้จากความเข้มเสียงที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบมันดังสมการ

$$W = \int_S I \cdot dS \quad 2.6$$

ถ้าเราสมมติว่าพื้นที่ที่เป็นทรงกลมและมีรัศมี และมีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ตรงกลางดังนั้นสมการคือ

$$I(r) = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad 2.7$$

สมการนี้เป็นที่แพร่หลายในนาม Inverse square law สำหรับการแพร่กระจายของเสียง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเสียงจะมีกำลังน้อยลงเมื่อเคลื่อนที่ไกลห่างออกไปจากจุดกำเนิดเสียง

2.6 การสูญเสียพลังงานของเสียง (Sound attenuation)

การแพร่กระจายของคลื่นเสียงผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการจะนำไปสู่การกระจายตัวของพลังงาน การสูญเสียความเข้มของคลื่นไม่ได้เกิดจาก inverse square law เท่านั้น แต่เกิดจากการสูญเสียพลังงานโดยตรงที่มีสาเหตุจากการสูญเสียภายใน โมเดลที่แสดงกระบวนการนี้ได้ดีคือการลดทอนของแอมพลิจูดและความเข้มของสัญญาณคลื่น โดยที่การแพร่กระจายจะอยู่ในฟังก์ชันของตัวแปร x

$$\begin{aligned} A(x) &= A_0 e^{-bx} \\ I(x) &= I_0 e^{-2bx} \end{aligned} \quad 2.8$$

โดยที่ A_0 คือ แอมพลิจูด และ I_0 ความเข้มที่จุด $x = 0$ และ b คือ อัตราส่วนการลดทอนของ

สัญญาณเสียง ในหน่วย
สำหรับแก๊สและของเหลว

$$b = \frac{(2\pi f)^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \zeta + K \frac{c_p - c_v}{c_p c_v} \right] \quad 2.9$$

โดยที่ f แทน ความถี่ c ความเร็วของเสียง ρ, η, ζ, K แทน ความเข้ม ความหนืดเฉือน ความหนืดลำดับที่สอง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ตามลำดับ และ เป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ และที่ปริมาตรคงที่ตามลำดับ ในอากาศค่าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความดันของชั้นบรรยากาศ อุณหภูมิ และความชื้น สมการการลดทอนแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบ linear ในสเกลของ logarithm โดยทั่วไปแล้วจะถูกแสดงอยู่ในหน่วยเดซิเบล

2.7 การกระเจิงและการสะท้อน (Huygen's principle, diffraction and reflection)

การประมาณการเคลื่อนที่ของคลื่น แต่ละจุดของคลื่นถูกปฏิบัติเหมือนเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นลูกเล็กๆลูกที่สอง

การอ้อมของคลื่นเสียง ปรากฏการณ์เมื่อคลื่นเสียงอ้อมรอบสิ่งกีดขวางและทำให้ข้างหลังวัตถุที่กีดขวางเป็นตำแหน่งที่สามารถได้ยินเสียงได้ หรือ เสียงทั้งหมดภายในห้องที่เปิดประตูจะได้ยินเสียงนั้นที่โถงทางเดินเหมือนกับว่าจุดกำเนิดเสียงอยู่ที่ประตูห้อง

การหักเหของคลื่นเสียงเกิดเมื่อระนาบของคลื่นเสียงเดินทางมาถึงขอบเขตระหว่างสองตัวกลางที่มีความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นแตกต่างกัน ระนาบของคลื่นเสียงจะเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายดังสมการ

$$\frac{\sin \theta_I}{c_1} = \frac{\sin \theta_T}{c_2} \quad 2.10$$

โดยที่ θ_I, θ_T เป็นมุมตกกระทบและมุมส่ง เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางสองตัวด้วยความเร็ว ตามลำดับ

การสะท้อนเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเดียวกัน บางส่วนของคลื่นเสียงเคลื่อนที่ถึงขอบระหว่างตัวกลางสองตัว บางส่วนสะท้อนกลับและบางส่วนได้สูญหายไป มุมของการสะท้อนจะเท่ากับ

มุมตกกระทบตั้งสมการ

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad 2.11$$

การสะท้อนเกิดจากการพลิกกลับด้วยความเร็วคลื่นปกติ ซึ่งหมายถึงกระบวนการสะท้อนนั้นเป็นกระบวนการกลับเฟสของคลื่นเสียง อัตราส่วนพลังงานการส่งต่อการสะท้อนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความต้านทานของตัวกลาง ถ้าทั้งสองมีค่าเท่ากันการส่งจะสมบูรณ์แบบ และตัวกลางทั้งสองจะถูกเรียกว่า Impedance matched

2.8 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)

ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนความถี่และความยาวคลื่นเมื่อจุดส่งและจุดรับมีการเคลื่อนที่สำหรับคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเช่นคลื่นเสียงนั้น ความเร็วของผู้สังเกตการณ์และแหล่งกำเนิดเสียงนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวกลางที่เสียงคลื่นถูกส่ง เมื่อเราขึ้นอยู่ในสถานีรถไฟและรถไฟเคลื่อนที่ผ่าน เราจะได้ยินเสียงแตกต่างกัน เสียงสูงขึ้นเมื่อรถไฟแล่นเข้าหาตัวเราและเสียงลดลงเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ออกจากสถานี สำหรับผู้โดยสารที่อยู่ในรถไฟนั้น โทนเสียงจะคงที่ ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์นี้มีผลจากการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดและผู้สังเกตการณ์ ความถี่จะเปลี่ยนดังสมการนี้

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{|v_s - v_o|}{c} \cos \theta} \quad 2.12$$

โดยที่ f_0 เป็นค่าความถี่เริ่มต้น f เป็นค่าความถี่ที่เราสังเกต v_s เป็นค่าความเร็วของแหล่งกำเนิดและ v_o เป็นค่าความเร็ว ณ จุดที่สังเกตการณ์ c เป็นความเร็วเสียง และ θ เป็นค่ามุมระหว่างผลลัพท์ทิศทางความเร็ว และเส้นที่ต่อระหว่างต้นกำเนิดกับผู้สังเกตการณ์

2.9 ไมโครโฟน

ไมโครโฟนเป็นเซนเซอร์ที่ไวต่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศ ซึ่งก็คือ เสียงและเปลี่ยนมันเป็นสัญญาณไฟฟ้า ความต้องการในการเปลี่ยนสัญญาณเสียงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้านี้เกิดขึ้นครั้งแรกจากการผลิตโทรศัพท์

2.9.1 Omni directional and Pressure Gradient Microphones

2.9.1.1 Pressure- Microphone

ไมโครโฟนส่วนใหญ่จะมีอุปกรณ์ที่รับแรงสั่นเพื่อสร้างหรือรับคลื่นเสียง ซึ่งไม่เพียงแต่วัดค่าความกดอากาศโดยตรงเท่านั้นแต่ยังวัดความแตกต่างระหว่างความกดอากาศทั้งสองด้านของอุปกรณ์ตัวนี้ ไมโครโฟนนั้นไม่สามารถรับรู้ถึงทิศทางการเข้ามาของคลื่นเสียงได้ ดังนั้นจึงเรียกว่า omnidirectional (Tashev, 2009)

2.9.1.2 Pressure-gradient Microphone

ไมโครโฟนชนิดนี้จะรับรู้ได้ถึงทิศทางของคลื่นเสียงซึ่งเข้ามาสองทิศทาง โดยที่ทิศทางของด้านหลังจะมีเฟสตรงข้ามกับทิศทางจากด้านหน้า เรียกว่า acoustic dipole ลักษณะของไมโครโฟนชนิดนี้ยังสามารถอธิบายให้อยู่ในรูป Frequency response ซึ่งมันตรวจจับความแตกต่างระหว่างความกดอากาศสองจุด สัญญาณของคลื่นเสียงที่เคลื่อนออกไปในตำแหน่งที่ไกล (far field) ควรจะเกิดจากความแตกต่างระหว่างสัญญาณสองจุดของอุปกรณ์รับแรงสั่นของไมโครโฟน ซึ่งทั้งสองตำแหน่งนี้จะมีค่าเฉลี่ยจากความยาวไมโครโฟน l และมุมตกกระทบ θ

$$U(f, \theta) = 1 - \exp\left(-j2\pi \frac{l \cos \theta}{c}\right) \quad 2.13$$

ซึ่งค่า c เป็นค่าความเร็ว

$$U(f, \theta) = \frac{Z_c}{Z_c + R} \left(1 - \exp\left(-j2\pi \tau \frac{l \cos \theta}{c}\right)\right) \quad 2.14$$

$Z_c = -j/2\pi f C$ คือค่า Capacitor Impedance และ $\tau = RC$ (Tashev, 2009)

2.9.1.3 First-order Directional Microphones

ไมโครโฟนแบบ Pressure omnidirectional และ ไมโครโฟนแบบ pressure-gradient ถูกนำมา รวมกันเพื่อสร้างความแตกต่างของ directivity pattern ซึ่งทำได้โดยการแยกค่าสัญญาณเฉลี่ยของ

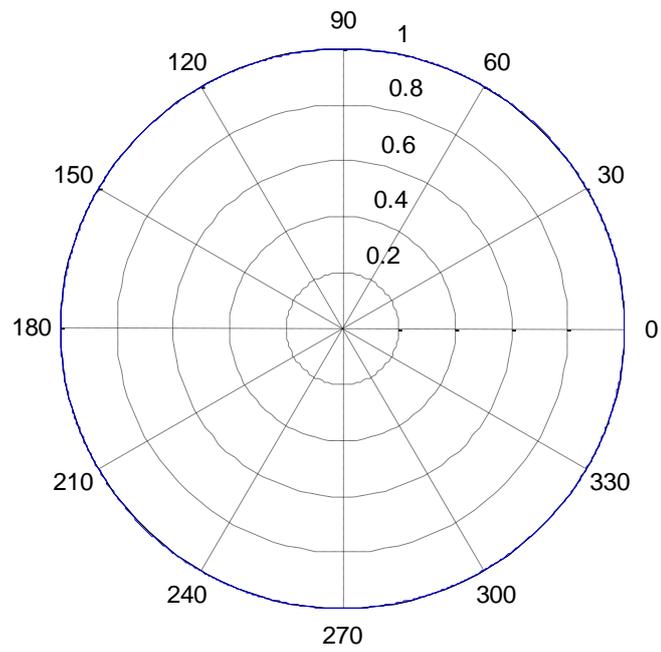
ไมโครโฟนตัวที่หนึ่งออกมาจากสัญญาณของไมโครโฟนตัวที่สอง โดยที่ให้ระยะห่างเป็นค่า l และเวลาที่เคลื่อนที่คือ τ ดังนั้น (Tashev, 2009)

$$U(f, \theta) = 1 - \exp\left(-j2\pi\left(\tau + \frac{l \cos \theta}{v}\right)\right) \quad 2.15$$

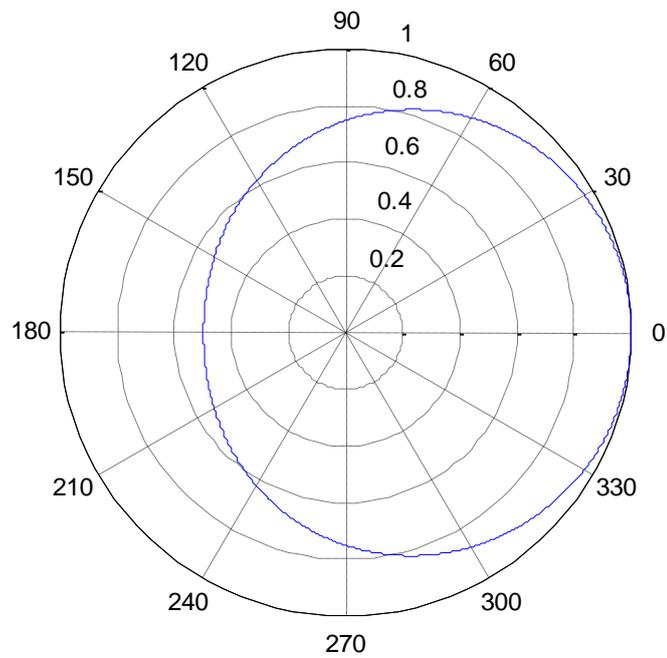
$$U(f, \theta)_{NORM} \approx \alpha + (1 - \alpha) \cos \theta$$

ตาราง 2.1 First-order directivity microphones

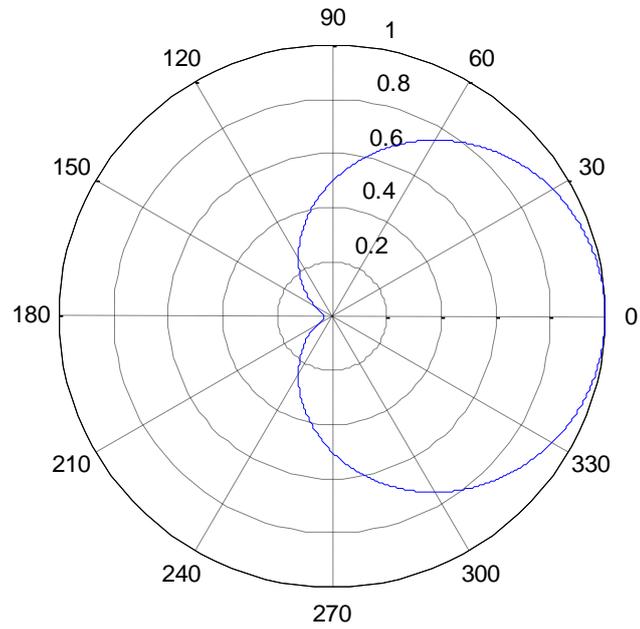
Type	α	DI	Note
Omnidirectional	1.00	0.00	No directivity
Subcardioid	0.75	2.40	
Cardioid	0.50	4.80	Zero at 180°
Supercardioid	0.35	5.70	Highest front to back ratio, zeros at $\pm 125^\circ$
Hypercardioid	0.25	6.00	Highest DI, zeros at $\pm 109^\circ$
	0.00	4.80	Zeros at $\pm 90^\circ$



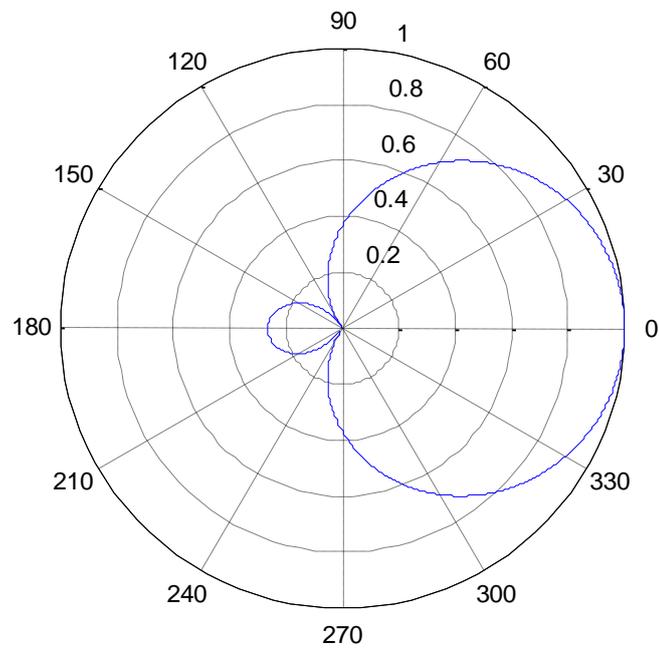
شکل 2.1 directivity pattern of omnidirectional speaker



شکل 2.2 directivity pattern of subcardioid speaker



နိဂ ၂.၃ directivity pattern of cardioid speaker



နိဂ ၂.၄ directivity pattern of supercardioid speaker

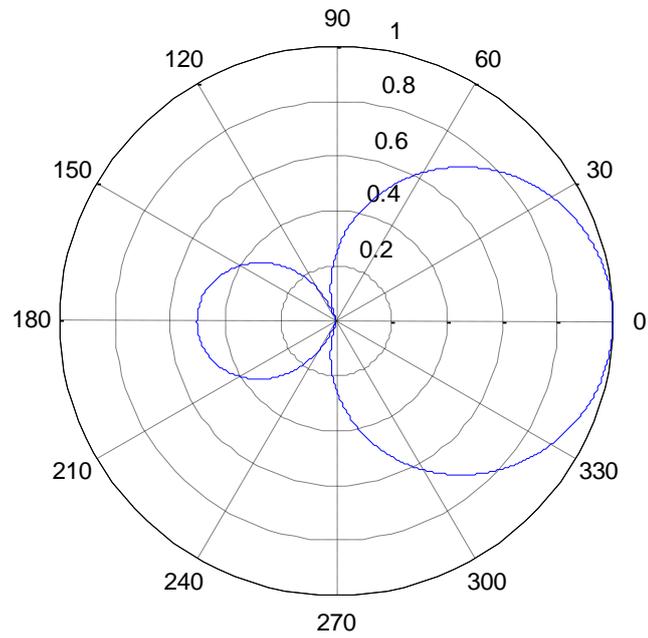


Figure 2.5 directivity pattern of hypercardoid speaker

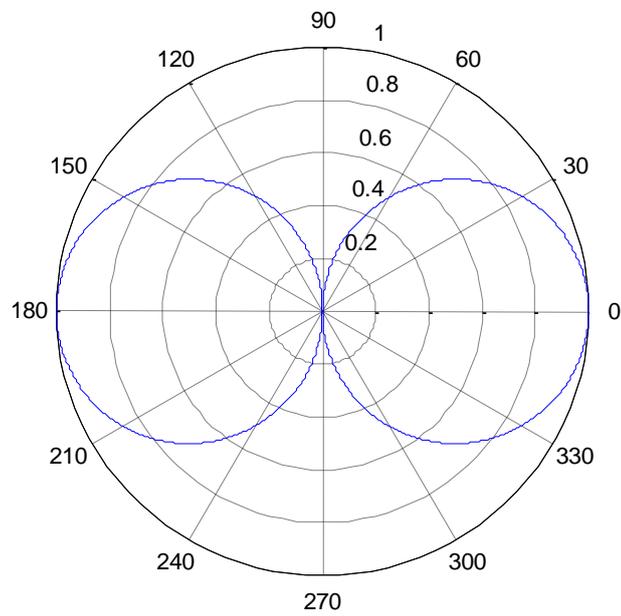
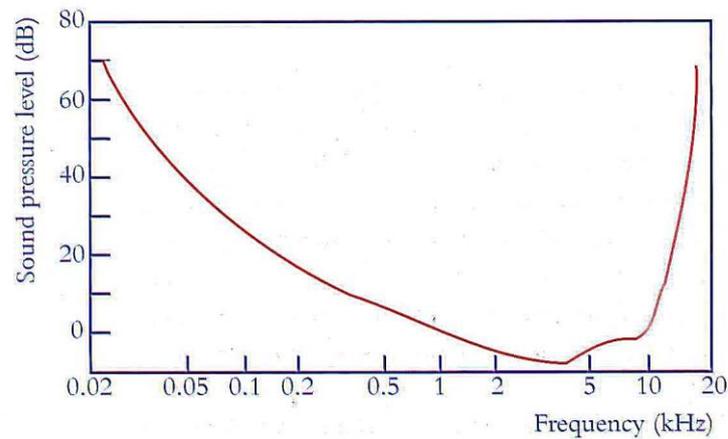


Figure 2.6 directivity pattern of figure-8 speaker

2.10 โมเดลการรับรู้ของเสียง[1]



รูป 2.7 โมเดลการรับรู้ของเสียง

จากรูปที่ 2.7 เส้นสีแดงแสดงเส้น threshold of hearing คือระดับต่ำสุดที่มนุษย์สามารถได้ยินเสียง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ จะเห็นว่ามนุษย์จะได้ยินเสียงที่ความถี่ต่ำๆและที่ความถี่สูงมากๆ ความถี่เหล่านี้จะต้องมีระดับเสียงที่ดังมากกว่าเสียงที่มีความถี่ปานกลาง ดังนั้นมนุษย์นั้นมีความไวต่อเสียงเปลี่ยนแปลงไปในช่วงความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน

บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย

สมมติให้ห้องมีขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร วางลำโพงแบบ Omnidirectional 2 ตัว เรียงชิดฝาผนังด้านหนึ่งและให้ L_i เป็นระยะห่างจากลำโพงแต่ละตัวกับจุดสังเกตเสียง A_i เป็นแอมพลิจูดและ D_i เป็นเฟสที่เปลี่ยนแปลงของไมโครโฟน L_{\min} คือระยะห่างที่สั้นที่สุดจากลำโพงไปถึงจุดสังเกตเสียง [2, 4]

$$A_i = \frac{L_{\min}}{L_i} \quad (3.1)$$

$$D_i = \frac{L_{\min} - L_i}{V_s} \quad (3.2)$$

ในที่นี้ให้ความเร็วเสียงคือ V_s และค่าแอมพลิจูด A_i ที่จุดสังเกตเสียงได้ยินเสียงจากลำโพงทั้ง 3 ตัวด้วยความดังที่เท่ากัน คลื่นสัญญาณเสียงนั้นเป็นรูปแบบ sinusoidal และมีความถี่ F ดังนั้นคลื่นเสียงจากลำโพงแต่ละตัว แสดงได้ดังนี้

$$N_i(t) = A_i \sin(2\pi F(t + D_i)) \quad (3.3)$$

ที่จุดสังเกตเสียงนั้นจะมีค่าสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของลำโพงทั้ง 3 ตัวดังนี้

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N \sin(2\pi F(t + \frac{L_{\min}}{V_s})) \quad (3.4)$$

การปรับปรุงสัญญาณคลื่นเสียงที่จุด p ใดๆด้วยการหน่วงเวลาสัญญาณคลื่นเสียงจากลำโพงทั้ง 3 ตัว R_{ip} คือระยะทางจากลำโพงแต่ละตัวถึงจุด p จะมีสมการดังนี้

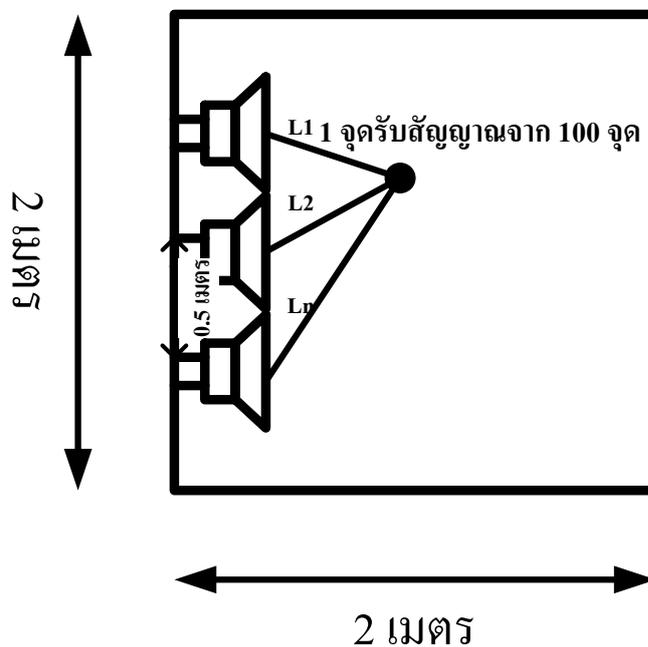
$$Q(t) = \sum_{i=1}^N \sin(2\pi F(t + \frac{L_{\min} + R_{ip}}{V_s})) \quad (3.5)$$

ตาราง 3.1 เงื่อนไขการสร้างแบบจำลอง

ตำแหน่งการวางลำโพง	0.5, 1.0, 1.5 เมตร
ขนาดพื้นที่ที่ทำการทดลอง	กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร
ความเร็วเสียง	343.2 เมตรต่อวินาที
ความถี่	500Hz, 1kHz, 2kHz, ,5kHz *
คาบเวลา	0-1 ของคาบเวลา **
จำนวนจุดสังเกตเสียง	100 จุด

* ไม่พิจารณาความถี่ที่สูงและต่ำมาก ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเสียงที่เกิดจากเครื่องดนตรีวงออเคสตรา

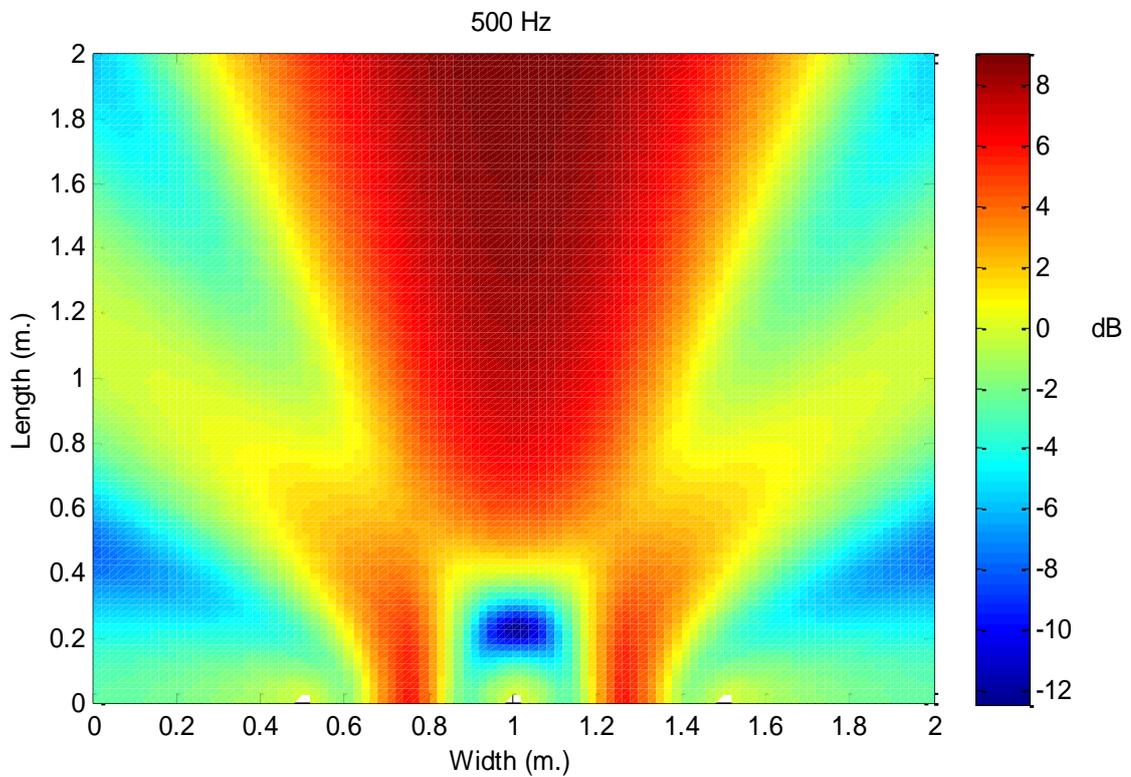
** จำลองสัญญาณแต่ละความถี่ให้อยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1 คาบเวลา โดยที่ช่วงเวลาในแต่ละชั้นเวลามีค่า 0.01 คาบ ใช้ทั้งหมด 100 ชั้นเวลา และเลือกชั้นเวลาที่มีสัญญาณเสียงดังที่สุดมาทำการวิเคราะห์



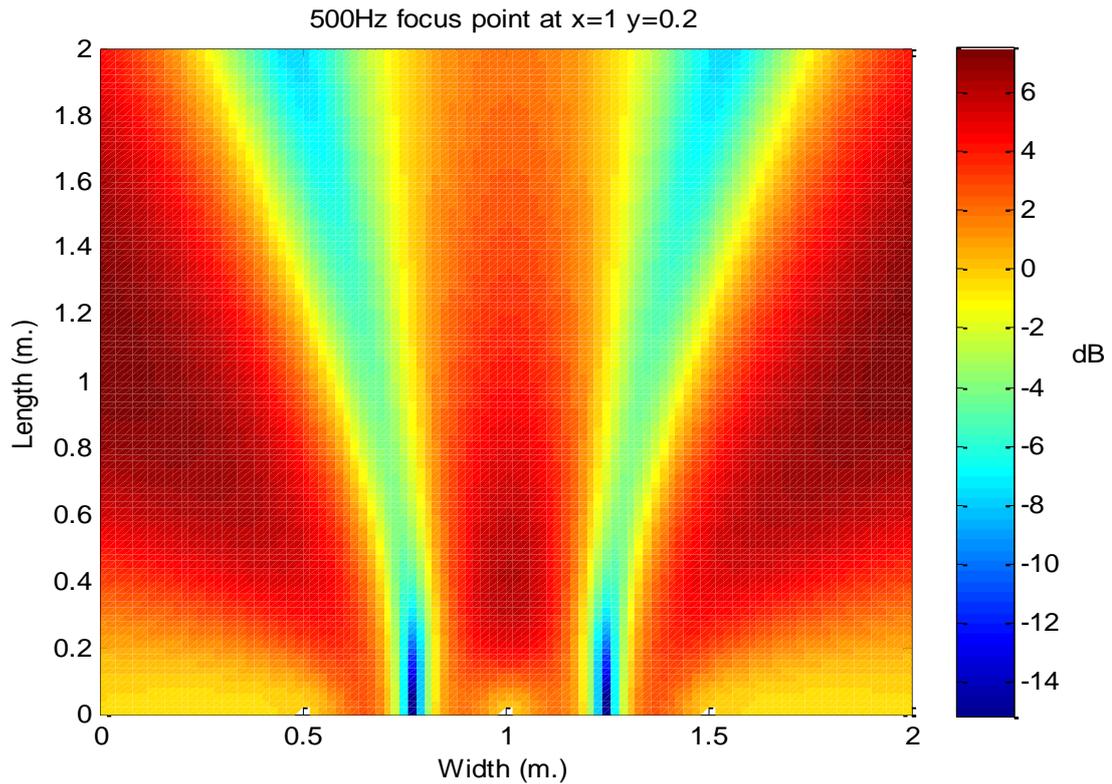
รูป 3.1 การจัดวางลำโพงในพื้นที่ขนาด 2x2 ตารางเมตร

บทที่ 4 ผลการวิจัย

รูปที่ 4.1 แสดงจุดรับสัญญาณเสียง 100 จุดภายในพื้นที่ขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ที่ความถี่ของสัญญาณเสียง 500 Hz จากระดับสัญญาณเสียงแต่ละตำแหน่ง 100 ตำแหน่ง เทียบกับสัญญาณที่จุดกำเนิดเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล จากรูปจะเห็นว่าที่จุด $x=1$ เมตร $y=0.2$ เมตร ค่าระดับสัญญาณเสียงเทียบกับจุดกำเนิดเสียงมีสีน้ำเงินซึ่งมีค่าเท่ากับ -12 dB ซึ่งมีค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นเราจะทำการปรับปรุงระดับสัญญาณเสียงที่จุดนี้ให้มีค่าเพิ่มขึ้นโดยใช้ sum delay beamforming ในสมการที่ 4.3 และ 4.4 ค่าระดับสัญญาณเสียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่ามากกว่า 4 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.2

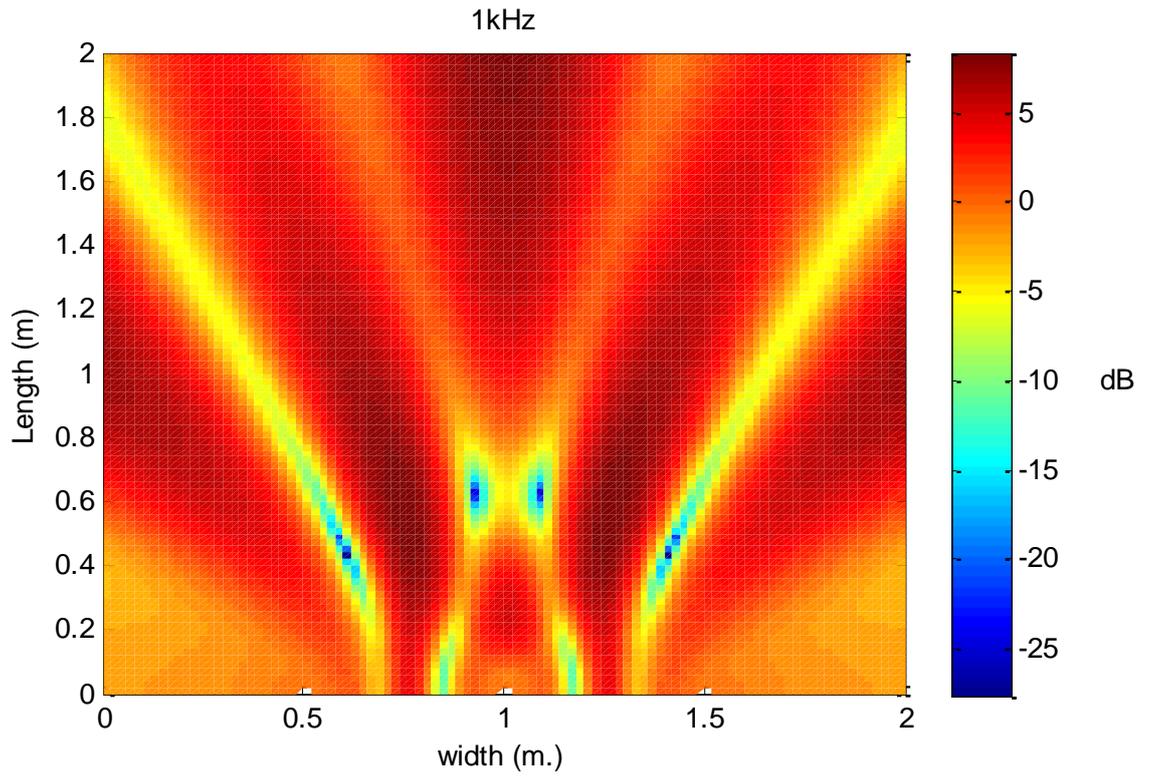


รูป 4.1 จุดรับสัญญาณ 100 จุดที่ความถี่ 500 Hz

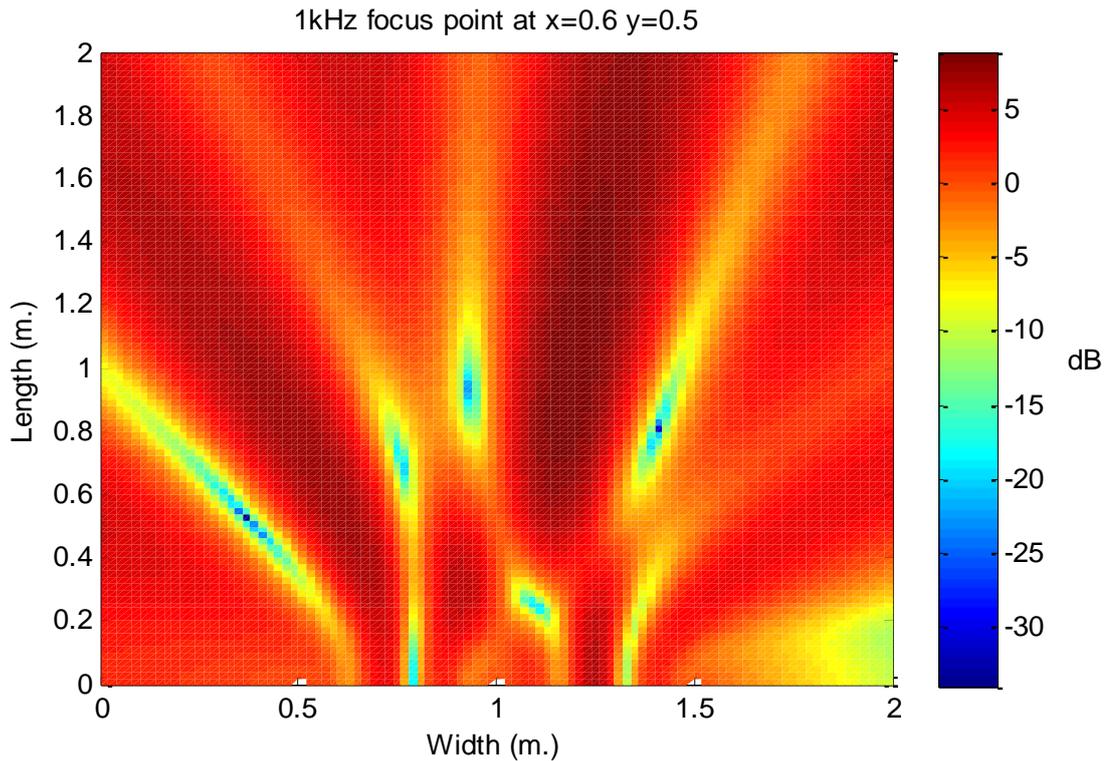


รูป 4.2 จุดโฟกัสที่ $x=1$ เมตร $y=0.2$ เมตร และความถี่ 500 Hz

รูปที่ 4.3 แสดงจุดรับสัญญาณเสียง 100 จุดภายในพื้นที่ขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ที่ความถี่ของสัญญาณเสียง 1000 Hz จากระดับสัญญาณเสียงแต่ละตำแหน่ง 100 ตำแหน่ง เทียบกับสัญญาณที่จุดกำเนิดเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล จากรูปจะเห็นว่าที่จุด $x=0.6$ เมตร $y=0.5$ เมตร ค่าระดับสัญญาณเสียงเทียบกับจุดกำเนิดเสียงมีสีน้ำเงินซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง -20 ถึง -25 dB ซึ่งมีค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นเราจะทำการปรับปรุงระดับสัญญาณเสียงที่จุดนี้ให้มีค่าเพิ่มขึ้นโดยใช้ sum delay beamforming ในสมการที่ 4.3 และ 4.4 ค่าระดับสัญญาณเสียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสีแดงซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงมากกว่า 5 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.4

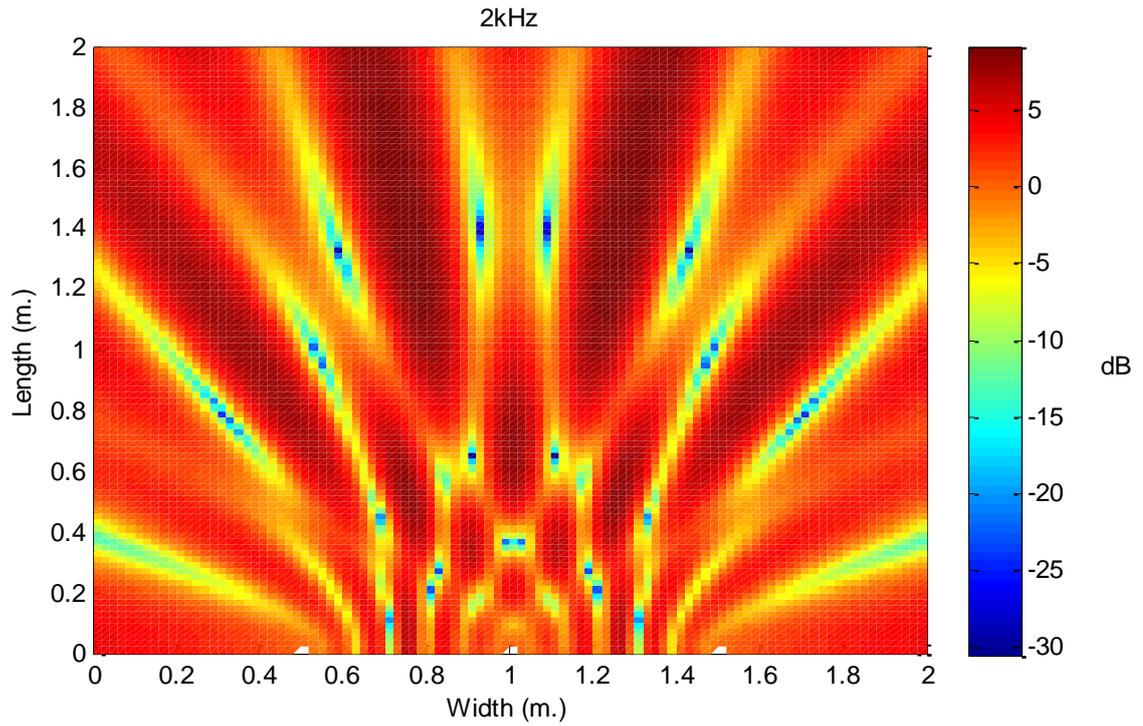


รูป 4.3 จุดรับสัญญาณ 100 จุดที่ความถี่ 1 kHz

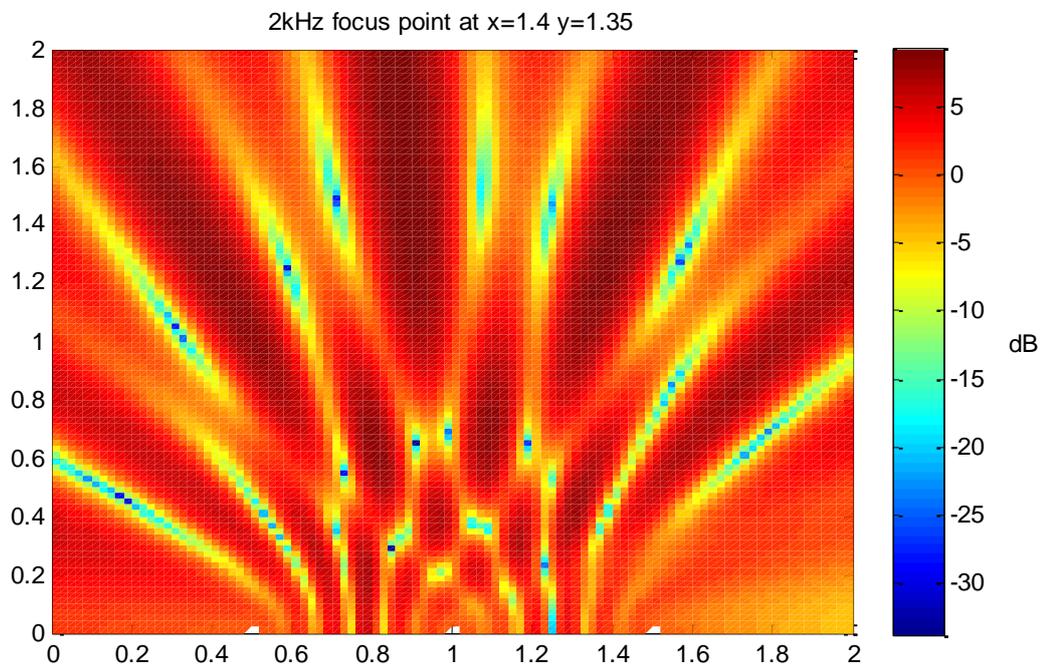


รูป 4.4 จุดโฟกัสที่ $x=0.6$ เมตร $y=0.5$ เมตร และความถี่ 1 kHz

รูปที่ 4.5 แสดงจุดรับสัญญาณเสียง 100 จุดภายในพื้นที่ขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ที่ความถี่ของสัญญาณเสียง 2000 Hz จากระดับสัญญาณเสียงแต่ละตำแหน่ง 100 ตำแหน่ง เทียบกับสัญญาณที่จุดกำเนิดเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล จากรูปจะเห็นว่าที่จุด $x=1.4$ เมตร $y=1.35$ เมตร ค่าระดับสัญญาณเสียงเทียบกับจุดกำเนิดเสียงมีสีน้ำเงินซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง -20 ถึง -25 dB ซึ่งมีค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นเราจะทำการปรับปรุงระดับสัญญาณเสียงที่จุดนี้ให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้ sum delay beam forming ในสมการที่ 4.3 และ 4.4 ค่าระดับสัญญาณเสียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสีแดงซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงมากกว่า 5 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.6

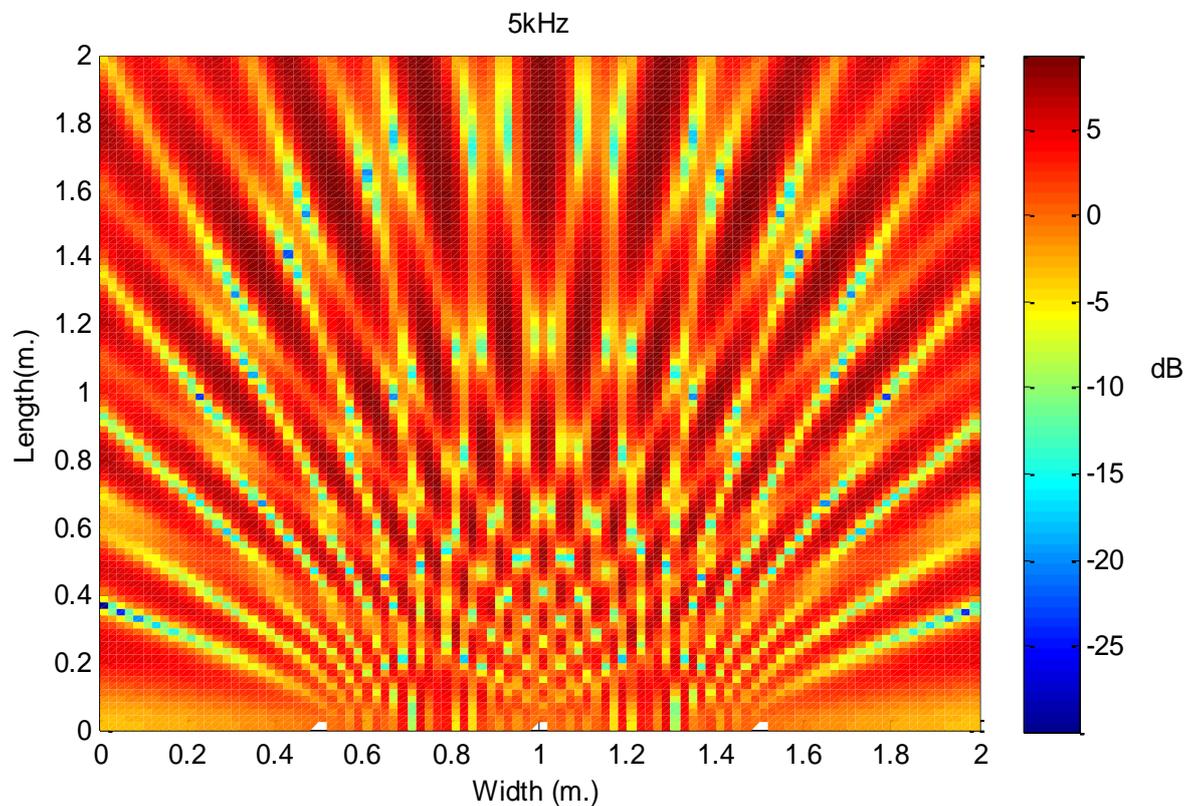


รูป 4.5 จุดรับสัญญาณ 100 จุด ที่ความถี่ 2 kHz

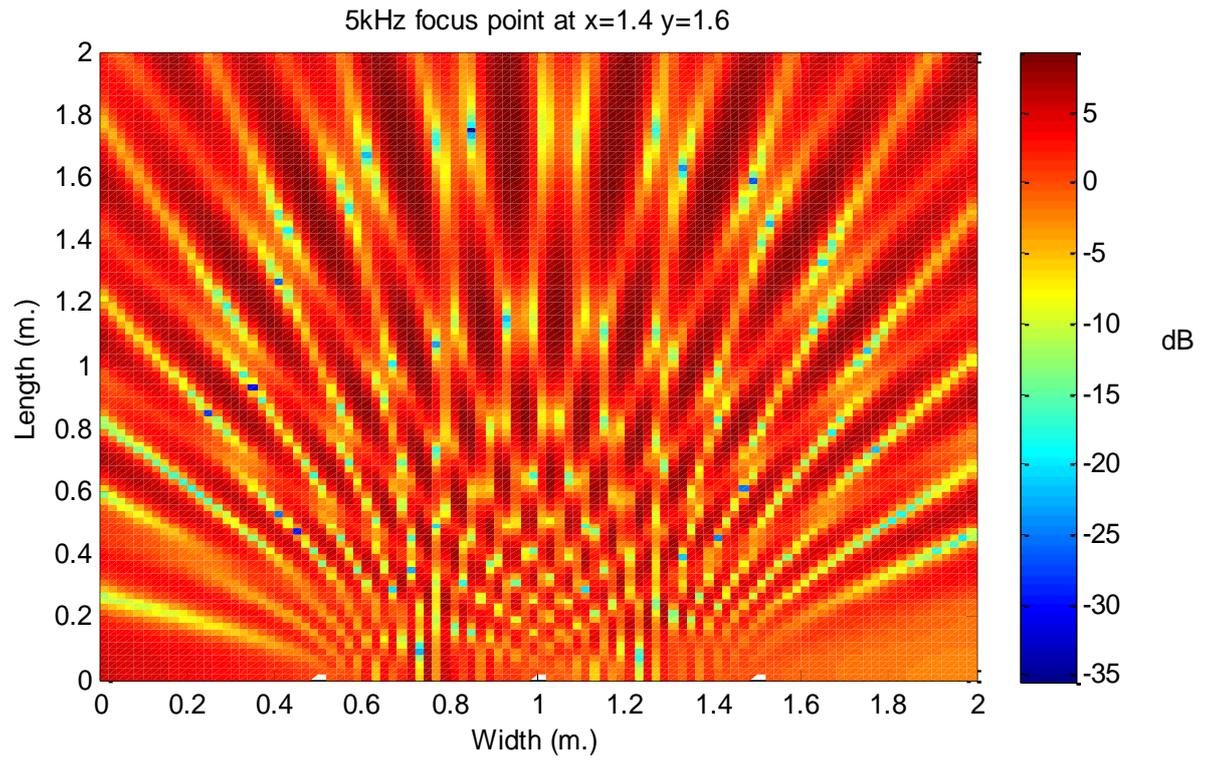


รูป 4.6 จุดโฟกัสที่ $x=1.4$ เมตร $y=1.35$ เมตร และความถี่ 2 kHz

รูปที่ 4.5 แสดงจุดรับสัญญาณเสียง 100 จุดภายในพื้นที่ขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ที่ความถี่ของสัญญาณเสียง 2000 Hz จากระดับสัญญาณเสียงแต่ละตำแหน่ง 100 ตำแหน่ง เทียบกับสัญญาณที่จุดกำเนิดเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล จากรูปจะเห็นว่าที่จุด $x=1.4$ เมตร $y=1.35$ เมตร ค่าระดับสัญญาณเสียงเทียบกับจุดกำเนิดเสียงมีสีน้ำเงินซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง -20 ถึง -25 dB ซึ่งมีค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นเราจะทำการปรับปรุงระดับสัญญาณเสียงที่จุดนี้ให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้ sum delay beam forming ในสมการที่ 4.3 และ 4.4 ค่าระดับสัญญาณเสียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสีแดงซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงมากกว่า 5 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูป 4.7 จุดรับสัญญาณ 100 จุด ที่ความถี่ 5 kHz



รูป 4.8 จุดโฟกัสที่ $x=1.4$ เมตร $y=1.6$ เมตร และความถี่ 5 kHz

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการโครงการนี้ เราได้ทำการวิจัยถึงการกำหนดตำแหน่งของจุดรับสัญญาณเสียงและการดึงสัญญาณมาประมวลผลโดยใช้วิธีการรวมสัญญาณและหน่วงเวลาจากลำโพงที่วางเรียงแบบแถวลำดับ รวมทั้งการคำนวณเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นคำนวณได้จากระยะห่างระหว่างลำโพงแต่ละตัวไปถึงจุดรับสัญญาณแต่ละจุด

การจำลองผลการทดลอง เรากำหนดให้ขนาดพื้นที่กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร และที่ผนังห้องด้านหนึ่งวางลำโพงที่มีทิศทางการกระจายแบบรอบตัว 3 ตัวที่ตำแหน่ง 0.5, 1, 1.5 เมตรตามลำดับ จากนั้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เราสามารถเคลื่อนย้ายจุดรับฟังไปยังตำแหน่งที่ต้องการและยังสามารถได้รับสัญญาณเสียงที่ดีภายในพื้นที่ที่กำหนดด้วย

เราสามารถนำผลการทดลองนี้มาทำการทดลองจริง และนำไปปรับใช้กับพื้นที่ที่มีขนาดเล็กเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันใหม่ๆที่ต้องการส่งสัญญาณเสียงไปยังบริเวณที่ต้องการแทนการใช้หูฟัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chapman, N. C. (2009). *Digital Multimedia*. New York: John Wiley and Sons.
- [2] S. Kagami, H. Mizoguchi, Y. Tamai and T. Kaneda. (2004). "Microphone Array for 2D Sound Localizaton and Capture." *Procededings of the International Conference on Robotics and Automation* (pp. 703-708). New Orleans, LA: IEEE.
- [3] Tashev, I. J. (2009). *Sound Capture and Processing*. New York: John Wiley and Sons.
- [4] Y. Tamai, S. K. (2004). "Sound Spot Generation By 128-Channel Surrounded Speaker Array." *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing workshop*, (pp. 542-546).

ภาคผนวก

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ดร.สุภวรรณ อันนั้นหนับ

อาจารย์คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	ม.เกษตรศาสตร์	2543
วศ.ม.	วิศวกรรมสารสนเทศ	สจล.	2547
Ph.D.	Electrical Engineering (Telecommunication)	The University of Electro- Communications, Tokyo	2551

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Digital Multimedia Technology, Acoustic Engineering