



การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 4

“GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2022 iHappiness: ความสุขและคุณภาพชีวิตที่ดีอย่างยั่งยืนในยุคสังคมดิจิทัล”

การลดระดับเสียงหอนในระบบขยายเสียงด้วยระบบดิจิทัลแบบปรับตัว Adaptive Digital System for Howling Reduction in a Sound Amplification System

ราชู พันธุ์ฉลาด

rachu@techno.rru.ac.th

ประยุทธ์ อินแบน

prayuth@techno.rru.ac.th

สุรพงษ์ แก่นมณี

surapong@techno.rru.ac.th

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ฉะเชิงเทรา

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบลดระดับเสียงหอนแบบดิจิทัลในระบบขยายเสียง ระบบที่นำเสนอได้นำระบบดิจิทัลแบบปรับตัวได้มาใช้ประมาณค่าและสังเคราะห์เสียงหอนที่เกิดขึ้นโดยสมมติว่าทราบค่าความถี่เสียงหอนแต่ไม่ทราบค่าเฟสและแอมพลิจูด ในการสังเคราะห์สัญญาณเสียงหอนนั้น ได้ใช้ตัวกำเนิดสัญญาณดิจิทัลแบบคัปเปิล (couple oscillator) ซึ่งให้เอาพุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกนำไปคูณกับค่าน้ำหนัก (weights) ซึ่งได้รับมาจากระเบียบวิธีปรับค่าได้แบบ weighted least square (WLS) ต่อมานำสัญญาณทั้งสองมารวมกันได้เป็นค่าประมาณของสัญญาณเสียงหอนที่เกิดขึ้นในระบบ สุดท้ายนำไปลบออกจากสัญญาณเสียงที่กำลังถูกรบกวนด้วยเสียงหอนเพื่อกำจัดเสียงหอนทิ้งไปและกู้สัญญาณเสียงที่ต้องการกลับคืนมา ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถกำจัดเสียงหอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เสียงหอน, ระบบดิจิทัลปรับตัวได้, ระบบวิธีปรับค่าได้

Abstract

This paper presents an adaptive system for howling reduction in a sound-amplifying system. An adaptive digital system is used to estimate and synthesize the howling by assuming that the howling frequency is known, but the phase and amplitude are unknown. In the synthesis of howling, a couple oscillator was used, which outputs two sinusoidal waveforms with a phase difference of 90 degrees and amplitudes of 1. The two signals are then multiplied



by the weights, which are obtained from the weighted least square (WLS) adaptive algorithm. Subsequently, the two signals were added together to obtain an estimate of howling occurring in the system. Finally, the synthesized howling is removed from the system input signal to restore the desired speech signal. The computer simulation results showed that the proposed system effectively eliminate the howling.

Keywords: Howling, Adaptive digital system, Adaptive algorithm

บทนำ

เสียงหอนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นได้เสมอในระบบการขยายสัญญาณเสียง เช่น ระบบขยายเสียงกำลังงานสูงกลางแจ้งหรือในห้องประชุม เป็นต้น ปัญหาเสียงหอนทำให้ประสิทธิภาพของระบบการขยายเสียงลดลงอย่างมากจนอาจไม่สามารถใช้งานได้อีก การแก้ปัญหาพื้นฐานที่คนทั่วไปปฏิบัติกันคือการขยับไมโครโฟนหรือลำโพง ไป-มา ไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมและรอจนกระทั่งเสียงหอนหายไปหรือใช้วิธีปรับปุ่มควบคุมความดังของเสียงที่เครื่องขยายเสียง ก็สามารถลดปัญหาเสียงหอนได้เช่นเดียวกัน ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าได้อธิบายปรากฏการณ์เสียงหอนว่าเป็น การป้อนกลับทางเสียง (acoustic feedback) จากลำโพงสู่อุปกรณ์ไมโครโฟน ซึ่งมีสองลักษณะ ได้แก่ วิถีตรง (direct path) จากลำโพงสู่อุปกรณ์ไมโครโฟนและหลายวิถี (multipath) ซึ่งเกิดจากการที่เสียงจากลำโพงไปชนกับ พื้น ผนังห้อง เพดาน ต้นไม้ และสิ่งกีดขวางอื่น ๆ และสะท้อนหรือเลี้ยวเบนกลับไปยังไมโครโฟน ปัจจุบันจะสามารถแบ่งวิธีการแก้ปัญหาเสียงหอนได้สามแบบ ประกอบด้วย ก) การลดอัตรากำลังการขยาย (gain attenuation) (Chung, K., 2004) ข) ใช้ตัวกำจัดเสียงสะท้อนแบบปรับตัวได้ (adaptive echo cancellation) (Ngo, K., Waterschoot, T.V., Christensen, M.G., Moonen, M., Jensen, S.H., 2013) และ ค) ใช้ตัวกรองนอตช์ (ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, วรพงศ์ ศิลาพันธ์, 2547) วิธีการลดอัตรากำลังการขยายมีข้อเสียคือทำให้ความดังของเสียงที่ได้ยินลดลงอาจทำให้การสื่อสารเกิดความคลาดเคลื่อน ส่วนการใช้ตัวกำจัดเสียงสะท้อนแบบปรับตัวจะมีปัญหาเรื่องทำงานได้ช้าเพราะต้องใช้เวลาในการประมาณค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบในขณะที่เสียงหอนมักจะเกิดขึ้นแบบกะทันหัน และสุดท้ายใช้ตัวกรองนอตช์ปรับตัวได้ซึ่งนอกจากมีปัญหาเรื่องทำงานช้าแล้วยังทำให้สเปกตรัมของสัญญาณเสียงเกิดความผิดเพี้ยนอีกด้วยเนื่องจากสเปกตรัมบางส่วนที่มีความถี่ตรงกับเสียงหอนจะต้องถูกกำจัดทิ้งไปด้วย

บทความนี้ได้นำเสนอระบบกำจัดเสียงหอนด้วยระบบดิจิทัลปรับตัวได้ที่อยู่บนหลักการแบบ ข) (ประยุทธ์ อินแบน, ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, 2563) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้เข้าใจกลไกการเกิดเสียงหอนผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. เพื่อนำเสนอแนวทางในการลดเสียงหอนในระบบขยายเสียง

ขอบเขตการวิจัย

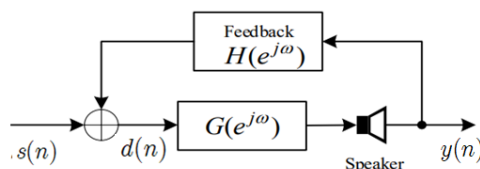
1. เสียงหอนอยู่ในย่านความถี่ 0 – 4 kHz
2. เสียงหอนมีองค์ประกอบความถี่เดียวที่โดดเด่นและมีกำลังงานสูงสุด
3. ทราบความถี่ของเสียงหอนแต่ไม่ทราบขนาดและเฟส

กลไกการเกิดเสียงหอน

เสียงหอนเกิดจากการที่สัญญาณเสียงจากลำโพงย้อนกลับเข้าไปยังไมโครโฟน ดังนั้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองระบบการได้ยินได้ดังรูปที่ 1 โดยที่ $s(n)$ คือสัญญาณเสียงอินพุต $y(n)$ คือสัญญาณเสียงเอาต์พุต $d(n)$ คือสัญญาณเสียงที่ถูกรับกวนด้วยสัญญาณเสียง $G(e^{j\omega})$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบขยายเสียง และ $H(e^{j\omega})$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนในเส้นทางป้อนกลับจากลำโพงสู่ไมโครโฟน ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนโดยรวมของระบบการได้ยินจาก $s(n)$ ไปยัง $y(n)$ คือ

$$Q(e^{j\omega}) = \frac{Y(e^{j\omega})}{S(e^{j\omega})} = \frac{G(e^{j\omega})}{1 - H(e^{j\omega})G(e^{j\omega})} \quad (1)$$

พบว่า (1) เป็นระบบป้อนกลับแบบบวก (positive feedback system) โดยเมื่อ $H(e^{j\omega})G(e^{j\omega}) \rightarrow 1$ และ $\angle H(e^{j\omega})G(e^{j\omega}) \rightarrow 2\pi n, n = 1, 2, \dots$ ทำให้ $1 - H(e^{j\omega})G(e^{j\omega}) \rightarrow 0$ ผลคือ $Q(e^{j\omega}) \rightarrow \infty$ กลายเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพ มีการขยายสัญญาณบางความถี่เฉพาะที่หูเราได้ยินอย่างไร้ขอบเขตเกิดเป็นเสียงหอนตามที่เราได้ยินกันนั่นเอง



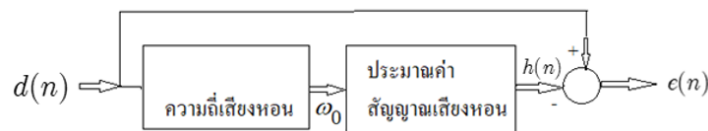
ภาพที่ 1 แบบจำลองของระบบการได้ยิน



วิธีดำเนินการวิจัย

1. การกำจัดเสียงรบกวน

หัวข้อนี้กล่าวถึงระบบกำจัดเสียงรบกวนโดยอาศัยหลักการในบทความ (ประยูทธ อินแบน, ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, 2563) ข้อดีของระบบนี้คือสามารถติดตามการเกิดของเสียงรบกวนได้ดีและให้ค่าความเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตต่ำเมื่อเทียบกับการใช้ตัวกรองนอตช์ โดยหลักการที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 2 โดยที่ $d(n)$ คือสัญญาณเสียงรวมกับสัญญาณเสียงรบกวน ω_0 คือค่าความถี่หลักของสัญญาณเสียงรบกวน $h(n)$ คือสัญญาณเสียงรบกวนที่สังเคราะห์ได้และ $e(n)$ คือสัญญาณเสียงที่กู้คืนมาได้ เสียงรบกวนที่รวมอยู่ใน $d(n)$ จะมีค่าความถี่อยู่ในช่วงที่หูของคนได้ยินกล่าวคือประมาณ 20 – 20000 Hz อย่างไรก็ตาม ในบทความนี้เราจะสนใจเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในย่านความถี่เสียงมนุษย์เท่านั้นคือช่วงความถี่ 20 – 4000 Hz ขณะเกิดปัญหาเสียงรบกวนนั้นจะมีองค์ประกอบหลักเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่โดดเด่นและมีค่ากำลังงานสูงสุดแต่จะไม่สามารถระบุความถี่หลักได้อย่างแน่ชัด แต่ในบทความนี้จะตั้งสมมติฐานว่าทราบค่า ω_0 จากนั้นค่าความถี่ ω_0 ที่ทราบค่าจะถูกส่งต่อไปยังระบบสังเคราะห์สัญญาณเสียงรบกวนได้สัญญาณ $h(n)$ จากนั้นนำไปลบออกจาก $d(n)$ เพื่อกู้เสียง $e(n)$ กลับคืนมา



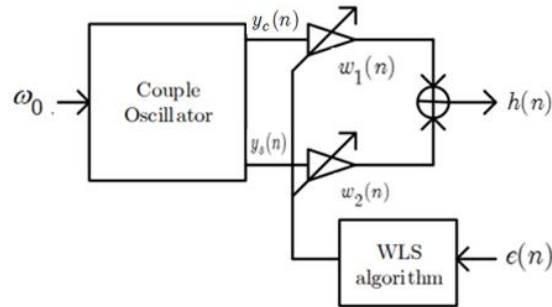
ภาพที่ 2 ระบบกำจัดเสียงรบกวนที่นำเสนอ

2. ตัวสังเคราะห์เสียงรบกวน

หัวข้อนี้กล่าวถึงการสังเคราะห์สัญญาณเสียงรบกวนซึ่งมีหลักการดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ ค่าความถี่หลัก ω_0 ของสัญญาณเสียงรบกวนที่ทราบค่าจะถูกส่งต่อไปให้กับตัวกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบคัปเปิล (couple oscillator) เพื่อสร้างองค์ประกอบอินเฟส $y_c(n)$ และต่างเฟส 90 องศา $y_s(n)$ ดังนั้นเอาต์พุตของตัวกำเนิดสัญญาณจึงสามารถเขียนได้ว่า

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{F}\mathbf{y}(n - 1) \quad (2)$$

โดยที่



ภาพที่ 3 ตัวประมาณค่าเสียงหอน

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos \omega_0 & -\sin \omega_0 \\ \sin \omega_0 & \cos \omega_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

คือเมตริกลักษณะเฉพาะ (characteristic matrix) โดยต้องกำหนดค่าเริ่มต้นเป็น $\mathbf{y}(-1) = [\cos \omega_0 \quad -\sin \omega_0]^T$ เมื่อ T คือ ทรานส์โพส

$$\mathbf{y}(n) = [y_c(n) \quad y_s(n)]^T \quad (4)$$

เมื่อ $y_c(n) = \cos \omega_0 n$ และ $y_s(n) = \sin \omega_0 n$ เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของแอมพลิจูดและเฟสของเสียงหอนได้ ดังนั้นจึงต้องนำตัวกำเนิดสัญญาณไปทำงานร่วมกับระเบียบปรับตัวได้แบบ weighted least square (WLS) (สาเหตุที่เลือก WLS เพราะสามารถหาค่าตอบได้เร็ว) เพื่อปรับค่าแอมพลิจูด $\mathbf{w}(n)$ ของ $\mathbf{y}(n)$ เพื่อสังเคราะห์สัญญาณเสียงหอนดังนี้

$$h(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{y}(n) \quad (5)$$

เมื่อ $\mathbf{w}(n) = [w_1(n) \quad w_2(n)]^T$ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{R}_{yy}^{-1}(n) \mathbf{r}_{dy}(n) \quad (6)$$



โดยที่

$$\mathbf{R}_{yy}(n) = \lambda \mathbf{R}_{yy}(n-1) + \mathbf{y}(n)\mathbf{y}^T(n) \quad (7)$$

และ

$$\mathbf{r}_{dy}(n) = \lambda \mathbf{r}_{dy}(n-1) + d(n)\mathbf{y}(n) \quad (8)$$

คือค่าอัตโนมัติสหสัมพันธ์และสหสัมพันธ์ไขว้สะสมระหว่าง $\mathbf{y}(n)$ กับ $\mathbf{y}(n)$ และระหว่าง $d(n)$ กับ $\mathbf{y}(n)$ ตามลำดับ $0 << \lambda < 1$ เป็นค่าคงที่ (Thitinauremit, A., Punalchard, R., 2018)

3. การกำจัดเสียงรบกวน

สัญญาณเสียงรบกวน $h(n)$ ที่สังเคราะห์ได้หัวข้อที่ 2 จะถูกนำไปลบออกจากสัญญาณอินพุต $d(n)$ ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณเสียงพูดกับเสียงรบกวนจริง จะได้สัญญาณเสียงที่กู้คืนได้คือ $e(n) = d(n) - h(n)$ ดังนั้น ถ้าหากกระบวนการในแต่ละส่วนที่กล่าวมาสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ เราสามารถคาดหวังได้ว่า สัญญาณเสียงที่กู้คืนได้จะมีคุณภาพใกล้เคียงกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ ในหัวข้อถัดไปจะแสดงผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการวิจัย

เราจะเริ่มต้นจำลองการทำงานของระบบกำจัดสัญญาณเสียงรบกวนที่นำเสนอด้วยกับการบันทึกสัญญาณเสียงพูดผ่านซาว์นการ์ด (sound card) ของคอมพิวเตอร์โดยใช้อัตราสุ่ม 8000 Hz ซึ่งเป็นเสียงของผู้ใหญ่เพศหญิงพูดวลีว่า “ดอกกล้วยไม้” โดยรูปร่างและสเปกโตรแกรมของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4(a) และ (b) ตามลำดับ ต่อมาจะสมมติให้มีเสียงรบกวน $p(n)$ เกิดขึ้นในระบบโดยมีค่าความถี่เท่ากับ 2000 Hz มีเฟสเป็นศูนย์ และแอมพลิจูดมีค่าขึ้นกับเวลา และเนื่องจากได้กำหนดให้อัตราสุ่มมีค่าเป็น 8000 Hz ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการเสียงรบกวนในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ว่า

$$\tilde{p}(n) = \sqrt{n} \cos\left(\frac{\pi}{2}n\right) \quad (9)$$

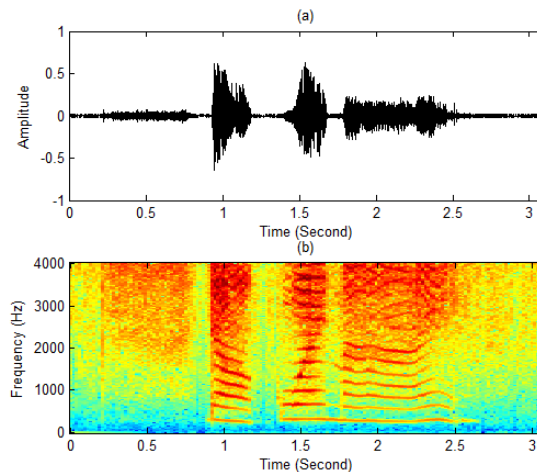
เมื่อนำ $\tilde{p}(n)$ ไปรวมกับสัญญาณเสียงในรูปที่ 4(a) จะได้รูปร่างและสเปกโตรแกรมของสัญญาณ $d(n)$ ดังภาพที่ 5(a) และ (b) ตามลำดับ จากภาพที่ 5(a) จะพบว่าเสียงรบกวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาและเมื่อมี



การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 4

“GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2022 iHappiness: ความสุขและคุณภาพชีวิตที่ดีอย่างยั่งยืนในยุคสังคมดิจิทัล”

ค่ามากพอเราก็จะไม่สามารถได้ยินเสียงพูดอีกต่อไปแต่จะได้ยินเสียงหอนแทน ซึ่งก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้ฟังเป็นอย่างมาก ส่วนในรูปที่ 5(b) นั้นจะสังเกตเห็นว่ามีเส้นสเปกตรัมทอดยาวไปตามแกนเวลาโดยอ่านค่าความถี่ในแนวตั้งได้ 2000 Hz ได้อย่างชัดเจน ต่อมาเมื่อป้อนสัญญาณในรูปที่ 5(a) ให้แก่ระบบที่นำเสนอเพื่อกำจัดเสียงหอนผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 6 โดยที่รูป (a) คือรูปร่างของสัญญาณ และ (b) คือสเปกโตรแกรมจากภาพที่ 6(b) พบว่าสเปกตรัมของเสียงหอนมีสีจางลงมากเมื่อเทียบกับภาพที่ 5(b) ซึ่งสามารถแปลความหมายจากสเปกโตรแกรมได้ว่า ค่ากำลังงานของเสียงหอนมีค่าลดลงนั่นเอง ส่วนรูป 7(a) และ (b) แสดงผลการกำจัดสัญญาณเสียงหอนในบทความ (ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, วรพงศ์ ศิลาพันธ์, 2547) ซึ่งจากสเปกโตรแกรมพบว่าเส้นสเปกตรัมของเสียงหอนยังมีสีเข้มซึ่งแปลความหมายได้ว่าระบบใน (ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, วรพงศ์ ศิลาพันธ์, 2547) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเสียงหอนด้อยกว่าระบบที่นำเสนอในบทความนี้ อนึ่ง สำหรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงนั้น ในบทความนี้ได้กำหนดค่าเหมือนกับที่ปรากฏในเอกสารอ้างอิงท้ายบทความ

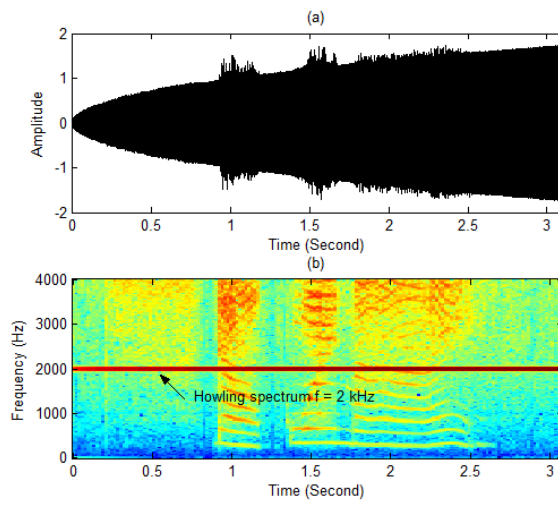


ภาพที่ 4 (a) รูปร่างสัญญาณเสียงวลี “ดอกกล้วยไม้” (b) สเปกโตรแกรม

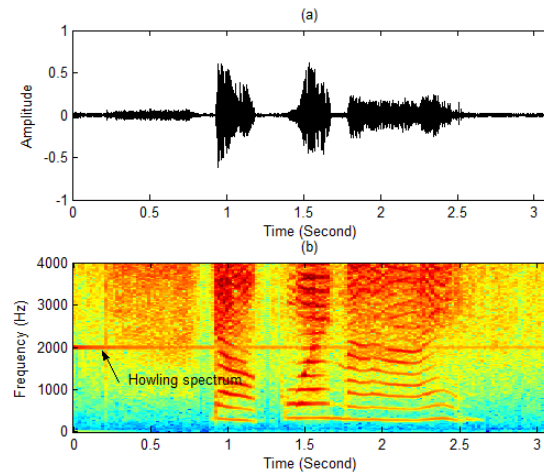


การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 4

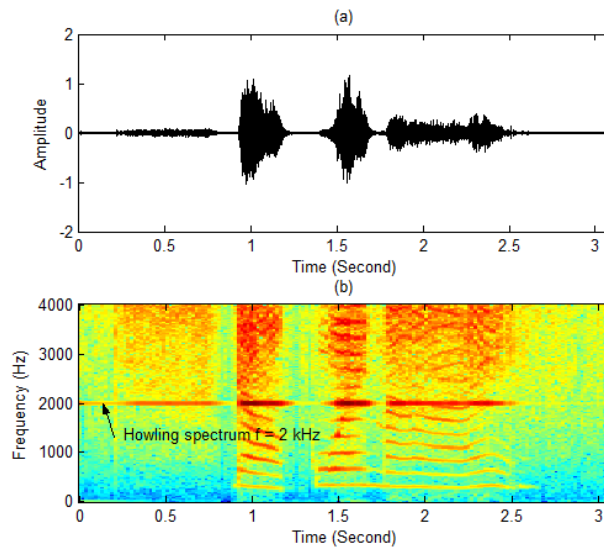
“GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2022 iHappiness: ความสุขและคุณภาพชีวิตที่ดีอย่างยั่งยืนในยุคสังคมดิจิทัล”



ภาพที่ 5 (a) รูปร่างสัญญาณเสียงวลี “ดอกกล้วยไม้” เมื่อเกิดเสียงทอน (b) สเปคโตรแกรม



ภาพที่ 6 (a) รูปร่างสัญญาณเสียงวลี “ดอกกล้วยไม้” เมื่อผ่านระบบกำจัดเสียงทอน (b) สเปคโตรแกรม



ภาพที่ 7 (a) รูปร่างสัญญาณเสียงวลี “คอกกล้วยไม้” เมื่อผ่านระบบกำจัดเสียงหอนในบทความ
(ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, วรพงศ์ ศิลาพันธ์, 2547)
(b) สเปกโตรแกรม

อภิปรายผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอระบบกำจัดสัญญาณเสียงหอนในระบบเสียง ระบบที่นำเสนอขึ้นทำงานอยู่บนหลักการของตัวกำจัดสัญญาณเสียงสะท้อนแบบปรับตัวได้ ระบบที่นำเสนอได้นำตัวสังเคราะห์เสียงหอนมาใช้ โดยสมมติว่าทราบค่าความถี่ที่แน่นอนของสัญญาณเสียงหอน เสียงหอนที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปลบออกจากสัญญาณอินพุตซึ่งจะให้ผลเป็นสัญญาณเสียงที่ถูกลบคืนมา ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถกำจัดเสียงหอนได้เร็วและมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการใช้ในกรองนอตซ์ปรับตัวได้

ข้อเสนอแนะ

สัญญาณเสียงหอนนั้นเป็นสัญญาณสุ่ม (random) โดยจะไม่ทราบทั้งเวลาที่เกิด ขนาด เฟส และความถี่ ดังนั้นการแก้ปัญหาเสียงหอนจึงจำเป็นต้องใช้ระบบปรับตัวได้เท่านั้นจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่นำเสนอขึ้นยังขาดตัวตรวจจับเสียงหอน (howling detector) และตัวประมาณค่าความถี่เสียงหอน (howling frequency estimator) ซึ่งจะได้พัฒนาต่อยอดในงานวิจัยถัดไป



การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 4

“GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2022 iHappiness: ความสุขและคุณภาพชีวิตที่ดีอย่างยั่งยืนในยุคสังคมดิจิทัล”

เอกสารอ้างอิง

- ประยุทธ์ อินแบน, ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา. (2563). **การกำจัดสัญญาณแทรกสอดเพาเวอร์ไลน์ในสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจด้วยระบบปรับตัว**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 43 (EECON 43) ตุลาคม.
- ราชู พันธุ์ฉลาด, วุฒิพร เลิศวาสนา, วรพงศ์ ศิลาพันธ์. (2547). **การกำจัดเสียงรบกวนโดยใช้วงจรกรองดิจิทัลแบบไอโออาร์นอตช์แบบปรับตัวได้**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27 (EECON 27). (121-124) พฤศจิกายน.
- Chung, K. (2004). Challenges and recent developments in hearing aids: Part ii. feedback and occlusion effect reduction strategies, laser shell manufacturing processes, and other signal processing technologies. **Trends Amplif**, 8, 125–164.
- Friedlander, B., Smith, J. (1984). Analysis and performance evaluation of an adaptive notch filter. **IEEE Trans. Inf. Theory**, 30, 283-295.
- Leotwassana, W., Punalard, R., Silaphan, W. (2003). **Adaptive howling canceller using adaptive iir notch filter: Simulation and implementation**. In Proceedings of the International Conference on Neural Networks & Signal Processing, Nanjing, China, 14–17 December.
- Ma, G., Gran, F. Jacobsen, Agerkvist, F.T. (2011). Adaptive feedback cancellation with band-limited LPC vocoder in digital hearing aids. **IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process**, 19, 677-687.
- Ngo, K., Waterschoot, T.V., Christensen, M.G., Moonen, M., Jensen, S.H. (2013). Improved prediction error filters for adaptive feedback cancellation in hearing aids. **Signal Process**, 93, 3062–3075.
- Thitinauremit, A., Punalard, R. (2018). Fast Adaptive Algorithm for Sinusoidal Interference Cancellation. **2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)**, (1-3).