

การตรวจจับและกำจัดเสียงหอนในระบบเสียงสาธารณะ Howling Detection and Rejection in Public Address System

ราชู พันธุ์ฉลาด^{1*} และ ประยุทธ์ อินแบน¹
Rachu Punchalard^{1*} and Prayuth Inban¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับและกำจัดเสียงหอนในระบบเสียงสาธารณะ ระบบที่นำเสนอมีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือตัวตรวจจับและตัวกำจัดสัญญาณเสียงหอน เนื่องจากเสียงหอนเป็นสัญญาณแบบสุ่มที่ไม่ทราบค่าแอมพลิจูด ความถี่ และเฟส ที่แน่นอน ดังนั้นจึงได้นำตัวกรองนอตช์ปรับตัวได้มาใช้แก้ปัญหาเสียงหอน ในการตรวจจับการมีของเสียงหอนในระบบนั้นเราจะตรวจสอบจากค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองนอตช์ ส่วนสัญญาณที่ผ่านการกำจัดเสียงหอนแล้วจะวัดจากเอาต์พุตของตัวกรองนอตช์ ผลการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ตัวตรวจจับเสียงหอนสามารถทำงานได้ดีในช่วงความถี่ 500 Hz – 4,000 Hz ที่ความถี่สุ่ม 8,000 Hz และที่อัตราความแรงของเสียงหอนร้อยละ 100 ของระดับสูงสุดของสัญญาณเสียงพูด โดยหลังจากตรวจจับเสียงหอนได้แล้ว ระบบยังสามารถกำจัดเสียงหอนให้หายไปอย่างรวดเร็วอีกด้วย ส่งผลให้ผู้ฟังได้รับข่าวสารจากผู้พูดได้อย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: ระบบเสียงสาธารณะ เสียงหอน ตัวกำจัดเสียงหอน ตัวกรองนอตช์ ตัวกรองปรับตัวได้

Abstract

This paper presents howling detection and rejection for public address audio systems. The proposed system has two main components: the howling detector and the howling eliminator. Since howling is a random signal whose exact amplitude, frequency, and phase are not known, adaptive notch filters (ANFs) have been used to overcome howling. To detect the presence of howling in the systems, we consider the ANF coefficient. The howling, suppressed speech is measured at the output of the ANF. The results of the computer program showed that the howling detector worked well in the frequency range 500 Hz–4,000 Hz, at a sampling frequency of 8,000 Hz, and at a howling intensity rating of 100% of the peak of the speech signal. After detecting the howling, the system can also quickly eliminate howling. As a result, the listeners receive the message from the speaker accurately.

Keywords: Public address system, Howling, Howling detector, Notch filter, Adaptive filter

*Corresponding author: rachu@techno.rru.ac.th

1. บทนำ

เสียงรบกวนเกิดจากผลกระทบของการป้อนกลับทางเสียง (Acoustic feedback) (P. Gil-Cacho et al., 2009, pp. 2574-2578) ซึ่งสร้างปัญหาอย่างร้ายแรงต่อการได้ยินทั้งต่อระบบช่วยเหลือการได้ยิน (Hearing aid systems: HA) ของผู้พิการทางการได้ยินและต่อระบบเสียงสาธารณะ (Public address: PA) เช่นในห้องประชุม หรือเวทีปราศรัยกลางแจ้ง เป็นต้น เสียงรบกวนคือผลของการเชื่อมต่อทางเสียง (Acoustic coupling) ระหว่างไมโครโฟนและลำโพง โดยเสียงบางส่วนจากลำโพงที่ถูกขยายแล้วได้เล็ดลอดกลับเข้าสู่ไมโครโฟน จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การป้อนกลับทางเสียง ตามเงื่อนไขของระบบปิด (Closed loop systems) สาเหตุที่เกิดเสียงรบกวนคือระบบขาดเสถียรภาพซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยทฤษฎีเงื่อนไขเสถียรภาพไนควิสต์ (Nyquist stability criterion) (H. Nyquist, 1932, pp. 126-147) ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองของระบบปิดโดยผลตอบสนองทางความถี่ที่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$T(f) = \frac{H(f)}{1 - G(f)H(f)} \quad (1)$$

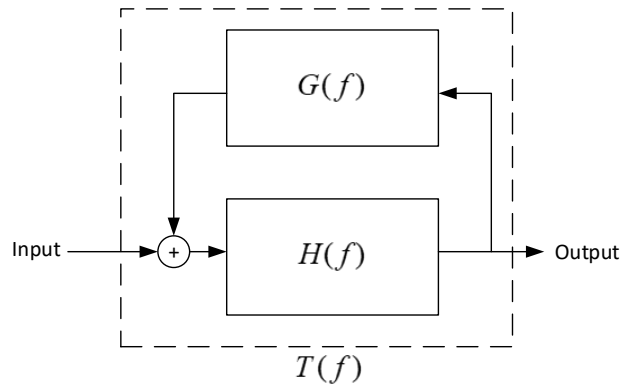
เมื่อ f คือตัวแปรความถี่ $G(f)$ คือผลตอบสนองของระบบขยายเสียง $H(f)$ ผลตอบสนองในเส้นทางป้อนกลับ และ $T(f)$ คือผลตอบสนองโดยรวม

ทฤษฎีเงื่อนไขเสถียรภาพไนควิสต์กล่าวไว้ว่า ถ้ามีความถี่วิกฤต f ค่าหนึ่งที่ทำให้

$$\begin{cases} |G(f)H(f)| & \geq 1 \\ \angle G(f)H(f) = 2n\pi, n = 0, \pm 1, \dots \end{cases}$$

เป็นจริงแล้วระบบปิดจะไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นหากระบบถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณที่มีความถี่วิกฤต f ดังกล่าวแล้วการออสซิลเลชัน (Oscillation) ที่เป็นตัวสร้างเสียงรบกวนก็จะเกิดขึ้นในที่สุด ซึ่งเสียงรบกวนที่เราได้ยินทั่วไประบบนั้นมักจะเป็นสัญญาณแบนแคบ (Narrow band signals) ซึ่งสามารถจำลองเสียงรบกวนได้ด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ไม่ทราบค่าแอมพลิจูด เฟส และความถี่วิกฤต f

การป้อนกลับทางเสียงทำให้ระบบโดยรวม $T(f)$ เกิดการขยายสัญญาณที่มีความถี่วิกฤต f อย่างมากมายผิดปกติจนกลายเป็นเสียงรบกวนและส่งผลทำให้การได้ยินเกิดวิกฤต ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบ HA และ PA แม้ว่าเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบทั้งสองจะเป็นเรื่องเดียวกันแต่ตัวแปรทางกายภาพในระบบทั้งสองนั้นแตกต่างกันอย่างมาก ยกตัวอย่าง ในระบบ HA จะใช้ไมโครโฟนหนึ่งตัวกับลำโพงอีกหนึ่งหรือสองตัวในขณะที่ในระบบ PA จะต้องนำแบบจำลองระบบแบบหลายช่องสัญญาณ (Multichannel) มาใช้อธิบาย นอกจากนี้ยังพบว่าผลตอบสนองอิมพัลส์ในเส้นทางป้อนกลับ (Feedback path) ของระบบ HA จะสั้นกว่าผลตอบสนองอิมพัลส์ในเส้นทางป้อนกลับของระบบ PA อย่างมาก จึงทำให้ระบบกำจัดเสียงรบกวนใช้กำลังงานในการคำนวณในระบบ HA น้อยกว่าในระบบ PA จากความแตกต่างทางกายภาพดังกล่าว ทำให้เกิดแนวคิดในการแก้ปัญหาการป้อนกลับทางเสียงในหลากหลายรูปแบบ โดยในระบบ HA มักนิยมใช้การกำจัดการป้อนกลับแบบปรับตัวได้ (Adaptive feedback cancellation: AFC) (Spriet A. et al., 2007), (Li, Yanping et al., 2021), (Gan, H. et al., 2022) ในบทความนี้เราสนใจแก้ปัญหาการป้อนกลับทางเสียงในระบบ PA เท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ใช้กันมากในการแก้ปัญหาคือใช้ตัวกรองนอตช์ปรับตัวได้ (Adaptive notch filter: ANF) (T. van Waterschoot, M. Moonen, 2008, pp. 8-13) โดยเราจะนำตัว ANF ไปวางในเส้นทางไปข้างหน้า (Forward path) ของระบบเพื่อทำหน้าที่ลดทอนค่ากำลังงานขององค์ประกอบความถี่ที่เกิดจากการป้อนกลับทางเสียง



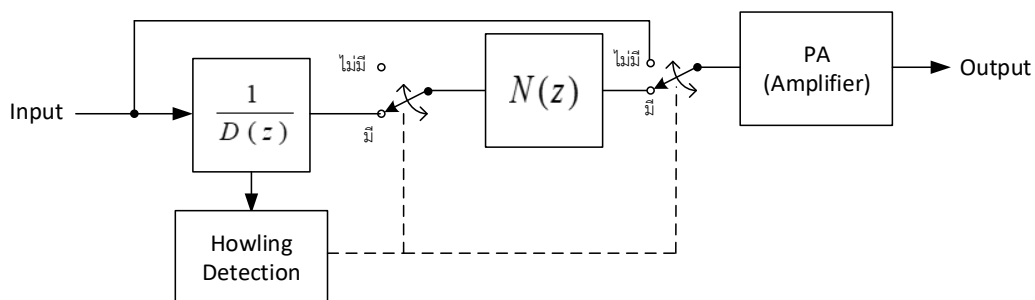
ภาพที่ 1 แบบจำลองระบบปิด

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 ศึกษาต้นเหตุของปัญหาการเกิดเสียงหอน
- 2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา
- 2.3 ออกแบบระบบแก้ปัญหาโดยอาศัยความรู้ทางด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- 2.4 ทดสอบกับสัญญาณจริงผ่านการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์
- 2.5 นำไปใช้งานจริงในอนาคต

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาหาต้นเหตุที่ทำให้เกิดเสียงหอนหรือการป้อนกลับทางเสียง จากนั้นจะหาวิธีการแก้ไขในบทความนี้เราจะสนใจเฉพาะการป้อนกลับทางเสียงในระบบ PA เท่านั้นและได้เลือกรูปแบบการแก้ไขปัญหาการป้อนกลับทางเสียงด้วยวิธีการใช้ตัวกรอง ANF โดยหลักการที่นำเสนอแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบตรวจจับและกำจัดเสียงหอนที่นำเสนอ

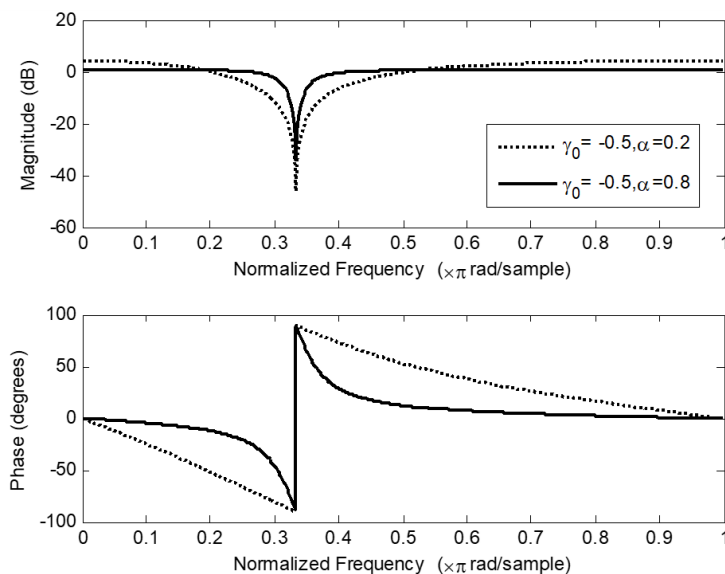
จากภาพ สัญญาณ input จะถูกป้อนเข้าระบบ $1/D(z)$ เพื่อตรวจจับสัญญาณเสียงหอน หากตรวจไม่พบการป้อนกลับทางเสียง สัญญาณ Input จะถูกส่งโดยตรงไปยัง PA โดยตรงไม่ผ่านทั้งระบบ $1/D(z)$ และ $N(z)$ ทำให้ระบบประมวลผลลดการคำนวณลงได้ ทันทีที่ตรวจพบได้ว่าการป้อนกลับทางเสียงเกิดขึ้น เอาต์พุตของระบบ $1/D(z)$ ก็จะถูกป้อนเข้าสู่อินพุตระบบ $N(z)$ ทำให้ระบบทั้งสองต่อ cascade กันกลายเป็นตัวกรอง ANF ซึ่ง ANF จะทำหน้าที่ลดทอนค่ากำลังงานขององค์ประกอบความถี่วิกฤติของสัญญาณเสียงที่ถูกขยายอย่างผิดปกติอันเนื่องจากการป้อนกลับทางเสียงเพื่อทำให้ระบบ PA สามารถกลับมาทำงานได้ตามปกติ ในการตรวจจับการป้อนกลับทางเสียงนั้นเราได้ใช้การตรวจจับแบบ sample by sample ทำให้ระบบมีการคำนวณแบบ sample-based ซึ่งสามารถลดภาระการคำนวณของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับกับการคำนวณแบบ frame-based

3.1 ตัวกรอง ANF

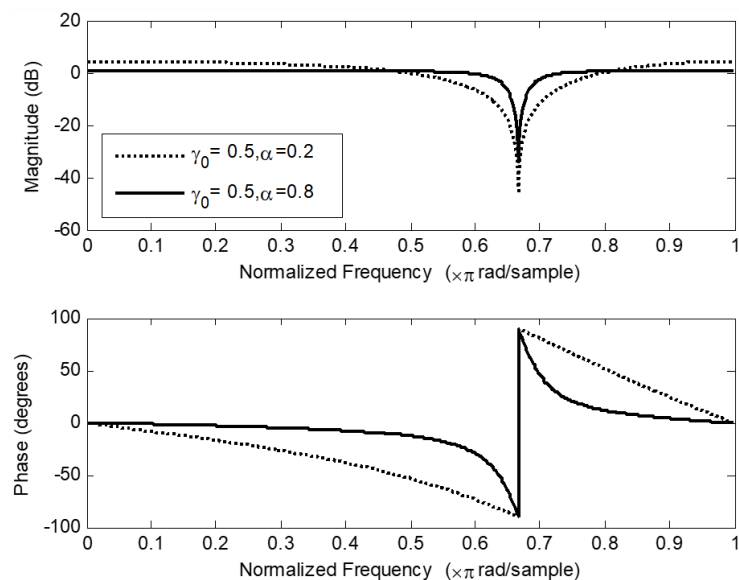
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวกรอง ANF ในบทความนี้เราได้เลือกใช้ตัวกรอง ANF แบบ infinite impulse response (IIR) อันดับสองซึ่งมีฟังก์ชันระบบ (System function) ดังนี้ (N. I. Cho, S. U. Lee, 1993, pp. 405-416)

$$H_N(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{1 + 2\gamma_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 + (1 + \alpha)\gamma_0 z^{-1} + \alpha z^{-2}} \quad (2)$$

เมื่อ z คือตัวแปรเชิงซ้อน $-1 < \gamma_0 < 1$ คือสัมประสิทธิ์ของตัวกรองและ $0 < \alpha < 1$ คือตัวแปรคงที่ใช้กำหนดแบนด์วิดท์ของตัวกรอง ANF ภาพที่ 3 และ 4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของ $H_N(z)$ เมื่อกำหนดให้ $\gamma_0 = -0.5$ และ 0.5 และ $\alpha = 0.2$ และ 0.8 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ผลตอบสนองความถี่ของ ANF เมื่อ $\gamma_0 = -0.5$ $\alpha = 0.2$ และ 0.8



ภาพที่ 4 ผลตอบสนองความถี่ของ ANF เมื่อ $\gamma_0 = 0.5$ $\alpha = 0.2$ และ 0.8

จากภาพที่ 3 และ 4 จะเห็นว่าเมื่อค่า γ_0 เปลี่ยนไปจะส่งผลให้ความถี่ notch Ω_0 (Notch frequency) เปลี่ยนตามด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองและค่าความถี่ notch จะสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\gamma_0 = -\cos\Omega_0 \quad (3)$$

ส่วนตัวแปร α จะส่งผลโดยตรงต่อค่าแบนวิทซ์ของ ANF กล่าวคือ ถ้ามีค่าต่ำแบนวิทซ์ของ ANF จะกว้างหากมีค่าสูงแบนวิทซ์จะแคบ จากสมการที่ (3) หากทำการปรับเปลี่ยนค่า γ_0 จะส่งผลโดยตรงต่อค่า Ω_0 นั้นหมายความว่า ถ้าความถี่เสียงหอนมีค่าเป็น Ω_h เราก็จะสามารถปรับค่า k_0 ไปได้เรื่อย ๆ ในช่วง -1 ถึง 1 จนกว่าจะพบ $\gamma_h = -\cos\Omega_h$ ในที่สุดนั่นเอง

จากที่กล่าวมาก่อนหน้า เราจะสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของสัญญาณเสียงหอน ได้ดังนี้

$$v(n) = A\cos(\Omega_h n + \phi) \quad (4)$$

เมื่อ $v(n)$ คือสัญญาณเสียงหอน $A > 0$ คือแอมพลิจูด $0 < \Omega_h < \pi$ คือความถี่เสียงหอน $-\pi \leq \phi \leq \pi$ คือเฟส และ n คือตัวแปรดัชนีเวลา (Time index) ในทางปฏิบัติสัญญาณเสียงหอนในสมการที่ (4) จะเป็นสัญญาณประเภทสุ่ม (Random signal) ที่ไม่ทราบค่าแอมพลิจูด ความถี่และเฟสที่แน่นอน ดังนั้นตัวกรองนอตช์แบบคงที่ (Fixed notch filter) จึงไม่สามารถใช้แก้ปัญหาเสียงหอนในระบบ PA ได้ เพื่อที่จะปรับค่า γ_0 ให้ได้ค่า γ_h ตามที่ต้องการ เราต้องใช้ระเบียบวิธีปรับตัวได้ (Adaptive algorithm) ซึ่งในบทความนี้ได้เลือกวิธีที่ถูกนำเสนอโดย (N. I. Cho, S. U. Lee, 1993, pp. 405-416) เนื่องจากมีอัตราการปรับตัวเร็ว (Fast convergence speed) ทำให้สามารถหาเสียงหอนได้ไวและไม่มีไบอัส (Unbiased) เรียกวิธีดังกล่าวว่า ระเบียบวิธีแลตทิซ (Lattice algorithm: LA) ดังนี้

$$\tilde{\gamma}_0(n+1) = \lambda \tilde{\gamma}_0(n) + (1-\lambda)\gamma_0(n) \quad (5)$$

โดยที่

$$\gamma_0(n) = -\frac{C(n)}{D(n)} \quad (6)$$

เมื่อ

$$C(n) = \beta C(n-1) + (1-\beta)y(n-1)(y(n) + y(n-2)) \quad (7)$$

$$D(n) = \beta D(n-1) + 2(1-\beta)y^2(n-1) \quad (8)$$

และ $0 < \beta < 1$ การปรับค่า γ_0 ตามสมการที่ (5) ถึง (8) จำเป็นต้องกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial values) ค่าน้อย ๆ ให้แก่ระเบียบวิธี LA ซึ่งประกอบด้วยค่า $C(0)$ และ $D(0)$ และเพื่อให้ได้ผลตอบสนองชั่วขณะ (Transient response) ที่เหมาะสมในบทความ (N. I. Cho, S. U. Lee, 1993, pp. 405-416) ได้แนะนำให้กำหนดให้ $|C(0)| < |D(0)|$ จากสมการที่ (7) $y(n)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ $1/D(z)$ กล่าวคือ

$$y(n) = \frac{1}{D(z)} x(n) \quad (9)$$

โดยที่

$$x(n) = s(n) + v(n) \quad (10)$$

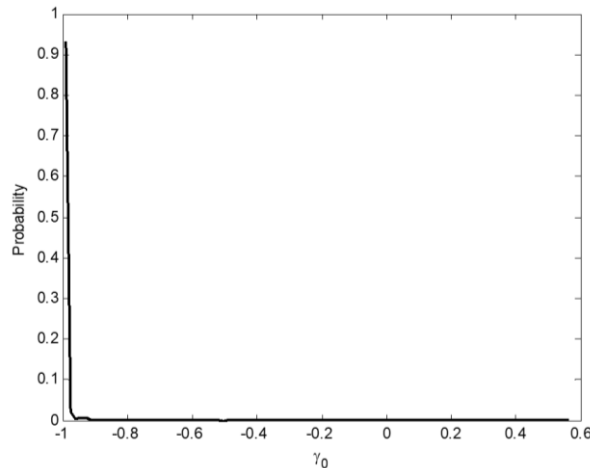
เมื่อ $s(n)$ คือสัญญาณเสียงพูด (Speech) สำหรับสัญญาณเสียงพูดหรือสัญญาณที่ต้องการ $u(n)$ ที่ผ่านการแก้ไขปัญหาเสียงหอนแล้ว นั้นจะได้จากนำมาจากเอาต์พุตของ ANF ดังนี้

$$u(n) = N(z)y(n) \quad (11)$$

3.2 การตรวจจับเสียงหอน

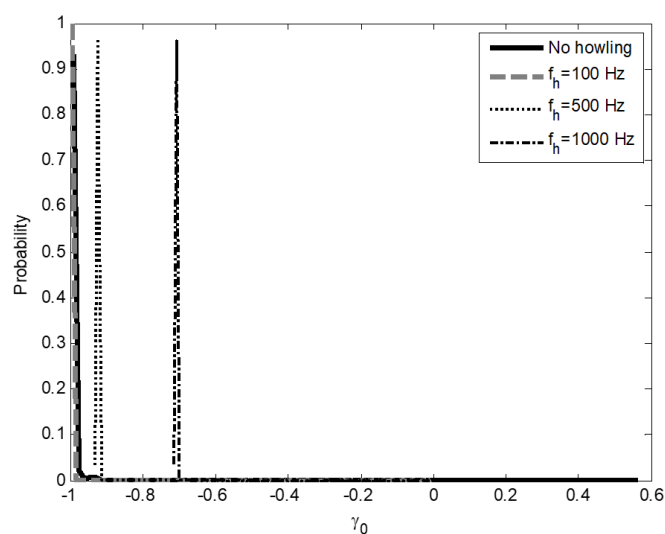
การตรวจจับเสียงหอนที่นำเสนอในบทความนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ γ_0 ของตัวกรอง ANF มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่ามีเสียงหอนเกิดขึ้นในระบบหรือไม่ ซึ่งมีหลักการดังนี้

ก) ในกรณีที่ไม่มีเสียงหอนเกิดขึ้นค่าความถี่ส่วนใหญ่ที่ระบบ $1/D(z)$ ตรวจพบจะมีค่าเป็นศูนย์หรือเทียบเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ $\gamma_0 = -1$ เสียเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 5



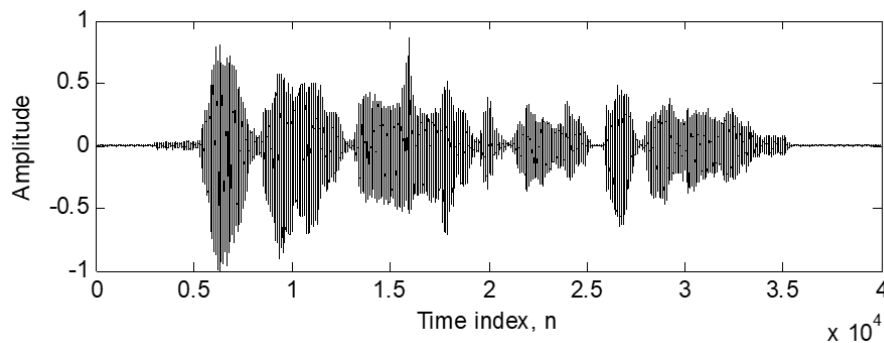
ภาพที่ 5 ความน่าจะเป็นของ γ_0 เมื่อไม่มีเสียงหอนที่ระบบ $1/D(z)$ ตรวจพบ

ข) เมื่อมีเสียงหอนที่ความถี่วิกฤตใดๆ เกิดขึ้นทำให้ γ_0 ลู่อเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่งในช่วง -1 ถึง 1 โดยที่เมื่อค่าความถี่วิกฤตมีค่าเข้าใกล้ 0 ทำให้ค่า γ_0 ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับ -1 เช่นกัน ดังนั้นการใช้ค่า γ_0 เพื่อตรวจจับเสียงหอนในเงื่อนไขนี้จึงทำได้ยาก อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เสียงหอนที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ค่า γ_0 ส่วนใหญ่อยู่ห่างจากค่า -1 ทำให้เป็นไปได้ที่จะนำค่า γ_0 มาใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่ามีเสียงหอนเกิดขึ้นในระบบหรือไม่ ดังตัวอย่างแสดงในภาพ 6 จากภาพพบว่าหากค่าความถี่เสียงหอนที่มีค่าตั้งแต่ 500 Hz ขึ้นไปจะให้ค่า γ_0 ที่มากกว่า -1 จนเห็นได้ชัด ดังนั้นการใช้ค่า γ_0 เพื่อตรวจจับการมีอยู่ของเสียงหอนจึงสามารถทำได้และเป็นวิธีที่ง่าย ไม่มีการคำนวณค่าใดๆ เพิ่มเติมเพราะระเบียบวิธี LA จะปรับ γ_0 อยู่ตลอดเวลาในแบบ sample by sample



ภาพที่ 6 ความน่าจะเป็นของ γ_0 เมื่อเกิดเสียงหอนที่ความถี่วิกฤตต่าง 100 500 และ 1,000 Hz ที่ระบบ $1/D(z)$ ตรวจพบ

ค) จากผลการทดลองดังภาพที่ 5 และ 6 ทำให้เราสามารถกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้ **1) สัญญาณอินพุต:** ความถี่สุ่มตัวอย่างเป็น 8,000 Hz จำนวนบิตต่อตัวอย่างเป็น 16 บิต ช่วงเวลาในการบันทึกสัญญาณ 5 วินาที สัญญาณเสียงมีความถี่สูงสุดเป็น 4,000 Hz กำหนดให้ขนาด (Absolute value) สูงสุดของสัญญาณเสียงมีค่าเป็น 1 โดยสัญญาณเสียงต้นฉบับที่บันทึกได้แสดงดังภาพที่ 7 ในส่วนขององค์ประกอบเสียงพหุที่สามารถตรวจจับได้จะต้องมีค่าความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 Hz แต่ต้องน้อยกว่า 4,000 Hz (เนื่องจากถูกจำกัดด้วยความถี่สุ่มตัวอย่าง 8,000 Hz) ความแรงของเสียงพหุมีค่าร้อยละ 100 ของสัญญาณเสียงสูงสุด (อัตราความแรงของเสียงพหุอื่น ๆ อยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้) **2) ตัวกรอง ANF และระเบียบวิธี LA:** กำหนดค่า $\alpha=0.8$ $\beta=0.9$ $\lambda=0.95$ ค่าเริ่มต้น $C(0)=0.001$ และ $D(0)=0.01$



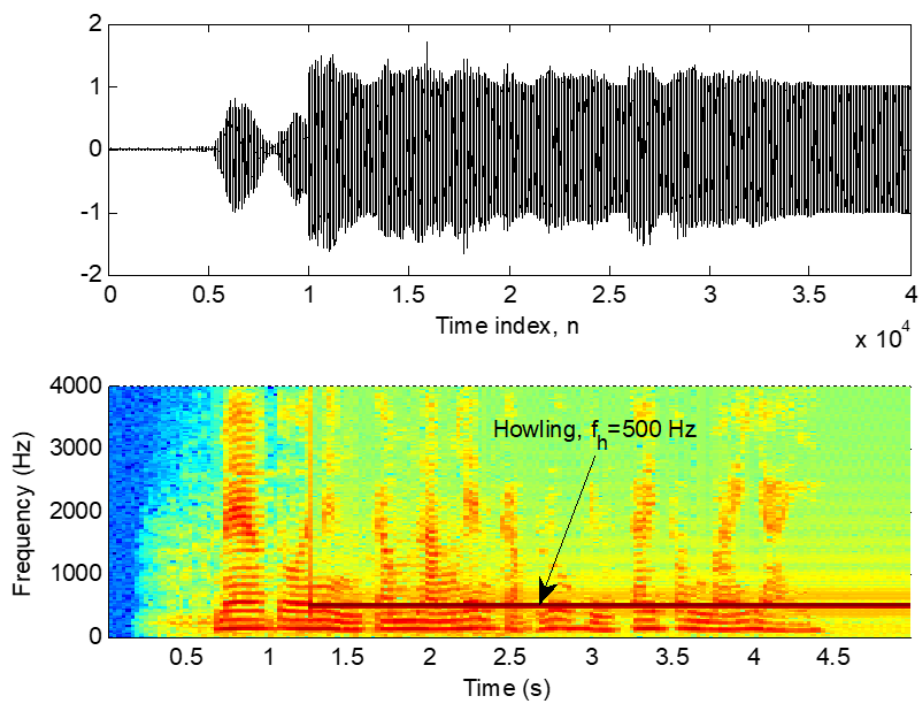
ภาพที่ 7 สัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ

ในการตรวจจับองค์ประกอบเสียงพหุที่อาจเกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่กำหนดข้างต้น เราจะต้องเลือกค่าอ้างอิง γ_t ขึ้นมาค่าหนึ่งจาก γ_0 ที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ปรากฏในภาพที่ 6 เพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจว่าสัญญาณเสียงพหุเกิดขึ้นในระบบหรือไม่ จากการสังเกต ในบทความนี้ได้เลือกใช้ค่า $\gamma_t = -0.95$ ดังนั้นในระหว่างที่ระบบทำงานอยู่หากตรวจพบว่า $\gamma_0(n) < \gamma_t$ ระบบจะตัดสินใจว่าไม่มีเสียงพหุอยู่ในระบบ สวิตช์ทั้งสองตัวในภาพที่ 2 จะถูกสับไปที่ตำแหน่ง “ไม่มี” ทำให้สัญญาณอินพุตถูกส่งโดยตรงไปยังเครื่องขยายเสียงโดยไม่ผ่านตัวกรอง ANF ในทางกลับกันหากตรวจสอบพบว่า $\gamma_0(n) \geq \gamma_t$ สวิตช์ทั้งสองจะถูกสับไปที่ตำแหน่ง “มี” ทำให้ตัวกรอง ANF ก็จะถูกต่อเข้ากับระบบเพื่อทำหน้าที่ลดค่ากำลังงานขององค์ประกอบสัญญาณเสียงพหุที่เกิดขึ้น

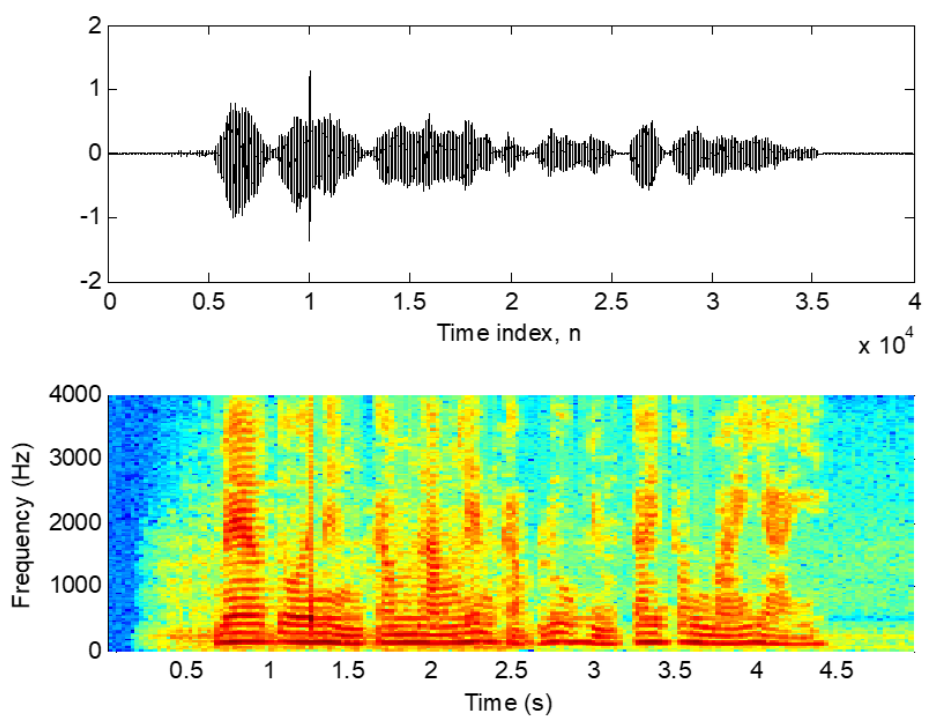
4. ผลการวิจัย

หัวข้อนี้จะแสดงผลการทำงานของระบบที่นำเสนอผ่านการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในส่วนของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาจะใช้ค่าเดียวกันกับที่ใช้ในหัวข้อที่ 3 โดยเราจะแบ่งการทดลองออกเป็นสองกรณีด้วยกัน ดังนี้

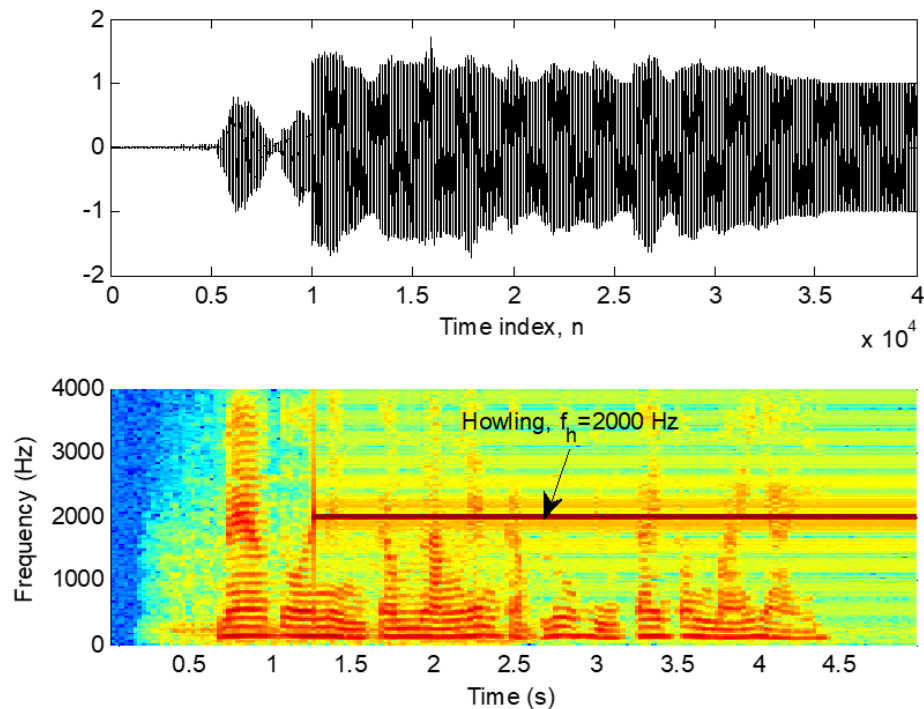
4.1 กรณีที่ 1 สัญญาณเสียงพหุเริ่มเกิดขึ้นเวลา 1.25 วินาที (ตรงกับค่าดัชนีเวลาที่ $n=1 \times 10^4$) เป็นต้นไป โดยกำหนดค่าความถี่เสียงพหุสองค่าคือ 500 Hz และ 2,000 Hz ภาพที่ 8 บนแสดงสัญญาณเสียงพหุที่ถูกบกรวนด้วยเสียงพหุความถี่ร้อยละ 100 ความถี่ 500 Hz ส่วนภาพล่างคือสเปกโตรแกรม ภาพที่ 9 แสดงผลการกำจัดสัญญาณเสียงพหุด้วยระบบที่นำเสนอ โดยภาพบนคือสัญญาณเสียงที่กู้คืนมาได้ส่วนภาพล่างคือสเปกโตรแกรม จะเห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถตรวจพบสัญญาณเสียงพหุที่เกิดขึ้นและสามารถกำจัดทิ้งไปได้ สำหรับภาพที่ 10 และ 11 จะสามารถอธิบายได้เช่นกันกับภาพที่ 8 และ 9 เพียงแต่ความถี่เสียงพหุเปลี่ยนเป็น 2,000 Hz



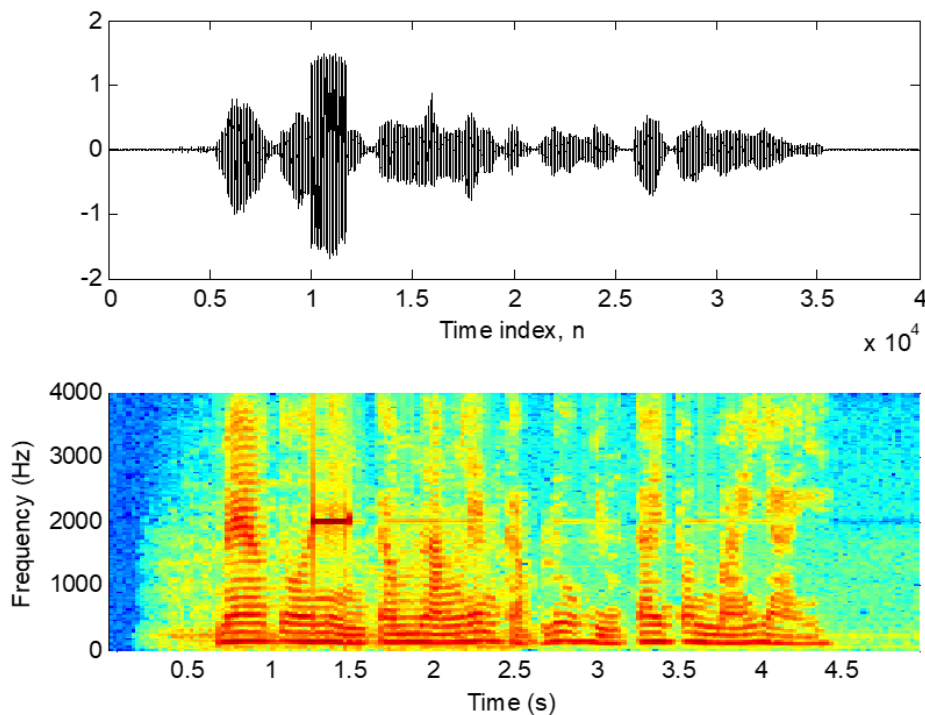
ภาพที่ 8 สัญญาณเสียงที่ถูกรบกวนด้วยเสียงหอนความถี่ 500 Hz ที่อัตราแตร้อยละ 100 (บน) และสเปคโตรแกรม (ล่าง)



ภาพที่ 9 สัญญาณเสียงที่กู้คืนได้ (บน) และสเปคโตรแกรม (ล่าง)

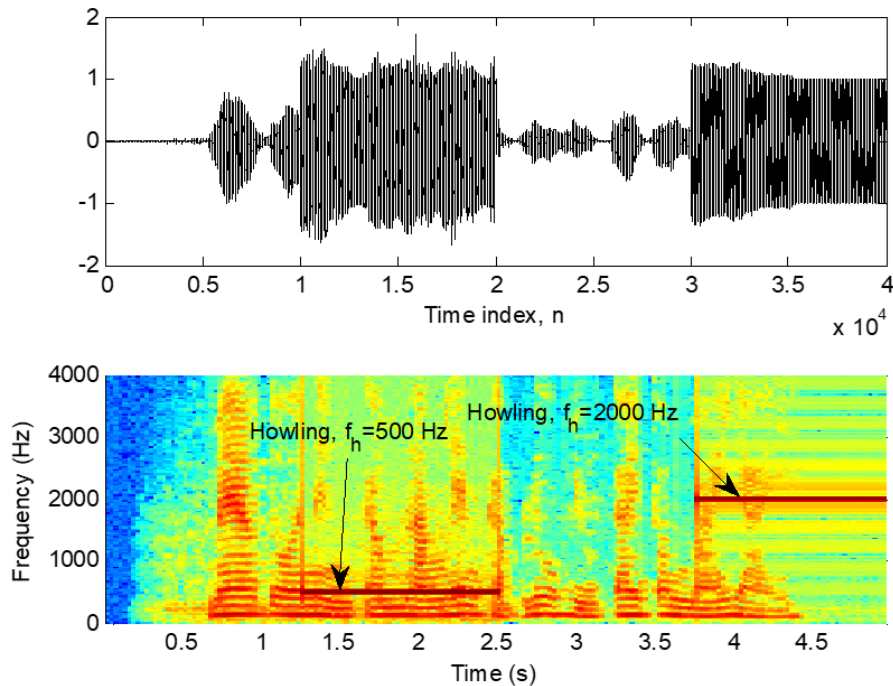


ภาพที่ 10 สัญญาณเสียงที่ถูกรบกวนด้วยเสียงหอนความถี่ 2,000 Hz ที่อัตราแตร้อยละ 100 (บน) และสเปกโตรแกรม (ล่าง)



ภาพที่ 11 สัญญาณเสียงที่กู้คืนได้ (บน) และสเปกโตรแกรม (ล่าง)

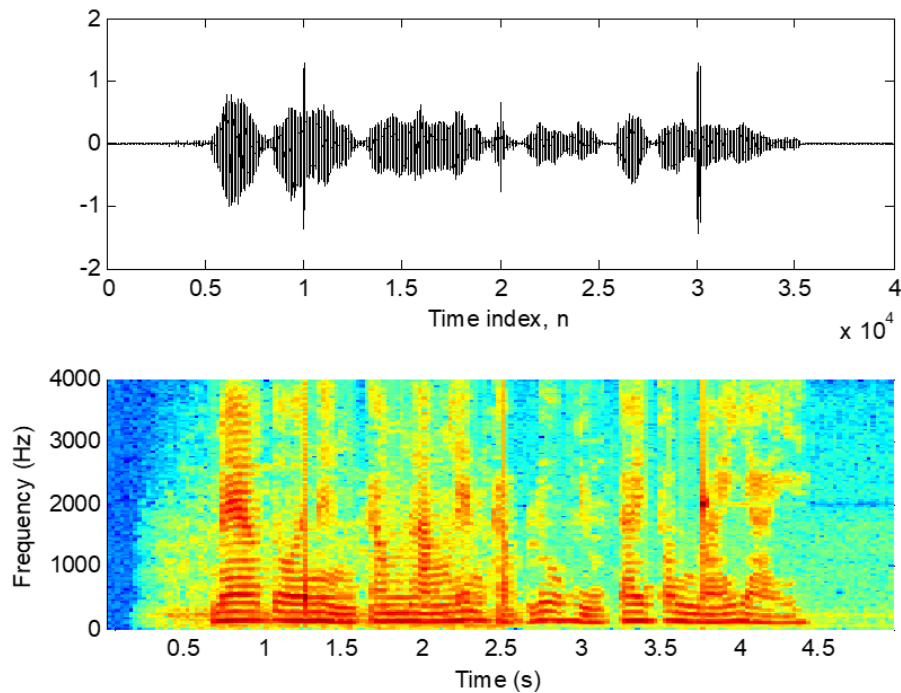
4.2 กรณีที่ 2 สัญญาณเสียงหอนเกิดเป็นบางช่วงเวลาที่วินาทีที่ 1.25 วินาที ถึงวินาทีที่ 2.5 ด้วยความถี่ $f_h = 500$ Hz และเกิดอีกครั้งที่วินาทีที่ 3.75 ถึงวินาทีที่ 5 ด้วยความถี่ $f_h = 2,000$ Hz โดยมีความแรงของสัญญาณเสียงหอนเป็นร้อยละร้อยเช่นเดิม ภาพที่ 12 บนคือสัญญาณเสียงที่ถูกรบกวนด้วยเสียงหอนเป็นช่วงส่วนภาพล่างคือสเปกโตรแกรม ผลการกำจัดเสียงหอนด้วยระบบที่นำเสนอแสดงภาพที่ 13 โดยภาพบนแสดงสัญญาณเสียงที่กู้คืนได้ส่วนภาพล่างแสดงสเปกโตรแกรม จะพบว่าระบบที่นำเสนอก็ยัง สามารถตรวจจับเสียงหอนและกำจัดทิ้งไปได้



ภาพที่ 12 สัญญาณเสียงที่ถูกรบกวนด้วยเสียงหอนเป็นช่วงด้วยความถี่ 500 Hz และ 2,000 Hz (บน) และสเปกโตรแกรม (ล่าง)

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้นำเสนอระบบกำจัดเสียงหอนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเสียงสาธารณะ โดยข้อเด่นของระบบที่นำเสนอที่ต่างจากระบบที่เคยนำเสนอในเอกสารอ้างอิง คือมีตัวตรวจจับสัญญาณเสียงหอน ระบบตรวจจับจะทำหน้าที่ตรวจหาความเป็นไปได้ที่จะมีเสียงหอนเข้ามาในระบบ หากตรวจไม่พบ ระบบจะส่งสัญญาณออกไปยังเครื่องขยายเสียงและลำโพงโดยตรง ไม่ต้องผ่านระบบกำจัดเสียงหอน แต่หากตรวจพบเสียงหอน สัญญาณเสียงที่ถูกรบกวนจะถูกส่งต่อไปยังระบบกำจัดเสียงหอนเพื่อลดผลกระทบจากเสียงหอนให้เหลือน้อยที่สุด จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4 พบว่าระบบที่นำเสนอยังมีข้อด้อยตรงที่ยังไม่สามารถตรวจจับองค์ประกอบเสียงหอนได้ทุกความถี่โดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ อย่างไรก็ตาม จากประสบการณ์จริงมักจะพบว่าเสียงหอนที่เกิดขึ้นจริงในระบบ PA และก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้ฟังทุกช่วงวัยนั้นมักจะเป็นเสียงหอนที่มีความถี่สูง จากความจริงนี้ทำให้ระบบตรวจจับและกำจัดเสียงหอนที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตาม การค้นหาวีธีการตรวจจับการป้อนกลับทางเสียงยังคงเป็นเรื่องที่ท้าทายนักวิจัยและเป็นงานที่จะทำต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 13 สัญญาณเสียงที่กู้คืนได้ (บน) และสเปกโตรแกรม (ล่าง)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการตีพิมพ์บทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Gan, H., Luo, G., Luo, Y., Luo, W. (2022). Howling Noise Cancellation in Time-Frequency Domain by Deep Neural Networks. In: Yang, X.S., Sherratt, S., Dey, N., Joshi, A. (eds) Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 236. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2380-6_28
- H. Nyquist. (1932). Regeneration theory. *Bell System Technical Journal*, 11(1), 126-147.
- Li, Yanping, Xiangdong Huang, Yi Zheng, Zhongke Gao, Lei Kou, and Junhe Wan. (2021). Howling Detection and Suppression Based on Segmented Notch Filtering. *Sensors Journal*, 21(23). <https://doi.org/10.3390/s21238062>
- N. I. Cho, S. U. Lee. (1993). On the adaptive lattice notch filter for the detection of sinusoids. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 40(7), 405-416. <https://ieeexplore.ieee.org/document/238368>
- P. Gil-Cacho, T. V. Waterschoot, M. Moonen, S. H. Jensen. (2009). Regularized adaptive notch filters for acoustic howling suppression. *17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)*. Glasgow, Scotland.
- Spiet, A., Doclo, S., Moonen, M., Wouters, J. (2008). Feedback Control in Hearing Aids. Springer Handbook of Speech Processing. *Springer Handbooks*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49127-9_48
- T. van Waterschoot, M. Moonen. (2008). 50 years of acoustic feedback control: state-of-the-art and future challenges. *AT-SISTA Technical Report (8-13)*. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.