

การควบคุมระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบแอคทีฟ: การศึกษาเชิงทดลอง¹

One Dimensional Active Noise Control: Experimental Studies

สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ² และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา³

ศูนย์วิจัยและพัฒนาาระบบอัจฉริยะ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กรุงเทพฯ 10800 โทร 02-9132500 โทรสาร 02-5870026

Sawangtit Srekituwan and Suwat Kuntanapreeda

R&D Center for Intelligent Systems , King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

Bangkok 10800, Thailand, Tel: 02-9132500, Fax: 02-5870026

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาเชิงทดลองของการควบคุมเพื่อลดระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบแอคทีฟ ชุดทดลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ชุดท่อลำโพงคู่หนึ่งพร้อมตัวขยายกำลังแบบสเตอริโอ ไมโครโฟนสองตัว และชุดประมวลผล DSP โครงสร้างของการควบคุมเป็นแบบการควบคุมป้อนไปข้างหน้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบ FIR ที่ปรับตัวเองได้ บทความนี้ได้ศึกษาการปรับตัวเองสองแบบ คือ แบบ LMS และ Leaky-LMS จากการศึกษาพบว่าตัวควบคุมสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้อย่างน่าพอใจ และกฎการปรับตัวเองแบบ Leaky-LMS สามารถป้องกันการเกิด overflow เนื่องจากผลของ finite precision ของคอมพิวเตอร์ได้ดี โดยส่งผลให้ระดับการลดของเสียงรบกวนน้อยกว่าแบบ LMS เพียงเล็กน้อย

Abstract

This paper presents the experimental studies of one-dimension active noise control. The apparatus that is constructed for this research contains four main parts: a duct set, a pair of loudspeakers with a stereo power amplifier, two microphones and a DSP processing unit.

The control structure used here is feedforward control using an adaptive FIR controller. This paper presents the uses of two different adaptive algorithms named LMS and Leaky-LMS. The experiment results show that the controllers satisfactorily reduce the level of the noise as desired. The Leaky-LMS is able to prevent the overflow problem due to the finite precision effect of the computer while insignificantly decreasing attenuation of noise compared to the LMS.

1. บทนำ

มลพิษทางเสียงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมที่ภายในโรงงานประกอบด้วยเครื่องจักรกลที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน เช่น เครื่องกำเนิดลม พัดลมระบายความร้อน และเครื่องปั๊มขึ้นรูปโลหะ เป็นต้น ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วง 5-10 ปีที่ผ่านมา เทคนิคการลดหรือควบคุมระดับเสียงรบกวนสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ การควบคุมแบบ Passive [1,2] และการควบคุมแบบ Active [3,4] ซึ่งการควบคุมแบบ Passive จะเป็นการนำวัสดุดูดซับเสียง (sound absorption material) หรืออุปกรณ์กั้นเสียง (sound barriers) มาใช้ วิธีนี้โดยทั่วไปจะใช้ได้กับการลด

¹ งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² นักศึกษามหาบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

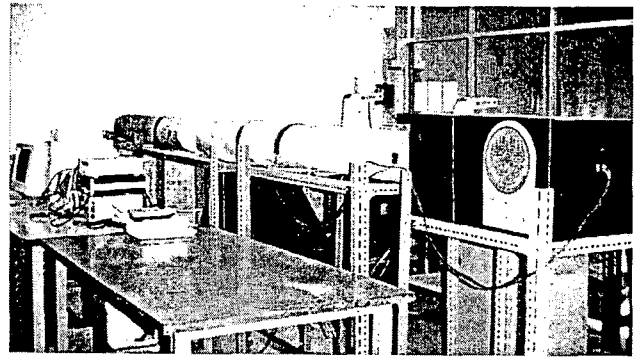
³ อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ระดับเสียงรบกวนที่มีความถี่สูง ส่วนวิธีแบบ Active จะเป็น การสังเคราะห์สัญญาณเสียงขึ้นมาหักลบกับคลื่นเสียงรบกวน ที่ไม่ต้องการ ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานสำหรับ ลดหรือกำจัดเสียงรบกวนที่มีความถี่ต่ำ

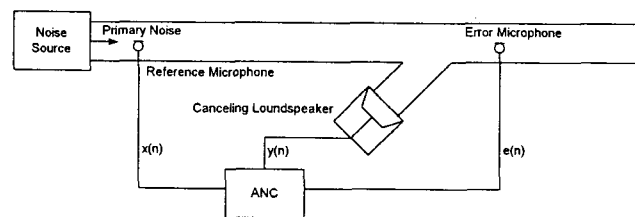
บทความนี้เสนอผลการศึกษาระบบทดลองด้านการควบคุม ระดับเสียงรบกวนแบบ Active การแพร่ของเสียงรบกวนถูก จำกัดเป็นแบบมิติเดียวภายในท่อ การคำนวณและประมวล ผลทางคณิตศาสตร์ใช้ตัวประมวลผล DSP รุ่น TMS320C32 ตัวควบคุมเป็นแบบ feedforward มีโครงสร้างเป็น FIR-filter และปรับตัวเองได้ (adaptive) ซึ่งทำให้สามารถควบคุมเสียง รบกวนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ในที่นี้ได้ประยุกต์ใช้กฎ การปรับตัวเอง 2 แบบ คือ LMS และ Leaky-LMS จากการ ศึกษาพบว่าตัวควบคุมสามารถลดระดับเสียงรบกวนภายใน ท่อได้อย่างน่าพอใจ และกฎการปรับตัวเองแบบ Leaky-LMS สามารถป้องกันการเกิด overflow เนื่องจาก finite precision effect ของดิจิทัลคอมพิวเตอร์ได้อย่างดี ในขณะที่ส่งผลให้ ระดับการลดลงของเสียงรบกวนน้อยลงกว่าแบบ LMS เพียง เล็กน้อย

2. ชุดควบคุมเสียงรบกวน

ชุดควบคุมเสียงรบกวนที่จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ชุดท่อป้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. จัด ประกอบขึ้นเป็นรูปสามทางมีความยาวทั้งชุดทดลองประมาณ 5 เมตร ลำโพงหนึ่งคู่พร้อมอุปกรณ์ขยายกำลัง ไมโครโฟน พร้อมอุปกรณ์ขยายสัญญาณสองชุด และคอมพิวเตอร์พร้อม DSP-board (DSP = Digital Signal Processor) ทำหน้าที่ใน การคำนวณและประมวลผล รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายและรายละเอียดของชุดทดลองที่สร้างขึ้นในการศึกษานี้ รูปที่ 2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของชุดทดลองที่ได้มาจากการ ทดสอบจริงในย่านความถี่ 20-1000 Hz ค่าสัญญาณ input และ output ของผลตอบสนองได้มาจากไมโครโฟนวัดเสียง รบกวน $x(n)$ และไมโครโฟนวัดเสียง $e(n)$ ตามลำดับ แกนตั้ง ของกราฟเป็นตัวแทนของอัตราขยาย สังเกตว่าค่าความถี่ที่มี ค่าอัตราขยายเป็น peak ขึ้นมาคือตำแหน่ง poles หรือ singularities ของระบบนั่นเอง โดยทางทฤษฎีแล้วอัตรา ขยายที่ตำแหน่ง poles มีค่าเป็นอนันต์ การควบคุมเสียงที่มีความถี่ตรง poles ของระบบจะไม่สามารถกระทำได้ ในงาน วิจัยนี้ช่วงความถี่ของการทำงานถูกกำหนดด้วย frequency response ของลำโพงซึ่งมีย่านความถี่ทำงาน 20 ~ 400 Hz

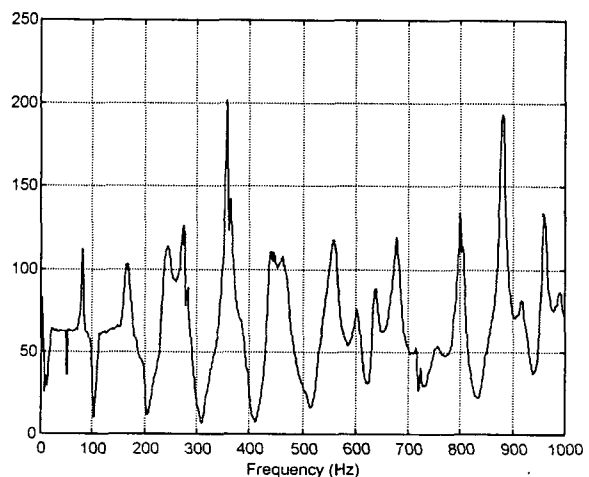


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ชุดทดลองที่สร้างขึ้น ก. ภาพถ่าย ข. แผนภาพ

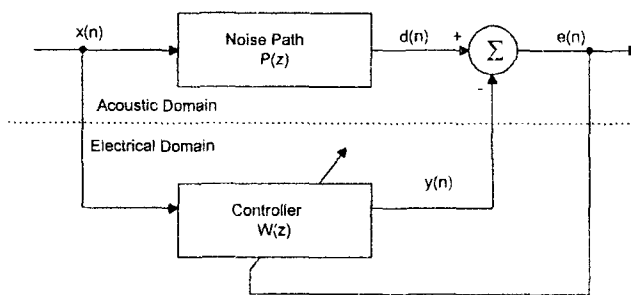


รูปที่ 2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของชุดท่อ

3. การควบคุมแบบ Active

การควบคุมแบบ Active มีหลักการทำงานพอสรุปโดย ย่อดังนี้ จากรูปที่ 1 ข แหล่งกำเนิดเสียงรบกวน (ในที่นี้เป็น ลำโพง) ข่ายมือจะทำหน้าที่สร้างคลื่นสัญญาณเสียงรบกวน ให้กับระบบ ในขณะที่ลำโพงตัวด้านล่างทำหน้าที่สร้าง สัญญาณเสียงควบคุม $y(n)$ เพื่อใช้หักลบกับคลื่นเสียงรบกวน ค่าของคลื่นเสียงควบคุมนี้จะถูกกำหนดตามกฎการ

ควบคุม ซึ่งคำนวณด้วยตัวประมวลผล DSP โดยใช้ข้อมูลจากสัญญาณเสียงรบกวนอ้างอิง $x(n)$ ก่อนการลดระดับเสียงที่วัดมาจากไมโครโฟนตัวซ้ายมือ และสัญญาณเสียงรบกวน $e(n)$ หลังจากการหักลบเสียง ณ ตำแหน่งที่ต้องการจะลดระดับเสียง ซึ่งวัดโดยไมโครโฟนตัวขวามือ หลักการทำงานนี้เรียกว่าการควบคุมแบบ feedforward แผนผังการทำงานนี้สรุปไว้ในรูปที่ 3 สัญญาณ $d(n)$ ในรูป คือสัญญาณเสียงรบกวน ณ ตำแหน่งที่ต้องการจะควบคุม ซึ่งคือ $x(n)$ ที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปในขณะเคลื่อนที่ผ่านเส้นทางเดินของเสียงซึ่งแทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $P(z)$



รูปที่ 3 แผนผังการควบคุม

โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบฟังก์ชัน FIR ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)x(n-i) \quad (1n)$$

โดยที่ n คือ ระยะเวลา, L คือ ลำดับ (order), $w_i(n)$ คือ พารามิเตอร์ตัวที่ i ของฟังก์ชัน และ $x(n)$ และ $y(n)$ คือ input และ output ของฟังก์ชัน ตามลำดับ หรือเขียนในรูปของสมการเวกเตอร์ได้เป็น

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (1ข)$$

โดยที่ $\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T$ และ $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T$ สังเกตว่า FIR เป็นสมการแบบเชิงเส้นที่ไม่มีโพล ดังนั้นจึงมีข้อดีในด้านของเสถียรภาพ แต่ข้อเสียหลักคือจะมีแนวโน้มของลำดับ (order) ที่ค่อนข้างจะสูงเพื่อให้ได้ผลการควบคุม

คุมที่ดี การหาฟังก์ชันถ่ายโอน $W(z)$ หรือค่าตัวแปร $w_i(n)$ ของตัวควบคุมกระทำแบบปรับตัวเอง (adaptive) โดยใช้ค่าสัญญาณเสียงรบกวน $e(n)$ มาปรับค่าตัวแปรอย่างต่อเนื่องเพื่อทำการลดขนาดของ $e(n)$ ให้มากที่สุด

4. กฎการปรับค่าแบบ LMS และ Leaky-LMS

การปรับค่าตัวแปรแบบ LMS (Least Mean Square) เป็นการใช้ steepest-descent method โดยปรับค่าตัวแปรในทิศทาง negative gradient ของ performance หรือ objective function ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป

จากรูปที่ 3 ค่าสัญญาณเสียงรบกวนก่อนการลดระดับเสียง ณ ตำแหน่งที่สนใจมีค่าเป็น $d(n)$ การควบคุมต้องการให้ค่า $e(n) = d(n) - y(n) = 0$ หรือมีขนาดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ดังนั้น objective function ที่ต้องการ minimize กำหนดเป็น $\xi = E[e^2(n)]$ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติค่า ξ นี้ไม่สามารถหาได้จริง จำเป็นต้องมีการประมาณ ซึ่งเนื่องจากในที่นี้เป็นการทำงานแบบปรับค่าอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นค่าประมาณของ ξ ที่เวลา n ที่เหมาะสม คือ $e^2(n)$ นั่นคือจะได้

$$\xi \approx \hat{\xi}(n) = e^2(n) \quad (2)$$

และใช้หลักการของ steepest descent

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \quad (3)$$

โดยที่ μ คือ ค่า step size หรือ training rate ของการปรับตัวเอง และ $\nabla \hat{\xi}(n)$ คือค่า gradient ของสมการ objective function ส่วนเลข 2 ที่หารในสมการเป็นเพียงใส่เพิ่มเข้ามาเพื่อให้ผลลัพธ์สุดท้ายอยู่ในรูปแบบที่ต้องการเท่านั้น

ดำเนินการหาค่า gradient จะได้

$$\nabla \hat{\xi}(n) = -2x(n)e(n)$$

แทนลงในสมการ (3) ข้างต้นจะได้กฎการปรับค่าแบบ LMS

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu x(n)e(n)$$

ในการใช้งานจริง ปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอเนื่องจากความเป็น finite precision machine ของคอมพิวเตอร์ คือ การเกิด overflow ในระหว่างการปรับตัวเมื่อระบบเข้าใกล้สภาวะคงที่ เทคนิคหนึ่งที่ใช้เพื่อป้องกันการเกิดปัญหานี้ได้อย่างได้ผลคือ เทคนิค Leaky โดยการเพิ่มตัวแปร v เข้าในกฎการปรับค่า ได้เป็นกฎการปรับค่าแบบ Leaky-LMS ดังนี้

$$w(n+1) = vw(n) + \mu x(n)e(n)$$

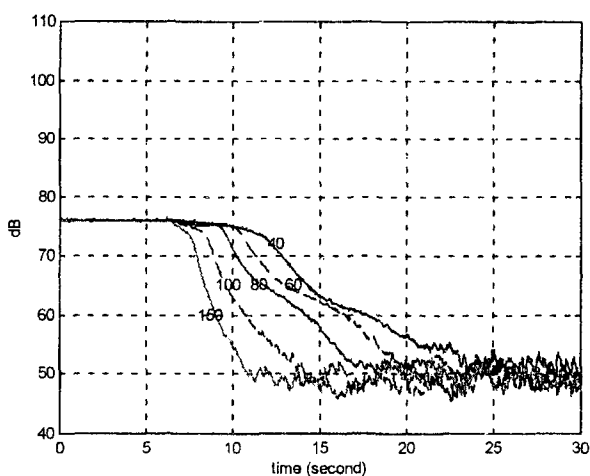
รายละเอียดของกฎการปรับค่าทั้งสองแบบดูได้จาก [3-4]

5. การควบคุม

ในงานวิจัยนี้เงื่อนไขของการวัดสัญญาณเพื่อการประมวลผลและควบคุมมีค่าความถูกต้องของการแปลง AD/DA และอัตราการสุ่ม (Sampling rate) เท่ากับ 16 bits และ 5512 Hz ตามลำดับ

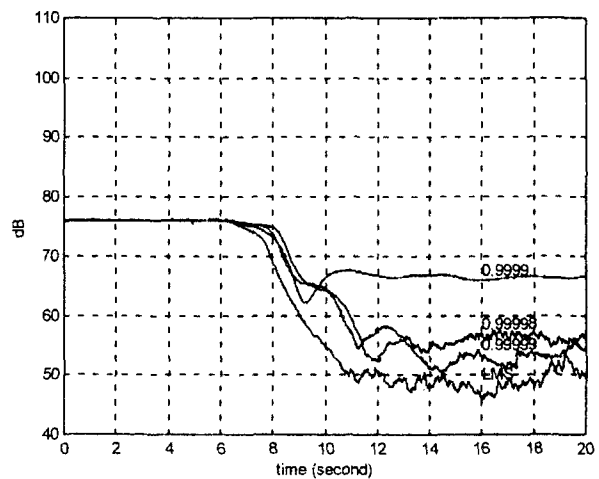
จากการศึกษาทั้งหมดพบว่าตัวควบคุมทั้งแบบปรับด้วย LMS และ Leaky-LMS สามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ทุกความถี่ ยกเว้นความถี่ที่ตรงกับค่า poles ของระบบ ย่านความถี่ที่ทำงานได้ดีอยู่ในย่านช่วงไม่เกิน 500 Hz ซึ่งถูกจำกัดหรือกำหนดไว้ด้วยคุณสมบัติของตัวลำโพงเอง

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของระดับเสียงรบกวนที่ค่าลำดับ L ต่างๆ ความถี่เสียงรบกวนคือ 300 Hz โดยกำหนดค่าของ step size = 0.01 จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มค่าลำดับสูงขึ้น การควบคุมจะสามารถลดระดับสูงได้มากขึ้น ระดับเสียงสูงสุดที่สามารถลดได้ประมาณ 28 dB



รูปที่ 4 การลดลงของระดับเสียงที่ค่า L ต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของระดับเสียงเมื่อใช้กฎการปรับตัวแบบ LMS และ Leaky-LMS เงื่อนไขการทำงานเช่นเดิม คือ ความถี่ = 300 Hz และ Step size = 0.01 โดยใช้ค่า $v = 0.99990, 0.99998$ และ 0.99999 ซึ่งพบว่า Leaky-LMS สามารถป้องกันการเกิด overflow หลังจากทำงานไปแล้วนานๆ ได้ผลดี และส่งผลให้ระดับเสียงที่ลดลงแตกต่างจาก LMS เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5 เปรียบเทียบระหว่าง LMS และ Leaky-LMS

6. สรุปและงานวิจัยในอนาคต

บทความนี้เสนอผลการศึกษาการควบคุมเพื่อลดระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบแอดดติฟ ตัวควบคุมเป็นแบบ adaptive FIR ทำการควบคุมป้อนไปข้างหน้า บทความนี้ได้ศึกษากฎการปรับตัวเองสองแบบ คือ แบบ LMS และ Leaky-LMS จากการศึกษพบว่าตัวควบคุมสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้อย่างน่าพอใจได้ทุกความถี่ในย่านความถี่ไม่เกิน 500 Hz ยกเว้นความถี่ที่ตรงกับ poles หรือ singularities ของระบบ และจากการเปรียบเทียบการทำงานของกฎการปรับตัวทั้งสองแบบ พบว่ากฎการปรับตัวเองแบบ Leaky-LMS สามารถป้องกันการเกิด overflow เนื่องจากผลของ finite precision ของคอมพิวเตอร์ได้ดี โดยส่งผลให้ระดับเสียงที่ลดลงน้อยกว่าแบบ LMS ไม่มาก

งานวิจัยในอนาคตต่อไปจะเป็นการเน้นในการวิจัยการควบคุมแบบต่างๆ เช่น

- การควบคุมโดยใช้กฎการปรับตัวเองแบบอื่น เช่น FXLMS และ RLS เป็นต้น
- การควบคุมด้วย Neural Networks

- การควบคุมเสียงรบกวนมากกว่ามิติเดียว เช่น การควบคุมเสียงรบกวนในห้อง เป็นต้น
- ฯลฯ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณท่านคณบดีและกรรมการคณะทุกท่านของคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความสนับสนุนนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] B.J. Smith, R.J. Peters and S. Owen, Acoustics and Noise Control, 2nd-edition, Addison-Wesley Longman, 1982
- [2] L.L. Beranek and I.L. Ver, Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications, John Wiley and Sons, 1992
- [3] S.M. Kuo and D.R. Morgan, Active Noise Control Systems algorithms and DSP Implementations, John Wiley and Sons, 1996
- [4] S.M. Kuo and I. Panahi, K.M. Chung, T. Horner, M. Nadeski and J. Chyan, Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family, Texas Instruments Inc., 1996
- [5] P. Lueg, "Process of Silencing Sound Oscillations", US. Patent 2043416, June 1936
- [6] G.E. Wamaka, "Active Attenuation of Noise The State of the Art", Noise Control Eng., 18, May/June 1982
- [7] L.J. Ericksson and M.C. Allie, "A Practical System for Active Noise Attenuation in Ducts", Sound Vib., 22(2), 1988.
- [8] TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments Inc., 1997