การควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนกลับด้วยกฎ FXLMS[1]

Feedback Noise Control using FXLMS rule

พงษ์ศักดิ์ นิ่มดำ[2] และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา[3]
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพฯ 10800 โทร 02-9132500 โทรสาร 02-5870026

Pongsak Nimdum and Suwat Kuntanapreeda
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Bangkok 10800, Thailand, Tel: 02-9132500, Fax: 02-5870026

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาการควบคุมแอคตีฟเพื่อลดเสียงรบกวนมิติเดียวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งข้อได้เปรียบหลักของการควบคุมแบบป้อนกลับ คือ ใช้ไมโครโฟนในการหยั่งสัญญาณเสียงรบกวนเพียงตัวเดียว โดยในการศึกษานี้ตัวควบคุมที่ใช้มีโครงสร้างเป็น FIR-filter และใช้กฎ FXLMS ในการปรับตัวแปรของตัวควบคุมอย่างต่อเนื่อง การคำนวณทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดกระทำด้วยตัวประมวล DSP (Digital Signal Procrssor) ในเวลาจริง ยกเว้นการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ secondary path จากผลการศึกษาเชิงทดลองพบว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ดีอย่างน่าพอใจเท่ากับการใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ศึกษาใน [1,2] และพบว่าความถูกต้องในการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของ secondary path มีผลต่อเสถียรภาพของการควบคุมค่อนข้างมาก

Abstract

This paper presents the study results of active control for attenuating one-dimensional noises using a feedback control technique. An advantage of this technique is that it utilizes only one microphone for sensing the noise signal. In this study the structure of the controller was FIR-filter and the FXLMS rule was used for continuously adapting the controller. All mathematical calculations were carried out through a Digital Signal Processor (DSP) in real time, except determining the transfer function of the secondary path. The experimental studies show that the feedback controller was able to attenuate the noise level as satisfactorily good as when feedforward controllers were implemented as done in [1,2]. In addition, we found that the estimation accuracy of the secondary path function significantly affects the stability of the control.

1.บทนำ

การควบคุมเสียงรบกวนแบบแอฟตีฟ (active noise control) สามารถแบ่งตามโครงสร้างการควบคุมออกได้ 2 แบบ คือ การควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนไปข้างหน้า (feedforward control) และการควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนกลับ (feed-back control) [3] โดยการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะใช้ไมโครโฟน 2 ตัว ทำหน้าที่วัดหรือหยั่งสัญญาณเสียงเพื่อเป็นสัญญาณอินพุทให้กับตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยไมโครโฟนตัวด้านซ้ายมือใช้หยั่งสัญญาณเสียง $d(n)$ จากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ในขณะที่ไมโครโฟนอีกตัวหยั่ง

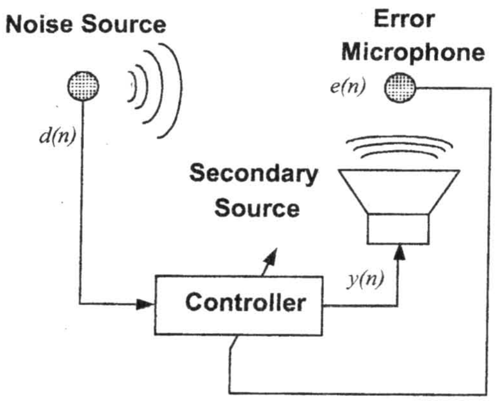
---

[1] งานวิจัยนี้สนับสนุนโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] นักศึกษาบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

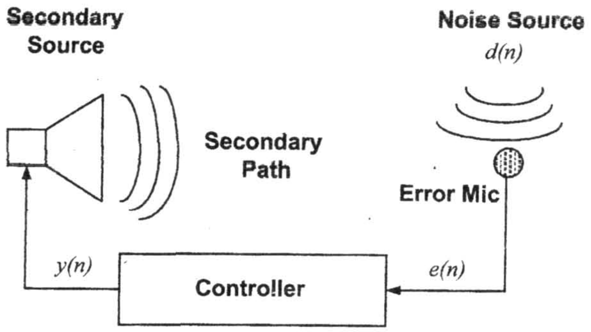
[3] อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สัญญาณเสียง $e(n)$ ณ ตำแหน่งที่ต้องการจะลดระดับเสียง โดยตัวควบคุมทำการสร้างสัญญาณเสียงควบคุม $y(n)$ ไปหักลบกับเสียงรบกวนที่ตำแหน่งที่ต้องการลดระดับเสียง



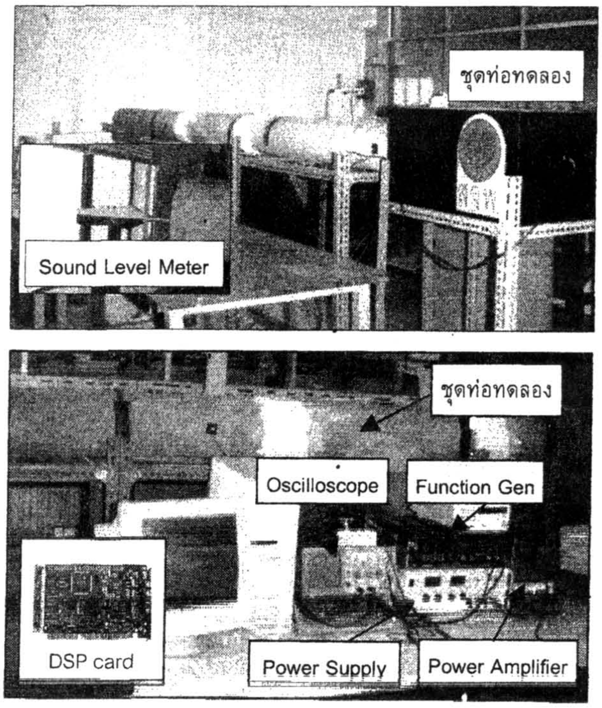
รูปที่ 1 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

ถึงแม้ว่าการควบคุมเสียงแบบป้อนไปข้างหน้านี้จะเป็นที่ยอมรับกันว่าใช้งานได้ดี [1,2] แต่ในบางงานที่มีข้อจำกัดของการวัดสัญญาณเสียง $d(n)$ จากแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าได้ การควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนกลับเป็นการควบคุมที่ไม่ต้องการสัญญาณเสียง $d(n)$ ในการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นข้อได้เปรียบของการควบคุมประเภทนี้ แต่ต้องแลกกับความซับซ้อนของกฎการควบคุมที่เพิ่มขึ้น โดยในส่วนรายละเอียดของการควบคุมแบบป้อนกลับนี้จะกล่าวในตอนต่อไป



รูปที่ 2 การควบคุมแบบป้อนกลับ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาเชิงทดลองของการควบคุมระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบป้อนกลับ โดยทำการทดลองกับชุดท่อที่ใช้ศึกษาใน [1,2] ดังแสดงในรูปที่ 3 ตัวควบคุมที่ใช้มีโครงสร้างเป็นแบบ FIR (Finite impulse response) และใช้กฎการปรับค่าตัวควบคุมแบบ FXLMS (Filtered-X Least-mean-square) โดยการคำนวณและประมวลผลทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดกระทำด้วยการ์ดประมวลผล DSP (Digital Signal Processor) [4] ติดตั้งอยู่กับคอมพิวเตอร์ PC โดยตัวประมวลผล DSP ที่ใช้คือ TMS320C32 [5] และการคำนวณทั้งหมดดำเนินการแบบเวลาจริง (real time)

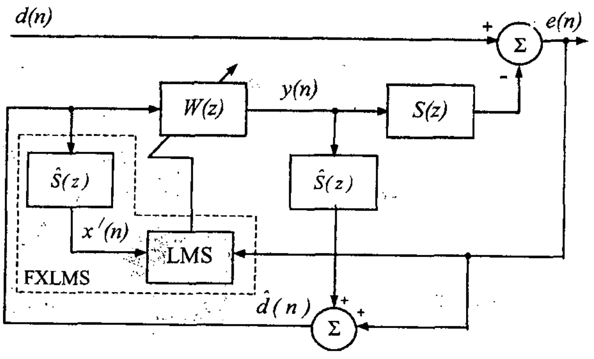


รูปที่ 3 ภาพถ่ายชุดท่อที่ใช้ทดลอง

2. การควบคุมเสียงประเภทป้อนกลับ

วิธีการควบคุมเสียงแบบป้อนกลับมีหลักการทำงานพอสรุปได้ดังนี้ จากรูปที่ 2 ลำโพงด้านซ้ายมือทำหน้าที่เป็น secondary source ในการกำเนิดสัญญาณเสียงควบคุม $y(n)$ แพร่ผ่านตัวกลางเสียง (secondary path) แทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $S(z)$ เพื่อไปหักลบกับเสียงรบกวน $d(n)$ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง error microphone โดยสัญญาณเสียงคงเหลือหลังจากการหักลบนี้แทนด้วยตัวแปร $e(n)$ ซึ่งจุดประสงค์ของการควบคุมก็คือเพื่อลดขนาดของ $e(n)$ นี้ให้เหลือน้อยที่สุด หลักการควบคุมโดยทั่วไปมีลักษณะการทำงานเหมือนกับวิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า แต่ไม่มีการใช้ไมโครโฟนวัดสัญญาณรบกวน $d(n)$ แต่จะใช้การคำนวณประมาณการแทน ซึ่งในที่นี้แทนด้วยตัวแปร $\hat{d}(n)$ ส่วนในการทำงานตัวควบคุม $W(z)$ ซึ่งมีโครงสร้างเป็น FIR-filter จะใช้สัญญาณเสียงคงเหลือ $e(n)$ และค่าประมาณ $\hat{d}(n)$ ในการปรับตัวเองด้วยกฎการปรับ FXLMS

เช่นเดียวกับการควบคุมเสียงแบบป้อนไปข้างหน้าที่ศึกษาใน [2] ยกเว้นการใช้ $\hat{d}(n)$ แทน $d(n)$ ในขณะเดียวกัน ตัวควบคุมทำหน้าที่คำนวณหาค่าสัญญาณเสียงควบคุม $y(n)$ ไปให้กับลำโพงเพื่อใช้ในการหักลบเสียงรบกวนต่อไป ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งการคำนวณทั้งหมดกระทำโดยตัวประมวลผล DSP (Digital Signal Processor) ที่มีความเร็วในการคำนวณสูง ทำให้สามารถทำงานแบบเวลาจริง (real time) ได้ โดยแผนผังการทำงานทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 4 โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอน $\hat{S}(z)$ ที่ปรากฏในแผนผัง คือ ฟังก์ชันประมาณการของ $S(z)$ ซึ่งในการศึกษานี้หาแบบ off-line [3] โดยใช้อินพุทเป็น sweep sinusoid เป็นสัญญาณกระตุ้น (excitation) ในการหา



รูปที่ 4 แผนผังการทำงาน

3. กฎการปรับ FXLMS

การควบคุมการลดระดับเสียงแบบป้อนกลับ โดยใช้กฎการปรับ FXLMS ดังแสดงในรูปที่ 4 ได้มีการใช้ $\hat{S}(z)$ เพื่อทำการชดเชยผลที่เกิดจาก Secondary Path และสามารถหาค่าประมาณ $\hat{d}(n)$ ได้ดังนี้

$$\hat{d}(n) = e(n) + \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m y(n-m) \quad (1)$$

โดยที่ $\hat{s}_m = [\hat{s}_0 \quad \hat{s}_1 \quad \ldots \quad \hat{s}_{M-1}]^T$ คือ ค่าตัวแปรของ $\hat{S}(z)$ และ $y(n) = [y(n)\ y(n-1)\ y(n-2)\ \ldots\ y(n-M-1)]^T$ สำหรับโครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบฟังก์ชัน FIR ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)\hat{d}(n-i) \quad (2)$$

โดยที่ n คือ ดรรชนีเวลา, L คือ ค่าลำดับ (order) และ $w_i(n)$ เป็นค่าพารามิเตอร์ตัวที่ i ของฟังก์ชัน $W(z)$

ดังที่แสดงไว้ใน [2,3] กฎการปรับตัวแบบ FXLMS ดัดแปลงมาจากกฎการปรับตัว LMS (Least Mean Square) โดยมีการชดเชยผลของ Secondary Path และคณิตศาสตร์ของการปรับตัวหามาจากการ minimize

$$\xi = E\left[e^2(n)\right].$$

ด้วยวิธี Steepest-descent Method โดยที่

$$e(n) = d(n) - \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m y(n-m) = 0 \quad (3)$$

ซึ่งจะได้กฎการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมดังนี้

$$w(n+1) = w(n) - \mu x'(n)e(n) \quad (4)$$

โดยที่ μ คือค่า step-size ของการปรับค่า และ

$$x'(n) \equiv \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m \hat{d}(n-m) \quad (5)$$

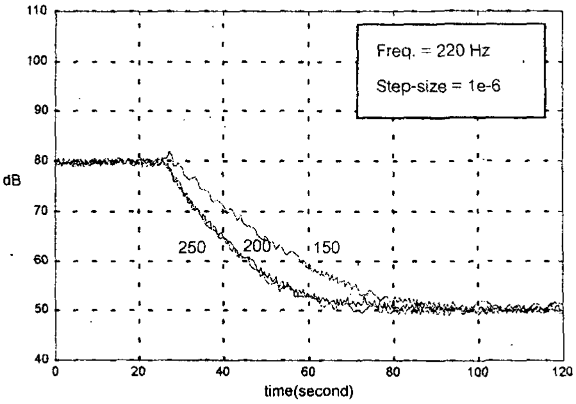
โดยที่ $\hat{s}_m$ คือค่าพารามิเตอร์ของ Secondary Path ที่เกิดจากการหาแบบ Off-line ล่วงหน้าและค่า $\hat{d}(n)$ เป็นค่าที่เกิดจากการประมาณตามสมการที่ (1)

4. ผลลัพธ์การควบคุม

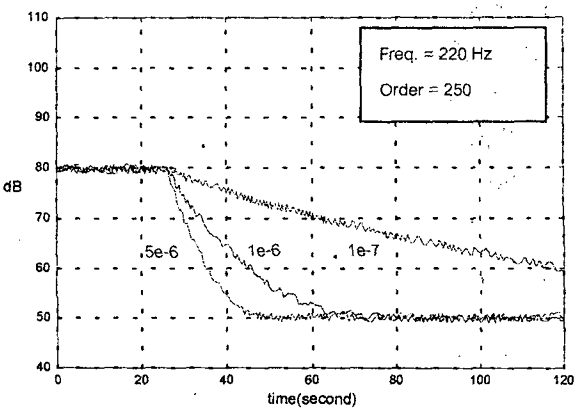
ในการศึกษานี้เงื่อนไขของการวัดสัญญาณเพื่อการประมวลผลและควบคุมมีค่าความถูกต้องของการแปลง AD/DA และอัตราการสุ่ม (Sampling Rate) เท่ากับ 16 bit และ 5512 Hz ตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับนี้สามารถลดระดับเสียงในช่วงความถี่ต่ำได้ดีเท่าเทียมกับการใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ศึกษาใน [2] นอกจากนี้แล้วยังพบว่าความถูกต้องของการประมาณฟังก์ชันของ Secondary Path มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของการควบคุมอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีเมื่อมีความผิดพลาดของการประมาณการก่อให้เกิด phase error จะส่งผลให้ระบบเสียเสถียรภาพอย่างรวดเร็ว

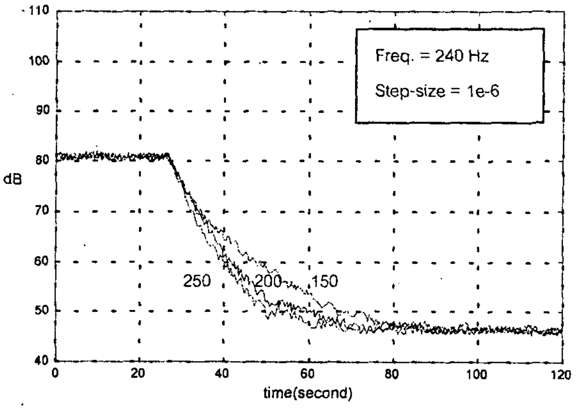
ผลลัพธ์การเปรียบเทียบสมรรถภาพของการควบคุมในกรณีที่ตัวควบคุมมีค่าอันดับที่ต่างกันแสดงในรูปที่ 5 และ 6 โดยพิจารณาการลดลงของระดับเสียงรบกวนความถี่ 220 และ 240 Hz และตัวควบคุมมีอันดับเท่ากับ 150 200 และ 250 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มค่าอันดับสูงขึ้น ตัวควบคุมสามารถลดระดับเสียงได้มากและเร็วขึ้น โดยระดับเสียงที่สามารถลดได้อยู่ในช่วงประมาณ 25-35 dB



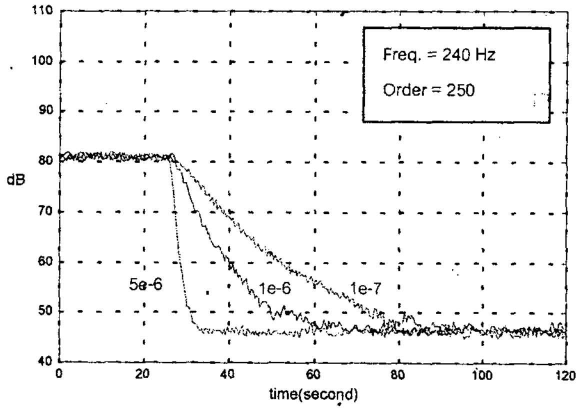
รูปที่ 5 การลดลงของระดับเสียงรบกวนความถี่ 220 Hz โดยใช้ตัวควบคุมอันดับต่างๆ



รูปที่ 7 การลดลงของระดับเสียงรบกวนความถี่ 220 Hz โดยใช้ค่า step-size ต่างๆ



รูปที่ 6 การลดลงของระดับเสียงรบกวนความถี่ 240 Hz โดยใช้ตัวควบคุมอันดับต่างๆ



รูปที่ 8 การลดลงของระดับเสียงรบกวนความถี่ 240 Hz โดยใช้ค่า step-size ต่างๆ

รูปที่ 7 และ 8 เปรียบเทียบอัตราการลดลงของระดับเสียงรบกวนความถี่ 220 และ 240 Hz ด้วยค่า step-size μ ของการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งพบว่าในการเพิ่มค่า μ จะทำให้ระดับเสียงสามารถลดได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากใช้ค่า μ มากเกินไป ก็จะทำให้ระบบเกิดความไม่มีเสถียรภาพได้ การเลือกค่าอันดับและค่า μ ที่เหมาะสมขึ้นจะอยู่กับลักษณะของแต่ละปัญหาเป็นหลัก

6. สรุป

บทความนี้เสนอผลการศึกษาการควบคุมเพื่อลดระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบแอคตีฟที่ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งข้อได้เปรียบหลักของการควบคุมเสียงแบบป้อนกลับนี้เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างนี้ที่ศึกษาใน [1,2] คือต้องการใช้ไมโครโฟนวัดสัญญาณเสียงรบกวนเพียงตัวเดียว โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบ FIR ที่ปรับตัวเองได้ โดยในการศึกษานี้ได้ใช้กฎการปรับตัวเองแบบ FXLMS จากการศึกษาพบว่าตัวควบคุมสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้มากถึงประมาณ 35 dB อย่างน่าพอใจ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า ความถูกต้องในการประมาณ Secondary path มีผลต่อเสถียรภาพของระบบควบคุมมากพอสมควร ดังนั้นในการประมาณจึงจำเป็นที่ต้องเลือกใช้ค่าอันดับของฟังก์ชันประมาณการที่สูงพอสมควร หรืออาจเลือกประมาณเฉพาะช่วงที่สนใจเท่านั้น การเลือกค่าอันดับที่สูงมากเกินไปอาจทำให้ค่าอันดับของตัวควบคุมลดลงอันเนื่องมาจากขีดจำกัดในหน่วยความจำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณของตัวประมวลผล

เอกสารอ้างอิง

[1] สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา, "การควบคุมระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบแอดตีฟ: การศึกษาเชิงทดลอง", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 2-3 พฤศจิกายน 2543 โรงแรม โนโวเทล เชียงใหม่

[2] สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา, "การศึกษาเชิงทดลองการลดระดับเสียงรบกวนด้วยวิธี FXLMS", วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม 2544

[3] S.M. Kuo *and* D.R. Morgan, <u>Active Noise Control Systems algorithms and DSP Implementations,</u> John Wiley and Sons, 1996

[4] Peachtree User's Guide, Atlanta Signal Processors Inc., 1995

[5] TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments Inc., 1997