

LOẠI BỎ PHẢN HỒI ÂM THANH TRONG MÁY TRỢ THÍNH SỬ DỤNG THUẬT TOÁN APA CÓ DẤU

Trần Thị Thục Linh
Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

Tóm tắt—Máy trợ thính dạng mở thường gặp phản hồi âm thanh, làm hạn chế mức khuếch đại có thể đạt được và làm giảm chất lượng âm thanh. Phương pháp loại bỏ phản hồi thích ứng dựa trên phương pháp dự đoán lỗi (PEM-AFC) là một phương pháp được biết đến rộng rãi để giảm thiểu các tác động bất lợi của phản hồi âm thanh. Thuật toán APA có dấu (APSA) đã được áp dụng thành công cho các ứng dụng loại bỏ tiếng vọng mạng. Tuy nhiên, việc sử dụng thuật toán thích ứng nhanh này để loại bỏ phản hồi âm thanh vẫn bị hạn chế do mối tương quan vốn có giữa tín hiệu mong muốn đến micrô và tín hiệu loa. Để giải quyết thách thức này, tôi đề xuất tích hợp thuật toán thích ứng này lên PEM-AFC với cắt mềm (soft-clipping), tạo ra một phương pháp loại bỏ phản hồi âm thanh mới cho máy trợ thính, gọi là PEMSC-APSA. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng chống lại nhiễu xung, đạt được tốc độ hội tụ và theo dấu cao hơn trong khi vẫn duy trì các lỗi trạng thái ổn định tốt hơn so với các phương pháp cạnh tranh tiên tiến.

Từ khóa—Loại bỏ phản hồi âm thanh, bộ lọc thích ứng, PEMSC-AFC, PEMSC-APSA.

I. GIỚI THIỆU

Một vấn đề phổ biến ở máy trợ thính dạng mở (open-fitting hearing aid) là phản hồi âm thanh, xảy ra khi micrô thu được một phần tín hiệu loa. Phản hồi này được xử lý thông qua hệ thống vòng kín của máy trợ thính, dẫn đến chất lượng tín hiệu giảm và hạn chế khả năng khuếch đại có thể đạt được. Trong một số điều kiện nhất định, nó có thể khiến máy trợ thính trở nên không ổn định và

gây ra tiếng hú (howling). Trong sáu thập kỷ qua, nhiều phương pháp loại bỏ phản hồi âm thanh đã được đề xuất [1]. Trong số đó, phương pháp loại bỏ phản hồi thích ứng (Adaptive Feedback Cancellation - AFC) đã được sử dụng rộng rãi để giảm thiểu các tác động tiêu cực của phản hồi âm thanh. Phương pháp này bao gồm ước tính đường phản hồi âm thanh bằng bộ lọc có đáp ứng xung chiều dài hữu hạn (FIR). Đường phản hồi ước tính sau đó được sử dụng để tính toán tín hiệu phản hồi và tín hiệu này bị triệt tiêu khỏi tín hiệu micrô. Tuy nhiên, việc ước tính đường phản hồi có thể có sai số (bias), do tương quan cao giữa tín hiệu loa và tín hiệu mong muốn đến micrô [2].

Để giảm sai số này, nhiều kỹ thuật khử tương quan đã được đưa ra trong các nghiên cứu trước đây, chẳng hạn như thêm độ trễ vào đường xử lý tín hiệu (the forward path) [3], chèn nhiễu dò (probe noise) vào tín hiệu loa [4], [5], dịch chuyển một lượng nhỏ tần số [6], điều chế pha [7] và sử dụng tiền bộ lọc [8]. Trong số này, phương pháp loại bỏ phản hồi thích ứng dựa trên dự đoán lỗi (PEM-AFC) đặc biệt nổi tiếng vì hiệu quả của nó trong cả miền thời gian [9]–[11] và miền tần số [2], [12]–[14]. Phương pháp này sử dụng tiền bộ lọc để tiền làm trắng các tín hiệu đầu vào của bộ lọc thích ứng, giúp giảm tương quan và do đó giảm sai số. PEM-AFC thường được tích hợp với các thuật toán bước biến thiên (VSS) [6], [15], [16], các kỹ thuật băng con [17]–[19], các hệ thống nhiều micrô [20], các thuật toán chuyển mạch với bộ dự đoán ổn định dựa trên cắt mềm [21], [22], phân tích bộ lọc bằng cách sử dụng một tích Kronecker [23], và các biến thể được tạo ra bằng cách kết hợp các kỹ thuật này.

Mặc dù các phương pháp AFC trước đây đã có một số tiến bộ về hiệu năng, nhưng chúng vẫn có

Tác giả liên hệ: Trần Thị Thục Linh

Email: linhtt@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 01/3/2025, chỉnh sửa: 12/4/2025, chấp nhận đăng: 16/5/2025.

thể được cải thiện và tối ưu hóa hơn nữa.

Gần đây, các phương pháp AFC dựa trên các thuật toán APA có đầu (Affine Projection Sign Algorithm - APSA) [24]–[27] được chú ý do chúng có khả năng chống lại nhiễu xung không phải Gaussian và hội tụ nhanh. Lưu ý rằng thuật toán APA thông thường (Affine Projection Algorithm) [28] cập nhật hệ số của bộ lọc thích ứng dựa trên nhiều vector đầu vào gần nhất thay vì một vector dữ liệu hiện tại duy nhất như được sử dụng trong các thuật toán LMS và NLMS. Khi bậc chiếu (projection order) của APA tăng lên, tốc độ hội tụ tăng lên và độ phức tạp tính toán cũng tăng theo. Để giảm độ phức tạp tính toán, một số thuật toán cải tiến được sử dụng như Fast APA (FAPA) [29], [30]. Tuy nhiên các thuật toán APA và FAPA đều bị suy giảm hiệu năng khi tín hiệu đầu vào có nhiễu xung. Do đó thuật toán APSA là một lựa chọn thay thế nổi bật nhờ độ phức tạp thấp và độ mạnh mẽ chống lại nhiễu xung.

Để nâng cao hiệu năng hơn nữa, tôi đề xuất tích hợp thuật toán APA có đầu (APSA) lên PEM-AFC với cấu trúc mềm, tạo ra một phương pháp tiếp cận mới có tên là PEMSC-APSA. Lưu ý rằng APSA [31]–[33] đã được triển khai thành công trong việc loại bỏ tiếng vọng mạng (NEC - Network Echo Cancellation). Tuy nhiên, việc sử dụng chúng để loại bỏ phần hồi âm thanh thích ứng vẫn còn nhiều thách thức do có mối tương quan cao giữa tín hiệu mong muốn đến micrô và tín hiệu loa. Để vượt qua thách thức này, trước tiên tôi đề xuất sử dụng tiền bộ lọc để tiền làm trắng các đầu vào bộ lọc thích ứng, cho phép giảm đáng kể mối tương quan trên. Sau đó thuật toán APSA có thể được sử dụng để cập nhật hệ số bộ lọc thích ứng theo cách đệ quy. Đóng góp của bài báo này bao gồm:

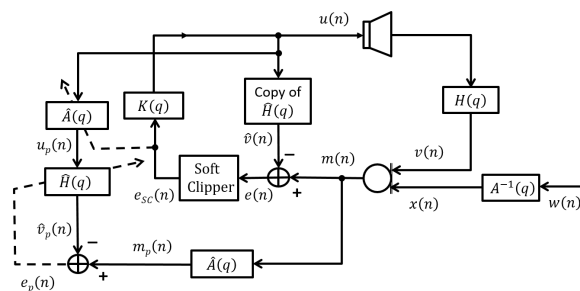
- Đề xuất phương pháp loại bỏ phần hồi âm thích ứng nhanh có khả năng chống nhiễu xung mạnh cho các ứng dụng trợ thính (PEMSC-APSA). Phương pháp này tận dụng ước tính có sai số nhỏ cho đường dẫn phản hồi bằng cách sử dụng tiền bộ lọc và tốc độ hội tụ theo đầu nhanh bằng cách sử dụng các thuật toán APA có đầu. Ngoài ra bộ cắt mềm (soft clipper) được sử dụng trên tín hiệu lỗi để nâng cao hơn nữa hiệu năng loại bỏ phần hồi âm thanh.
- Cung cấp phân tích chi tiết phương pháp đề xuất (PEMSC-APSA) cho các ứng dụng AFC. Theo hiểu biết của tôi, công trình này

chưa được đề cập trong bất kỳ tài liệu nào trước đây.

- Độ phức tạp tính toán của phương pháp đề xuất được phân tích khi so sánh với các thuật toán cạnh tranh.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Phần II và phần III lần lượt phân tích các mô hình PEM-AFC thông thường và mô hình PEMSC-APSA đề xuất. Trong phần IV, việc thiết lập tham số và đánh giá kết quả mô phỏng được thực hiện. Phần V phân tích và so sánh độ phức tạp tính toán của các phương pháp AFC. Cuối cùng, kết luận của bài báo được trình bày trong phần VI.

II. PHƯƠNG PHÁP PEM-AFC VỚI CẤU MỀM



Hình 1. Mô hình phương pháp PEM-AFC với cấu trúc mềm.

Trong bài báo này, để đơn giản tôi giả định rằng tất cả các hệ thống AFC đều là hệ thống tuyến tính, bất biến, rời rạc theo thời gian và tín hiệu mong muốn đến micrô là tĩnh (stationary). Phương pháp AFC thông thường có sai số đáng kể trong ước tính đường dẫn phản hồi. Nhằm mục đích giảm sai số này, tiền bộ lọc được sử dụng để tiền làm trắng các đầu vào của bộ lọc thích ứng trong phương pháp PEM-AFC [2]. Ngoài ra, bộ cắt mềm (soft clipper) được sử dụng trên tín hiệu lỗi để nâng cao hơn nữa hiệu năng loại bỏ phần hồi âm thanh [21]. Hình 1 minh họa mô hình PEM-AFC với cấu trúc mềm, gọi là PEMSC, cho máy trợ thính có một micrô và một loa. Giả thiết đường phản hồi, $H(q)$, giữa loa và micrô được coi là hàm truyền đa thức với các hệ số L_h biến thiên theo thời gian, nghĩa là $H(q) = \mathbf{h}^T \mathbf{q}$, trong đó $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{L_h-1}]^T$ là một vector chiều dài L_h biểu diễn đáp ứng xung của đường phản hồi âm thanh thực tế và $\mathbf{q} = [1, q^{-1}, \dots, q^{-L_h+1}]^T$ với q^{-1} biểu thị toán tử độ trễ.

$$x(n) = A^{-1}(q)w(n), \quad (1)$$

trong đó n là hệ số thời gian rời rạc, và $A^{-1}(q)$ biểu thị cho một bộ lọc toàn cục ổn định đảo, trong khi $w(n)$ biểu thị một chuỗi nhiễu Gaussian trắng.

63

trong đó $x'(n)$ là tín hiệu mong muốn đến micrô ($x(n)$) bị can nhiễu bởi nhiễu nền ($n_{bgr}(n)$) và nhiễu xung ($n_{imp}(n)$), nghĩa là

$$x'(n) = x(n) + n_{bgr}(n) + n_{imp}(n). \quad (12)$$

Trong PEMSC-APSA, tín hiệu tại micrô $m(n)$ và tín hiệu tại loa $u(n)$ được tiền làm trắng bởi các tiền bộ lọc $\hat{A}(q)$ tương tự như mô tả trong các công thức (3) và (4) nhưng với tín hiệu tại micrô được định nghĩa trong (11). P vector gần nhất của tín hiệu loa sau khi làm trắng được nhóm thành ma trận kích thước $L_h \times P$ để đưa tới đầu vào bộ lọc thích ứng, nghĩa là $\mathbf{U}_p(n) = [\mathbf{u}_p(n), \dots, \mathbf{u}_p(n - P + 1)]$ với P là bậc chiều. Vector tín hiệu micrô, vector tín hiệu lỗi tiên nghiệm (priori error vector) và vector tín hiệu lỗi hậu nghiệm (posteriori error vector) sau khi làm trắng được biểu diễn lần lượt dưới dạng $\mathbf{m}_p(n) = [m_p(n), \dots, m_p(n - P + 1)]^T$, $\mathbf{e}_p(n) = [e_p(n), \dots, e_p(n - P + 1)]^T$, và $\boldsymbol{\varepsilon}_p(n) = [\varepsilon_p(n), \dots, \varepsilon_p(n - P + 1)]^T$. Các vector tín hiệu lỗi tiên nghiệm và hậu nghiệm sau khi làm trắng được tính như sau:

$$\mathbf{e}_p(n) = \mathbf{m}_p(n) - \mathbf{U}_p^T(n) \hat{\mathbf{h}}(n), \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_p(n) = \mathbf{m}_p(n) - \mathbf{U}_p^T(n) \hat{\mathbf{h}}(n + 1). \quad (14)$$

Trong phương pháp PEMSC-APSA đề xuất, l_1 - norm của vector lỗi hậu nghiệm được tối thiểu hóa với một điều kiện ràng buộc đối với các hệ số bộ lọc như sau:

$$\min_{\hat{\mathbf{h}}(n+1)} = \left(\left\| \mathbf{m}_p(n) - \mathbf{U}_p^T(n) \hat{\mathbf{h}}(n + 1) \right\|_1 \right), \quad (15)$$

$$\text{subject to } \left\| \hat{\mathbf{h}}(n + 1) - \hat{\mathbf{h}}(n) \right\|_2^2 \leq \mu^2, \quad (16)$$

trong đó μ là một tham số được sử dụng để đảm bảo rằng vector hệ số trọng số không thay đổi quá mức trong mỗi lần lặp. Bằng cách sử dụng phương pháp của bộ nhân Lagrange như trong [34], ta thu được

$$\hat{\mathbf{h}}(n + 1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{1}{2\kappa} \mathbf{U}_p(n) \text{sgn}[\boldsymbol{\varepsilon}_p(n)], \quad (17)$$

trong đó $\text{sgn}[\cdot]$ biểu thị hàm dấu, và κ biểu thị hệ số nhân Lagrange. Thay thế (17) vào (16) ta thu được

$$\frac{1}{2\kappa} = \frac{\mu}{\sqrt{\text{sgn}(\boldsymbol{\varepsilon}_p^T(n)) \mathbf{U}_p^T(n) \mathbf{U}_p(n) \text{sgn}(\boldsymbol{\varepsilon}_p(n))}}. \quad (18)$$

Thay thế (18) vào (17), phương trình cập nhật vector trọng số của bộ lọc thích ứng được tính như sau:

$$\hat{\mathbf{h}}(n + 1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{\mu \mathbf{U}_p(n) \text{sgn}(\boldsymbol{\varepsilon}_p(n))}{\sqrt{\text{sgn}(\boldsymbol{\varepsilon}_p^T(n)) \mathbf{U}_p^T(n) \mathbf{U}_p(n) \text{sgn}(\boldsymbol{\varepsilon}_p(n))}}. \quad (19)$$

Do vectơ lỗi hậu nghiệm $\boldsymbol{\varepsilon}_p(n)$ phụ thuộc vào $\hat{\mathbf{h}}(n + 1)$ - thứ không thể truy cập trước bản cập nhật hiện tại, nên có thể xấp xỉ nó bằng vectơ lỗi tiên nghiệm $\mathbf{e}_p(n)$. Đặt $\mathbf{u}_g(n) = \mathbf{U}_p(n) \text{sgn}(\mathbf{e}_p(n))$ với $\text{sgn}(\mathbf{e}_p(n)) = [\text{sgn}(e_p(n)), \dots, \text{sgn}(e_p(n - P + 1))]^T$, công thức (19) có thể được viết lại như sau:

$$\hat{\mathbf{h}}(n + 1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{\mu \mathbf{u}_g(n)}{\sqrt{\mathbf{u}_g^T(n) \mathbf{u}_g(n) + \zeta}}, \quad (20)$$

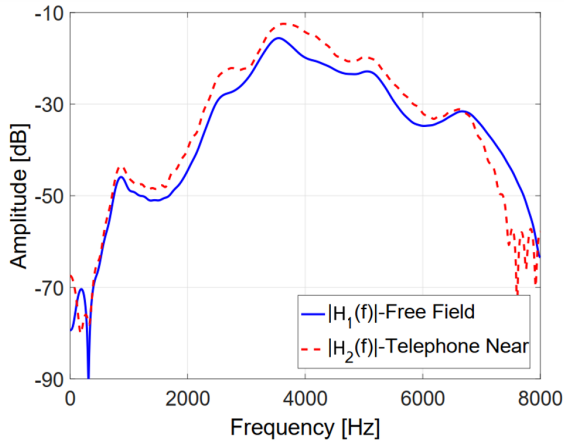
trong đó ζ là một số dương nhỏ được cộng vào mẫu số để tránh chia cho 0. Như trình bày ở (20) thì không cần phép toán nghịch đảo ma trận cho PEMSC-APSA. So sánh với PEMSC-APA thì PEMSC-APA cần phép tính nghịch đảo ma trận và việc tính toán cũng phức tạp hơn so với PEMSC-APSA.

IV. MÔ PHỎNG

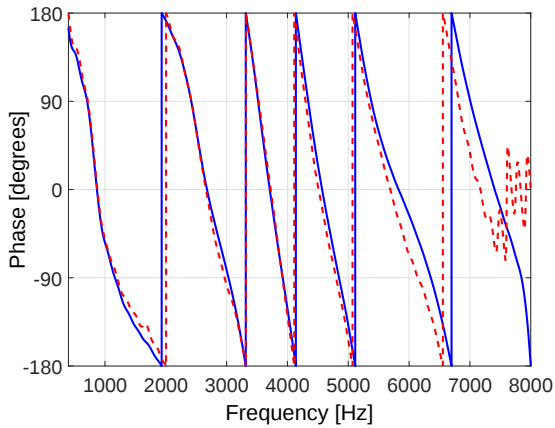
A. Thiết lập tham số

Đường dẫn phản hồi âm thanh được đo trên một đầu giả (dummy head) có ống tai có thể điều chỉnh, sử dụng máy trợ thính hai micrô sau tai và khuôn tai hở. Đường phản hồi đầu tiên được đo mà không có bất kỳ vật cản nào giữa micrô và loa (gọi là đường phản hồi trường tự do, $H_1(f)$) và đường phản hồi thứ hai được đo bằng cách đặt điện thoại gần khuôn tai (gọi là đường dẫn phản hồi khi có điện thoại đặt gần, $H_2(f)$) [36]. Tôi lấy mẫu đáp ứng xung (IR) của các đường phản hồi đã đo được ở tần số lấy mẫu $f_s = 16 \text{ kHz}$ và sau đó cắt bớt chúng theo độ dài $L_h = 100$. Hình 3 cho thấy đáp ứng biên độ và pha của các đường phản hồi đo được.

Độ lệch chuẩn hóa - Normalized Misalignment (MIS) được sử dụng để đánh giá các phương pháp loại bỏ phản hồi âm thanh thích ứng. Độ lệch chuẩn hóa đo độ sai lệch giữa đường phản hồi thực tế và đường phản hồi ước lượng, và tham số



(a)



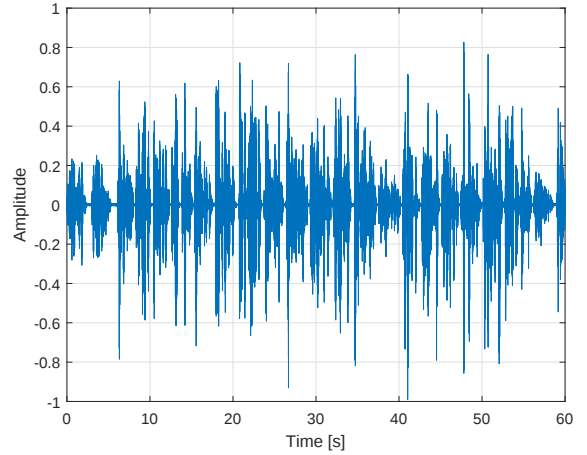
(b)

Hình 3. Đường phản hồi đo được: a) Đáp ứng biên độ, b) Pha.

này được tính toán như sau [8]:

$$\text{MIS} = 10 \log_{10} \left(\frac{\|\mathbf{h}(n) - \hat{\mathbf{h}}(n)\|_2^2}{\|\mathbf{h}(n)\|_2^2} \right). \quad (21)$$

Độ lệch chuẩn hóa được dùng để đánh giá hiệu năng của các phương pháp AFC, tham số này càng thấp thì càng tốt. Các tham số sau được chọn cho tất cả các mô phỏng: độ trễ đường xử lý tín hiệu $d_k = 96$ mẫu, độ khuếch đại của đường xử lý tín hiệu $|K| = 30$ dB, độ trễ tại đường loại bỏ phản hồi $d_{fb} = 1$ mẫu, và $\delta = 10^{-6}$, $\zeta = \frac{1}{2L_h}\delta$. Chọn độ dài của các đường dẫn phản hồi ước tính, $L_h = 64$. Bậc chiếu, $P = 2$, được chọn để đảm bảo rằng độ phức tạp tính toán chỉ tăng nhẹ. Đối với phương pháp PEMSC-APSA kích thước bước $\mu = 8.10^{-6}$ được chọn để cập nhật các hệ số bộ lọc thích ứng, $\hat{H}(q)$, trong



Hình 4. Tiếng nói là tín hiệu đến mong muốn.

khi $\mu = 8.10^{-4}$ được chọn cho PEMSC-APA và PEMSC-IPAPA. Đối với PEMSC-NLMS và PEMSC-IPNLMS, $\mu = 10^{-3}$ được chọn. Việc chọn kích thước bước như vậy để đảm bảo mỗi phương pháp trên đạt được hiệu năng tốt nhất.

Đối với tín hiệu mong muốn đến micrô, tôi sử dụng tín hiệu giọng nói được tạo ra từ 30 câu nói bởi 3 nam và 3 nữ mà được trích xuất từ cơ sở dữ liệu NOIZEUS [37]. Cụ thể, 30 câu IEEE đã được nổi lại và phát lại liên tục. Các tín hiệu giọng nói đã được ghi lại bằng nút tai SP1x của Sensear [38], sau đó cắt ngắn còn 60 giây. Hình 4 minh họa tín hiệu giọng nói được ghi âm lại để sử dụng làm tín hiệu đến mong muốn.

Trong môi trường có nhiều nền và nhiễu xung, micrô không chỉ thu được tín hiệu giọng nói đến và tín hiệu phản hồi mà còn thu được tiếng ồn nền và tiếng ồn xung. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) giữa tín hiệu giọng nói đến và tiếng ồn nền có thể được chọn trong phạm vi $SNR = [10, 20, 30]$ dB. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SIR) giữa tín hiệu giọng nói đến và tiếng ồn xung được chọn bằng $SIR = 0$ dB. Tôi chọn hai loại nhiễu nền cho mô phỏng, gồm nhiễu trắng và nhiễu trong nhà máy (factory 2) lấy từ cơ sở dữ liệu NOISEX-92 [39].

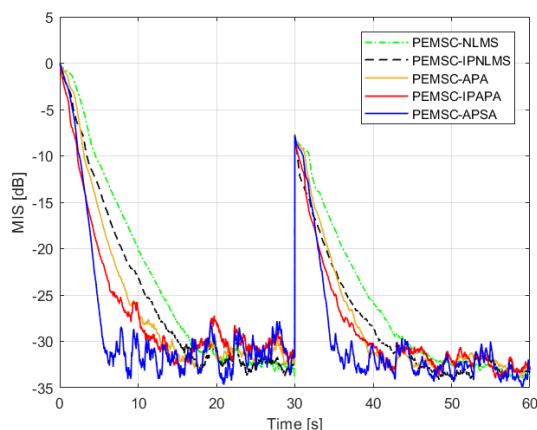
Nhiễu xung được mô hình hóa như một phân phối Bernoulli-Gaussian (BG), trong đó BG ($y(n)$) là tích của một quá trình Bernoulli ($c(n)$) và một quá trình ngẫu nhiên Gaussian trắng ($g(n)$), tức là, $y(n) = c(n) \cdot g(n)$. Xác suất thành công cho quá trình Bernoulli là $P(c = 1) = \alpha$ và quá trình Gaussian trắng có trung bình bằng

không với phương sai σ_g^2 . Công suất trung bình của quá trình BG là $\alpha \cdot \sigma_g^2$. Ở đây $\alpha = 0.1$ được chọn cho các mô phỏng.

B. Kết quả mô phỏng

1) *Kịch bản 1*: hệ thống có sự tác động của nhiễu trắng (tiếng ồn nền) và nhiễu xung.

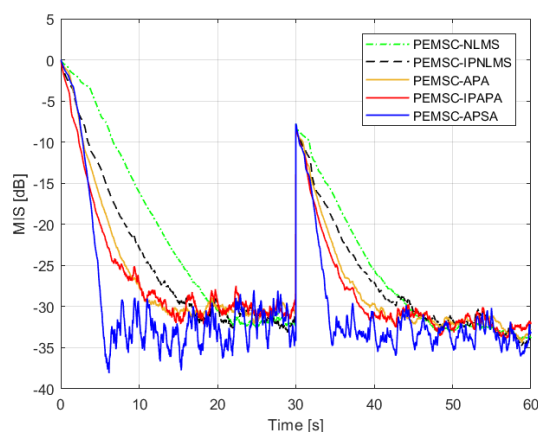
Trong trường hợp này, hiệu năng của phương pháp PEMSC-APSA đề xuất được so sánh với các phương pháp hiện thời như PEMSC-NLMS, PEMSC-IPNLMS, PEMSC-APA và PEMSC-IPAPA khi tiếng ồn nền là nhiễu trắng với $SNR = [10, 20, 30]$ dB và có sự hiện diện của nhiễu xung với $SIR = 0$ dB. Giọng nói ghi âm được sử dụng làm tín hiệu đến mong muốn.



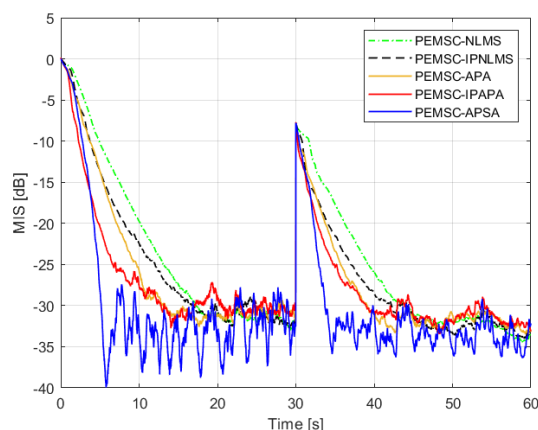
Hình 5. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so sánh với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là nhiễu trắng $SNR = 10$ dB và có nhiễu xung $SIR = 0$ dB.

Hình 5 – Hình 7 minh họa độ lệch chuẩn hóa (MIS) của phương pháp AFC đề xuất khi so sánh với các phương pháp cạnh tranh.

Tôi quan sát thấy rằng ở các SNR đã chọn, tốc độ hội tụ và theo dấu của PEM-APA nhanh hơn nhiều so với các phương pháp PEMSC-NLMS và PEMSC-IPNLMS, nhưng chậm hơn so với PEM-IPAPA. Tốc độ hội tụ của phương pháp đề xuất (PEM-APSA) vượt trội so với tất cả các phương pháp còn lại. Khi đường phản hồi đột ngột thay đổi sau 30 giây, tốc độ theo dấu của PEM-APSA nhanh hơn nhiều so với các phương pháp AFC khác. SNR càng cao, tốc độ hội tụ và theo dấu của phương pháp đề xuất càng được cải thiện nhiều hơn so với các phương pháp còn lại.



Hình 6. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so sánh với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là nhiễu trắng $SNR = 20$ dB và có nhiễu xung $SIR = 0$ dB.



Hình 7. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so sánh với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là nhiễu trắng $SNR = 30$ dB và có nhiễu xung $SIR = 0$ dB.

Bảng I

SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP AFC DỰA TRÊN GIÁ TRỊ TRUNG BÌNH CỦA ĐỘ LỆCH CHUẨN HÓA TẠI ĐƯỜNG PHẢN HỒI ÂM THANH $H_1(f)$, $H_2(f)$ VỚI NHIỄU TRẮNG (TIẾNG ỒN NỀN) $SNR = 20$ dB VÀ NHIỄU XUNG $SIR = 0$ dB.

Phương pháp AFC	$\overline{MIS}_1$	$\overline{MIS}_2$
PEMSC-NLMS	-20.85	-26.63
PEMSC-IPNLMS	-24.13	-27.36
PEMSC-APA	-25.37	-28.49
PEMSC-IPAPA	-25.87	-28.89
PEMSC-APSA	-28.89	-31.08

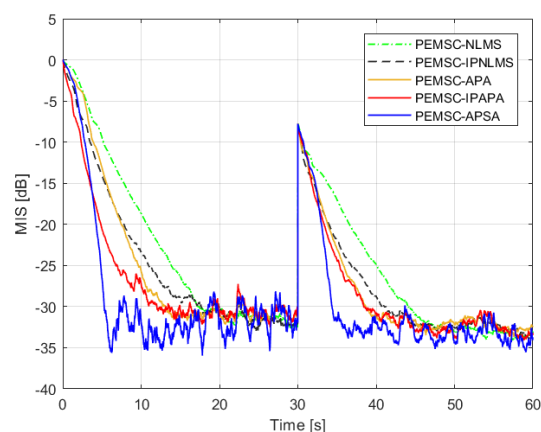
Bảng I đánh giá các phương pháp AFC dựa trên giá trị trung bình của độ lệch chuẩn hóa ở

đường phản hồi âm thanh thứ nhất ($\overline{MIS}_1$) và giá trị trung bình của độ lệch chuẩn hóa ở đường phản hồi âm thanh thứ hai ($\overline{MIS}_2$) cho trường hợp hệ thống chịu tác động của nhiễu nền là nhiễu trắng có $SNR = 20$ dB và nhiễu xung có $SNR = 0$ dB. Lưu ý là việc chuyển đường phản hồi âm thanh một cách đột ngột từ $H_1(f)$ sang $H_2(f)$ được thực hiện sau 30 s. Giá trị lớn nhất tương ứng với $\overline{MIS}_1$ và $\overline{MIS}_2$ trong bảng được in đậm. Có thể thấy rằng với phương pháp PEMSC-NLMS thì các giá trị $\overline{MIS}_1$ và $\overline{MIS}_2$ là cao nhất và với phương pháp PEMSC-APSA thì các giá trị này là thấp nhất. Trong các phương pháp còn lại thì PEMSC-APA có các độ lệch chuẩn hóa trung bình thấp hơn so với PEMSC-IPNLMS nhưng cao hơn PEMSC-IPAPA. Điều này cho thấy phương pháp đề xuất, PEMSC-APSA có hiệu năng tốt nhất, tiếp đến là PEMSC-IPAPA, rồi đến PEMSC-APA, PEMSC-IPNLMS. Phương pháp PEMSC-NLMS có hiệu năng thấp nhất. Kết quả trong Bảng I hoàn toàn phù hợp với kết quả trong Hình 5 – Hình 7.

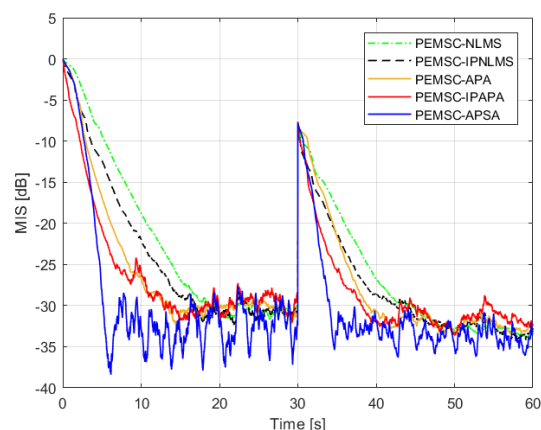
2) *Kịch bản 2*: hệ thống có sự tác động của nhiễu nền là tiếng ồn thu ở nhà máy (factory 2) và nhiễu xung.

Trong trường hợp này, hiệu năng của phương pháp PEMSC-APSA đề xuất được so sánh với các phương pháp PEMSC-NLMS, PEMSC-IPNLMS, PEMSC-APA và PEMSC-IPAPA khi nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy với $SNR = [10, 20, 30]$ dB và có sự hiện diện của nhiễu xung với $SIR = 0$ dB. Giọng nói ghi âm được sử dụng làm tín hiệu đến mong muốn. Đường phản hồi âm thanh chuyển đột ngột từ $H_1(f)$ sang $H_2(f)$ sau 30 s.

Hình 8 – Hình 10 minh họa MIS của phương pháp AFC đề xuất khi so sánh với các phương pháp cạnh tranh. Có thể thấy rằng tốc độ hội tụ và theo dấu sự thay đổi của đường phản hồi âm thanh sau 30 s của phương pháp PEMSC-IPNLMS tốt hơn so với PEMSC-NLMS do tận dụng được tính chất thưa thớt của đường phản hồi âm thanh trong việc cập nhật trọng số của bộ lọc thích ứng. Hiệu năng của phương pháp PEMSC-APA tốt hơn nhiều so với PEMSC-IPNLMS, nhưng lại kém hơn PEMSC-IPAPA do phương pháp PEMSC-IPAPA không những tận dụng được nhiều vector đầu vào cho bộ lọc thích ứng mà còn tận dụng được tính chất thưa thớt của đường phản hồi âm thanh. Quan sát cũng cho thấy rằng phương pháp đề xuất, PEMSC-APSA, vượt trội hơn tất cả các phương pháp đề cập ở trên.



Hình 8. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy $SNR = 10$ dB và có nhiễu xung $SIR = 0$ dB.



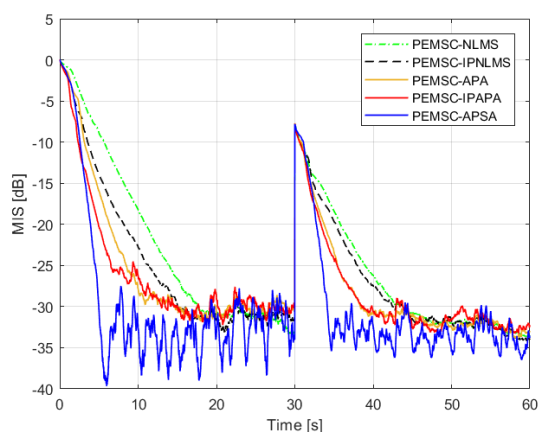
Hình 9. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy $SNR = 20$ dB và có nhiễu xung $SIR = 0$ dB.

Bảng II

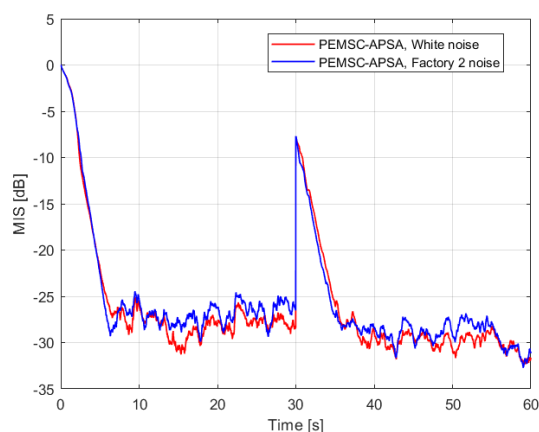
SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP AFC DỰA TRÊN GIÁ TRỊ TRUNG BÌNH CỦA ĐỘ LỆCH CHUẨN HÓA TẠI ĐƯỜNG PHẢN HỒI ÂM THANH $H_1(f)$, $H_2(f)$ VỚI TIẾNG ỒN NHÀ MÁY (TIẾNG ỒN NỀN) $SNR = 20$ dB, NHIỄU XUNG $SIR = 0$ dB.

Phương pháp AFC	$\overline{MIS}_1$	$\overline{MIS}_2$
PEMSC-NLMS	-21.88	-27.13
PEMSC-IPNLMS	-23.64	-28.18
PEMSC-APA	-25.13	-28.37
PEMSC-IPAPA	-25.87	-28.92
PEMSC-APSA	-28.90	-31.32

Tương tự Bảng I, Bảng II cũng đánh giá các phương pháp AFC dựa trên $\overline{MIS}_1$ và $\overline{MIS}_2$ nhưng



Hình 10. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy $SNR = 30$ dB và có nhiễu xung $SIR = 0$ dB.



Hình 11. Hiệu năng của phương pháp đề xuất khi tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy (factory 2 noise) hoặc nhiễu trắng (white noise) và có nhiễu xung, $SNR = SIR = 10$ dB.

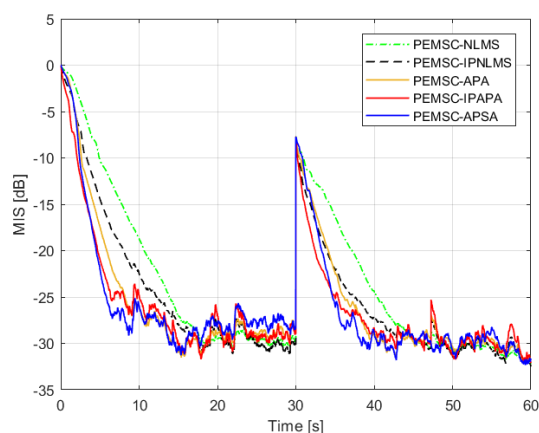
với nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy có $SNR = 20$ dB và với nhiễu xung có $SNR = 0$ dB. Có thể thấy rằng phương pháp PEMSC-APSA cho kết quả tốt nhất, và so với phương pháp tốt thứ hai là PEMSC-IPAPA thì phương pháp đề xuất có MIS_1 và MIS_2 cải thiện hơn khoảng 3 dB và 2.4 dB tương ứng. So với các phương pháp còn lại thì phương pháp đề xuất tốt hơn từ 3.8 dB đến 7 dB đối với MIS_1 và tốt hơn 3 dB - 4 dB đối với MIS_2 . Kết quả này hoàn toàn phù hợp với quan sát ở Hình 8 – Hình 10.

3) *Kịch bản 3*: hệ thống có sự tác động của nhiễu nền và nhiễu xung với $SNR = SIR = 10$ dB.

Trong trường hợp này, hiệu năng của phương pháp PEMSC-APSA đề xuất được so sánh với các phương pháp cạnh tranh trong môi trường có nhiễu nền và nhiễu xung mạnh ngang nhau. Giọng nói ghi âm được sử dụng làm tín hiệu đến mong muốn. Đường phản hồi âm thanh chuyển đột ngột từ $H_1(f)$ sang $H_2(f)$ sau 30 s.

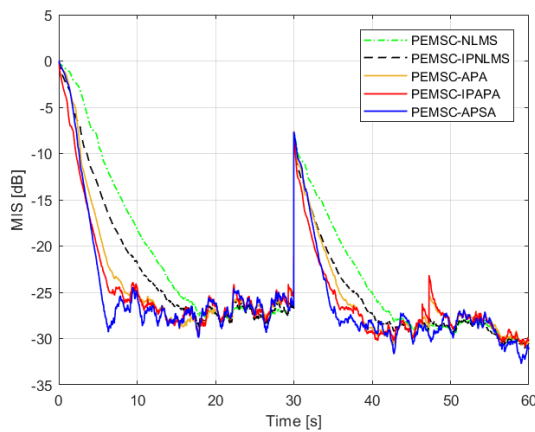
Trước tiên, hiệu năng của phương pháp đề xuất được đánh giá khi có các nhiễu nền khác nhau (nhiễu trắng và tiếng ồn nhà máy) và nhiễu xung. Hình 11 so sánh MIS của phương pháp đề xuất PEMSC-APSA cho trường hợp $SIR = SNR = 10$ dB, nhiễu xung là BG còn nhiễu nền lần lượt là nhiễu trắng và tiếng ồn nhà máy. Từ hình vẽ có thể thấy phương pháp đề xuất PEMSC-APSA hội tụ và theo dấu nhanh hơn một chút đối với tiếng ồn nhà máy, nhưng sau khi đã hội tụ thì phương pháp

đề xuất đạt được lỗi trạng thái ổn định (steady-state error) thấp hơn đối với trường hợp nhiễu nền là nhiễu trắng. Điều này cho thấy rằng nhiễu trắng dễ xử lý hơn so với tiếng ồn nhà máy.



Hình 12. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là nhiễu trắng và có nhiễu xung, $SNR = SIR = 10$ dB.

Hình 12 - Hình 13 so sánh hiệu năng của phương pháp đề xuất so với các phương pháp cạnh tranh tương ứng cho trường hợp nhiễu nền là nhiễu trắng và tiếng ồn nhà máy. Mặc dù khi mới bắt đầu hoặc khi chuyển đường phản hồi âm thanh phương pháp đề xuất hội tụ và theo dấu chậm hơn một chút so với PEMSC-IPAPA, nhưng sau đó tốc độ hội tụ và theo dấu tăng dần và lớn hơn. So với các phương pháp khác thì phương pháp đề



Hình 13. Hiệu năng của phương pháp đề xuất so với các phương pháp cạnh tranh: tín hiệu đầu vào là tiếng nói, nhiễu nền là tiếng ồn nhà máy và có nhiễu xung, $SNR = SIR = 10$ dB.

xuất đều vượt trội hơn.

V. ĐỘ PHỨC TẠP TÍNH TOÁN

Trong phần này, độ phức tạp tính toán của phương pháp AFC đề xuất được phân tích và so sánh với các phương pháp cạnh tranh. Để đơn giản, giả định rằng phép nhân thực và phép chia thực có cùng độ phức tạp. Trong phương pháp PEM-AFC, chỉ cần ước tính các hệ số LPC (Linear Prediction Coefficients). Cụ thể, độ phức tạp tính toán để ước tính các hệ số LPC bằng cách sử dụng ma trận tự tương quan và thuật toán Levinson-Durbin được tính theo số phép nhân là $\frac{5L_a^2 + 2LL_a + L_a}{2L}$, trong đó L_a và L biểu thị bậc của mô hình AR và độ dài khung hình. Ngoài ra, tín hiệu được tiền làm trắng ở đầu ra của mỗi tiền bộ lọc yêu cầu L_a phép nhân. Bộ cắt mềm cần 2 phép nhân. Việc ước tính các hệ số bộ lọc thích ứng bằng thuật toán NLMS cần $3L_{\hat{h}} + 2$ phép nhân [35]. Do đó, số phép nhân trên mỗi mẫu đầu ra cần thiết để tính toán PEMSC-NLMS là $B + 3L_{\hat{h}} + 2$, trong đó $B = \frac{5L_a^2 + 2LL_a + L_a}{2L} + 2L_a + 2$. Bảng III tổng hợp số phép nhân thực trên mỗi mẫu đầu ra cho tất cả các phương pháp AFC được đề cập. Một giá trị số (số phép nhân) cho một tập hợp các tham số $L_a = 20$, $L = 160$, $L_{\hat{h}} = 64$, và $P = 2$ được tính toán và hiển thị trong cột cuối cùng của Bảng III. Có thể thấy rằng PEMSC-NLMS có độ phức tạp thấp nhất nhưng hiệu năng của nó là tệ nhất. Mặc dù PEMSC-APA với P nhỏ (ví dụ: $P = 2$) có độ phức tạp

cao hơn PEMSC-IPNLMS, nhưng hiệu năng của nó tốt hơn. Phương pháp PEMSC-IPAPA có số phép nhân cao nhất nhưng tốc độ hội tụ và theo dấu của nó nhanh hơn cả PEMSC-IPNLMS và PEMSC-APA. Phương pháp AFC đề xuất có độ phức tạp cao hơn PEMSC-NLMS nhưng thấp hơn nhiều so với ba phương pháp còn lại. Hơn nữa, hiệu năng của PEMSC-APSA là vượt trội hơn các thuật toán cạnh tranh khác trong môi trường với nhiễu nền có $SNR = [10, 20, 30]$ dB và với nhiễu xung có SIR thấp ($SIR = 0$ dB). Phương pháp PEMSC-APSA cần số phép nhân thấp nhất và không yêu cầu phép toán nghịch đảo ma trận như PEMSC-APA và PEMSC-IPAPA, tuy nhiên nó yêu cầu một phép toán căn bậc hai. Độ phức tạp của PEMSC-APA và PEMSC-IPAPA cao hơn so với các phương pháp khác đã đề cập còn bởi vì các phương pháp này yêu cầu phép toán nghịch đảo ma trận.

VI. KẾT LUẬN

Bài báo này đề xuất một phương pháp AFC mới kết hợp thuật toán APA có dấu với PEMSC. Phương pháp mới này tận dụng lợi ích của PEMSC trong việc giảm tương quan giữa tín hiệu đến mong muốn và tín hiệu loa, dẫn đến giảm sai số trong ước tính đường dẫn phản hồi. Hơn nữa, thuật toán lọc thích ứng nhanh (APSA) được tích hợp vào PEMSC để nâng cao hiệu năng hơn nữa, cụ thể là tăng tốc độ hội tụ, tốc độ theo dấu và giảm độ lệch chuẩn hóa. Ngoài ra, độ phức tạp tính toán của tất cả các phương pháp AFC đã đề cập được phân tích và so sánh. Các mô phỏng được tiến hành đối với tín hiệu giọng nói trong môi trường có cả nhiễu nền và nhiễu xung. Nhìn chung, phương pháp PEMSC-APSA đề xuất đạt hiệu năng vượt trội so với các phương pháp cạnh tranh khác được dùng để so sánh, thể hiện khả năng chống nhiễu tốt trong môi trường có tiếng ồn xung và tiếng ồn nền.

LỜI CẢM ƠN

Cảm ơn Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT) đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. van Waterschoot and M. Moonen, "Fifty Years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 2, pp. 288–327, 2011.

Bảng III
ĐỘ PHỨC TẠP TÍNH TOÁN TRÊN MỖI MẪU ĐẦU RA.

Phương pháp AFC	Phép nhân	Căn bậc hai	Nghịch đảo ma trận	#
PEMSC-NLMS	$B + 3L_{\hat{h}} + 2$	0	Không	263
PEMSC-IPNLMS	$B + 8L_{\hat{h}} + 2$	0	Không	583
PEMSC-APA	$B + (P^2 + 2P) L_{\hat{h}} + 2P$	0	Có	585
PEMSC-IPAPA	$B + (P^2 + 3P + 4) L_{\hat{h}} + 2P$	0	Có	969
PEMSC-APSA	$B + (P + 2) L_{\hat{h}}$	1	Không	325

Một giá trị số (số phép nhân) được tính với $L_a = 20$, $L = 160$, $L_{\hat{h}} = 64$, và $P = 2$.

- [2] A. Spriet, S. Doclo, M. Moonen, and J. Wouters, "Feedback control in hearing aids," in *Springer Handb. Speech Process.* Springer, 2008, pp. 979–1000.
- [3] M. G. Siqueira and A. Alwan, "Steady-state analysis of continuous adaptation in acoustic feedback reduction systems for hearing-aids," *IEEE Trans. Speech, Audio Process.*, vol. 8, no. 4, pp. 443–453, 2000.
- [4] M. Guo, S. H. Jensen, and J. Jensen, "Novel acoustic feedback cancellation approaches in hearing aid applications using probe noise and probe noise enhancement," *IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 20, no. 9, pp. 2549–2563, 2012.
- [5] Y. Eren, B. Ç. Güvenç, and E. C. Mengüç, "An acoustic feedback canceler based on probe noise and informative data for hearing aids," *Signal, Image Video Process.*, vol. 18, no. 1, pp. 703–714, 2024.
- [6] F. Albu, L. Tran, S. Radhika, and A. Chandrasekar, "Acoustic feedback cancellation using the variable step size affine projection tanh algorithm," in *2023 IEEE Stat. Signal Process. Work.* IEEE, 2023, pp. 522–526.
- [7] M. Guo, S. H. Jensen, J. Jensen, and S. L. Grant, "On the use of a phase modulation method for decorrelation in acoustic feedback cancellation," in *Proc. Eur. Signal Process. Conf.*, 2012, pp. 2000–2004.
- [8] A. Spriet, G. Rombouts, M. Moonen, and J. Wouters, "Adaptive feedback cancellation in hearing aids," *Elsevier J. Franklin Inst.*, vol. 343, no. 6, pp. 545–573, 2006.
- [9] J. M. Gil-Cacho, T. van Waterschoot, M. Moonen, and S. H. Jensen, "Transform domain prediction error method for improved acoustic echo and feedback cancellation," in *Proc. Eur. Signal Process. Conf.* IEEE, 2012, pp. 2422–2426.
- [10] L. T. T. Tran, H. Schepker, S. Doclo, H. H. Dam, and S. Nordholm, "Proportionate NLMS for adaptive feedback control in hearing aids," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.*, 2017.
- [11] M. T. Akhtar, F. Albu, and A. Nishihara, "Prediction error method (PEM)-based howling cancellation in hearing aids: Can we do better?" *IEEE Access*, vol. 11, pp. 337–364, 2022.
- [12] G. Bernardi, T. van Waterschoot, J. Wouters, M. Hillbratt, and M. Moonen, "A PEM-based frequency-domain Kalman filter for adaptive feedback cancellation," in *Proc. 23rd Eur. Signal Process. Conf.* IEEE, 2015, pp. 270–274.
- [13] G. Bernardi, T. van Waterschoot, J. Wouters, and M. Moonen, "An all-frequency-domain adaptive filter with PEM-based decorrelation for acoustic feedback control," in *Proc. Work. Appl. Signal Process. Audio Acoust.* IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [14] L. T. T. Tran, H. Schepker, S. Doclo, H. H. Dam, and S. Nordholm, "Frequency Domain Improved Practical Variable Step-Size for Adaptive Feedback Cancellation Using Pre-Filters," in *2018 16th Int. Work. Acoust. Signal Enhanc.* IEEE, 2018, pp. 171–175.
- [15] M. Rotaru, F. Albu, and H. Coanda, "A variable step size modified decorrelated NLMS algorithm for adaptive feedback cancellation in hearing aids," *Proc. ISETC. Timisoara*, pp. 263–266, 2012.
- [16] L. T. T. Tran, F. Albu, H. T. Nguyen, and S. Nordholm, "Proportionate NLMS with Variable Step-Size for Adaptive Feedback Cancellation in Hearing Aids," in *2023 Asia Pacific Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf. (APSIPA ASC)*. IEEE, 2023, pp. 2343–2348.
- [17] F. Strasser and H. Puder, "Sub-band feedback cancellation with variable step sizes for music signals in hearing aids," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process.* IEEE, 2014, pp. 8207–8211.
- [18] S. A. Khoubrouy and I. M. S. Panahi, "An Efficient Delayless Sub-band Filtering for Adaptive Feedback Compensation in Hearing Aid," *J. Signal Process. Syst.*, pp. 1–9, 2016.
- [19] S. Pradhan, V. Patel, D. Somani, and N. V. George, "An improved proportionate delayless multiband-structured subband adaptive feedback canceller for digital hearing aids," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 25, no. 8, pp. 1633–1643, 2017.
- [20] L. T. T. Tran, S. E. Nordholm, H. Schepker, H. H. Dam, and S. Doclo, "Two-microphone hearing aids using prediction error method for adaptive feedback control," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 26, no. 5, pp. 909–923, 2018.
- [21] S. Nordholm, H. Schepker, L. T. T. Tran, and S. Doclo, "Stability-controlled hybrid adaptive feedback cancellation scheme for hearing aids," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 143, no. 1, pp. 150–166, 2018.
- [22] L. T. T. Tran and S. E. Nordholm, "A Switched Algorithm for Adaptive Feedback Cancellation Using Pre-Filters in Hearing Aids," *Audiol. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 389–409, 2021.
- [23] S. S. Bhattacharjee and N. V. George, "Fast and Efficient Acoustic Feedback Cancellation based on Low

- Rank Approximation,” *Signal Processing*, p. 107984, 2021.
- [24] F. Huang, J. Zhang, and S. Zhang, “Combined-Step-Size Affine Projection Sign Algorithm for Robust Adaptive Filtering in Impulsive Interference Environments,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 63, no. 5, pp. 493–497, 2016.
- [25] Z. Zheng and Z. Liu, “Steady-state mean-square performance analysis of the affine projection sign algorithm,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 67, no. 10, pp. 2244–2248, 2019.
- [26] Z.-Y. Luo, J.-L. Zhou, and Y.-F. Pu, “A widely linear complex-valued affine projection sign algorithm with its steady-state mean-square analysis,” *Circuits, Syst. Signal Process.*, vol. 41, no. 6, pp. 3446–3464, 2022.
- [27] Y.-R. Chien, S. S.-D. Xu, and D.-Y. Ho, “Combined boosted variable step-size affine projection sign algorithm for environments with impulsive noise,” *Digit. Signal Process.*, vol. 140, p. 104110, 2023.
- [28] L. T. T. Tran, H. H. Dam, and S. Nordholm, “Affine Projection Algorithm For Acoustic Feedback Cancellation Using Prediction Error Method In Hearing Aids,” *Proc. IEEE Int. Work. Acoust. Signal Enhanc.*, 2016.
- [29] F. Yang and J. Yang, “A comparative survey of fast affine projection algorithms,” *Digit. Signal Process.*, vol. 83, pp. 297–322, 2018.
- [30] V. Djigan, “Multichannel Acoustic Echo Canceller Based on Fast Affine Projection Algorithm,” in *2023 25th Int. Conf. Digit. Signal Process. its Appl.* IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [31] M. Z. A. Bhotto, M. O. Ahmad, and M. N. S. Swamy, “Robust shrinkage affine-projection sign adaptive-filtering algorithms for impulsive noise environments,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 13, pp. 3349–3359, 2014.
- [32] Y.-R. Chien and J. Li-You, “Convex combined adaptive filtering algorithm for acoustic echo cancellation in hostile environments,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 16 138–16 148, 2018.
- [33] D. Liu and H. Zhao, “Novel Affine Projection Sign SAF Against Impulsive Interference and Noisy Input: Algorithm Derivation and Convergence Analysis,” *Circuits, Syst. Signal Process.*, vol. 42, no. 10, pp. 6182–6209.
- [34] T. Shao, Y. R. Zheng, and J. Benesty, “An affine projection sign algorithm robust against impulsive interferences,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 327–330, 2010.
- [35] A. H. Sayed, *Fundamental adaptive filtering*. John Wiley and Sons, 2003.
- [36] T. Sankowsky-Rothe, M. Blau, H. Schepker, and S. Doclo, “Reciprocal measurement of acoustic feedback paths in hearing aids,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, no. 4, pp. EL399–EL404, 2015.
- [37] P. C. Loizou, *Speech enhancement: theory and practice*. CRC press, 2013.
- [38] C. R. C. Nakagawa, S. Nordholm, and W.-Y. Yan, “Dual microphone solution for acoustic feedback cancellation for assistive listening,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process.*, 2012, pp. 149–152.

- [39] A. Varga and H. J. M. Steeneken, “Assessment for automatic speech recognition: II. NOISEX-92: A database and an experiment to study the effect of additive noise on speech recognition systems,” *Speech Commun.*, vol. 12, no. 3, pp. 247–251, 1993.

ACOUSTIC FEEDBACK CANCELLATION IN HEARING AIDS USING AFFINE PROJECTION SIGN ALGORITHM

Abstract: Open-fit hearing aids often experience acoustic feedback, limiting the achievable amplification level and reducing sound quality. The adaptive feedback cancellation method based on the prediction error method (PEM-AFC) is a widely recognized approach to mitigate the adverse effects of acoustic feedback. The APA sign algorithm (APSA) has been successfully applied to network echo cancellation applications. However, the use of these fast adaptive algorithms for acoustic feedback cancellation remains limited due to the inherent correlation between the incoming signal and the loudspeaker signal. To address this challenge, I propose integrating these adaptive algorithms with PEM-AFC with soft-clipping, creating a new method for acoustic feedback cancellation in hearing aids called PEMSC-APSA. Simulation results show that the proposed method is robust against impulsive noise, achieving higher convergence and tracking rate while maintaining similar steady-state errors compared to advanced competing methods.

Keywords: acoustic feedback cancellation, adaptive filter, PEMSC-AFC, PEMSC-APSA.



Trần Thị Thục Linh tốt nghiệp đại học ngành Điện tử-Viễn thông tại Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 1999, thạc sĩ ngành Truyền thông số tại Đại học tổng hợp Kiel, CHLB Đức năm 2005, và tiến sĩ ngành Kỹ thuật điện và máy tính tại Đại học Curtin, Perth, Úc năm 2018. Từ năm 2019 đến 2020 cô ấy là nghiên cứu sinh sau tiến sĩ tại Đại học Công nghệ Nanyang, Singapore. Hiện tại cô ấy là giảng viên tại Khoa Kỹ thuật điện tử 1 thuộc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Hướng nghiên cứu chính bao gồm xử lý tín hiệu âm thanh và tiếng nói, loại bỏ phản hồi âm thanh, đặc biệt là cho các ứng dụng liên quan đến máy trợ thính.