

FILTER PENGHAPUS NOISE UNTUK PEMROSESAN SUARA MANUSIA DENGAN ALGORITMA LMS, NLMS DAN AFA

Wahyu Adi Prijono

Abstrak: Pada lingkungan dengan karakteristik noise tidak diketahui, filter fixed sulit menjadi optimum. Untuk mengatasi hal tersebut digunakanlah filter adaptif. Filter adaptif memiliki kemampuan untuk menyesuaikan sendiri koefisien filternya sehingga untuk mendesainnya membutuhkan sedikit pengetahuan tentang karakteristik noise dan sinyal asli. Dalam Penelitian ini akan dibahas mengenai penghapusan noise dengan filter adaptif menggunakan algoritma LMS, NLMS dan AFA. Tujuan dari penyusunan Penelitian ini adalah mengkaji proses penghapusan noise pada sinyal suara manusia dan membandingkan performansi algoritma-algoritma adaptif LMS, NLMS dan AFA. Untuk pembahasan dari Penelitian ini dilakukan analisis terhadap misadjustment, SNR, perubahan daya, kecepatan konvergensi, dan kompleksitas perhitungan. noise yang digunakan adalah kipas angin pendingin komputer. Misadjustment untuk algoritma LMS dan NLMS bernilai 0.06 sedangkan AFA bernilai 0.05. Dengan SNR input -17,804 dB untuk LMS menghasilkan SNR output 3,619 dB, NLMS -1,563 dB dan AFA 4,535 dB. Perubahan daya berbanding lurus dengan SNR semakin tinggi SNR perubahan daya juga semakin tinggi. Untuk algoritma AFA konvergensi dicapai pada iterasi ke 30, LMS iterasi ke 500 sedangkan NLMS iterasi ke 4000. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan konvergensi AFA adalah yang tertinggi, disamping itu AFA relatif tidak terpengaruh oleh perubahan amplitudo input. Kompleksitas perhitungan merupakan jumlah operasi matematika (dalam hal ini yang digunakan operasi perkalian) yang diperlukan oleh suatu algoritma dalam sekali iterasi. Berdasarkan kompleksitas perhitungan algoritma LMS merupakan algoritma yang paling sederhana.

Kata kunci: Filter adaptif, algoritma LMS, NLMS, dan AFA

Kehadiran *noise* dalam aplikasi pemrosesan suara manusia tidak dapat dihindarkan. Sistem yang bekerja dengan baik dalam kondisi bebas *noise* biasanya menunjukkan penurunan performansi ketika terdapat noise di dalamnya.

Inti permasalahan dari proses pengurangan *noise* ini adalah pada sebagian kondisi, karakteristik *noise* tidak diketahui dan bahkan berubah terhadap waktu. Hal ini menyebabkan penggunaan filter *fixed* tidak akan efektif dalam penghapusan noise. Oleh karena itu penggunaan aplikasi filter adaptif untuk penghapusan *noise* (*noise cancelation*) digunakan secara luas.

Pada sistem penghapusan noise ini digunakan filter adaptif linier dengan respon impuls terbatas (FIR). Keuntungannya adalah analisis sederhana dari sistem linier dalam proses adaptasi dan jaminan stabilitas dari struktur FIR. Sebagai inputnya, digunakan dua buah mikropon yaitu referensi dan primer.

Penggunaan umum algoritma adaptif untuk sistem ini adalah *Least Mean Squares* (LMS) dan *Normalized Least Mean Squares* (NLMS). Akan tetapi untuk aplikasi dimana kecepatan konvergensi dibutuhkan, maka algoritma LMS tidak lagi aplikatif. Untuk itu diperkenalkanlah algoritma baru yang didasarkan pada *Adaptive Filtering with Averaging* (AFA).

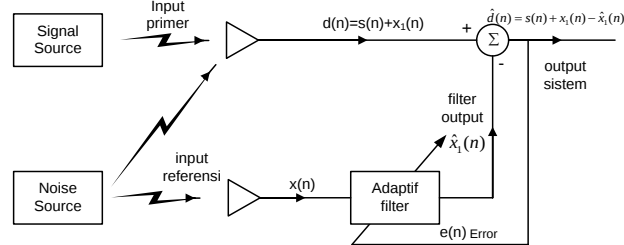
METODE

Adaptive Noise Cancelling

Secara umum filter adaptif terdiri atas dua unit utama yaitu sebuah filter digital dengan koefisien yang berubah terhadap waktu dan sebuah algoritma adaptif. Filter

digital digunakan untuk membentuk respon yang diinginkan sedangkan algoritma adaptif digunakan untuk meningkatkan performansi sinyal hasil proses *filtering*. Struktur filter ditentukan dan tetap pada saat perancangan sedangkan algoritma adaptif mengatur koefisien filter secara terus-menerus.

Noise canceling adalah sebuah variasi dari proses *filtering* optimal (filter adaptif termasuk di dalamnya) yang memiliki banyak keuntungan dalam beberapa aplikasi. Dasar sistem *noise cancelling* digambarkan pada Gambar 1. Sebuah sinyal ditransmisikan melalui sebuah kanal ke sebuah sensor yang menerima sinyal $s(n) + \text{noise } x_1(n)$ yang tidak berkorelasi (tidak berhubungan) satu sama lain. Kombinasi sinyal dan *noise*, $s(n)+x_1(n)$, membentuk input primer pada *canceler* (sistem adaptif penghapus *noise*). Sensor kedua menerima *noise* $x(n)$ yang tidak berkorelasi dengan sinyal $s(n)$ tetapi berkorelasi dengan *noise* $x_1(n)$. Sensor ini menyediakan input referensi pada *canceler*. *Noise* ini difilter untuk menghasilkan output $\hat{x}_1(n)$ yang mendekati tiruan dari $x_1(n)$. Output ini dikurangkan dari input primer $s(n)+x_1(n)$ untuk menghasilkan output sistem $\hat{d}(n)=s(n)+x_1(n)-\hat{x}_1(n)$.



Gambar 1. Konsep Adaptif Noise Canceling

Sumber: Widrow, Bernard and Samuel D. Stearns. Adaptive Signal Processing.

Pada aplikasi *noise canceling* ini $s(n)$, $x_1(n)$, $x(n)$ dan $\hat{x}_1(n)$ adalah *statistically stationary* dan memiliki *mean nol*, dan $s(n)$ tidak berkorelasi dengan $x_1(n)$ dan $x(n)$, sedangkan $x_1(n)$ dan $x(n)$ berkorelasi. Output sistem pada gambar 1. adalah

$$e(n) = s(n) + x_1(n) - \hat{x}_1(n) \quad (1)$$

Dengan pengkuadratan didapat,

$$e^2(n) = s(n)^2 + (x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2 + 2s(n)(x_1(n) - \hat{x}_1(n)) \quad (2)$$

Dengan mengambil ekspektasi dari kedua sisi persamaan 2 dan menyadari bahwa $s(n)$ tidak berkorelasi dengan $x_1(n)$ dan dengan $\hat{x}_1(n)$, maka

$$\begin{aligned} E[e^2(n)] &= E[s(n)^2] + E[(x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2] + 2E[s(n)(x_1(n) - \hat{x}_1(n))] \\ &= E[s(n)^2] + E[(x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2] \end{aligned} \quad (3)$$

Karena daya sinyal $E[s^2]$ tidak akan terpengaruh apabila filter diatur untuk meminimalkan $E[(x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2]$, maka daya output minimum adalah

$$E_{\min}[e^2(n)] = E[s(n)^2] + E_{\min}[(x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2] \quad (4)$$

Jika filter diatur sehingga $E(e^2(n))$ minimal, maka $E[(x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2]$ juga akan minimal dan output filter $\hat{x}_1(n)$ merupakan sebuah pendekatan terbaik dari *noise* primer $x_1(n)$. Pengaturan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan algoritma adaptif. Untuk hasil yang sempurna daya output total sistem haruslah terkecil yaitu $E(e^2(n))_{\min} = E[s^2(n)]$ yang dicapai apabila $E[(x_1(n) - \hat{x}_1(n))^2] = 0$. Oleh karena itu $x_1(n) = \hat{x}_1(n)$ dan $e(n) = s(n)$, dengan kata lain meminimalkan daya output total akan memaksimalkan *signal to noise ratio* (SNR) output.

Algoritma Adaptif

Kebanyakan algoritma adaptif merupakan pendekatan dari filter Wiener dan digunakan untuk mencari nilai koefisien optimum. Ketiga algoritma yang dibahas hanya berbeda dalam hal update koefisien sedangkan pencarian output sistim dan lainnya sama.

Proses pencarian koefisien filter optimum:

- Membaca data input $x(n)$ dan $d(n)$.
- Menetapkan *step size* μ
- Menetapkan jumlah koefisien filter N
- Pada waktu n , koefisien filter $w(n)$ ditetapkan sebesar 0
- Menghitung output filter $\hat{x}_1(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n) x(n-i) = w'(n) x(n) = x'(n) w(n)$
- Menghitung *error* pendekatan $e(n) = d(n) - \hat{x}_1(n)$
- Update Koefisien
 - a. LMS (*Least Mean Square*)

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n)$$
 - b. NLMS (*Normalized Least Mean Square*)

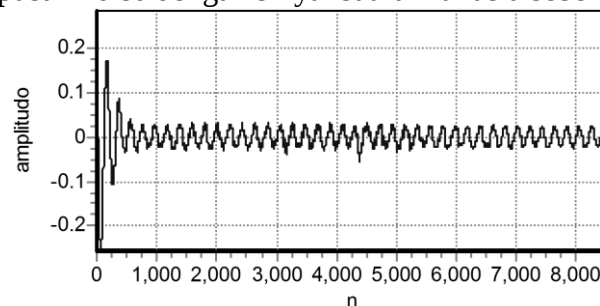
$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\|x(n)\|^2 + c} e(n)x(n)$$
 - c. AFA (*Adaptive Filtering with Averaging*)

$$\bar{w}(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n w(k)$$

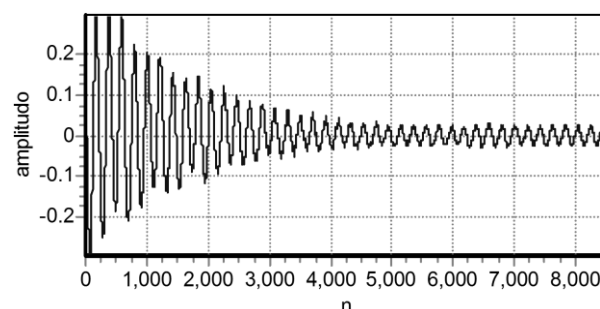
HASIL DAN PEMBAHASAN

Misadjustment

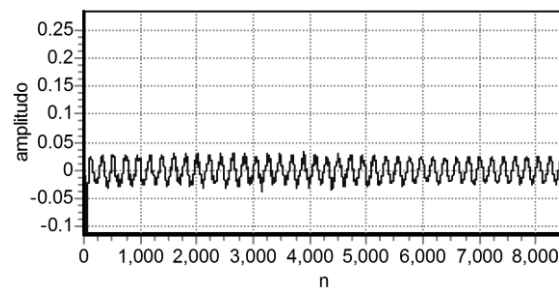
Misadjustment merupakan perbedaan sinyal suara manusia sebelum dicampur *noise* dengan sinyal hasil penghapusan *noise*. Pengujiannya dilakukan dengan mengurangi sinyal hasil penghapusan *noise* dengan sinyal suara manusia sebelum dicampur *noise*.



Gambar 2. Misadjustment dengan LMS step size 0.01 jumlah koefisien 3
Sumber: Hasil Simulasi



Gambar 3. Misadjustment dengan NLMS step size 0.0002 jumlah koefisien 3
Sumber: Hasil Simulasi



Gambar 4. Misadjustment dengan AFA step size 0.7 jumlah koefisien 3

Sumber: Hasil Simulasi

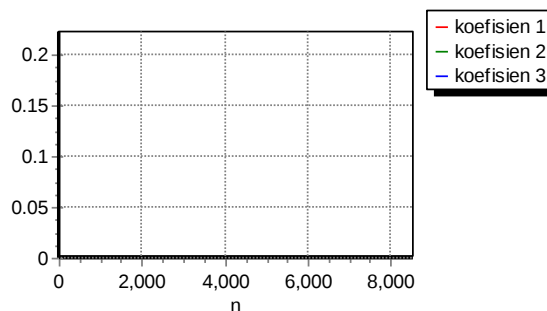
Berdasarkan Gambar 2, 3 dan 4 dapat dilihat bahwa *Misadjustment* setelah konvergen mencapai amplitudo 0.06 untuk LMS dan NLMS sedangkan untuk AFA mencapai 0.05. Untuk algoritma ketiga algoritma pada bagian dimana sinyal input besar, *misadjustment*nya tidak mulus.

Pada kasus amplitudo sinyal suara manusia diperbesar dua kali, untuk algoritma LMS dan NLMS titik-titik awal misadjustment yang tidak mulus semakin tidak mulus. Sedangkan untuk AFA lebih sedikit terpengaruh. Untuk amplitudo *noise* yang diperbesar, nilai *misadjustment* semakin besar.

Untuk *step size* yang diperkecil untuk algoritma LMS dan NLMS menghasilkan kecepatan konvergensi yang lebih lambat, akan tetapi titik-titik dimana *misadjustment* tidak mulus menjadi semakin mulus. Sedangkan untuk algoritma AFA menghasilkan kecepatan konvergensi yang lebih cepat (hampir langsung konvergen) tetapi titik-titik dimana misadjustment tidak mulus menjadi semakin tidak mulus.

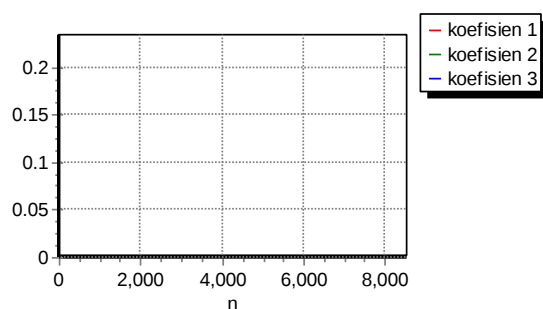
Untuk jumlah koefisien yang semakin banyak maka kecepatan konvergensi lebih lambat akan tetapi lebih perubahan nilai koefisien lebih halus.

4.1 Koefisien Filter



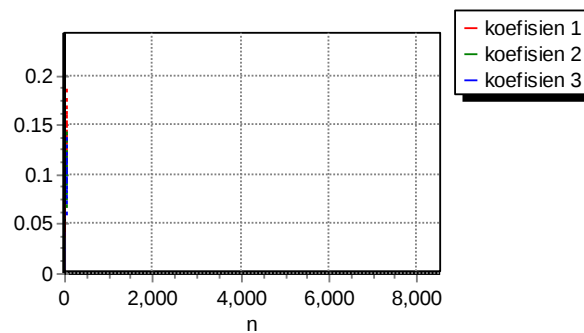
Gambar 5. Koefisien Filter dengan LMS step size 0.01 jumlah koefisien 3

Sumber: Hasil Simulasi



Gambar 6. Koefisien Filter dengan NLMS step size 0.0002 jumlah koefisien 3

Sumber: Hasil Simulasi



Gambar 7. Koefisien Filter dengan AFA step size 0.7 jumlah koefisien 3
Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 5, 6, dan 7 dapat dilihat bahwa dari ketiga algoritma, AFA memiliki kecepatan konvergensi yang paling cepat. Pada ketiganya terjadi *ripple* pada titik-titik dimana nilai amplitudo *desired* input besar. Untuk algoritma LMS dan AFA memiliki banyak *ripple* sedangkan untuk NLMS memiliki *ripple* yang lebih sedikit. *Ripple* ini mempengaruhi misadjustment, yaitu untuk *ripple* yang semakin banyak menghasilkan misadjustment yang lebih tidak mulus sedangkan amplitudo *ripple* menyatakan besar kecilnya amplitudo misadjustment. Semakin besar amplitudo *ripple* maka semakin besar pula misadjustment.

Pada kasus amplitudo sinyal suara manusia diperbesar dua kali, maka *ripple* untuk ketiga algoritma makin banyak dan besar. Sedangkan untuk amplitudo *noise* yang diperbesar besar dan banyaknya *ripple* tidak begitu terpengaruh. Semua hal tersebut berkaitan dengan proses penjejakkan koefisien.

Untuk step size yang diperkecil untuk algoritma LMS dan NLMS menghasilkan koefisien filter yang lebih lama mencapai konvergen. Sedangkan untuk algoritma AFA menghasilkan koefisien filter yang lebih cepat konvergen Untuk jumlah koefisien yang semakin banyak maka kecepatan konvergensi koefisien lebih lambat.

Signal To Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan daya sinyal dengan daya *noise*. Dalam Penelitian SNR input merupakan perbandingan daya sinyal suara manusia dengan daya sinyal *noise*. Sedangkan SNR output merupakan perbandingan daya sinyal suara manusia dengan daya sinyal *noise* setelah proses penghapusan *noise*. Sinyal *noise* setelah proses penghapusan *noise* didapat dengan mengurangi sinyal hasil *noise* cancelation dengan sinyal suara manusia (*misadjustment*). Berikut ini adalah hasil perhitungan SNR dengan suara manusia a adalah suara manusia dan noise b adalah noise. 2a artinya adalah suara manusia dikuatkan 2 kali.

Tabel 1. Signal To Noise Ratio Input

Kondisi	SNR Total (dB)
Speech a dan Noise b	-152.137,756
Speech 2a dan Noise b	-100.721,841
Speech a dan Noise 2b	-182.212,628

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 2, 3, dan 4 dapat dilihat bahwa SNR output mengalami peningkatan dari SNR input. Dapat dilihat pula bahwa nilai SNR AFA adalah yang lebih besar dibandingkan yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa performansi AFA lebih baik dari algoritma yang lain dalam proses penghapusan *noise*.

Pada kasus amplitudo sinyal suara manusia diperbesar dua kali, nilai SNR dari sinyal meningkat. Baik itu SNR input maupun SNR output. Sedangkan pada kasus amplitudo *noise* diperbesar menghasilkan SNR yang lebih kecil. Baik itu SNR input maupun SNR output.

Tabel 2. Signal To Noise Ratio Output dengan LMS

Kondisi	SNR Total (dB)
Speech a, noise b, stepsize 0.8, koef 3	37.592,71
Speech a, noise b, stepsize 0.7, koef 3	38.750,097
Speech a, noise b, stepsize 0.5, koef 3	39.456,15
Speech 2a, noise b, stepsize 0.7, koef 3	88.956,052
Speech a, noise 2b, stepsize 0.7, koef 3	13.141,337
Speech a, noise b, stepsize 0.7, koef 5	16.323,749
Speech a, noise b, stepsize 0.7, koef 8	4.356,449

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 3. Signal To Noise Ratio Output dengan NLMS

Kondisi	SNR Total (dB)
Speech a, noise b, stepsize 0.0005, koef 3	15.466,921
Speech a, noise b, stepsize 0.0002, koef 3	-13.920,205
Speech a, noise b, stepsize 0.0001, koef 3	-59.249,269
Speech 2a, noise b, stepsize 0.0002, koef 3	34.480,636
Speech a, noise 2b, stepsize 0.0002, koef 3	-38.312,007
Speech a, noise b, stepsize 0.0002, koef 5	-12.336,175
Speech a, noise b, stepsize 0.0002, koef 8	-21.347,217

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4. Signal To Noise Ratio Output dengan AFA

Kondisi	SNR Total (dB)
Speech a, noise b, stepsize 0.02, koef 3	32.594,303
Speech a, noise b, stepsize 0.01, koef 3	30.920,205
Speech a, noise b, stepsize 0.008, koef 3	29.379,261
Speech 2a, noise b, stepsize 0.01, koef 3	78.513,898
Speech a, noise 2b, stepsize 0.01, koef 3	5.400,598
Speech a, noise b, stepsize 0.01, koef 5	12.987,364
Speech a, noise b, stepsize 0.01, koef 8	1.837,55

Sumber: Hasil Perhitungan

Untuk step size yang diperkecil untuk algoritma LMS dan NLMS menghasilkan SNR output yang semakin kecil. Hal ini dikarenakan kecepatan konvergensi yang semakin lambat. Sedangkan untuk algoritma AFA menghasilkan SNR output yang semakin tinggi. Hal ini dikarenakan kecepatan konvergensi AFA semakin besar.

Untuk jumlah koefisien yang semakin banyak menghasilkan SNR output yang semakin kecil. Hal ini disebabkan semakin banyaknya jumlah maka kecepatan konvergensi semakin lambat.

Kecepatan Konvergensi

Kecepatan konvergensi merupakan jumlah iterasi yang dibutuhkan suatu algoritma untuk konvergen. Dalam Penelitian ini pembahasan mengenai kecepatan konvergensi adalah sebagai perbandingan antara ketiganya. Untuk perbandingan kecepatan konvergensi, masing-masing algoritma diuji pada kondisi yang paling baik yaitu dengan

mengatur *step size* secara tepat agar dicapai konvergensi yang paling cepat dengan tetap memperhatikan *misadjustment*-nya. Oleh karena itu masing-masing algoritma memiliki besar *step size* yang sangat mungkin untuk berbeda.

Berdasarkan Gambar 2, 3, dan 4. tentang *misadjustment* dapat diketahui bahwa algoritma AFA konvergen pada iterasi ke 30, LMS iterasi ke 500 sedangkan NLMS iterasi ke 4000. Sehingga dapat disimpulkan bahwa AFA merupakan algoritma yang memiliki kecepatan konvergensi paling cepat kemudian diikuti oleh LMS dan terakhir NLMS.

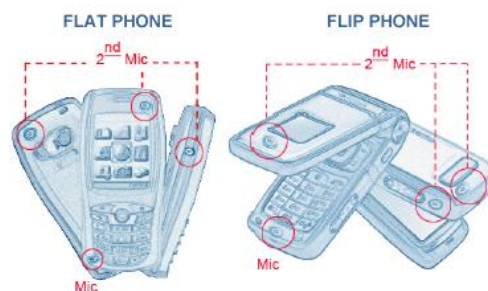
Untuk jumlah koefisien, semakin banyak jumlah koefisien maka kecepatan konvergensi semakin berkurang. Sedangkan untuk besar *step size*, semakin besar *step size* untuk algoritma LMS dan NLMS menghasilkan kecepatan konvergensi yang semakin cepat tetapi untuk algoritma AFA semakin besar *step size* maka kecepatan konvergensi semakin lambat.

Aplikasi

Pada dasarnya penggunaan algoritma ini bisa saling menggantikan. Algoritma LMS dipakai secara luas di beberapa aplikasi dan kemudian algoritma NLMS dan AFA mengikutinya (NLMS dan AFA diteliti berdasarkan algoritma LMS). Jadi pada aplikasi *noise canceling* yang menggunakan algoritma LMS maka dapat juga menggunakan algoritma NLMS dan AFA.

Contoh aplikasi dari Penelitian ini adalah untuk *mobile noise canceller*. Pada *mobile noise canceller* ini menggunakan 2 macam mikropon (seperti halnya konsep *adaptive noise cancelling*), mikropon pertama membawa suara manusia dengan *background noise* sedangkan mikropon kedua membawa *noise* saja.

Mikropon pertama diletakkan didekat mulut pengguna, sedangkan mikropon kedua harus diletakkan jauh dari mulut pengguna untuk menghindari kemungkinan menerima suara pengguna dan juga diletakkan jauh dari kemungkinan ditutupi oleh tangan pengguna.



Gambar 8. *Mobile Noise Canceler*

Sumber: http://www.spiritedsp.com/noise_cancellation.html

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi Penelitian ini dapat disimpulkan:

- Struktur filter yang digunakan oleh ketiga algoritma adalah transversal.
- Proses penghapusan *noise* untuk ketiga algoritma secara umum sama, yang membedakan diantara ketiganya adalah proses *update* atau penjejak koefisiennya.
- Performansi algoritma diuji dengan *misadjustment*, SNR, perubahan daya, kecepatan konvergensi dan kompleksitas perhitungan.
- Ketiga algoritma memiliki nilai *misadjustment* yang hampir sama pada kondisi yang paling baik.

- Perubahan amplitudo *speech* mempengaruhi *misadjustment* LMS dan NLMS sedangkan AFA lebih sedikit terpengaruh perubahan amplitudo *speech*. Sedangkan perubahan amplitudo *noise* meningkatkan *misadjustment* ketiga algoritma tersebut.
- SNR output dari ketiga algoritma menunjukkan bahwa algoritma AFA memiliki SNR output yang paling besar.
- Untuk amplitudo *noise* yang semakin besar maka SNR input maupun output semakin kecil. Untuk amplitudo *speech* yang semakin besar maka SNR input dan output semakin besar pula.
- Perubahan daya berbanding lurus dengan SNR, yaitu semakin besar SNR maka perubahan daya semakin besar pula dan sebaliknya.
- Semakin kecil *step size* maka kecepatan konvergensi semakin lambat untuk algoritma LMS dan NLMS sedangkan AFA semakin cepat.
- Untuk ketiga algoritma semakin banyak jumlah koefisien maka kecepatan konvergensinya akan semakin lambat.
- Semakin lambat kecepatan konvergensi suatu algoritma maka akan menghasilkan *misadjustment* yang semakin mulus.
- Dari ketiga algoritma, algoritma LMS adalah yang paling sederhana.
- Secara umum untuk pemilihan *step size* yang tepat dan jumlah koefisien serta panjang sample yang sama, maka diantara ketiga algoritma tersebut algoritma AFA adalah algoritma yang memiliki performansi paling bagus.

SARAN

Setelah melakukan penelitian ini maka dapat disarankan untuk pengembangan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Untuk mendapatkan performansi sinyal hasil penghapusan *noise* yang lebih bagus dapat digunakan algoritma RLS atau Modified AFA akan tetapi kompleksitas perhitungan kedua algoritma tersebut lebih tinggi.
- Menggunakan Algoritma yang dibahas untuk aplikasi lain seperti *Canceled Donor-Heart Interference In Heart-Transplant Electrocardiography*.

DAFTAR PUSTAKA

- Iliev, G. and Kasabov, N. 1999. *Adaptive filtering with averaging in noise cancellation for voice and speech recognition*, ICONIP/ANZIIS/ANNES'99 Workshop, Dunedin, New Zealand, November 22-24, 71-75.
- Hayes, Monson H. 1996. *Statistical Digital Signal Processing and Modelling*. New York: John Wiley & Sons, inc.
- Widrow, Bernard and Samuel D. Stearns. 1985. *Adaptive Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Iliev, G. and Kasabov, N. 1999. *Adaptive blind noise suppression in some speech processing applications*, 6th Intern. Conference on Neural Information Processing (ICONIP'99), Perth, Australia, 192-197.
- S. Haykin, 1994. *Adaptive Filters Theory*, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs
- Sen M. Kuo, Woon-Seng Gan, 2003. *Digital Signal Processors Architecture, Implementation and Application*. New Jersey : Prentice Hall
- Chai Sze Chiang, *Adaptive Noise Cancellation using a hybrid algorithm*. 2003

- Vijayakumar, V.R., P.T. Vanathi, P. Kanagasabapathy and L. Deivasigamani. *Modified AFA Algorithm for Noise Cancellation in Speech Signal*. Proceedings of the International Conference on Cognition and Recognition.
- Bose Tamal, 1994. *Digital Signal and Image Processing*. Singapore: John Willey and Sons, Inc
- J. Orfanidis Sophocles. 1990. *Optimum Signal Processing*. Singapore: McGrawHill International Editions.
- Prijono, Wahyu Adi. 2005. *Pemrosesan Sinyal Digital*. Malang: Universitas Brawijaya. Diktat Kuliah
- Mustofa, Ali. 2001. *Identifikasi Speaker dengan Metode Constructive Backpropagation*. Tesis.
- Wajdy, Jauhar. 2003. *Perbandingan Antara Tapis IIR Adaptif Bentuk Lattice Cascade dan Bentuk Direct Dalam Hal Kestabilan dan Kecepatan Konvergensi*. Penelitian
- Hsu, Hwe P. 1993. *Analog And Digital Communications*. Singapore: McGraw-Hill International Editions.