

Pengembangan Metoda Estimasi Frekuensi dari Digitized Waveform Berdasarkan Metoda *Zero-Crossing*

Eko Satria^{1,a)}, Mitra Djamal^{1,b)}

¹Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi,
Kelompok Keilmuan Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

a) ekosatria004@gmail.com

b) mitra.djamal@yahoo.co.id

Abstrak

Sistem estimasi frekuensi berdasarkan metoda zero-crossing telah dikembangkan untuk mengestimasi frekuensi dari suatu digitized waveform. Metoda estimasi frekuensi yang sering digunakan secara konvensional untuk mengestimasi frekuensi dari suatu digitized waveform adalah metoda Fast Fourier Transform (FFT) dan metoda Instant Zero-Crossing. Namun untuk keperluan pengukuran yang membutuhkan akurasi dan ketahanan yang tinggi terhadap noise, seperti pengukuran dengan menggunakan sistem interferometer optik, metoda ini tidak memadai, sehingga dibutuhkan suatu metoda untuk mengestimasi frekuensi dari suatu digitized waveform dengan akurasi tinggi meski dengan adanya noise pada waveform tersebut. Dalam penelitian ini, pengembangan sistem estimasi frekuensi berdasarkan zero-crossing telah dilakukan dan keunggulannya dibandingkan dengan metoda FFT dan Instant Zero-Crossing akan ditunjukkan.

Kata-kata kunci: digitized waveform, estimasi frekuensi, fast fourier transform, zero crossing

PENDAHULUAN

Estimasi frekuensi dengan resolusi dan *sample rate* yang tinggi dari suatu sinyal dengan *White Gaussian Noise* adalah masalah mendasar dalam pemrosesan sinyal dan komunikasi. Berbagai aplikasi dari estimasi frekuensi ini seperti sinyal pada sistem komunikasi [1] - [4], penentuan posisi objek dalam sistem radar dan sonar [5] - [10], perkiraan denyut jantung janin dalam biomedis [11], [12], dan sistem distribusi komunikasi [13]. Terlepas dari aplikasinya, estimasi frekuensi yang tidak tepat akan menyebabkan masalah. Sebagai contoh, dalam sistem komunikasi, dengan estimasi frekuensi pembawa yang buruk, *down-converter* mungkin tidak dapat melakukan demodulasi sinyal *pass band* ke *baseband*. Dalam sistem antena, estimator fase yang buruk dapat menyebabkan sistem gagal mengidentifikasi arah kedatangan sinyal [14], [15].

Di bidang pengukuran mekanis dengan presisi tinggi menggunakan interferometer optik, diperlukan pengukuran pergeseran frekuensi *Doppler* pada *port output* interferometer [16] - [23]. Biasanya, penghitung frekuensi elektronik, yaitu konverter analog-ke digital berkecepatan tinggi, digunakan untuk mengukur pergeseran frekuensi *Doppler*. Namun, kinerja penghitung yang tersedia secara komersial terkadang tidak cukup untuk mengukur frekuensi dengan tingkat resolusi dan *sampling rate* yang cukup tinggi. Alih-alih penghitung frekuensi elektronik, *digitizer* kecepatan tinggi digunakan untuk merekam keseluruhan profil gelombang dan frekuensinya dihitung dari profil gelombang yang ditangkap. Metoda estimasi frekuensi yang sering digunakan secara konvensional untuk mengestimasi frekuensi dari suatu *digitized waveform* adalah metoda estimasi frekuensi *Fast Fourier Transform* (FFT), namun untuk keperluan pengukuran yang membutuhkan akurasi dan ketahanan yang tinggi terhadap *noise*, metoda FFT tidak memadai.

Metoda lain yang digunakan untuk mengestimasi frekuensi dari *digitized waveform* yaitu pengukuran periode dengan menghitung interval waktu dari dua buah *zero-crossing* yang berdekatan, yang memberikan informasi periode waveform tersebut, kemudian frekuensi dapat dihitung [24]. Metoda ini akurat untuk sinyal bebas *noise*. Namun, bila tingkat *noise*-nya tinggi, penghitungan akan menghasilkan estimasi frekuensi yang salah.

Berfokus pada masalah ini, pada penelitian ini dikembangkan teknik estimasi frekuensi berbasis *zero-crossing* untuk mengestimasi frekuensi dari suatu *digitized waveform*. Untuk menunjukkan karakteristik kinerja dari metoda yang dikembangkan, maka metoda yang dikembangkan dibandingkan dengan estimasi frekuensi berbasis FTT dan metoda *instant zero-crossing*.

METODA YANG DIKEMBANGKAN

Pendeteksian *zero-crossing* merupakan metoda yang umum yang digunakan untuk menghitung frekuensi atau periode dari suatu sinyal. Saat mengukur frekuensi sinyal, biasanya jumlah siklus sinyal referensi diukur selama satu atau lebih periode waktu dari sinyal yang diukur. Frekuensi didapatkan dengan menentukan titik *zero-crossing* dan waktu *zero-crossing*. Pendeteksian *zero-crossing* dilakukan dengan pendekatan interpolasi linier dari 2 titik di sekitar sumbu x dimana nilai sinyal berubah dari negatif ke positif. Jarak antara 2 titik *zero-crossing* yang berdekatan sama dengan satu periode gelombang, sehingga dengan mengetahui titik *zero-crossing* dan waktu *zero-crossing*, maka frekuensi dapat ditentukan. Perhitungan frekuensi dengan beberapa periode akan membantu dalam memperkecil eror yang disebabkan oleh *noise* fasa.

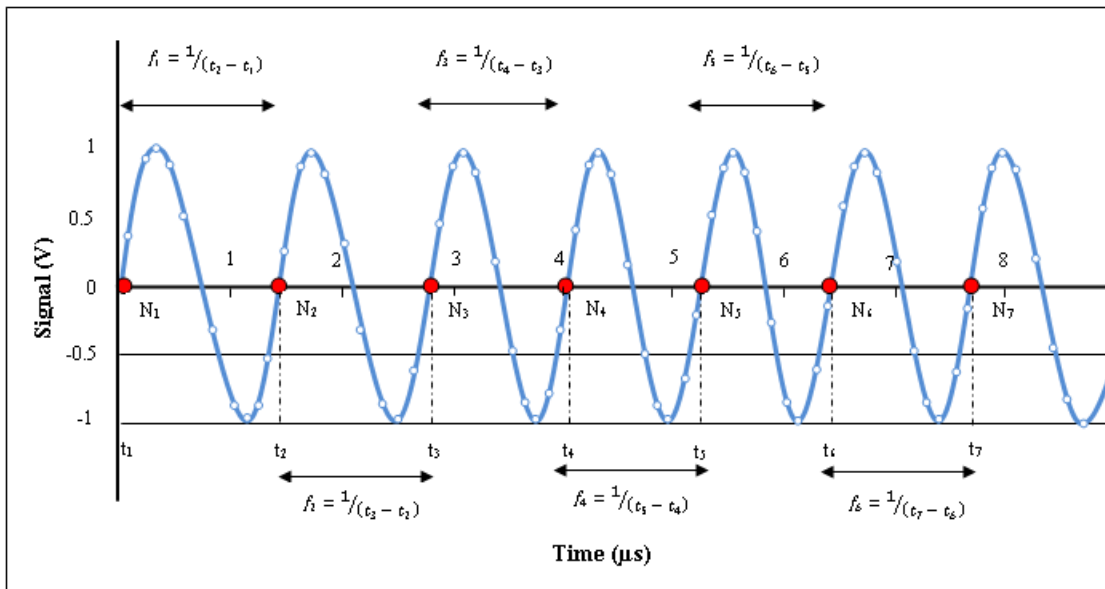
Pada gambar 1. titik merah pada grafik adalah titik *zero-crossing*, N (1,2,3, dst) menunjukkan *zero-crossing* (1,2,3, dst) dan t (1,2,3, dst) adalah waktu *zero-crossing* untuk setiap *zero-crossing*. Pada metoda *zero-crossing* ini, frekuensi dapat dihitung menggunakan data waktu *zero-crossing* yang didapatkan, frekuensi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$f_1 = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \tag{1}$$

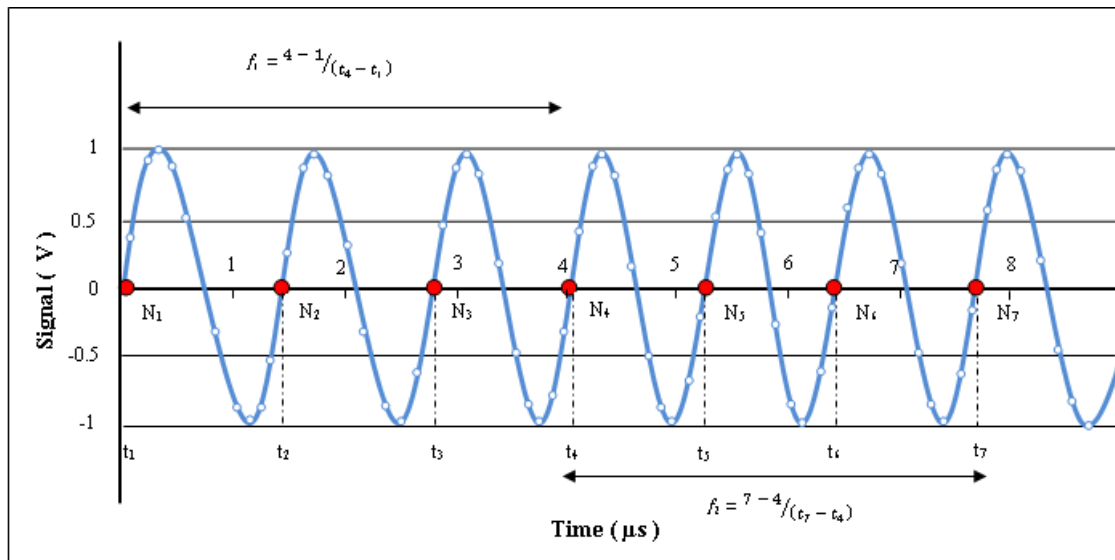
$$f_2 = \frac{1}{(t_3 - t_2)} \tag{2}$$

$$f_3 = \frac{1}{(t_4 - t_3)} \tag{3}$$

Pada estimasi frekuensi dengan menggunakan metoda *zero-crossing*, hanya informasi dari *zero-crossing* pertama dan terakhir yang digunakan, sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 1. Algoritma estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing*



Gambar 2. Estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* dengan beberapa perioda (3 perioda)

Frekuensi f_1 dan f_2 dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$f_1 = \frac{4-1}{(t_4-t_1)} \tag{4}$$

$$f_2 = \frac{7-4}{(t_7-t_4)} \tag{5}$$

Pada perhitungan ini, hanya informasi *zero-crossing* pertama dan terakhir (dengan *range* tertentu) yang digunakan dalam perhitungan (N_1 dan N_4 ; N_4 dan N_7) dengan waktu *zero-crossing* (t_1 dan t_4 ; t_4 dan t_7) tanpa memperhatikan informasi *zero-crossing* antara dua buah *zero-crossing* yang digunakan untuk menghitung frekuensi.

Pada pengukuran, hadirnya *noise* yang menyebabkan kesalahan dalam pengukuran tidak bisa dihindari. Pada penelitian yang dilakukan, dikembangkan suatu metoda estimasi frekuensi yang dioptimasi untuk mengurangi *noise*, sehingga estimasi frekuensi dapat lebih akurat. Prinsip yang digunakan hampir sama dengan metoda perata-rataan untuk mengurangi *noise*. Pada metoda yang dikembangkan, *digitized waveform* yang telah ditentukan *zero-crossing*-nya dipecah dan dikelompokkan dengan jumlah *zero-crossing* tertentu.

Sepintas algoritma yang digunakan hampir sama dengan algoritma yang digunakan pada gambar 2, namun berbeda dengan metoda *zero-crossing* yang hanya menggunakan *zero-crossing* pertama dan terakhir, pada metoda yang dikembangkan, semua informasi titik *zero-crossing* dan waktu *zero-crossing* digunakan dalam perhitungan, sehingga kesalahan dapat diminimalisir.

Pada penelitian ini pengestimasi frekuensi dilakukan dengan variasi jumlah *zero-crossing* untuk mengetahui efek dari segmentasi terhadap akurasi dari estimasi frekuensi oleh program yang dikembangkan.

$$f_j = \frac{N^3 - N}{12 \sum_{i=0}^{N-1} it_i + j(N-1) - 6(N-1) \sum_{i=0}^{N-1} t_{i+j}(N-1)} \tag{6}$$

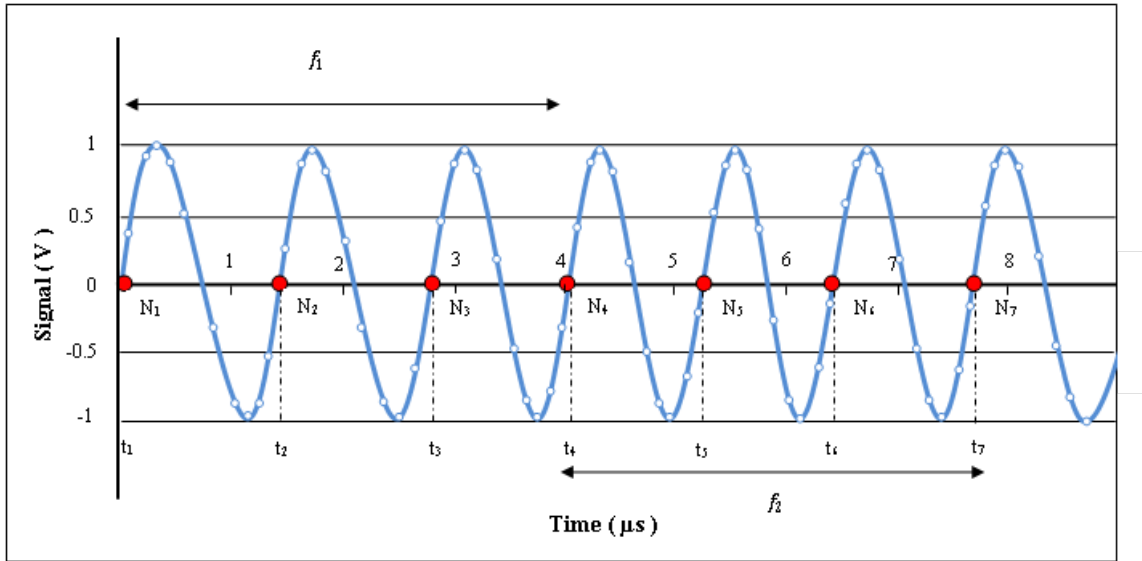
dimana

f_j : Frekuensi ($j=1,2,3$, dst)

N : Jumlah *zero-crossing* untuk segmentasi

t_i : Waktu *zer-crossing* ($i=1,2,3$, dst)

Untuk dapat mengetahui eror dari estimasi frekuensi yang dilakukan oleh program yang dikembangkan, maka sebuah data *waveform* di-generate dengan parameter tertentu. Kemudian data ini diproses dengan menggunakan metoda yang dikembangkan. Eror didapatkan dengan membandingkan frekuensi sebagai hasil estimasi dari metoda yang dikembangkan dengan frekuensi sebenarnya dari data ini. Kemudian untuk mengetahui ketahanan dari metoda yang dikembangkan terhadap *noise* yang ada pada sinyal, maka data yang di-generate tadi ditambahkan dengan *White Gaussian Noise* kemudian frekuensinya diestimasi dengan program yang telah dikembangkan.



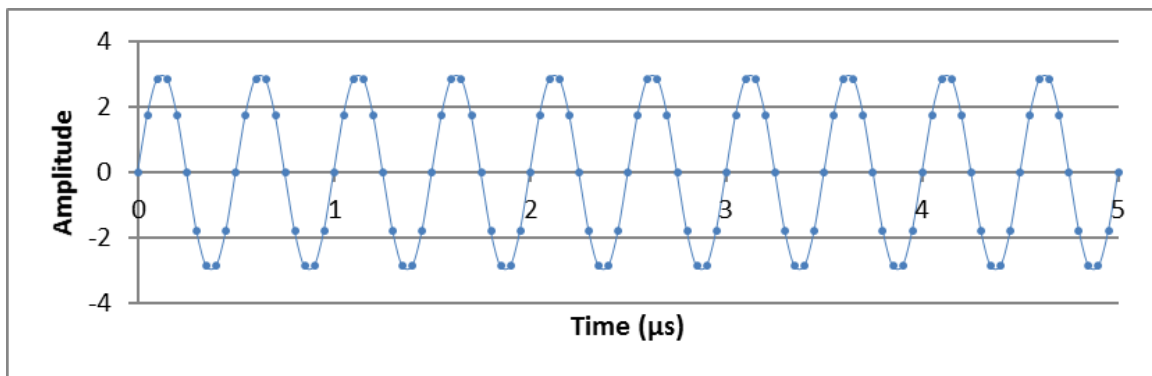
Gambar 3. Algoritma dari metoda yang dikembangkan (contoh N=4)

PENGUJIAN DAN EVALUASI METODA YANG DIKEMBANGKAN

Pengujian dilakukan dengan menggunakan program yang telah dikembangkan untuk mengestimasi frekuensi dari data yang telah di-generate dengan parameter tertentu. Data uji yang digunakan berupa data sinyal sinusoida dengan parameter yang diketahui. Kemudian untuk mengetahui ketahanan program terhadap noise, maka data yang telah di-generate ditambahkan dengan *White Gaussian Noise* dengan level tertentu. Adapun tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut

Data sinusoidal sebagai data uji di-generate.

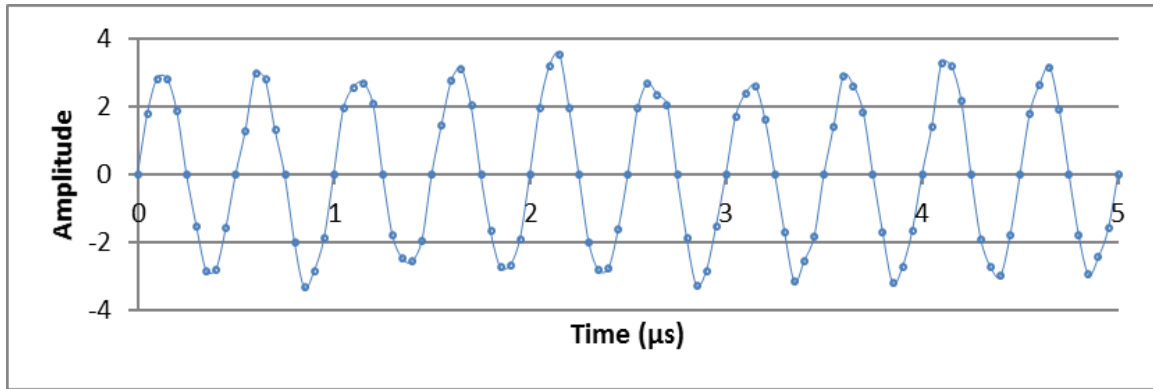
Data uji yang digunakan dalam pengujian program yang dikembangkan adalah data sinyal sinusoida. Sinyal ini di-generate menggunakan bahasa pemrograman *C# Visual Studio*. Sinyal yang di-generate memiliki parameter spesifik dengan *sampling rate* 20 MHz, jumlah data 5.000.000, frekuensi 2 MHz, dan amplitudo 3.



Gambar 4. Data sinusoida sebagai data uji

Penambahan *White Gaussian Noise* pada data sinusoida yang telah di-generate

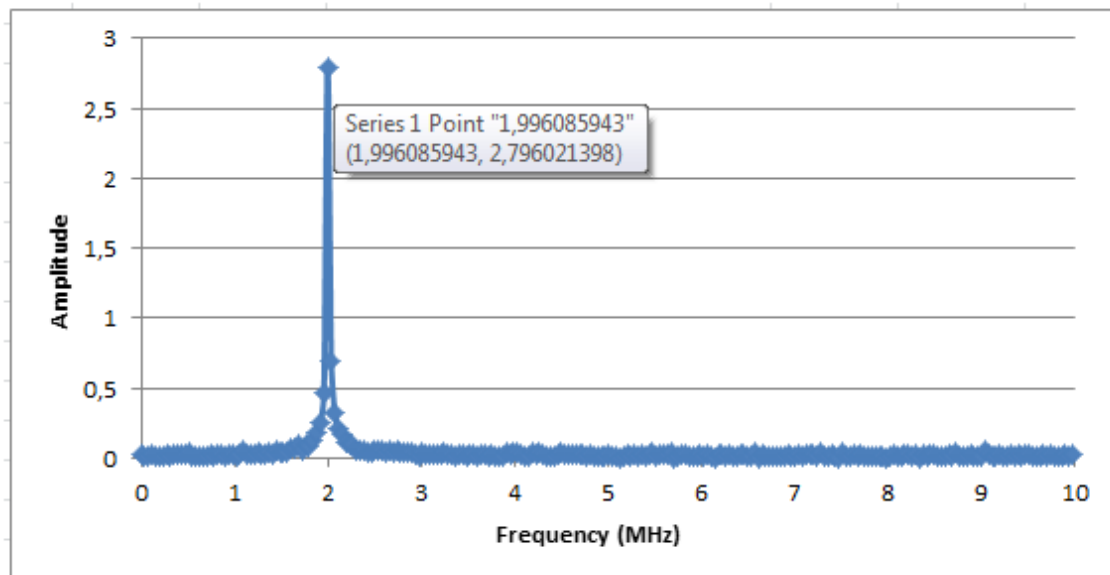
Setelah data sinusoida seperti gambar 4 di-generate, kemudian data ini ditambahkan dengan *White Gaussian Noise* dengan level tertentu (10%). Penambahan *White Gaussian Noise* pada data sinusoida juga dilakukan dengan bahasa pemrograman *C# Visual Studio*.



Gambar 5. Data sinusoida dengan white Gaussian noise

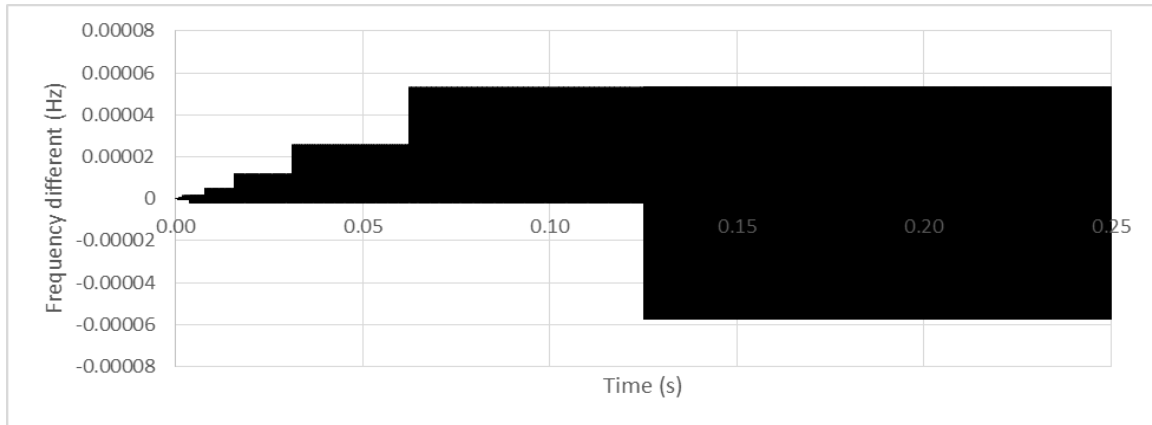
Pengestimasian frekuensi dari data sinusoida pada gambar 5 menggunakan metoda *zero-crossing* yang telah dikembangkan dan dibandingkan dengan metoda estimasi frekuensi FFT dan metoda *instant zero-crossing*.

Tahapan berikutnya adalah pengestimasian frekuensi dari data sinusoida pada gambar 5. Error didapatkan dengan membandingkan perbedaan antara frekuensi hasil estimasi dengan frekuensi sesungguhnya dari data yang diestimasi.



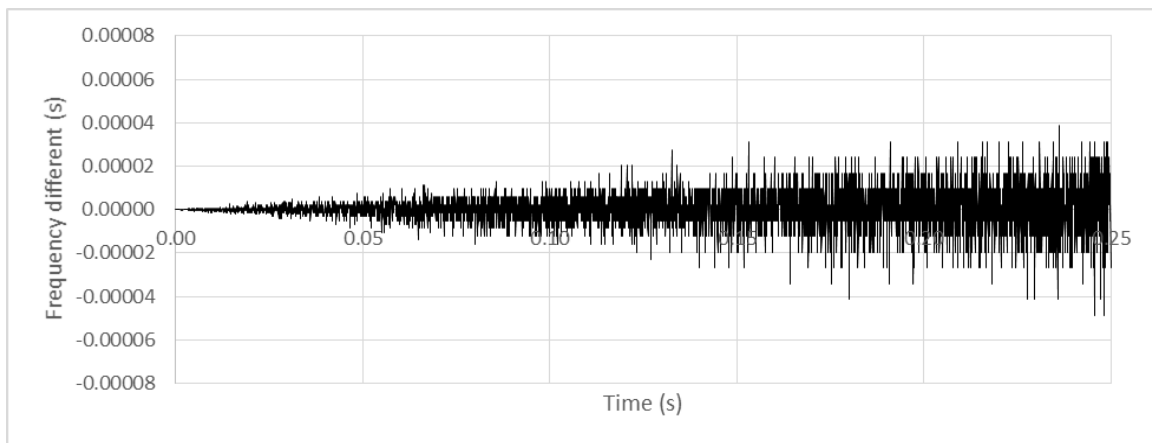
Gambar 6. Hasil estimasi frekuensi menggunakan FFT

Gambar 6 menunjukkan hasil dari estimasi frekuensi dari *digitized waveform* pada gambar 5 menggunakan metoda estimasi frekuensi FFT. FFT adalah metoda yang sering digunakan untuk mengestimasikan frekuensi dari suatu *waveform*. Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya, data yang diestimasi memiliki frekuensi 2 MHz, namun seperti yang terlihat pada gambar 6, hasil estimasi frekuensi menggunakan FFT adalah 1,996 MHz, sehingga estimasi frekuensi menggunakan metoda FFT menghasilkan error 1,95%.



Gambar 7. Grafik perbedaan frekuensi antara frekuensi sebenarnya data uji dengan frekuensi hasil estimasi menggunakan metoda *instant zero-crossing*

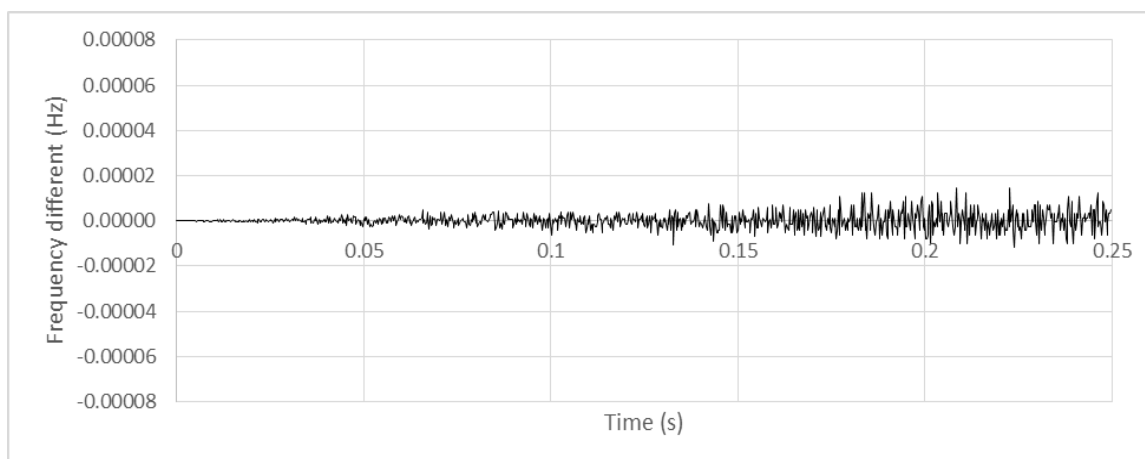
Gambar 7 adalah grafik eror dari estimasi frekuensi menggunakan metoda *instant zero-crossing*. Frekuensi dihitung menggunakan data waktu *zero-crossing* yang didapatkan, kemudian frekuensi dihitung menggunakan persamaan (1-3). Seperti yang terlihat pada gambar 7, hasil estimasi frekuensi menggunakan *instant zero-crossing* tidak stabil. Hal ini dikarenakan pengukuran menggunakan *single period* tidak dapat mengurangi *noise* yang disebabkan oleh *noise* fasa. Eror yang dihasilkan relatif kecil dibandingkan dengan metoda FFT namun tidak stabil, eror yang dihasilkan semakin membesar, sehingga hasil estimasi frekuensi tidak presisi.



Gambar 8. Grafik perbedaan frekuensi antara frekuensi data sinusida sesungguhnya dengan hasil estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan dengan N=100

Gambar 8 dan 9 adalah grafik eror dari estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan. Perbedaan dari metoda pada gambar 8 dan 9 adalah jumlah perioda yang digunakan untuk mengestimasi frekuensi (N=100 untuk gambar 8 dan N=500 untuk gambar 9). Selisih frekuensi terbesar antara frekuensi sesungguhnya dengan frekuensi hasil estimasi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan dengan N=100 adalah $3,86101 \times 10^{-5}$ Hz sehingga eror yang dihasilkan adalah $1,9305 \times 10^{-9}$ %, dan selisih terbesar antara frekuensi sesungguhnya dengan frekuensi hasil estimasi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan dengan N=500 adalah $1,43501 \times 10^{-5}$ Hz sehingga eror yang dihasilkan adalah 7.17503×10^{-10} %. Sebagaimana yang dapat dilihat pada gambar 8 dan 9, eror dari estimasi frekuensi pada gambar 9 lebih kecil dari pada eror estimasi frekuensi pada gambar 8. Sehingga dapat disimpulkan bahwa segmentasi (jumlah N) memberikan efek yang bagus terhadap estimasi frekuensi.

Dari gambar 6-9, dapat dilihat bahwa estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan lebih baik daripada metoda *instant zero-crossing*. Estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan menghasilkan hasil estimasi yang lebih stabil sehingga lebih presisi.



Gambar 9. Grafik perbedaan frekuensi antara frekuensi data sinusoida sesungguhnya dengan hasil estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan dengan $N=500$

KESIMPULAN

Beberapa metoda untuk mengestimasi frekuensi dari *digitized waveform* telah dijelaskan. Estimasi frekuensi menggunakan metoda *zero-crossing* yang dikembangkan terbukti lebih baik dibandingkan dengan metoda estimasi frekuensi menggunakan metoda FFT dan metoda *instant zero-crossing*. Metoda *zero-crossing* yang telah dikembangkan memiliki eror yang sangat kecil ($1,93 \times 10^{-9}$ % untuk $N=100$ dan $7,17503 \times 10^{-10}$ % untuk $N=500$) dan tahan terhadap *noise*, sedangkan metoda FFT menghasilkan eror yang relatif besar (1.95 %) dan tidak tahan terhadap *noise*. *Instant zero-crossing* memiliki nilai eror yang relatif kecil, namun eror menjadi semakin besar, sehingga estimasi frekuensi menggunakan *instant zero-crossing* kurang presisi. Sehingga metoda *zero-crossing* yang dikembangkan sangat baik digunakan untuk mengestimasi frekuensi dari *digitized waveform*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada beasiswa PMDSU dan program PKPI, Kementerian Riset, Teknologi dan Perguruan Tinggi atas dukungan finansialnya pada penelitian ini.

REFERENSI

1. A. A. Syed, Q. Sun, and H. Foroosh, "Frequency estimation of sinusoids from nonuniform samples," *Signal Process.*, vol. 129, pp. 67–81, Dec. 2016.
2. S. T. P. Suárez, C. M. T. González, and J. B. A. Hernández, "Design Methodology of an Equalizer for Unipolar Non Return to Zero Binary Signals in the Presence of Additive White Gaussian Noise Using a Time Delay Neural Network on a Field Programmable Gate Array," *Sensors*, vol. 13, no. 12, pp. 16829–16850, Dec. 2013.
3. S. V. Vaseghi, *Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction*. Springer-Verlag, 2013.
4. A. C. Chan, V. J. Srinivasan, and E. Y. Lam, "Maximum Likelihood Doppler Frequency Estimation Under Decorrelation Noise for Quantifying Flow in Optical Coherence Tomography," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 33, no. 6, pp. 1313–1323, Jun. 2014.
5. C. Tang, B. Lian, and L. Zhang, "Doppler-aided channel estimation in satellite communication base on frequency-domain equalization," in *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), 2013*, 2013, pp. 1–5.
6. T. H. Nguyen *et al.*, "Carrier Frequency Offset Estimation Based on Circular Harmonic Expansion for Optical Coherent M-QAM Communication Systems," in *20th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2015)*, Shanghai, China, 2015, pp. 1–3.

7. E. P. Simon, L. Ros, H. Hijazi, and M. Ghogho, "Joint Carrier Frequency Offset and Channel Estimation for OFDM Systems via the EM Algorithm in the Presence of Very High Mobility," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 2, pp. 754–765, Feb. 2012.
8. Z. Wang, J. Xie, G. Zhou, Z. Ji, and T. Quan, "Real-valued sparse representation for single snapshot direction-of-arrival estimation in shipborne high-frequency surface wave radar," *Sonar Navig. IET Radar*, vol. 9, no. 9, pp. 1314–1322, 2015.
9. R. Cao, X. Zhang, and W. Chen, "Compressed sensing parallel factor analysis-based joint angle and Doppler frequency estimation for monostatic multiple-input multiple-output radar," *Sonar Navig. IET Radar*, vol. 8, no. 6, pp. 597–606, Jul. 2014.
10. J. Guo, W. Zhang, Y. Liu, and L. Fu, "Improving the accuracy of local frequency estimation for interferometric synthetic aperture radar interferogram noise filtering considering large coregistration errors," *Sonar Navig. IET Radar*, vol. 8, no. 6, pp. 676–684, Jul. 2014.
11. I. Voicu *et al.*, "New Estimators and Guidelines for Better Use of Fetal Heart Rate Estimators with Doppler Ultrasound Devices," *Comput. Math. Methods Med.*, vol. 2014, p. e784862, Jan. 2014.
12. D. Casati and M. G. Frasch, "Analysis of fetal heart rate variability in frequency domain: methodical considerations," *Exp. Physiol.*, vol. 99, no. 2, pp. 466–467, Feb. 2014.
13. F. Quitin, M. M. U. Rahman, R. Mudumbai, and U. Madhow, "Distributed beamforming with software-defined radios: Frequency synchronization and digital feedback," in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2012, pp. 4787–4792.
14. C. W. R. Chiong, Y. Rong, and Y. Xiang, "Channel Estimation for Two-Way MIMO Relay Systems in Frequency-Selective Fading Environments," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 399–409, Jan. 2015.
15. W. Zhang and Q. Yin, "Blind Maximum Likelihood Carrier Frequency Offset Estimation for OFDM With Multi-Antenna Receiver," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 9, pp. 2295–2307, May 2013.
16. Y. Fujii, H. Nasbey, A. Setyobudi, and A. Takita, "Review of the Levitation Mass Method (LMM)-A precision method for measuring mechanical quantities using an optical interferometer," presented at the AIP Conference Proceedings, 2016, vol. 1719.
17. T. Jin, A. Takita, M. Djamal, W. Hou, H. Jia, and Y. Fujii, "A method for evaluating the electro-mechanical characteristics of piezoelectric actuators during motion," *Sens. Switz.*, vol. 12, no. 9, pp. 11559–11570, 2012.
18. I. A. Prayogi, K. Watanabe, K. Irisa, A. Takita, M. Djamal, and Y. Fujii, "A method for evaluating the mechanical response of rubber-like material under small impact loads," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 11, no. 3, pp. 949–954, 2015.
19. T. Yamaguchi *et al.*, "Damping response analysis for a structure connected with a nonlinear complex spring and application for a finger protected by absorbers under impact forces," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 88–96, 2014.
20. Y. Gong *et al.*, "Highly sensitive force sensor based on optical microfiber asymmetrical Fabry-Perot interferometer," *Opt. Express*, vol. 22, no. 3, pp. 3578–3584, 2014.
21. T. Jin *et al.*, "Method for acceleration measurement using a laser Doppler interferometer," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 7, 2013.
22. T. Jin *et al.*, "High-speed impact test using an inertial mass and an optical interferometer," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 7, 2013.
23. K. Maru and Y. Fujii, "Laser Doppler velocimetry with small wavelength sensitivity using planar lightwave circuit," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 103, pp. 76–81, 2012.
24. F. Marvasti, *Nonuniform Sampling: Theory and Practice*. Springer Science & Business Media, 2012.