

DESAIN BAND PASS FILTER DIGITAL FIR DENGAN METODE KAISER WINDOW UNTUK MEMFILTER SINYAL PINGER 37.5 kHz

Kania Sawitri dan Rustamaji

Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional
Jl. P. H. H. Hasan Mustafa No. 23 Bandung, 40124, Indonesia

E-mail: kania.sawitri@yahoo.co.id, rustamajisaja@gmail.com

Abstrak

Sinyal *pinger* dengan frekuensi 37.5 kHz dipancarkan oleh "Beacon black box locator acoustic 37.5 kHz" yang terdapat pada *black box*, dapat dideteksi menggunakan *sensor* berupa *hydrophone*, yang dilengkapi dengan rangkaian *filter* yang berfungsi untuk memilah sinyal 37.5 kHz dari sinyal-sinyal lain yang tidak diinginkan. Makalah ini membahas tentang desain *band pass filter* yang sesuai untuk memilah sinyal *pinger* yang bekerja pada daerah frekuensi 35.5 sampai dengan 39.5 kHz menggunakan metode *Kaiser window*. Hasil desain *filter* yang diperoleh secara respons frekuensi bentuknya sudah sesuai dengan yang direncanakan yaitu respons frekuensi *band pass filter* digital. *Band pass filter* digital dengan metode *Kaiser window* yang dipilih adalah untuk $\beta=3$ dan panjang $N=24$.

Kata kunci: black box, pinger, 37.5 kHz, band pass filter, dan Kaiser window

Abstract

A pinger signal with a frequency of 37.5 kHz emitted by "Black box locator beacon acoustic 37.5 kHz" contained in black boxes, can be detected using sensors such as hydrophones, that equipped with a filter circuit that serves to sort out the 37.5 kHz signal from other signals that are not desired. This paper discusses the design of appropriate band pass filter to sort pinger signals that work on the area with the frequencies of 35.5 to 39.5 kHz using the Kaiser window method. The filter design results were obtained in the frequency response shape was according to plan, namely the frequency response of band pass digital filter. The band pass digital filter with Kaiser window method chosen was for $\beta=3$ and the length $N=24$.

Keywords: black box, pinger, 37.5 kHz, band pass filter, dan Kaiser window

1. Pendahuluan

Setiap pesawat terbang terutama pada penerbangan sipil (*civil aviation*); dilengkapi dengan *aviation flight recorders* yang lebih dikenal sebagai "black box", yang terdiri dari *cockpit voice recorder* (CVR) dan *flight data recorder* (FDR). Untuk mendeteksi keberadaan *black box* apabila terjadi kecelakaan pesawat terbang di laut, *black box* dilengkapi dengan *underwater locator beacon* (ULB) atau *underwater acoustic beacon*, dikenal sebagai *pinger*. ULB akan aktif memancarkan (*emit*) sinyal *pinger* berupa gelombang *ultrasonic* "10 ms pulse setiap kali per second pada frekuensi 37.5 ± 1 kHz", apabila tercelup air (*water immersion*) [1].

Untuk mendeteksi sinyal *pinger* yang mempunyai frekuensi sebesar 37.5 kHz digunakan *hydrophone* [2]. Pada *hydrophone* terdapat rangkaian *filter* yang berfungsi untuk memilah sinyal 37.5 kHz dari sinyal-sinyal lain yang tidak diinginkan. Dalam penelitian Rustamaji, dkk., untuk memfilter sinyal *pinger* 37.5 kHz digunakan *band pass filter* (BPF) digital dengan metode *Blackman window* diperoleh panjang minimal $N=10$ [3]. Sedangkan

pada penelitian ini, menggunakan metode *Kaiser window* untuk memperoleh panjang N yang optimal. Desain rangkaian *filter* ini akan sangat menentukan kemampuan *hydrophone* dalam pemilahan sinyal *pinger*, karena itu akan dilakukan perhitungan desain *filter* yang sesuai untuk memilah sinyal *pinger* [4][5].

Spesifikasi sinyal *pinger* yang umum digunakan oleh perangkat ULB dari beberapa pabrikan [4][6][7]:

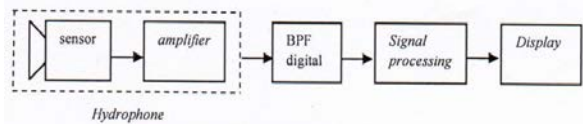
- *Operating Frequency*: 37.5 ± 1 kHz.
- *Pulse Length*: *Not less than 9 milliseconds* (10 millisecond nominal).
- *Pulse Repetition Rate*: *Not less than 0.9 pulse per second* (1 pulse per second nominal).

Sesuai dengan spesifikasi dari sinyal *pinger*, rangkaian *filter* yang didesain untuk memilah adalah berupa *band pass filter* (BPF) digital; direncanakan dapat bekerja pada daerah band frekuensi 35.5 sampai dengan 39.5 kHz, dengan frekuensi tengah 37.5 kHz. Sehingga BPF dapat memilah sinyal *pinger* yang mempunyai frekuensi 37.5 ± 1 kHz atau 36.5 sampai dengan 38.5 kHz [8].

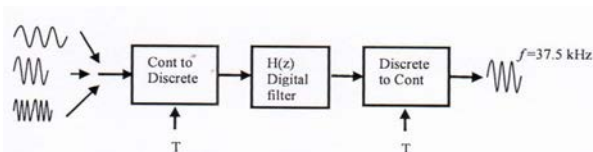
2. Metode

2.1. Perhitungan BPF Digital dengan Metode Kaiser Window

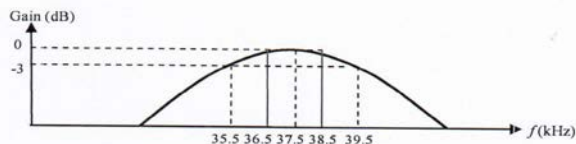
BPF digital *finite impulse response* (FIR) yang didesain menggunakan metode *Kaiser window*, merupakan bagian dari *hydrophone receiver* yang berfungsi untuk mendeteksi sinyal *pinger* seperti pada gambar 1 [3]. Sebelum melakukan realisasi rangkaian BPF digital FIR, dilakukan perhitungan agar diperoleh desain BPF digital FIR sesuai yang diinginkan seperti pada gambar 2 [3]. Desain BPF digital FIR yang akan digunakan untuk menyaring frekuensi sinyal kontinu sinusoida (*pinger*) 37.5 ± 1 kHz; mempunyai batas frekuensi diantara 35.5 sampai dengan 39.5 kHz atau *bandwidth* sebesar 4 kHz, dengan respons frekuensi seperti pada gambar 3 [3].



Gambar 1. Diagram blok hydrophone receiver



Gambar 2. Diagram blok desain BPF digital



Gambar 3. Respons frekuensi BPF digital finite impulse response (FIR)

2.2. Aproksimasi Panjang Window N

Desain BPF digital FIR dengan metode *Kaiser window*, mempunyai panjang *window* atau *length of window* N dihitung berdasarkan aproksimasi Herrmann, dengan parameter filter $N, \delta_1, \delta_2, \omega_p,$ dan ω_s [9][10],

$$N = \frac{-10 \log_{10}(\delta_1 \delta_2) - 13}{2.324 \Delta\omega} \quad (1)$$

dimana pada desain ini dipilih nilai $\delta_1 = \delta_2 = \delta = 0.1$, dan $\Delta\omega = \omega_s - \omega_p = 2.29336 - 2.16770 = 0.12566$ rad/s. Sehingga diperoleh aproksimasi nilai N sebesar $23.973 \approx 24$.

Berdasarkan pada hasil aproksimasi, dilakukan desain BPF digital FIR dengan metode *Kaiser window* untuk $N=24$. Sebagai bahan perbandingan untuk analisis respons

frekuensi BPF digital FIR yang didesain, dilakukan perhitungan *Kaiser window* dengan panjang $N = 10, 15, 20, 24,$ dan 30 [9][11][12].

2.3. Perhitungan Respons Frekuensi [3]

Frekuensi sinyal kontinu (*pinger*) $f_0 = 37.5$ kHz akan difilter dengan menggunakan BPF yang mempunyai frekuensi *cut-off* $f_1 = 35.5$ kHz dan $f_2 = 39.5$ kHz. Dilakukan konversi frekuensi (Hz) ke frekuensi (rad/s) dengan persamaan $\Omega = 2\pi f$, diperoleh: $\Omega_1 = 223.053$ krad/s, $\Omega_2 = 248.186$ krad/s, dan $\Omega_0 = 235.620$ krad/s. Dipilih *sampling rate* $f_{spt} = 10^5$ sample/s atau $T = \frac{1}{f_{spt}} = 10^{-5}$ s.

Konversi ke bidang diskrit (digital) dilakukan dengan menggunakan persamaan $\omega = \Omega T$, diperoleh: $\omega_1 = 2.23053$ rad/s, $\omega_2 = 2.48186$ rad/s, dan $\omega_0 = 2.35620$ rad/s. Dengan panjang *window* $N=10, 15, 20, 24, 30$ dan menggunakan persamaan

$$\alpha = \frac{N-1}{2} \quad (2)$$

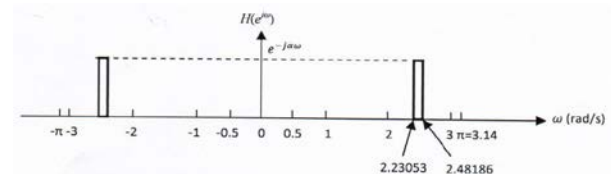
diperoleh $\alpha : 4.5, 7, 9.5, 11.5,$ dan 14.5 .

Respons frekuensi filter ideal dengan nilai α tertentu :

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j\alpha\omega} = |H(e^{j\omega})| \angle H(e^{j\omega}) = 1 \angle -\alpha\omega \quad (3)$$

mempunyai respons amplitudo filter $|H(e^{j\omega})|$ seperti pada gambar 4.

$|H(e^{j\omega})| = 1$, untuk $2.23053 \leq \omega_c \leq 2.48186$ dan respons fasa filter $\angle H(e^{j\omega}) = -\alpha\omega$ rad, menunjukkan respons fasa yang diinginkan linier.



Gambar 4. Respons amplitudo $|H(e^{j\omega})|$ BPF digital ideal yang diinginkan antara -2π s/d $+2\pi$ rad

Mencari respons impuls $h(n)$ bila diketahui $H(e^{j\omega}) = e^{-j\alpha\omega}$ sebagai berikut:

$$\begin{aligned} h(n) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} H(e^{j\omega}) \cdot e^{j\omega n} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_2}^{-\omega_1} e^{-j\alpha\omega} \cdot e^{j\omega n} d\omega \\ &\quad + \frac{1}{2\pi} \int_{+\omega_1}^{+\omega_2} e^{-j\alpha\omega} \cdot e^{j\omega n} d\omega \\ &= \frac{\sin \omega_2(n - \alpha)}{\pi(n - \alpha)} - \frac{\sin \omega_1(n - \alpha)}{\pi(n - \alpha)} \\ &= \frac{\sin 2.48186(n - \alpha)}{\pi(n - \alpha)} - \frac{\sin 2.23053(n - \alpha)}{\pi(n - \alpha)} \quad (4) \end{aligned}$$

Tabel 1. Nilai $h(n)$ dan $\bar{h}(n)$ untuk $N = 10, 15, 20, 24, 30$ dan $\beta = 3$

n	N = 10, α = 4.5			N = 15, α = 7			N = 20, α = 9.5			N = 24, α = 11.5			N = 30, α = 14.5		
	$h(n)$	$W_K(n)$	$\bar{h}_K(n)$	$h(n)$	$W_K(n)$	$\bar{h}_K(n)$	$h(n)$	$W_K(n)$	$\bar{h}_K(n)$	$h(n)$	$W_K(n)$	$\bar{h}_K(n)$	$h(n)$	$W_K(n)$	$\bar{h}_K(n)$
0	-0.02901	0.20488	-0.00594	-0.04955	0.20488	-0.01015	-0.05756	0.20488	-0.01179	-0.02102	0.20488	-0.00431	-0.03929	0.20488	-0.00805
1	-0.02964	0.43170	-0.01279	-2.222x10 ⁻⁷	0.34670	-7.703x10 ⁻⁸	0.02512	0.30767	0.00773	0.05426	0.28905	0.01568	0.04322	0.27103	0.01171
2	0.07270	0.67118	0.04880	0.05392	0.50105	0.02652	0.02628	0.41901	0.01101	-0.05756	0.37961	-0.02185	-0.01949	0.34153	-0.00666
3	-0.07347	0.87124	-0.06401	-0.07667	0.65476	-0.05020	-0.06596	0.53393	-0.03522	0.02512	0.47386	0.01190	-0.02102	0.41508	-0.00872
4	0.03059	0.98508	0.03014	0.05524	0.79363	0.04384	0.06817	0.64691	0.04410	0.02628	0.56879	0.01495	0.05426	0.49027	0.02660
5	0.03059	0.98508	0.03014	8.071x10 ⁻⁸	0.90421	7.298x10 ⁻⁸	-0.02901	0.75223	-0.02182	-0.06596	0.66120	-0.04361	-0.05756	0.56554	-0.03255
6	-0.07347	0.87124	-0.06401	-0.05642	0.97542	-0.05503	-0.02964	0.84435	-0.02502	0.06817	0.74788	0.03098	0.02512	0.63930	0.01606
7	0.07270	0.67118	0.04880	0.08000	1	0.08000	0.07270	0.91831	0.06676	-0.02901	0.82571	-0.02395	0.02628	0.70994	0.01866
8	-0.02964	0.43170	-0.01279	-0.05642	0.97542	-0.05503	-0.07347	0.97003	-0.07127	-0.02964	0.89181	-0.02643	-0.06596	0.77587	-0.05118
9	-0.02901	0.20488	-0.00594	8.071x10 ⁻⁸	0.90421	7.298x10 ⁻⁸	0.03059	0.99664	0.03049	0.07270	0.94373	0.06861	0.02609	0.83558	0.05696
10				0.05524	0.79363	0.04384	0.03059	0.99664	0.03049	-0.07347	0.97948	-0.07197	-0.02901	0.88768	-0.02575
11				-0.07667	0.65476	-0.05020	-0.07347	0.97003	-0.07127	0.03059	0.99771	0.03052	-0.02964	0.93095	-0.02759
12				0.05292	0.50105	0.02652	0.07270	0.91831	0.06676	0.03059	0.99771	0.03052	0.07270	0.96434	0.07011
13				-2.222x10 ⁻⁷	0.34670	-7.703x10 ⁻⁸	-0.02964	0.84435	-0.02502	-0.07347	0.97948	-0.07197	-0.07347	0.98706	-0.07252
14				-0.04955	0.20488	-0.01015	-0.02901	0.75223	-0.02182	0.07270	0.94373	0.06861	0.02609	0.99856	0.03055
15							0.06817	0.64691	0.04410	-0.02964	0.89181	-0.02643	0.03059	0.99856	0.03055
16							-0.06596	0.53393	-0.03522	-0.02901	0.82571	-0.02395	-0.07347	0.98706	-0.07252
17							0.02628	0.41901	0.01101	0.06817	0.74788	0.03098	0.07270	0.96434	0.07011
18							0.02512	0.30767	0.00773	-0.06596	0.66120	-0.04361	-0.02964	0.93095	-0.02759
19							-0.05756	0.20488	-0.01179	0.02628	0.56879	0.01495	-0.02901	0.88768	-0.02575
20										0.02512	0.47386	0.01190	0.06817	0.83558	0.05696
21										-0.05756	0.37961	-0.02185	-0.06596	0.77587	-0.05118
22										0.05426	0.28905	0.01568	0.02628	0.70994	0.01866
23										-0.02102	0.20488	-0.00431	0.02512	0.63930	0.01606
24													-0.05756	0.56554	-0.03255
25													0.05426	0.49027	0.02660
26													-0.02102	0.41508	-0.00872
27													-0.01949	0.34153	-0.00666
28													0.04322	0.27103	0.01171
29													-0.03929	0.20488	-0.00805

Diperoleh nilai $h(n)$ untuk $N = 10, 15, 20, 24,$ dan 30 seperti pada tabel 1. Sehingga respons impuls $h(n)$: Untuk $N = 24$

$$\begin{aligned}
 h(n) = & -0.02102 \delta(n) + 0.05426 \delta(n - 1) \\
 & -0.05756 \delta(n - 2) + 0.02512 \delta(n - 3) \\
 & +0.02628 \delta(n - 4) - 0.06596 \delta(n - 5) \\
 & +0.06817 \delta(n - 6) - 0.02901 \delta(n - 7) \\
 & -0.02964 \delta(n - 8) + 0.07270 \delta(n - 9) \\
 & -0.07347 \delta(n - 10) + 0.03059 \delta(n - 11) \\
 & +0.03059 \delta(n - 12) - 0.07347 \delta(n - 13) \\
 & +0.07270 \delta(n - 14) - 0.02964 \delta(n - 15) \\
 & -0.02901 \delta(n - 16) + 0.06817 \delta(n - 17) \\
 & -0.06596 \delta(n - 18) + 0.02628 \delta(n - 19) \\
 & +0.02512 \delta(n - 20) - 0.05756 \delta(n - 21) \\
 & +0.05426 \delta(n - 22) - 0.02102 \delta(n - 23) \quad (5)
 \end{aligned}$$

2.4. Kaiser Window

Persamaan respons impuls *Kaiser window* $w_K(n)$ yang digunakan pada desain filter digital FIR adalah [9][11]:

$$w_K(n) = \begin{cases} I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left[\frac{n-\alpha}{\alpha} \right]^2} \right] \\ I_0(\beta) \end{cases}, \quad 0 \leq n \leq N-1$$

untuk lainnya (6)

dimana: $\alpha = \frac{N-1}{2}$.

$I_0(x)$ adalah zeroth-order modified Bessel function of the first kind.

$$I_0(\beta) \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{\left(\frac{\beta}{2} \right)^k}{k!} \right]^2 \quad (7)$$

Parameter *Kaiser window*: *length* N dan *shape parameter* β ; pada desain ini $\beta = 3$. Menghitung $\hat{h}(n)$ bila diketahui *window* $w_x(n)$:

$$\hat{h}(n) = h(n) \cdot w_x(n) \quad (8)$$

Diperoleh $h(n)$, $w_x(n)$ dan $\hat{h}(n)$ untuk $N = 10, 15, 20, 24$, dan 30 seperti pada tabel 1. Sehingga diperoleh respons impuls $\hat{h}_x(n)$ setelah *windowing*:

untuk $N = 24$

$$\begin{aligned} \hat{h}_x(n) = & -0.00431 \delta(n) + 0.01568 \delta(n - 1) \\ & -0.02185 \delta(n - 2) + 0.01190 \delta(n - 3) \\ & +0.01495 \delta(n - 4) - 0.04361 \delta(n - 5) \\ & +0.05098 \delta(n - 6) - 0.02395 \delta(n - 7) \\ & -0.02643 \delta(n - 8) + 0.06861 \delta(n - 9) \\ & -0.07197 \delta(n - 10) + 0.03052 \delta(n - 11) \\ & +0.03052 \delta(n - 12) - 0.07197 \delta(n - 13) \\ & +0.06861 \delta(n - 14) - 0.02643 \delta(n - 15) \\ & -0.02395 \delta(n - 16) + 0.05098 \delta(n - 17) \\ & -0.04361 \delta(n - 18) + 0.01495 \delta(n - 19) \\ & +0.01190 \delta(n - 20) - 0.02185 \delta(n - 21) \\ & +0.01568 \delta(n - 22) - 0.00431 \delta(n - 23) \end{aligned}$$

(9)

3. Pengujian dan Analisis

Pengujian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui respons frekuensi dari BPF digital dengan metode *Kaiser window* yang diperoleh; dengan cara melakukan transformasi fourier pada respons impuls $\hat{h}_x(n)$ sehingga diperoleh respons frekuensi $\hat{H}_x(e^{j\omega})$. Selanjutnya memberi masukan frekuensi pada $\hat{H}_x(e^{j\omega})$ dengan rentang $-2\pi \leq \omega \leq +2\pi$ radian [9][11].

untuk $N = 24$

Dari persamaan (9), dengan transformasi fourier diskrit diperoleh respons frekuensi BPF digital $\hat{H}_x(e^{j\omega})$:

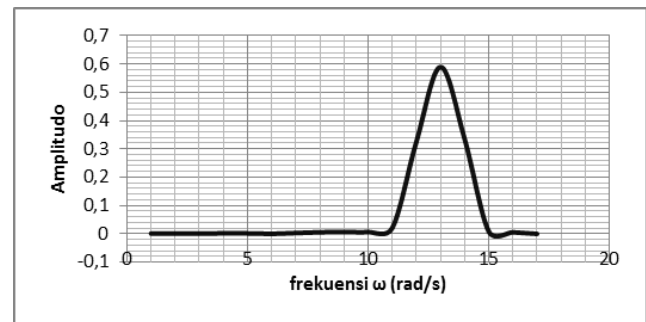
$$\begin{aligned} \hat{H}_x(e^{j\omega}) = & -0.00431 + 0.01568 e^{-j\omega} - 0.02185 e^{-j2\omega} \\ & + 0.01190 e^{-j3\omega} + 0.01495 e^{-j4\omega} \\ & - 0.04361 e^{-j5\omega} + 0.05098 e^{-j6\omega} \\ & - 0.02395 e^{-j7\omega} - 0.02643 e^{-j8\omega} \\ & + 0.06861 e^{-j9\omega} - 0.07197 e^{-j10\omega} \\ & + 0.03052 e^{-j11\omega} + 0.03052 e^{-j12\omega} \\ & - 0.07197 e^{-j13\omega} + 0.06861 e^{-j14\omega} \\ & - 0.02643 e^{-j15\omega} - 0.02395 e^{-j16\omega} \\ & + 0.05098 e^{-j17\omega} - 0.04361 e^{-j18\omega} \\ & + 0.01495 e^{-j19\omega} + 0.01190 e^{-j20\omega} \\ & - 0.02185 e^{-j21\omega} + 0.01568 e^{-j22\omega} \\ & - 0.00431 e^{-j23\omega} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_x(e^{j\omega}) = & e^{-j11.5\omega} (0.06105 \cos 0.5 \omega \\ & - 0.14393 \cos 1.5 \omega + 0.13722 \cos 2.5 \omega \\ & - 0.05286 \cos 3.5 \omega - 0.04791 \cos 4.5 \omega \\ & + 0.10196 \cos 5.5 \omega - 0.08723 \cos 6.5 \omega \\ & + 0.0299 \cos 7.5 \omega + 0.02380 \cos 8.5 \omega \\ & - 0.04370 \cos 9.5 \omega + 0.03137 \cos 10.5 \omega \\ & - 0.00861 \cos 11.5 \omega) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} |\hat{H}_x(e^{j\omega})| = & 0.06105 \cos 0.5 \omega - 0.14393 \cos 1.5 \omega \\ & + 0.13722 \cos 2.5 \omega - 0.05286 \cos 3.5 \omega \\ & - 0.04791 \cos 4.5 \omega + 0.10196 \cos 5.5 \omega \\ & - 0.08723 \cos 6.5 \omega + 0.0299 \cos 7.5 \omega \\ & + 0.02380 \cos 8.5 \omega - 0.04370 \cos 9.5 \omega \\ & + 0.03137 \cos 10.5 \omega \\ & - 0.00861 \cos 11.5 \omega \end{aligned} \quad (11)$$

$$\angle \hat{H}_x(e^{j\omega}) = -11.5\omega \text{ rad}$$

Besarnya nilai respons frekuensi $|\hat{H}_x(e^{j\omega})|$ untuk nilai $N = 10, 15, 20, 24$, dan 30 diperoleh seperti pada tabel 2, dan diplot untuk nilai $\omega = 0$ sampai dengan $\omega = \pi$ rad/s dengan interval $\pi/16$ rad, seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Respons frekuensi BPF digital dengan $N=24$

Respons frekuensi BPF digital dengan metode *Kaiser window* yang diperoleh untuk $N = 10, 15, 20, 24$, dan 30 , mempunyai parameter frekuensi seperti diringkas pada tabel 3.

Secara respons frekuensi, BPF digital yang diperoleh untuk $N = 10, 15, 20, 24$, dan 30 bentuknya sesuai dengan yang direncanakan yaitu respons BPF digital. Amplitudo tertinggi untuk $N=24$, yaitu sebesar 0.589655883.

Untuk $N = 10$.

Amplitudo maksimum pada frekuensi sudut $\omega_0 = 2.35619449$ rad/s, sebesar 0.245849179. Nilai $\frac{1}{\sqrt{2}}$ dari amplitudo maksimum adalah 0.1738416216, terletak pada frekuensi sudut $\omega_1 = 1.9853283997$ rad/s dan $\omega_2 = 2.759079869$ rad/s. Terlihat batas *bandwidth* dari BPF digital hasil *windowing* melebar dari yang direncanakan, yaitu dari 2.23053 sampai dengan 2.48186 rad/s, menjadi 1.9853283997 sampai dengan 2.759079869 rad/s; atau *bandwidth* melebar dari sebesar 0.25133 rad/s menjadi 0.7737514693 rad/s. Melebar 0.052242146 rad/s atau menjadi 307.862% dari yang direncanakan. Sehingga mampu memilah sinyal *pinger* 37.5 kHz atau 2.35620 rad/s.

Tabel 2. Nilai $|\bar{H}_R(e^{j\omega})|$ untuk $N=10, 15, 20, 24$, dan 30

No	ω	$ \bar{H}_R(e^{j\omega}) $					N=24
		N=10	N=15	N=20	N=24	N=30	Normalisir
1	0	0.0076	0.010039184	0.01006	0.001107	0.00477	0.001877366
2	$\pi/16$	0.003752451	0.000527482	0.004289295	0.000482611	0.004760671	0.000818462
3	$2\pi/16$	0.004227914	0.010329763	0.006635413	0.000732939	0.004743333	0.001242995
4	$3\pi/16$	0.008571361	0.001634702	0.010365502	0.001743368	0.004735805	0.002956586
5	$4\pi/16$	0.003958949	0.011281683	0.00213805	0.001643653	0.004774869	0.002787478
6	$5\pi/16$	0.006904645	0.002678409	0.009560651	3.31022E-05	0.004818465	5.61382E-05
7	$6\pi/16$	0.01301688	0.01364776	0.011888221	0.002850162	0.005003035	0.004833602
8	$7\pi/16$	0.000782169	0.002834278	0.000994075	0.005531855	0.005445276	0.009381498
9	$8\pi/16$	0.037646365	0.020399168	0.013873435	0.006807317	0.006413459	0.011544559
10	$9\pi/16$	0.098520621	0.015180176	0.021306866	0.006335795	0.008606637	0.010744902
11	$10\pi/16$	0.166699587	0.146353463	0.06416369	0.020597095	0.011115395	0.034930705
12	$11\pi/16$	0.221679098	0.304666702	0.340339662	0.32623637	0.290351867	0.553265692
13	$12\pi/16$	0.245849179	0.37208333	0.496924307	0.589655883	0.711740777	1
14	$13\pi/16$	0.230548541	0.300354383	0.32897343	0.333966735	0.289077541	0.566375652
15	$14\pi/16$	0.177472338	0.149672309	0.075500119	0.008231572	0.008470716	0.013959959
16	$15\pi/16$	0.096123455	0.018542239	0.020850072	0.005572242	0.004345275	0.00944999
17	$16\pi/16$	0	0.030759184	0	0	0	0

Tabel 3. Parameter frekuensi BPF digital untuk $N = 10, 15, 20, 24$, dan 30 .

Parameter	BPF digital direncanakan	BPF digital dengan Kaiser window				
		N=10	N=15	N=20	N=24	N=30
f_0 (kHz)	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
ω_0 (rad/s)	2.3562	2.35619449	2.35619449	2.35619449	2.35619449	2.35619449
amplitudo	1	0.245849179	0.37208333	0.496924307	0.589655883	0.711740777
f_1 (kHz)	35.5	31.59748	33.46562	34.49758	35.05264	35.49583
ω_1 (rad/s)	2.23053	1.9853284	2.102706911	2.167547014	2.202422226	2.2302685
amplitudo	0.70711	0.173841622	0.263102646	0.351378547	0.416949673	0.50327673
f_2 (kHz)	39.5	43.91212	41.4712	40.36362	39.89337	39.49121
ω_2 (rad/s)	2.48186	2.759079869	2.605712584	2.536121142	2.506574136	2.48130577
amplitudo	0.70711	0.173841622	0.263102646	0.351378547	0.416949673	0.50327673
BW (kHz)	4	12.31464	8.00558	5.866039	4.840728	3.995382
BW (rad/s)	0.25133	0.773751469	0.503005673	0.368574128	0.30415191	0.25103727
%		307.86%	200.14%	146.65%	121.02%	99.88%

Untuk $N = 24$.

Amplitudo maksimum pada frekuensi sudut $\omega_0 = 2.35619449$ rad/s, sebesar 0.589655883. Nilai $\frac{1}{\sqrt{2}}$ dari amplitudo maksimum adalah 0.416949673, terletak pada frekuensi sudut $\omega_1 = 2.202422226$ rad/s dan $\omega_2 = 2.506574136$ rad/s. Terlihat batas *bandwidth* dari BPF digital hasil *windowing* sedikit melebar dari yang direncanakan, yaitu dari 2.23053 sampai dengan 2.48186 rad/s, menjadi 2.202422226 sampai dengan 2.506574136 rad/s; atau *bandwidth* melebar dari sebesar 0.25133 rad/s menjadi 0.30415191 rad/s. Melebar 0.05282191 rad/s atau menjadi 121.0170% dari yang direncanakan. Sehingga mampu memilah sinyal pinger 37.5 kHz atau 2.35620 rad/s.

Untuk $N = 30$.

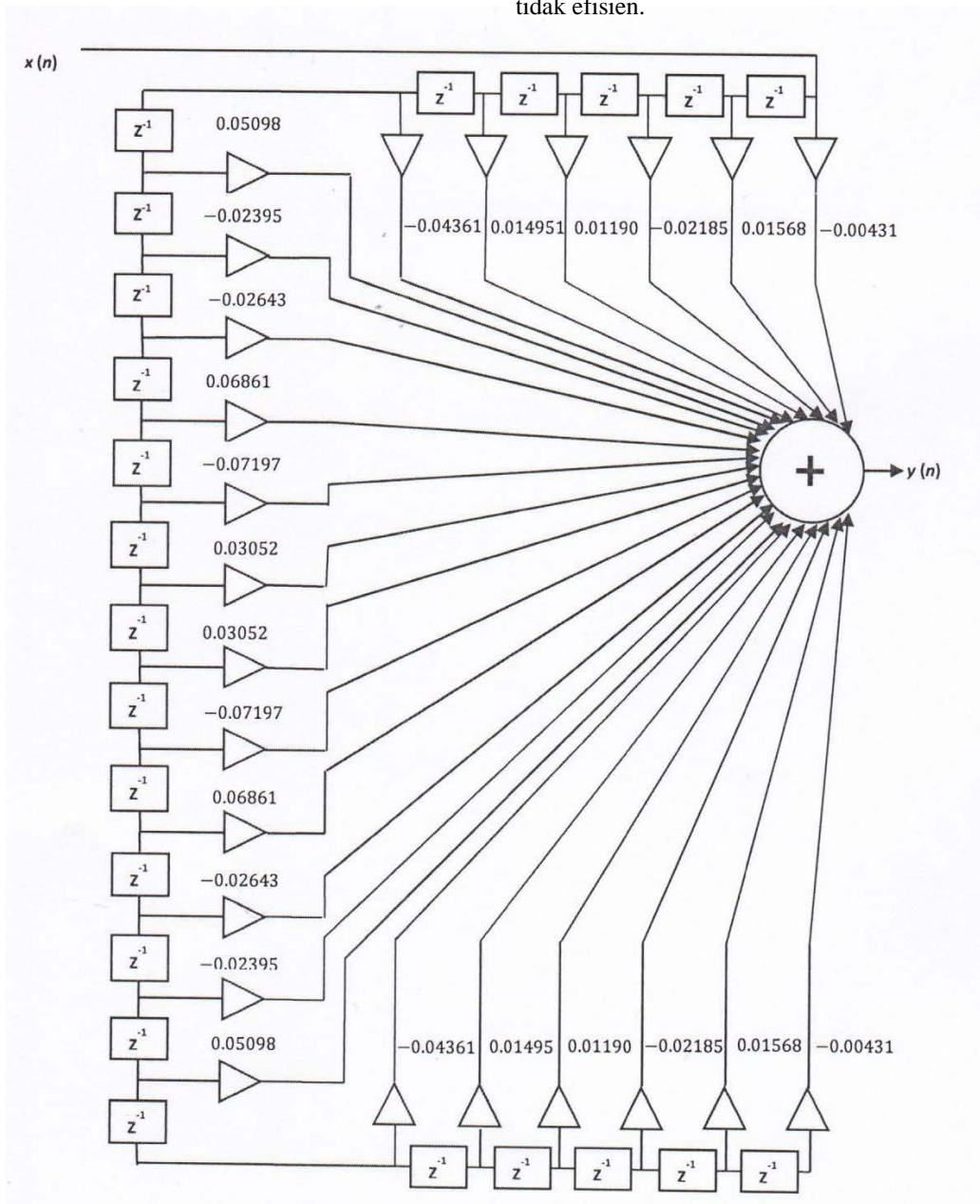
Amplitudo maksimum pada frekuensi sudut $\omega_0 = 2.35619449$ rad/s, sebesar 0.71174078. Nilai $\frac{1}{\sqrt{2}}$ dari amplitudo maksimum adalah 0.50327673, terletak pada frekuensi sudut $\omega_1 = 2.2302685$ rad/s dan $\omega_2 = 2.48130577$ rad/s. Terlihat batas *bandwidth* dari BPF digital hasil *windowing* sedikit menyempit dari yang direncanakan, yaitu dari 2.23053 sampai dengan 2.48186 rad/s, menjadi 2.2302686 sampai dengan 2.48130577 rad/s; atau *bandwidth* menyempit dari sebesar 0.25133 rad/s menjadi 0.25103727 rad/s. Menyempit 0.00024273 rad/s atau menjadi 99.88% dari yang direncanakan. ω_2 yang diperoleh berada di bawah ω_2 yang direncanakan. Sehingga BPF digital sudah tidak mampu memilah batas atas sinyal pinger 37.5 kHz (2.35620 rad/s) atau frekuensi $\omega_2 = 2.48186$ rad/s.

Desain BPF digital dengan metode *Kaiser window* untuk $\beta=3$ dan $N = 10, 15, 20, 24, 30$ yang direncanakan; dilihat dari respons frekuensinya, yaitu respons BPF semuanya memenuhi persyaratan awal, dan dipilih untuk panjang $N < 30$.

Dilihat dari bandwidth yang diperoleh untuk $N = 24$ mempunyai bandwidth menjadi 121.0170% sedikit lebih lebar dari yang direncanakan, lebih mendekati ideal dibandingkan untuk nilai N yang lainnya

Dilihat dari amplitudo normalisasi untuk $N=24$, amplitudo *sidelobe* tertinggi adalah 0.01154456 atau jauh dibawah $\delta = 0.1$ seperti yang dipersyaratkan pada aproksimasi Herrmann; sehingga memenuhi syarat. Jadi BPF digital yang dipilih adalah untuk $N = 24$. Dari persamaan (9), diperoleh realisasi rangkaian BPF digital dengan metode *Kaiser window* $\hat{h}_g(n)$ seperti pada gambar 6.

Semakin besar nilai N dengan $N < 30$, bandwidth BPF digital akan menuju kondisi ideal seperti yang direncanakan; tetapi akan menyebabkan realisasi rangkaian semakin besar dan persamaan untuk algoritma program pada perangkat lunak semakin panjang sehingga tidak efisien.



Gambar 6. Realisasi BPF digital untuk $N=24$

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil desain, pengujian dan analisis disimpulkan bahwa *filter* digital yang direncanakan dengan metode *Kaiser Window* untuk nilai $\beta = 3$, dan $N = 10, 15, 20, 24, 30$ secara respons frekuensi bentuknya sudah sesuai dengan yang direncanakan yaitu respons BPF.

Bandwidth dari BPF digital untuk nilai $\beta = 3$, dan $N = 10, 15, 20, 24$ melebar dari yang direncanakan; sedangkan $N=30$ menyempit dari yang direncanakan. BPF digital untuk $N = 24$ mempunyai *bandwidth* melebar 0.05282191 rad/s atau menjadi 121.0170% dari yang direncanakan dan $\delta = 0.01154456$. BPF digital FIR dengan metode *Kaiser window* untuk $N = 24$ yang dipilih.

Referensi

- [1]. Sheng-Shih Wang; Hsien-Sen Hung; Jyh-Jier Ho; Jie-Xian Lin; Chi-Hsiao Yeh. "Improving Detection Technique for Flight Recorders of the Distress Airplanes Crashed into Ocean by Integrating Inertial Navigation System into Underwater Locator Beacon". *Journal of Marine Science and Technology*. 2015; Vol. 23, No. 4: pp. 467-474.
- [2]. Rafael Barmak; André L. S. C. de Oliveira; Pedro São Thiago; Francisco dos Santos; Marco V. R. Lopes; Geraldo Cernicchiaro. "Underwater locator beacon signal propagation on tropical waters". *Conference: Rio Acoustics 2017*", Rio de Janeiro, Brazil. July 2017.
- [3]. Rustamaji; Elan Djaelani. "Desain Band Pass Filter (BPF) Digital dengan Metode Window untuk Memfilter Sinyal Pinger 37.5 kHz yang Dipancarkan dari Beacon Black Box Locator". *Prosiding Seminar Nasional Energi Telekomunikasi dan Otomasi (SNETO) 2015*: 28-32.
- [4]. *ELP-362D Emergency Locator Beacon User's Manual*. Teledyne Benthos. 2015.
- [5]. "Towed Pinger Locator 25 Specifications". Phoenix International. 2014.
- [6]. ATICourses. Applied Technology Institute. Posted by admin in Acoustics & Sonar, Defense, Including Radar, Missiles and EW on April 8, 2014.
- [7]. Rustamaji; Kania Sawitri; Rudi Gunawan; "Perancangan Prototipe Transmitter Beacon Black Box Locator Acoustic 37.5 kHz Pingers". *Jurnal ELKOMIKA* | Vol. 4 | No. 2 | Halaman 170 – 184, ISSN (p): 2338-8323 Juli - Desember 2016, ISSN (e): 2459-9638.
- [8]. Rustamaji; Pauline Rahmiati; Sarah Permatasari. "Perancangan Prototipe Receiver Beacon Black Box Locator Acoustic 37.5 kHz Pingers". *Jurnal ELKOMIKA* | Vol. 4 | No. 1 | Halaman 66 – 82, ISSN (p): 2338-8323 Januari - Juni 2016, ISSN (e): 2459-9638.
- [9]. Alan V. Oppenheim; Ronald W. Schaffer. "Discrete Time Signal Processing". Prentice-Hall of India, 1996.
- [10]. Alan V. Oppenheim; Ronald W. Schaffer. "Digital Signal Processing". Prentice-Hall of India, 1997.
- [11]. Lonnie C. Ludeman. "Fundamental of Digital Signal Processing". John Wiley & Sons, Inc. 1987.
- [12]. Andreas Antonio. "Digital Filter – Analysis, Design and Applications". McGraw-Hill, 1993.