

PERANCANGAN SISTEM RADAR FMCW MENGGUNAKAN SDR UNTUK MENDETEKSI GETARAN

DESIGN OF FMCW RADAR SYSTEM USING SDR TO DETECT VIBRATION

Ghinada Amania¹, Erfansyah Ali, S.T., M.T.², Dr. Aloysius Adya Pramudita, S.T., M.T.³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹ghinadamania@student.telkomuniversity.ac.id, ²erfansyahali@telkomuniversity.ac.id,

³pramuditaadya@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Radio Detection and Ranging (Radar) adalah sebuah sistem yang bekerja dengan cara memancarkan gelombang elektromagnetik dan mendeteksi sinyal balikan sebuah objek yang mampu memberikan informasi berupa jarak, posisi dan kecepatan dari suatu objek. Berdasarkan sinyal yang dikirim, radar dapat dibagi dua yaitu Radar Pulsa (*Pulsed Wave*) dan *Continuous Wave*. Salah satu jenis radar *continuous wave* adalah radar *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)*. Radar FMCW menggunakan modulasi frekuensi gelombang untuk memungkinkan pengukuran jarak. Resolusi jarak radar FMCW bergantung pada *bandwidth*. Salah satu perangkat lunak yang dapat mengembangkan teknologi radar adalah *Software Defined Radio (SDR)*. Implementasi SDR berbasis perangkat lunak GNU Radio untuk merancang radar FMCW untuk mendeteksi target yang bergetar. Penggunaan sistem SDR dimana komponen – komponennya diimplementasikan melalui perangkat lunak sebagai pengganti dari hardware yang digunakan sebagai *mixer*, filter, modulator/demodulator dan sebagainya untuk mengurangi biaya dan kompleksitas dalam desain dan implementasi. Perancangan sistem radar FMCW dibuat dengan bandwidth sebesar 10 MHz dan bekerja dengan frekuensi modulasi 1 kHz. Pada pengujian ini menggunakan delay sebagai rekayasa getaran. Hasil simulasi yang didapatkan dari sistem radar FMCW untuk mendeteksi getaran dapat dibuktikan dengan pergeseran fasa dan frekuensi beat. Pada pergeseran fasa dapat dilihat, dimana pada getaran kecil bergeser sebanyak 0,001 detik dan getaran besar sebesar 0,004 detik. Sedangkan pada pengukuran menggunakan frekuensi beat, pada getaran kecil peak yang dicapai 24 rad/s dan getaran besar 25 rad/s.

Kata Kunci :Radar, FMCW, SDR, GNU Radio, Getaran.

Abstract

Radio Detection and Ranging (Radar) is a system that works by emitting electromagnetic waves and detect feedback signals from an object that is able to provide information in the form of distance, position and speed of an object. Based on the signal sent, the radar can be divided into two, namely Pulse Wave (Radar Pulsa) and Continuous Wave. One type of continuous-wave radar is the Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar. FMCW radar uses frequency modulation of the waveform to allow a range measurement. The range resolution depends on the bandwidth. One of software that can develop radar technology is Software Defined Radio (SDR). Implementation of GNU radio-based software defined radio (SDR) for designing a FMCW to detect vibrating targets. The use of SDR system in which its components are implemented by uses software as a substitute for hardware that is used as a mixer, filter, modulator / demodulator and so on to reduce cost and complexity in the design and implementation. The FMCW radar system design is made with a bandwidth of 10 MHz and works with a modulation frequency of 1 kHz. In this test, using delay as vibration engineering. The simulation results obtained from the FMCW radar system for detecting vibrations can be proven by the phase shift and beat frequency. The phase shift can be seen, where the small vibration shifts as much as 0.001 seconds and the large vibration is 0.004 seconds. Whereas in the measurement using beat frequency, for small vibrations the peak reached 24 rad/s and large vibrations 25 rad /s.

Keywords : Radar, FMCW, SDR, GNU Radio, Getaran.

1. Pendahuluan

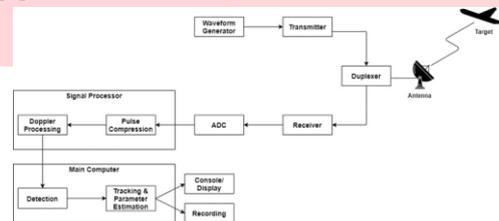
Pada prinsipnya teknologi dikembangkan untuk membuat alat atau sarana yang dapat membantu dan memberi kemudahan bagi manusia untuk melakukan kegiatannya sehari-hari [1]. *Radio Detection and Ranging (Radar)* merupakan salah satu teknologi yang sudah banyak digunakan saat ini. Radar adalah sebuah sistem yang bekerja dengan cara memancarkan gelombang elektromagnetik dan mendeteksi sinyal balikan sebuah objek yang mampu memberikan informasi berupa jarak, posisi dan kecepatan dari suatu objek [2]. Studi terbaru telah melaporkan penggunaan radar untuk mengukur getaran. Untuk mengukur getaran, perlu untuk mengamati target pada frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi getaran [3]. Berdasarkan sinyal yang dikirim, radar dapat dibagi dua yaitu Radar Pulsa (*Pulsed Wave*) dan *Continuous Wave (CW)*. Salah satu jenis radar CW adalah *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)* radar [4]. Radar FMCW bekerja dengan cara meradiasikan sinyal frekuensi yang sudah

dimodulasi maka objek tersebut akan memantulkan sinyal sehingga akan terjadi perbedaan sinyal frekuensi saat diterima oleh *receiver* [5]. Radar FMCW menggunakan modulasi frekuensi gelombang untuk memungkinkan pengukuran jarak [2]. Resolusi jarak radar FMCW bergantung pada *bandwidth*. Radar FMCW dipilih karena menggunakan daya yang kecil untuk memancarkan sinyal dan memiliki desain yang sederhana [5]. Perkembangan teknologi saat ini juga dirasakan dalam dunia komunikasi radio yaitu *Software Defined Radio* (SDR). SDR memiliki arsitektur lebih sederhana daripada sistem radio konvensional karena sebagian besar proses modulasi dilakukan dengan menggunakan *software* sebagai pengganti dari fungsi *hardware* seperti *mixer*, filter, modulator / demodulator dan sebagainya [6]. GNU Radio merupakan *software* yang dapat digunakan untuk merancang SDR [1]. GNU Radio dapat digunakan untuk simulasi dan memiliki fasilitas untuk mempresentasikan hasil dari pengukuran [5]. Pada penelitian Tugas Akhir ini merancang sistem radar FMCW untuk mendeteksi getaran dengan menggunakan *delay A* (500 ns, 502 ns, 505 ns) dan *delay B* (680 ns, 690 ns, 700 ns) secara bolak-balik untuk merekam getaran. Pengujian ini menggunakan frekuensi *cut-off* sebesar 1.5 MHz dan frekuensi modulasi sebesar 1 KHz.

2. Dasar Teori

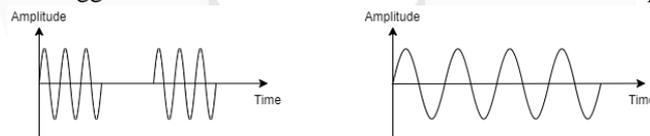
2.1 Radar

Radio Detection and Ranging (Radar) adalah sebuah sistem yang bekerja dengan cara memancarkan gelombang elektromagnetik dan mendeteksi sinyal pantulan dari sebuah objek. Jika suatu objek bergerak, maka radar dapat memperoleh lintasan dan memprediksikan lokasi objek tersebut. Salah satu keunggulan radar yaitu dapat mendeteksi objek yang relatif kecil pada jarak yang dekat dan jauh serta dapat mengukur jangkauannya dengan presisi dalam segala cuaca [2].



Gambar 1. Blok diagram radar

Pada Gambar 1 terdapat blok diagram radar, dimana *waveform generator* akan membangkitkan sinyal *transmitter* dan terhubung dengan antena yang kemudian akan dipancarkan ke target. *Duplexer* berfungsi untuk memisahkan antara sinyal penerima dan pengirim. *Receiver* akan menerima sinyal yang kemudian diteruskan ke ADC untuk diubah kedalam bentuk digital. Pada bagian *signal processor* berfungsi untuk mengambil sinyal yang dibutuhkan dan membuang sinyal yang tidak diperlukan. Dan pada *main computer* berfungsi untuk mengolah sinyal agar menjadi suatu informasi yang diinginkan [2]. Berdasarkan sinyal yang dikirim radar dapat dibagi dua, yaitu *Pulse Wave Radar* (radar pulsa) dan *Continuous Wave Radar* (CW radar). Pada radar pulsa, pengiriman gelombang elektromagnetik berupa pulsa-pulsa yang dikirimkan pada waktu tertentu [7] dan menggunakan satu antena yang sama dalam mengirimkan dan menerima sinyal radio. Sedangkan CW radar mengirimkan sinyal radio secara terus menerus dengan menggunakan antena *transmitter* dan *receiver* secara terpisah serta menggunakan



pergeseran frekuensi doppler untuk mendeteksi target yang bergerak atau untuk mengukur kecepatan relatif dari target [2].

Gambar 2. Output sinyal pulse wave radar dan continuous wave radar

Persamaan radar menjelaskan mengenai parameter-parameter sistem radar. Bentuk sederhana dari persamaan radar dapat ditulis sebagai berikut [2]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e \quad (1)$$

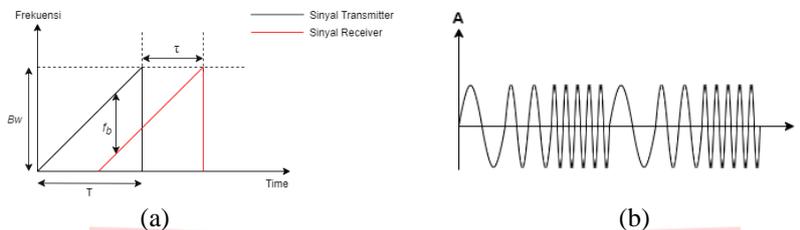
Daya terima (P_r) yang disalurkan ke pengolah sinyal diperoleh dari kerapatan daya pada jarak (R) dari radar yang memancarkan daya (P_t) dari *gain* antena (G_t), *Radar Cross Section* (σ) adalah perbandingan daya sinyal datang dengan daya sinyal yang terhamburkan dengan kata lain merupakan ukuran energi yang ditangkap oleh target radar. Penyebut $4\pi R^2$ merupakan divergensi sinyal gema pada jalur kembalinya ke radar. Area efektif (A_e) adalah banyaknya radiasi yang ditangkap oleh radar.

2.2 Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar

FMCW merupakan salah satu jenis radar yang menggunakan pancaran frekuensi yang sudah dimodulasi dan diradiasikan secara *continuous* [2]. Berbeda dengan radar CW, radar FMCW dapat mengubah frekuensi operasinya selama pengukuran [8]. Sistem kerja dari FMCW radar yaitu dengan meradiasikan sinyal frekuensi yang sudah dimodulasi maka objek tersebut akan memantulkan sinyal sehingga akan terjadi perbedaan sinyal frekuensi saat diterima oleh *receiver* [2]. Pengukuran jarak dilakukan dengan membandingkan sinyal yang diterima dengan sinyal referensi / sinyal transmisi [8].

Kelebihan radar FMCW yaitu memiliki sistem radar dengan desain yang sederhana dan menggunakan daya pancar yang rendah untuk memancarkan sinyal. Resolusi jarak radar FMCW bergantung pada *bandwidth* [5]. Semakin lebar *bandwidth* yang digunakan, maka semakin akurat radar dalam mendeteksi target. *Range resolution* sebagai salah satu parameter sistem radar menjadi sangat penting dan perlu ditingkatkan untuk memberikan informasi jarak target yang akurat [9].

Radar FMCW terdapat dua jenis, yaitu *Linear Frequency Modulated* (LFM) dan *Non-Linear Frequency Modulated* (NLFM). Pada LFM biasanya menggunakan bentuk sinyal *saw-tooth* atau *Triangular* karena bentuk getaran sinyal yang frekuensinya berbeda. Sedangkan pada NLFM lebih mudah untuk diimplementasikan karena tidak ada perbedaan pada jenis sinyalnya, menggunakan sinyal frekuensi berbentuk sinusoidal [5].



Gambar 3. (a) Sinyal segitiga linear FMCW, (b) Sinyal FMCW

Pada Gambar 3 terdapat *Sweep time* (T), yaitu waktu yang dibutuhkan sinyal untuk berubah dari frekuensi terendah sampai tertinggi. *Bandwidth* sinyal (Bw), yaitu rentang frekuensi sinyal radar FMCW. *Delay time* (τ), yaitu waktu yang diperlukan sinyal untuk mencapai ke target lalu kembali lagi ke penerima. Kemudian *Frekuensi Beat* (f_b), yaitu selisih antara frekuensi sinyal yang dikirimkan dengan sinyal yang diterima [7]. Maka persamaan sinyal yang dipancarkan yaitu :

$$S_t = A_t \cos(2\pi f_0 t + \pi \mu t^2) \quad (2)$$

Dimana A_t adalah amplitudo yang ditransmisikan, f_0 adalah frekuensi terendah dan μ adalah *chirp rate*. *Chirp rate* dapat didefinisikan sebagai :

$$\mu = \frac{Bw}{T_p} \quad (3)$$

Dimana Bw adalah *bandwidth* yang merupakan rentang frekuensi sinyal radar FMCW. T_p adalah *Time Sweep* yang merupakan periode sinyal chirp.

Ketika gelombang yang dipancarkan radar diradiasikan ke dalam sebuah medium dan menabrak target, maka target akan memantulkan kembali sebagian gelombang tersebut kembali ke radar [1]. Gelombang yang dipantulkan merupakan gelombang pancar yang mengalami pelemahan dan penundaan waktu. Maka gelombang pantul dapat dinyatakan sebagai :

$$S_r = A_r \cos(2\pi f_0(t - \tau) + \pi \mu(t - \tau)^2) \quad (4)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa gelombang pantul sama dengan gelombang pancar yang tertunda sebesar τ yang dinyatakan sebagai :

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (5)$$

Dimana R adalah jarak antara radar dengan target dan c adalah cepat rambat gelombang di udara.

Sinyal *beat* yang dihasilkan oleh *mixer* terdiri dari penjumlahan dan pengurangan frekuensi. Untuk menghilangkan penjumlahan dari dua sinyal tersebut maka perlu ditambahkan LPF untuk mendapatkan komponen *low order*. Sehingga persamaan frekuensi *beat* yang diperoleh dari turunan pertama fasa sinyal *beat*, yaitu :

$$f_b = \mu \tau \quad (6)$$

Dimana R merupakan jarak antara radar dengan target yang didapat dari frekuensi *beat*, yaitu :

$$R = \frac{T_p c}{2Bw} \times f_b \quad (7)$$

Dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk merubah sinyal *beat* dari domain waktu ke dalam domain frekuensi, maka akan didapat puncak frekuensi *beat* pada spektrum frekuensinya.

2.3 FMCW Doppler Radar

Efek Doppler adalah fenomena yang menghubungkan frekuensi gelombang harmonik yang dihasilkan oleh sumber yang bergerak dengan frekuensi yang diukur oleh pengamat yang bergerak dengan kecepatan berbeda dari sumbernya [10]. Ketika antenna mendeteksi adanya target yang bergerak dengan kecepatan relatif terhadap radar (v_r), pergeseran frekuensi terhadap sinyal terima dari *transmitter* disebut frekuensi Doppler (f_d) [1]. Perhitungan frekuensi Doppler dapat dirumuskan sebagai berikut [12] :

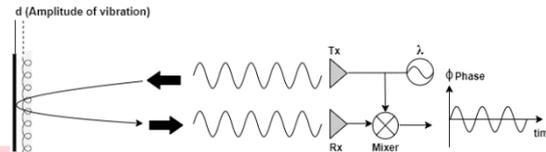
$$f_d = \pm \frac{2v_r}{\lambda} = \pm \frac{2v_r f_0}{c} \quad (8)$$

Dimana v_r adalah kecepatan relatif, λ adalah panjang gelombang, f_0 adalah frekuensi kerja dan c adalah cepat rambat gelombang di udara (3×10^8 m/s). Frekuensi Doppler bernilai negatif ketika target bergerak menjauhi radar dan bernilai positif jika target mendekati radar [11].

2.4 Getaran

Getaran atau vibrasi adalah gerakan bolak-balik yang melewati suatu titik kesetimbangan. Ketika suatu benda bergerak dari satu titik awal dan kembali lagi ke titik tersebut (A-B-C-B-A), maka peristiwa tersebut dapat didefinisikan sebagai satu kali bergetar penuh. Sebagai contoh, suatu bandul tidak pernah melewati lebih dari titik A atau titik C karena titik tersebut merupakan simpangan terjauh. Simpangan terjauh itu disebut amplitudo [12].

Getaran mempunyai tiga parameter penting yang dapat dijadikan sebagai tolak ukur yaitu Amplitudo, merupakan ukuran atau besarnya sinyal vibrasi yang dihasilkan. Amplitudo dari sinyal vibrasi mengidentifikasi besarnya gangguan yang terjadi. Semakin tinggi amplitudo yang ditunjukkan, menandakan semakin besar gangguan yang terjadi. Frekuensi, merupakan banyaknya periode getaran yang terjadi dalam satu putaran waktu. Besarnya frekuensi yang timbul pada saat terjadinya vibrasi dapat mengidentifikasi jenis-jenis gangguan yang terjadi. Frekuensi biasanya ditunjukkan dalam bentuk *Cycle* per menit (CPM), yang biasanya disebut istilah *Hertz* (dimana $\text{Hz} = \text{CPM}$). *Phase*, merupakan perpindahan atau perubahan posisi dari pada bagian – bagian yang bergetar secara relatif untuk menentukan titik referensi atau titik awal pada bagian yang lain yang bergetar.



Gambar 4. Prinsip getaran

Pada gambar 4 menunjukkan pengukuran getaran menggunakan fase sinyal yang dipantulkan dari target. Fase sinyal yang dipantulkan dimodulasi oleh getaran titik pantul. Amplitudo dan frekuensi getaran target diukur dengan menganalisis perubahan fase. Untuk mengukur getaran, frekuensi pengulangan radar harus lebih tinggi dari frekuensi getaran [3].

2.5 Software Defined Radio (SDR)

Software Defined Radio (SDR) adalah teknologi komunikasi berbasis nirkabel yang ditentukan oleh perangkat lunak dalam menjalankan fungsinya [13]. SDR sangat fleksibel karena dapat dikonfigurasi ulang, sehingga tanpa harus mengganti perangkat kerasnya pun dapat melakukan perubahan standar atau fungsi radio pada perangkat lunak saja. Komponen-komponen penting untuk membangun arsitektur SDR adalah rangkaian analog RF, ADC/DAC untuk sinyal IF atau RF, dan prosesor sebagai perangkat kerasnya, serta perangkat lunak untuk menjalankan fungsi radio.

Teknologi SDR mempunyai kelebihan yaitu mampu beradaptasi dengan perkembangan teknologi, tidak memerlukan penambahan atau perubahan *hardware*, lebih mudah dan sederhana dalam pengaplikasiannya, memperkecil ukuran dari sistem radar yang digunakan, Sistem SDR mampu mendukung pengembangan sistem komunikasi radio yang lebih maju. SDR juga mempunyai kekurangan yaitu memerlukan sistem antena dan tingkat RF yang sesuai untuk berbagai sistem radio, diperlukan sebuah arsitektur *Analog to Digital Converter* (ADC), membutuhkan sistem pengolahan sinyal *real time*, aplikasi dari SDR membutuhkan sistem pengolahan dan transmisi yang dapat meminimalisir *error* [13].

2.6 GNU Radio Companion

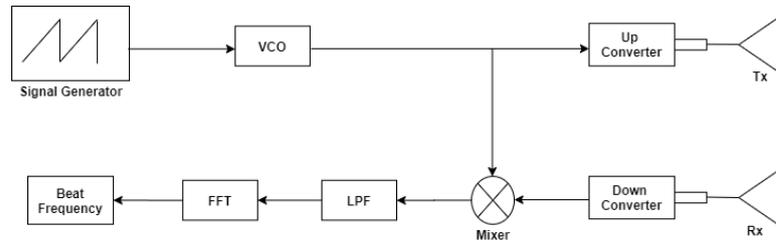
GNU Radio adalah *software open source* dan gratis yang menyediakan blok pemrosesan sinyal untuk mengimplementasikan radio perangkat lunak. GNU Radio dapat digunakan dengan *hardware* RF untuk membuat radio yang diinginkan oleh pengguna kemudian dikonfigurasi dengan *software* [15]. Jika tidak ada perangkat keras eksternal, GNU Radio dapat digunakan untuk simulasi, dan memiliki fasilitas untuk mempresentasikan hasil dari simulasi tersebut [5].

GNU radio bekerja pada rentang frekuensi *baseband* maupun IF. GNU radio digunakan untuk membangkitkan sinyal *chirp* FMCW, mengirim dan menerima data dari dan ke *hardware* RF serta melakukan *mixing* antara sinyal *transmit* dan sinyal *receive*. Sehingga didapatkan hasil berupa sinyal *beat* yang disimpan dalam bentuk *file binary* [1]. Selain itu, GNU Radio digunakan dalam penelitian ini karena simulasi dapat dilakukan tanpa biaya dan sedikit kompleksitas [5].

3. Model dan Perancangan Radar FMCW

3.1 Blok Diagram Sistem Radar FMCW

Dalam merancang sebuah sistem dibutuhkan rancangan sistem yang terstruktur untuk mempermudah merealisasikan sistem yang dibuat. Gambar 5 merupakan blok diagram sistem radar FMCW

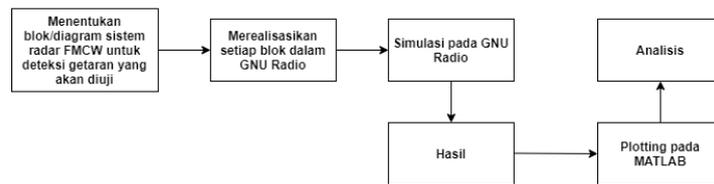


Gambar 5. Blok diagram sistem radar FMCW

Sinyal generator sebagai pembangkit sinyal FM akan dihubungkan dengan *Voltage Controlled Oscillator* (VCO) yang bertindak sebagai pemodulator yang keluarannya merupakan sinyal radar FMCW. Setelah sinyal dimodulasi maka akan dipancarkan menggunakan antenna pengirim ke arah target. Kemudian target akan memantulkan sinyal dan sebagian sinyal tersebut diterima oleh antenna penerima. *Low Noise Amplifier* (LNA) pada *receiver* memperkuat sinyal yang lemah dengan menggunakan *gain* yang tinggi dan *noise* yang rendah. Sinyal dari LNA digabungkan dengan sinyal referensi menggunakan *mixer*. Untuk mendapatkan elemen pengurangan (*low-order*) pada frekuensi *beat*, elemen penjumlahan (*high-order*) dihilangkan dengan menambahkan *Low Pass Filter* (LPF). *Fast Fourier Transform* (FFT), merupakan algoritma pengolahan sinyal untuk menggambarkan sinyal yang sudah dihasilkan oleh LPF.

3.2 Blok Diagram Penelitian

Pada Gambar 6 menunjukkan blok diagram penelitian yang akan dilakukan pada sistem radar FMCW.

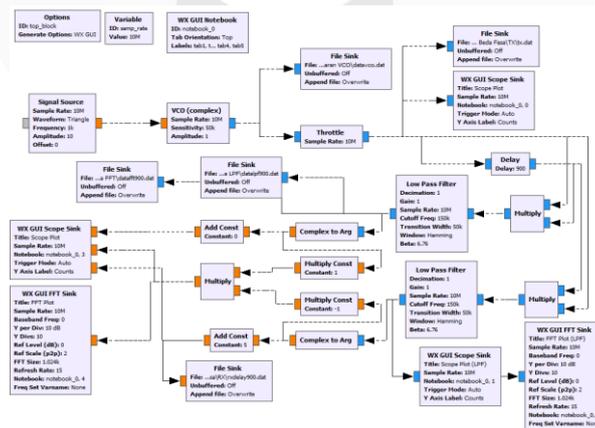


Gambar 6. Blok diagram penelitian

Langkah penelitian ini dimulai dengan menentukan blok/diagram sistem radar FMCW untuk deteksi getaran yang akan disimulasikan, kemudian akan dilakukan simulasi menggunakan GNU Radio, jika hasil sudah sesuai maka akan di *plotting* pada *software* pengolahan sinyal yaitu MATLAB untuk melihat *outputnya* dengan lebih jelas, kemudian hasilnya akan dianalisis.

3.3 Simulasi

Pada tahap ini membuat simulasi radar FMCW dengan menggunakan GNU Radio Companion. Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan sistem radar yang dapat memancarkan sinyal radar FMCW yang dibutuhkan dalam simulasi ini. Simulasi dimulai dengan membuat konfigurasi komponen di GNU Radio yang akan digunakan pada penelitian Tugas Akhir. Gambar 7 merupakan Konfigurasi sistem radar FMCW untuk mendeteksi getaran.



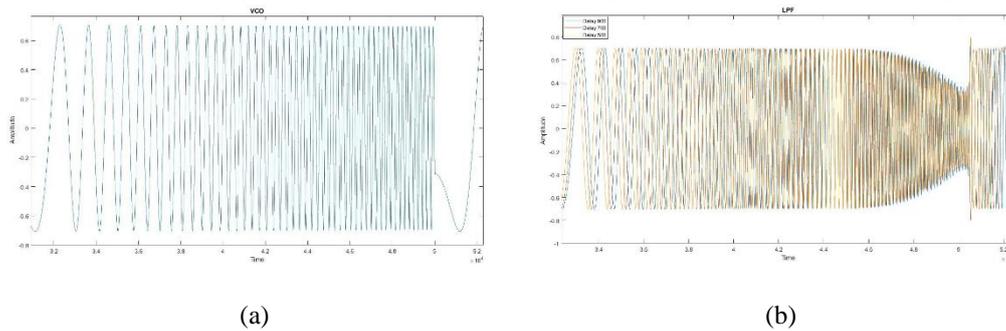
Gambar 7. Konfigurasi sistem radar FMCW untuk mendeteksi getaran

4. Hasil dan Analisis

4.1 Hasil fungsional

Pada Gambar 8 merupakan keluaran sinyal LPF dan VCO radar FMCW. Sinyal yang dihasilkan dari konfigurasi sistem radar FMCW untuk mendeteksi getaran yang dibuat pada GNU Radio di *plotting* pada *software* pengolahan sinyal dan diambil dalam satu periode waktu agar dapat dilihat lebih jelas. Potongan sinyal yang dihasilkan oleh VCO dan LPF titik puncaknya mencapai 0.7. Potongan sinyal yang diambil kurang lebih satu

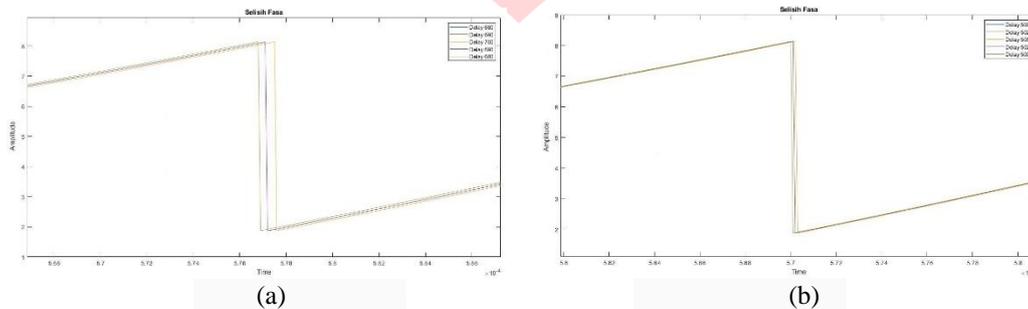
periode chirp.. Dapat disimpulkan, semakin besar nilai suatu delay maka sinyal yang akan di terima oleh *receiver* akan membutuhkan waktu yang lebih lama, oleh karena itu pada gambar terlihat sinyal akan bergeser.



Gambar 8. Keluaran sinyal (a) VCO, (b) LPF

4.2 Hasil Deteksi Getaran menggunakan Domain Waktu

Setelah mengetahui hasil fungsional dari sistem radar, maka dilakukan pengukuran pergeseran fasa sinyal *received* untuk sejumlah *delay* yang berbeda. Dimana *delay* yang digunakan akan dibuat dengan cara bolak-balik untuk merekayasa suatu getaran. Perubahan waktu dari sinyal Rx yang didapat dari sejumlah *delay* yang berbeda akan dicatat agar dapat melihat pergeseran fasa dari getaran menggunakan domain waktu. Ada dua perbandingan getaran yang digunakan yaitu, getaran kecil menggunakan *delay* A yaitu 500 ns, 502 ns, 505 ns dan getaran besar menggunakan *delay* B yaitu 680 ns, 690 ns, 700 ns, yang dibuat bolak – balik. Data selisih fasa yang didapat dari *delay* tersebut di simpan pada *filesink* kemudian di *plotting* pada *software* pengolahan sinyal untuk melihat selisih fasa pada masing – masing *delay* dengan lebih jelas.



Gambar 9. Selisih fasa (a) getaran besar, (b) getaran kecil

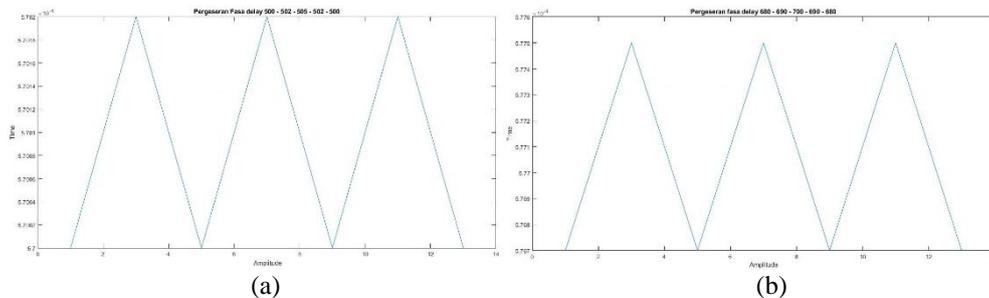
Pada Gambar 9 menunjukkan keluaran dari getaran kecil dan besar. Jika dilihat sekilas seperti hanya ada tiga garis sinyal, tetapi jika dilihat lebih jelas terdapat lima garis sinyal, dimana dua garis sinyal tersebut menimpa sinyal yang lainnya karena nilainya yang sama. Garis – garis tersebut merupakan hasil potongan sinyal dari selisih fasa pada *delay* A dan *delay* B yang dibuat bolak – balik dan sudah di perbesar. Perbandingan selisih fasa dapat kita lihat pada puncak keluaran sinyal masing – masing *delay*. Untuk mengetahui nilai puncak pada selisih fasa *delay* A dan *delay* B dapat dilihat melalui tabel berikut.

Tabel 1 Hasil selisih fasa getaran kecil

| Delay (ns) | Sample | Time |
|------------|--------|--------------------------|
| 500 | 8,135 | 5,7 x 10 ⁻⁴ |
| 502 | 8,139 | 5,701 x 10 ⁻⁴ |
| 505 | 8,136 | 5,702 x 10 ⁻⁴ |
| 680 | 8,123 | 5,767 x 10 ⁻⁴ |
| 690 | 8,13 | 5,771 x 10 ⁻⁴ |
| 700 | 8,141 | 5,775 x 10 ⁻⁴ |

Pada Tabel 1 menunjukkan perbandingan waktu untuk *delay* A (500 ns, 502 ns, dan 505 ns) hanya berselisih 0,001 detik, sedangkan untuk *delay* B (680 ns, 690 ns, 700 ns) hanya berselisih 0,004 detik. Jika dibandingkan dengan getaran kecil, pergeseran fasa terhadap domain waktu untuk getaran besar lebih besar, oleh karena itu membutuhkan waktu yang lebih lama. Nilai suatu *delay* akan berbanding lurus terhadap waktu. Dari waktu yang telah didapat kemudian digunakan untuk dapat melihat pergeseran fasa terhadap getaran.

Pada Gambar 10 menunjukkan pergeseran fasa getaran menggunakan *delay* secara bolak – balik. Karena digunakan secara bolak – balik maka pada saat pergeseran fasa sudah mencapai puncak tertinggi, sinyal akan turun kembali sehingga membentuk sebuah segitiga yang dapat membuktikan getaran itu sendiri



Gambar 10. Pergeseran fasa (a) getaran kecil, (b) getaran besar

Setelah melihat pergeseran fasa pada masing – masing getaran, dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai perubahan jarak (Δ) terhadap getaran yang terdeteksi oleh radar.

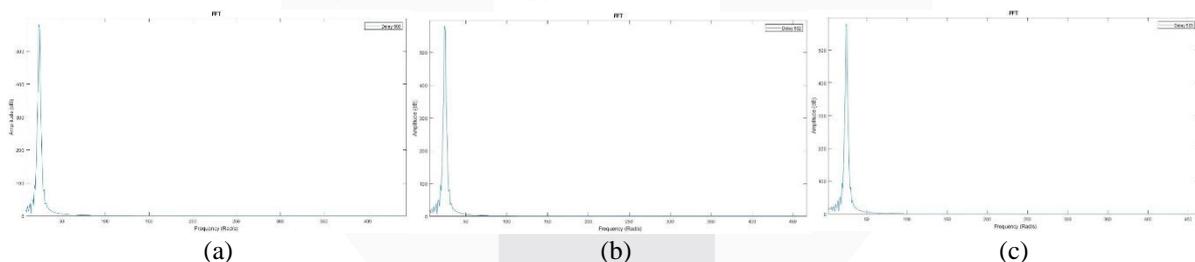
Tabel 2 Hasil perhitungan jarak

| Time | Jarak (m) |
|---|-----------|
| $5,701 \times 10^{-4} - 5,7 \times 10^{-4}$ | 15 |
| $5,702 \times 10^{-4} - 5,7 \times 10^{-4}$ | 30 |
| $5,771 \times 10^{-4} - 5,767 \times 10^{-4}$ | 60 |
| $5,775 \times 10^{-4} - 5,767 \times 10^{-4}$ | 120 |

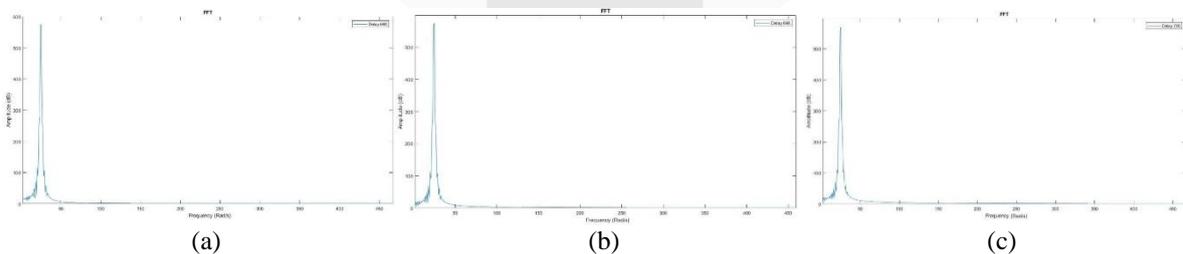
Berdasarkan hasil dari Tabel 2 dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak getaran dari radar berbeda – beda. Pada getaran kecil menggunakan *delay* A (500 ns, 502 ns, 505 ns), dimana waktu dari *delay* 500 ns dijadikan sebagai nilai referensi untuk menghitung jarak getaran dari radar. Sedangkan pada getaran besar menggunakan *delay* B (680 ns, 690 ns, 700 ns), dimana waktu dari *delay* 680 ns dijadikan sebagai nilai referensi untuk menghitung jarak getaran dari radar. Maka didapatkan hasil perhitungan jarak, dengan jarak terjauh 120 meter dan jarak terdekat 15 meter.

4.3 Hasil Deteksi Getaran menggunakan Domain Waktu

Selain mengetahui hasil deteksi getaran menggunakan domain waktu dengan pergeseran fasa, hasil deteksi getaran juga dapat dilihat dari frekuensi beat pada *delay* yang digunakan. Pada pengukuran ini menggunakan sinyal keluaran FFT yang kemudian disimpan pada filesink dan *plotting* pada *software* pengolahan sinyal untuk dapat melihat puncak – puncak dari frekuensi *beat* pada *delay* yang digunakan. Pada getaran kecil menggunakan *delay* A (500 ns, 502 ns, 505 ns) dan getaran besar menggunakan *delay* B (680 ns, 690 ns, 700 ns).



Gambar 11. Frekuensi beat dengan perbandingan *delay* (a) 500 ns, (b) 502 ns, (c) 505 ns



Gambar 12. Frekuensi beat dengan perbandingan *delay* (a) 680 ns, (b) 690 ns, (c) 700 ns

Gambar 11 dan 12 menunjukkan frekuensi *beat* dari *delay* A (500 ns, 502 ns, 505 ns) dan *delay* B (680 ns, 690 ns, 700 ns). Data yang diperoleh dari puncak masing – masing spektrum, dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 3 Frekuensi *beat* sejumlah *delay*

| Delay (ns) | Amplitudo (dB) | Frekuensi (Rad/s) |
|------------|----------------|-------------------|
| 500 | 581,9 dB | 24 (Rad/s) |
| 502 | 581,2 dB | 24 (Rad/s) |
| 505 | 579,8 dB | 24 (Rad/s) |
| 680 | 575 dB | 25 (Rad/s) |
| 690 | 574,7 dB | 25 (Rad/s) |
| 700 | 569,4 dB | 25 (Rad/s) |

Dari hasil simulasi pada Tabel 3 dapat ditarik kesimpulan bahwa frekuensi *beat* dari tiga *delay* yang berbeda yaitu 500 ns, 502 ns dan 505 ns mempunyai nilai yang sama yaitu 24 (Rad/s). Sedangkan amplitudonya berubah, pada saat *delay* 500 ns *peak* yang dicapai sebesar 581,9 dB. Saat *delay* 502 ns *peak* yang dicapai sebesar 581,2 dB. Saat *delay* 505 ns *peak* yang dicapai sebesar 579,8 dB. Begitu juga dengan *delay* 680 ns, 690 ns dan 700 ns mempunyai nilai yang sama yaitu 25 (Rad/s). Sedangkan amplitudonya berubah, pada saat *delay* 680 ns *peak* yang dicapai sebesar 575 dB. Saat *delay* 690 ns *peak* yang dicapai sebesar 574,7 dB. Saat *delay* 700 ns *peak* yang dicapai sebesar 569,4 dB. Semakin besar nilai *delay* maka nilai amplitudo yang dihasilkan akan semakin kecil. Frekuensi yang tidak berubah menunjukkan bahwa pengukuran getaran menggunakan frekuensi *beat* tidak akurat.

5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir terhadap perancangan sistem radar FMCW untuk mendeteksi getaran dapat disimpulkan dari hasil secara fungsional untuk sinyal keluaran LPF pada *delay* 500 ns, 700 ns dan 900 ns menunjukkan bahwa semakin besar nilai *delay* maka semakin lama waktu yang dibutuhkan sinyal untuk diterima oleh *receiver*. Ada dua cara membuktikan radar untuk mendeteksi getaran, yaitu dengan melihat pergeseran fasa dan frekuensi *beat*. Dari hasil deteksi menggunakan *delay* secara bolak-balik sebagai rekayasa getaran menunjukkan adanya pergeseran fasa, dimana pada getaran kecil bergeser sebanyak 0,001 detik dan getaran besar sebesar 0,004 detik. Pada perbandingan waktu *delay* simulasi dan kalkulasi terdapat error sebesar 1,818%. Walaupun sistem bisa mendeteksi getaran, tetapi masih terdapat error. Dari hasil frekuensi *beat*, semakin besar nilai suatu *delay* maka semakin kecil amplitudo yang dihasilkan tetapi pada frekuensi tidak mengalami perubahan yang berarti pergeseran pada getaran tidak dapat terlihat. Oleh karena itu pendeteksian getaran menggunakan perubahan pada fasa lebih baik dari pada menggunakan frekuensi *beat*.

Daftar Pustaka

- [1] S. Aulia, S. Tjondronegoro, and R. Kurnia, "Analisis Pengolahan Sinyal Radar Frequency Modulated Continuous Wave untuk Deteksi Target," *J. Nas. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 51–64, 2013, doi: 10.20449/jnte.v2i2.86.
- [2] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, Third Edit., no. 5. 2008.
- [3] H. Nohmi and A. R. System, "Development of Vibration-Imaging Radar (VirA)," *2019 IEEE Radar Conf.*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835776.
- [4] Azizah, A. B. Suksmono, and A. Munir, "Signal processing of range detection for SFCW radars using Matlab and GNU radio," *Proceeding - 2014 Int. Conf. Comput. Control. Informatics Its Appl. "New Challenges Oppor. Big Data", IC3INA 2014*, pp. 145–148, 2014, doi: 10.1109/IC3INA.2014.7042617.
- [5] Q. Zhu and Y. Wang, "FMCW radar implemented with GNU Radio Companion," pp. 1–20, 2016.
- [6] S. Aulia, A. B. Suksmono, and A. Munir, "Stationary and moving targets detection on FMCW radar using GNU radio-based software defined radio," *2015 Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. ISPACS 2015*, pp. 468–473, 2016, doi: 10.1109/ISPACS.2015.7432817.
- [7] S. Radar, "Stepped Frequency Continous Wave (SFCW) Radar," vol. 10, no. 4, pp. 13–16, 2015.
- [8] A. D. Setiawan, "Radar , Navigasi , dan Remote Sensing."
- [9] M. Ansori, S. Hadi, and M. A. Muslim, "Desain , Simulasi dan Analisis Peningkatan," vol. 9, no. 2, pp. 150–156, 2015.
- [10] C. Neipp, A. Hernández, J. J. Rodes, A. Márquez, T. Beléndez, and A. Beléndez, "An analysis of the classical Doppler effect," *Eur. J. Phys.*, vol. 24, no. 5, pp. 497–505, 2003, doi: 10.1088/0143-0807/24/5/306.
- [11] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Second Edi. McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [12] D. Puspita, "Getaran dan Perambatan Bunyi Serta Macam-Macam Perambatan Bunyi," 2018.
- [13] E. Marpanaji, B. R. T, A. Z. R. Langi, and A. Kurniawan, "ARSITEKTUR SOFTWARE-DEFINED RADIO (SDR)," vol. 3, pp. 1–6, 2006.