

Desain, Simulasi dan Analisis Peningkatan Range Resolution Sistem Radar FMCW

Mohamad Ansori, Sholeh Hadi Pramono dan M. Aziz Muslim

Abstract—Range resolution as one of the parameters of the radar system becomes very important and need to be upgraded to provide accurate target distance information. The Direct Digital Synthesizer (DDS) as devices is limited bandwidth to Increased and will enlarge the noise and power consumption of system Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar. To improve range resolution, bandwidth and linierity of chirp output signal play very important role. Moreover, engineering of sampling rate for range resolution improvement still experience barriers supposing based on peak detection only. So to improve range resolution alternatives that can do that is maintain linieritas or increase bandwidth and not just based on peak detection.

This paper discuss improvement of range resolution without increasing bandwidth using curve fitting method, i.e. comparing the output signal of the mixer and shift beat frequency until matching condition reached. Error of measurement range resolution is affected by the phase errors due to the beat frequency nonlinierity, so it is necessary to shift the frequency using curve fitting method of beat against the sweep of raw data (ADC output) to earn optimum beat frequency (optimum range resolution). The curve fitting methods can increase the Range resolution of Radar Demonstration Kit (RDK) up to 0.005 m range accuracy 15.2 % and shifting the beat frequency of 1KHz left.

Keywords—FMCW Radar, Range Resolution, Direct Digital Synthesizer, Curve Fitting.

Abstrak—Range resolution sebagai salah satu parameter sistem radar menjadi sangat penting dan perlu ditingkatkan untuk memberikan informasi jarak target yang akurat. Peningkatan bandwidth dapat dilakukan namun terbatas pada perangkat Direct Digital Synthesizer (DDS) yang digunakan dan akan memperbesar noise serta konsumsi daya sistem radar Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW). Untuk meningkatkan range resolution, linieritas dan bandwidth sinyal output chirp keduanya berperan sangat penting dan upaya rekayasa laju sampling untuk peningkatan range resolution masih mengalami hambatan bila didasarkan pada peak detection. Sehingga untuk meningkatkan range resolution beberapa alternatif yang dapat dilakukan yaitu menjaga linieritas atau meningkatkan bandwidth dan bukan hanya didasarkan pada peak detection.

Mohamad Ansori adalah mahasiswa Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang (mansori91@gmail.com)

Sholeh Hadi Pramono adalah dosen pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang (sholehpramono@gmail.com)

M. Aziz Muslim adalah dosen pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang (muhamadzism2@gmail.com)

Pada tulisan ini dibahas peningkatan range resolution tanpa meningkatkan bandwidth menggunakan metode kurva fitting dengan cara membandingkan sinyal output mixer dan menggeser frekuensi beat sinyal output mixer sampai keduanya cocok (match). Kesalahan pengukuran range resolution dipengaruhi oleh kesalahan fasa akibat ketidaklinieran frekuensi beat, sehingga perlu dilakukan penggeseran frekuensi beat menggunakan metode kurva fitting terhadap sweep raw data (output ADC) untuk memperoleh frekuensi beat optimum (range resolution optimum). Range resolution untuk Radar Demonstration Kit (RDK) menggunakan metode kurva fitting diperoleh hasil peningkatan range resolution sebesar 0,005 m, ketepatan jarak 15,2% dan pergeseran frekuensi beat ke kiri 1KHz.

Kata Kunci—Radar FMCW, Range Resolution, Direct Digital Synthesizer, Kurva Fitting

I. PENDAHULUAN

RADAR pulsa banyak digunakan dipelabuhan udara, laut dan instalasi militer. Radar jenis ini dapat menjangkau jarak yang sangat jauh (puluhan sampai ratusan kilometer) akan tetapi radar ini memerlukan konsumsi daya yang sangat besar (4 KW). Seiring dengan perkembangan teknologi piranti keras (*hardware*) untuk frekuensi radio dan gelombang mikro (*microwave*) telah dikembangkan sistem radar gelombang kontinu berdaya rendah (10 W) bermodulasi frekuensi yang disebut *frequency modulated continuous wave* (FMCW) [1]

Radar berbasis *Direct Digital synthesizer*(DDS) tipe AD 9956 ini menghasilkan sinyal *output chirp* menggunakan program komputer, sehingga dapat diatur frekuensi *sweep* dan lebar bandnya [2]. Pengaturan ini berfungsi untuk menentukan *range resolution* sistem radar, yaitu berkisar antara 4 m sampai dengan 125 m tergantung tipe DDS yang digunakan. Selain beberapa kelebihan tersebut, radar FMCW berbasis DDS memiliki kekurangan antara lain yaitu adanya kesalahan fasa pada sinyal *output chirp* yang dapat menurunkan *range resolution*.

Berdasarkan fakta tersebut, maka range resolution sebagai salah satu parameter sistem radar menjadi sangat penting dan perlu ditingkatkan untuk memberikan informasi jarak target yang akurat. Untuk meningkatkan *range resolution*, linieritas dan *bandwidth* sinyal output *chirp* keduanya berperan sangat penting [3] dan upaya rekayasa laju sampling untuk peningkatan *range resolution* masih mengalami

hambatan bila didasarkan pada *peak detection* [4].

Pada tulisan ini dibahas peningkatan *range resolution* dengan cara menjaga linieritas sinyal *output chirp* tanpa meningkatkan *bandwidth*. Hal ini dilakukan dengan cara membandingkan antara sinyal *output mixer* hasil Transformasi Fourier yang mengandung frekuensi *beat* dan sinyal *chirp* hasil Transformasi Fourier yang dipancarkan sebagai referensi kemudian menggeser frekuensi *beat* sinyal *output mixer* menggunakan metode kurva *fitting* sampai keduanya cocok (*match*). Kesalahan dalam pengukuran *range resolution* dipengaruhi oleh kesalahan fasa akibat ketidaklinieran frekuensi *beat*, sehingga perlu dilakukan penggeseran frekuensi *beat* terhadap *sweep raw data (output ADC)* untuk memperoleh frekuensi *beat* optimum (*range resolution optimum*). Simulasi digunakan sebagai alat pendukung desain dan analisis untuk memperoleh hasil pengukuran jarak yang akurat melalui perubahan delay dan kalibrasi serta verifikasi dengan perubahan laju sampling pada *zero order hold*.

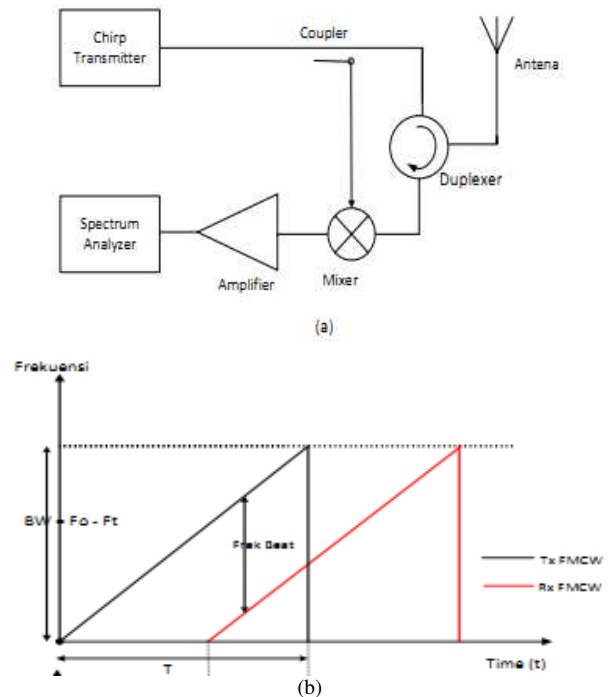
Penelitian lain yaitu *range performance radar FMCW* menggunakan simulasi MAS (*Modified Adaptive Sampling*) yang diproses dalam domain waktu menggunakan *numerical fitting* sinyal *sampling* diskrit terhadap sinyal target referensinya dan selanjutnya menyusun kembali deretan *sampling* setiap saat sehingga diperoleh susunan data set *sampling* hasil modifikasi. Selain itu ada pula modifikasi sistem radar FMCW yang menggunakan simulasi matlab simulink, sehingga secara praktis dari pengujian tersebut diperoleh *range resolution* atas pemodelan yang telah dirancang sebelumnya. Model yang dibuat disesuaikan dengan blok diagram sistem radar FMCW terdiri dari 3 (tiga) bagian utama yaitu *transmitter* termasuk sinyal *chirp* hasil modulasi, kanal dengan *noise AWGN (Additif White Gaussian Noise)* dan *receiver* yang meliputi sinyal asli dan sinyal delay kemudian dimasukkan dalam *AND gate*. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan *range resolution* system penerimaan radar FMCW menggunakan metode optimasi kurva *fitting*, sehingga diperoleh frekuensi *beat* dan *delay time* optimum.

II. DASAR TEORI

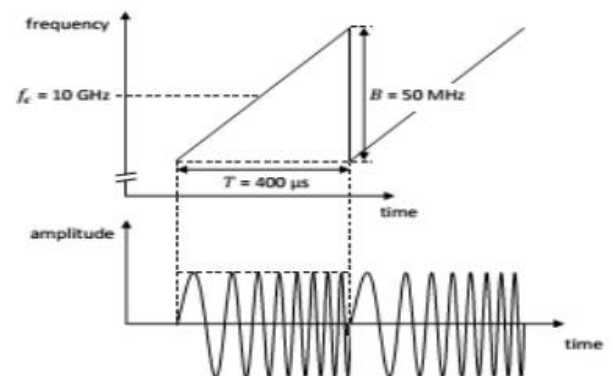
A. Radar Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)

Radar FMCW bekerja menggunakan prinsip *homodyne* dimana *oscillator* bekerja selain sebagai *local oscillator* juga untuk frekuensi *transmitter*. Secara umum skema diagram konsep FMCW seperti terlihat pada Gambar 1.(a), sinyal CW (*Continuous Wave*) dimodulasi frekuensi untuk menghasilkan *linier chirp* yang dipancarkan ke target melalui antenna dan sinyal pantul (*echo*) diterima oleh antenna yang sama dimana kedua sinyal tersebut dipisahkan oleh *duplexer*. Sebagian sinyal yang dipancarkan dicampur didalam mixer dengan sinyal yang diterima untuk menghasilkan sinyal sinkronisasi, kemudian dikuatkan oleh amplifier

dan bentuk sinyalnya dapat dilihat pada spektrum analyzer. Frekuensi yang dipancarkan mengalami kenaikan secara linier terhadap waktu demikian juga dengan frekuensi yang diterima sehingga diperoleh frekuensi *beat* f_b dan waktu tunda setelah T_p detik seperti terlihat pada Gambar 1.(b). Frekuensi *beat* adalah selisih antara frekuensi yang dipancarkan dan yang diterima.



Gambar 1. Skema diagram dan model konsep FMCW [3].



Gambar 2. Skema linier Up chirp dengan periode T, frekuensi deviasi B dan frekuensi tengah f_c [5]

Pada Gambar 2. Frekuensi sinyal yang dikirimkan meningkat secara linier dengan waktu (*Up chirp*) dengan perubahan frekuensi (*frekuensi deviasi*) sebesar B dan frekuensi tengah sebesar $f_c = 10$ GHz, sehingga amplitude sinyalnya konstan dan frekueansinya berubah secara linier selama periode T detik dari 9,950 GHz sampai dengan 10,050 GHz. Idealnya frekuensi yang diterima juga demikian sehingga diperoleh frekuensi *beat* konstan. Secara matematis sinyal yang dikirimkan dapat dinyatakan dalam domain waktu sebagai berikut[5]:

$$s_{tx}(t) = V_{tx} \cos \left[2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \right) \right] \quad (1)$$

Dimana $\alpha = B / T = 125$ GHz/detik, merupakan laju sinyal chirp FM, B adalah *bandwidth* sinyal chirp FM dan T adalah *time sweep* sedangkan f_c adalah frekuensi tengah. Untuk periode pengulangan antara $-T/2 < t < T/2$, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$s_{tx}(t) = s_{tx}(t + T) \quad (2)$$

Dengan menganggap sinyal tersebut periodic dan fasanya koheren pada tiap-tiap intervalnya, makawaktu internal (t_m) dalam pulsa ke-m dapat dinyatakan:

$$t_m = t - mT, \quad -\frac{T}{2} < t_m < \frac{T}{2} \quad (3)$$

Dari persamaan (2-1) dan (2-2) diperoleh:

$$s_{tx}(t) = V_{tx} \cos \left[2\pi \left(f_c t_m + \frac{1}{2} \alpha t_m^2 \right) \right] \quad (4)$$

Frekuensi merupakan turunan dari fasa (Carson 1922) sehingga diperoleh:

$$f_{tx}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (\Phi_{tx}) = f_c + \alpha t_m \quad (5)$$

$$\Delta f_{tx} = B = 50 \text{ MHz} \quad (6)$$

Sinyal yang diterima secara matematis merupakan bentuk perlambatan (*delay*) dari sinyal yang dikirimkan dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$s_{rx}(t) = V_{rx} \cos 2\pi \left(f_c (t_m - \tau_0) + \frac{1}{2} \alpha (t_m - \tau_0)^2 \right) \quad (7)$$

dimana $\tau_0 = 2R/c$ merupakan *delay* atau waktu yang dibutuhkan oleh sinyal chirp mulai dari sinyal dikirim sampai dengan diterima kembali dan c adalah kecepatan rambat gelombang = $3e8$ meter/detik.

B. Range FFT (Fast Fourier Transform).

Sebelum dilakukan proses FFT terhadap sinyal output ADC (*Analog to Digital Converter*) terdapat dua aspek penting yaitu *sampling interval* dan *sampling rate criterion*. Pertama, *sampling interval* (T_{AD}) ditentukan untuk menghindari terjadinya *sampling fly-back transient* dari *sweep* sebelumnya, sehingga sinyal *beat* harus disampling pada periode interval:

$$T_{AD} = T - \tau_{max} \quad (8)$$

Dimana, T = *time sweep* yaitu waktu yang diperlukan untuk satu periode *sweep* dari frekuensi bawah ke frekuensi atas dan τ_{max} adalah *delay maksimum* dari *echo target*.

Kedua, *sampling rate criterion* (f_s) yaitu besarnya frekuensi sampling minimal untuk mencegah terjadinya interferensi *bandwidth* setelah dilakukan proses FFT. Bila frekuensi *beat* maksimum = $f_{b(max)}$, maka frekuensi *sampling* minimumnya adalah:

$$f_s \geq 2 f_{b(max)} \quad (9)$$

Dan jumlah *sample* setiap periode *sweep*-nya yaitu:

$$N = T_{AD} f_s \quad (10)$$

Bila $N \geq 2 f_{b(max)} T_{AD}$ *sample*, maka diperoleh *sample* pada domain frekuensi dari $-f_{b(max)}$ sampai dengan $f_{b(max)}$ dimana $N/2$ merupakan jumlah *sample* positif dari $f_{b(max)} T_{AD}$. Bila lebar pulsa mendekati $1/T_{AD}$ dan $T_{AD} = 400 \mu s$, maka diperoleh lebar pulsa = 2.5 kHz

dan untuk $B = 10$ MHz maka terdapat 4000 informasi target yang dapat diwakili. Bila N *point* FFT menghasilkan $N/2$ frekuensi diskrit positif dan dengan menggantik dengan $f = \left(\frac{k}{N}\right) f_s$ dimana $k = 0, \dots, (N/2)-1$, maka informasi target adalah pulsa frekuensi *beat* tersampling. Secara digital setiap $N/2$ *sample* akan disimpan didalam baris matrik sampai dengan M baris sehingga akan terbentuk $N/2$ matrik kolom yang disebut dengan *range bin*.

C. Direct Digital Synthesizer (DDS).

DDS adalah sebuah teknik pengolahan data digital untuk membangkitkan sebuah sinyal output yang bias diatur frekuensi dan fasanya berdasarkan pada sebuah *clock* referensi yang presisi dan memiliki frekuensi tetap. Komponen DDS yang digunakan dalam tesis ini adalah AD9956 dari Analog Devices. Untuk membangkitkan sinyal chirp tersebut dapat dilakukan dengan memprogram komponen DDS dengan cara memasukkan beberapa parameter yaitu frekuensi bawah, frekuensi atas, kenaikan frekuensi (RDFTW), dan seberapa sering kenaikan frekuensi (RSRR) yang masing-masing dimasukkan dalam register PCR0, PCR1, RDFTW, dan RSRR. Jadi dengan memasukkan nilai RDFTW dan RSRR dapat diperoleh sinyal chirp dengan frekuensi ekskursi (*bandwidth*) seperti pada Tabel 1.

TABEL I.
NILAI-NILAI RSRR DAN RDFTW [7].

RSRR	RDFTW	FrekuensiEkskursi (BW = MHz)
1	4	1.539906
1	8	3.079812
1	16	6.159624
1	32	12.319248
1	64	24.638496
1	128	49.276992

Idealnya sinyal *output chirp* yang dihasilkan DDS memiliki fasa konstan, dan frekuensi beat yang merupakan fungsi jarak dapat menunjukkan ukuran yang akurat, namun kenyataannya masih terdapat kesalahan fasa sehingga timbul bayangan (*ghost*) pada *representasi target*.

D. Range Resolution dan Metode Curva Fitting

Range resolution adalah kemampuan radar untuk membedakan dua atau lebih target dalam *range sel* dan *bearing* (sudut azimut) yang sama namun memiliki jarak yang berbeda-beda. Pada penelitian ini bagaimana metode *kurva fitting* dapat memberikan resolusi jarak yang tepat dibandingkan hasil pengukuran.

Sinyal *output* mixer merupakan fungsi waktu tunda (τ) antara sinyal chirp yang dipancarkan dengan sinyal *echo* yang diterima, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut [4]:

$$u_t(t, \tau) = \text{sinc}(\Delta f \tau) \cos(2\pi f_d t + \phi_0) + \dots \sum_{k=-1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \text{sinc}(\Delta f \tau + k) \cos[2\pi(k f_m + f_d)t + \phi_0] + \dots \\ \text{sinc}(\Delta f \tau - k) \cos[2\pi(k f_m - f_d)t - \phi_0] \end{array} \right\} \quad (11)$$

dimana:

Δf = dinamic range (BW) dalam modulasi FM

$\tau = 2R/c$, R jarak target dan c = kecepatan gelombang elektromagnetik

$f_m = 1/T$ dan f_d adalah frekuensi deviasi akibat efek Doppler

Sehingga dengan beberapa penyederhanaan, *range resolution* dapat ditingkatkan menggunakan deretan pulsa kedua yaitu [4]:

$$2\pi\Delta f \sum_{k=1}^{\infty} |\text{sinc}(\Delta f\tau - k)| \delta(f - kf_m + f_d) \quad (12)$$

Dari sistem radar FMCW, menunjukkan adanya korelasi antara frekuensi beat dan jarak dengan persamaan[1]:

$$f_b = \frac{4Rf_m\Delta f}{c} \quad (13)$$

$$f_b = \left(\frac{\Delta f}{t_{\text{sweep}}} \right) \tau \quad (14)$$

dimana $\tau = 2R/c$, sehingga

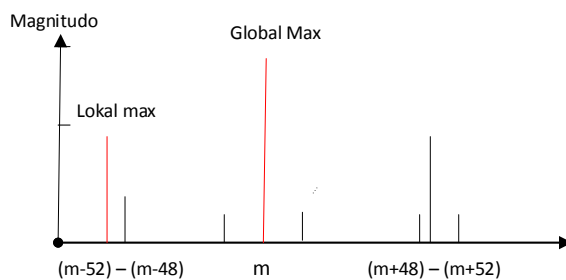
$$f_b = \frac{2R \Delta f}{c \cdot t_{\text{sweep}}} \quad (15)$$

$$R = \frac{c \cdot t_{\text{sweep}} \cdot f_b}{2 \cdot \Delta f} \quad (16)$$

$$\delta R = \frac{R}{N/2} \quad (17)$$

Dari persamaan (16) menunjukkan bahwa pergeseran frekuensi *beat* berarti pergeseran jarak dan perubahan *range resolution*. Pada simulasi ini digunakan *raw data output mixer* kemudian diproses secara digital menggunakan FFT dan sinyal *echo* tersebut diplot pada *range sel FFT point* yang tersedia (N=512). Jadi untuk *range sel* 1 (N=1) untuk frekuensi *beat* terendah, jarak terdekat dan *range sel* 512 (N=512) untuk frekuensi *beat* tertinggi dan jarak terjau kurva *fitting* merupakan proses pengolahan deretan sinyal diskrit dengan algoritma sebagai berikut[5]:

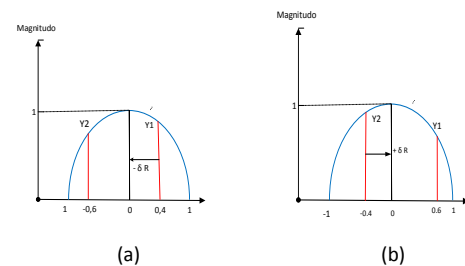
- Mengambil bagian positif *output mixer* tersampling berupa deretan pulsa (N *point* FFT)
- *Levelling* untuk menentukan magnitudo sinyal diskrit FFT
- Menentukan level puncak (*Global maximum*) dan level puncak kedua (*Local Maximum*) yang berdekatan menggunakan parameter frekuensi *beat* (f_b) dan resolusi FFT.



Gambar 3. Lokal maksimum deteksi puncak

Bila pada simulasi digunakan $f_m = 1/T = 100$ kHz dan resolusi FFT = 2 kHz, maka global maksimum terletak pada m sampel dan lokal maksimum pada (m - 100k/2k) atau (m - 50) dan dengan cara yang sama

diperoleh lokal maksimum kedua pada (m + 50). Untuk menghindari kompleksitas yang tinggi, maka pengecekan lokal maksimum sebelah kiri terletak pada (m-52) sampai dengan (m-48) seperti pada Gambar 3[4].

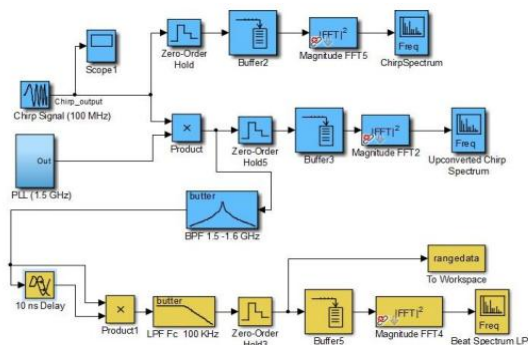


Gambar 4. Pergeseran Kurva Fitting

Pada Gambar 4. (a) pola puncaknya tinggi kanan pendek kiri (HRLR) maka digeser ke kiri ($-\delta R$) dan Gambar 2.6 (b) pola puncaknya tinggi kiri pendek kanan (HLLR) maka digeser ke kanan ($+\delta R$).

E. Simulasi sistem radar FMCW.

Alat bantu analisis sistem radar FMCW menggunakan simulasi Matlab Simulink. Desain model seperti terlihat pada Gambar 5. terdiri dari tiga bagian, pertama *signal chirp input* dengan parameter penyusun f_m dan Δf , secara grafis dapat dilihat pada scope 1 dan chirp spektrum merupakan tampilan sinyal chirp hasil Transformasi Fourier.



Gambar 5. Desain model simulasi Matlab Simulink sistem radar FMCW [7].

Kedua, sinyal chirp hasil modulasi dengan frekuensi tengah sehingga diperoleh *signal chirp upconverted spektrum* hasil Transformasi Fourier. Ketiga, sinyal chirp output *BandPass Filter* (BPF) yang dimodulasi dengan *delay time* (τ), sehingga diperoleh sinyal *beat spektrum Low Pass Filter* hasil Transformasi Fourier. Desain simulasi menggunakan parameter sistem radar FMCW yang ada saat ini berupa *bandwidth* ($\Delta f = 50$ Mhz) dan *time sweep* = 664,93 μ s. Frekuensi tengah = 160 MHz, sehingga digunakan band pass filter 135 MHz – 185 MHz. Dan *delay time* diatur sesuai dengan jaraknya, untuk 4 NM diperoleh *delay* (τ) = 12,33 μ s.

III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang analisa masalah, variabel penelitian dan solusi masalah.

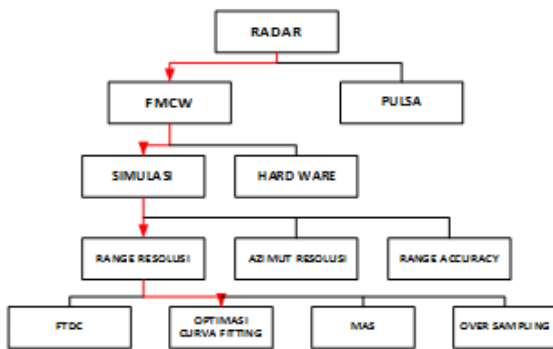
A. Analisa Permasalahan.

Radar pengawas pantai yang menggunakan modulasi FMCW berbasis DDS sangat mudah dan fleksibel untuk dilakukan pemrograman serta berdaya rendah (10 Watt) namun dengan adanya error fasa akibat pembangkitan frekuensi oleh DDS maka akan menurunkan kemampuan sistem radar tersebut.

Penelitian terkait telah dikembangkan termasuk metode yang digunakan, yaitu dengan meningkatkan *bandwidth* dan modifikasi laju *sampling* akan tetapi hal ini akan menambah noise dan memori. Untuk itu perlu dikembangkan peningkatan *range resolution* tanpa meningkatkan *bandwidth* menggunakan metode kurva *fitting* dengan beberapa variabel antara lain; frekuensi *sampling*, *bandwidth*, frekuensi *sweep*, *time chirp*, *delay*, frekuensi *beat* dan jarak serta *range resolution*.

B. Konsep Solusi.

Untuk menyelesaikan permasalahan peningkatan *range resolution* dibutuhkan kerangka konsep penelitian sebagai acuan, yang dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 6. Kerangka Konsep Penelitian

Penelitian tentang peningkatan *range resolution* sistem radar FMCW menggunakan alat pendukung simulasi, memiliki keuntungan yaitu lebih mudah dimodifikasi, namun harus memenuhi syarat kriteria yang diharapkan sehingga perlu diverifikasi dan dikalibrasi agar diperoleh simulasi dengan parameter input dan output mendekati sistem radar FMCW yang ada. Untuk meningkatkan *range resolution* tanpa meningkatkan *bandwidth* dilakukan dengan menjaga linieritas sinyal *output chirp* menggunakan metode optimasi kurva *fitting* terhadap sinyal *echo target* (*sweep raw data*) dari *output mixer* yang diolah secara *Digital Signal Processing* (DSP). Sebelum dilakukan optimasi, pengolahan sinyal dibagi dalam dua tahap, pertama *pre FFT processing* meliputi *equalizing*, *smoothing* dan *enveloping* dan kedua *post FFT processing* meliputi *base line correction*, *dB scale*, *peak detection local and global* [7].

Jadi sinyal *echo target* yang akan dioptimasi, diproses melalui dua tahap tersebut. Optimasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode kurva fitting yang dimasukkan kedalam simulasi untuk mendapatkan frekuensi beat atau *delay time* (τ) optimum dan prosedur operasionalnya adalah sebagai berikut:

- Menghitung N point FFT dan range sel.

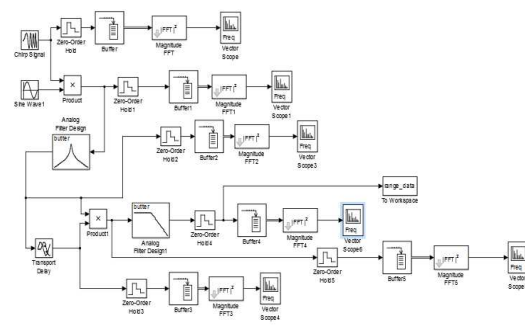
- Menentukan level sinyal sesuai N poin FFT.
- Menentukan range sel sinyal puncak dan puncak kedua.
- Menentukan tipe kedua range sel yang dicatat apakah kanan tinggi kiri rendah atau kiri tinggi kanan rendah dan tentukan arah pergeserannya.
- Membandingkan dengan sinyal Sinc referensi yang sebelumnya dinormalisasi terlebih dahulu, kemudian menggeser sinyal *echo*.
- Menentukan pergeserannya kemudian menentukan nilai frekuensi beat dan range sel.

C. Desain Simulasi.

Perancangan simulasi bertujuan agar memiliki sinyal output sesuai dengan karakteristik sistem radar yang ada. Parameter input sistem radar antara lain, frekuensi pembawa pertama, *bandwidth* sinyal *chirp* dan frekuensi bawah, frekuensi atas, *time sweep* dan *delay*. Simulasi menggunakan simulink Matlab dengan beberapa komponen antara lain pembangkit sinyal *chirp* (*chirp signal*), pembangkit frekuensi pembawa (*sine wave*), *multiplayer* (*product*), pembangkit delay (*delay transport*), dan filter (BPF, LPF).

Sebagai parameter digunakan *vektor scope* dan *spectrum analyzer* untuk melihat tampilan sinyal pada tiap-tiap *cek poin* yaitu *output chirp* untuk melihat bentuk dan besar frekuensi sinyal *chirp*, *output up chirp* untuk melihat sinyal output yang dihasilkan setelah dimodulasi oleh frekuensi pembawa pertama dan *vektor scope* terakhir pada titik output *Low Pass Filter* (LPF) untuk melihat sinyal *beat* yang dihasilkan. *Zero order hold* untuk merubah sinyal analog menjadi digital dengan frekuensi *sampling* tertentu kemudian sinyal hasil *sampling* ditempatkan dalam *buffer* yang berukuran minimal sama dengan jumlah *sampling*.

Untuk itu dibuat desain simulasi seperti pada Gambar 7. dan *setup* simulasi sebagai berikut:



Gambar 7. Desain simulasi Matlab Simulink

- Pembangkit sinyal *chirp*, frekuensi bawah 135.361MHz, frekuensi atas 184.638MHz dan *time sweep* 664,93µ detik.
- Pembangkit sinyal pembawa pertama, *sine wave* frekuensi 616 MHz.
- Zero Order Hold = 9 ns, Zero Order Hold1 = 37,6 ns, Zero Order Hold2 = 9 ns, Zero Order Hold3 = 9 ns.
- BPF = 3713,759E6 rad/detik s.d 4023,21E6 rad/detik
- LPF = 6,28E6 rad/detik
- Delay = 100E-9 detik

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

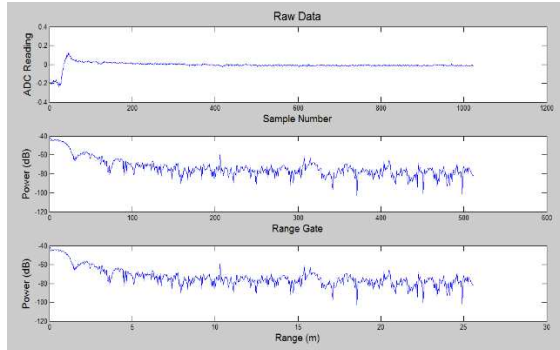
A. Implementasi

Implementasi dilakukan dengan menggunakan Radar Demonstration Kit (RDK) dengan spesifikasi sebagai berikut, frekuensi *Sampling* 20 KHz dan *bandwidth* 50 MHz, frekuensi *beat* (f_b) max = $f_s/2 = 10$ KHz dan *time chirp*-nya = 1 ms. Dari data tersebut diplot frekuensi *beat* yang merupakan fungsi jarak dalam 512 *range bin* dengan resolusi frekuensi = 20 Hz. Dari pers. (14) diperoleh Frekuensi *beat* (f_b) max = (BW/T) * *delay* (τ) max sehingga *delay* maksimum = 200 ns. Sedangkan jarak maksimum $R_{max} = \text{delay}(\tau)_{max} \cdot C = 30$ m.

Pengukuran dilakukan menggunakan target berupa plat berukuran 40x50 cm dengan jarak yang bervariasi dari 5 m, 10 m, 15 m, 20 m dan 25 m. Pelaksanaan pengukuran dilakukan seperti pada Gambar 8. Hasil pengukuran jarak 20 m seperti pada Gambar 9.



Gambar 8. Pelaksanaan pengukuran jarak



Gambar 9. Raw data, range gate dan jarak

B. Pembahasan.

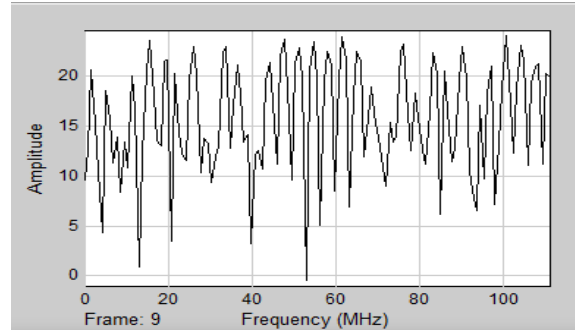
Berdasarkan pada algoritma kurva fitting maka dapat ditentukan parameter yang dapat diolah dari Gambar 9 yaitu:

- N poin FFT sebanyak 512 buah, range gate 512 buah dengan resolusi frekuensi sebesar $10 \text{ KHz}/512 = 19,53 \text{ Hz} \approx 20 \text{ Hz}$. Sesuai dengan ukuran jarak maka puncak sinyal *echo* terletak pada *range gate* 410 dengan nilai normalisasi = 0,98 dan puncak kedua pada *gate* 391 dengan nilai normalisasi = 0,1. Hal tersebut menunjukkan bahwa pola yang dibentuk adalah *Low Left High Right* (LLHR) sehingga jaraknya dikurang kiri ($-\delta R$).
- Untuk proses Fitting dilakukan dengan membagi sinyal *sinc* ternormalisasi sebanyak dua kali selisih *gate* sehingga terbentuk 40 angka *sinc* ternormalisasi.

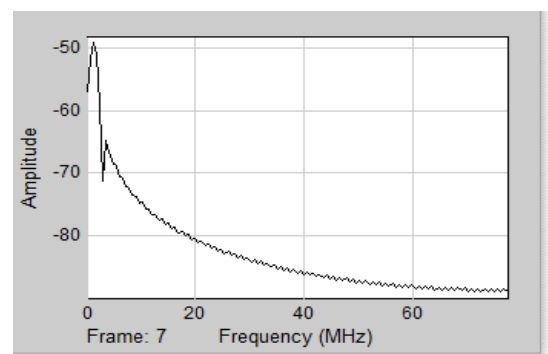
- Setelah *fitting* diperoleh *gate* 410 sinyal *echo* berhimpit dengan *gate* 22 sinyal *sinc* dan *gate* 391 sinyal *echo* berhimpit dengan *gate* 2 sinyal *sinc*.
- Pergeseran dilakukan dengan mengurangi titik tengah *sinc* dengan *sinc* terdekat yang berhimpit atau $(10-8) = 2$ satuan. Hal ini menunjukkan pergeseran atau koreksi yang dilakukan sebesar 2/20 atau 10 % sehingga sinyal *echo* harus digeser 10 % ke kiri dan frekuensi *beat* juga bergeser 10 % (1 KHz). Bila dikonversi ke jarak menjadi $10\% \cdot 30 \text{ m} = 3 \text{ m}$ dan peningkatan *range resolution* $= 3/512 = 0.005 \text{ m}$.
- Pengukuran jarak dalam penelitian ini sebanyak 5 kali dan data hasil perhitungan seperti pada Tabel I.

TABEL I.
PERHITUNGAN JARAK DAN KURVA FITTING

No nyata	Jarak (m)	Pengukuran		Kurva Fitting		Perbaikan %
		Jarak (m)	Error %	Jarak (m)	Error %	
1	5	6,1	22	4,6	8	14
2	10	12,1	21	10,6	6	15
3	15	18,1	20,6	15,1	0,6	20
4	20	24	20	21	5	15
5	25	28,8	15,2	25,8	3,2	12



Gambar 10. Sinyal Chirp 50 MHz simulasi



Gambar 11. Sinyal Output Mixer simulasi

Hasil simulasi pada Gambar 10. menunjukkan sinyal *chirp* yang dibentuk tampak spektrum dengan *bandwidth* 50 MHz, namun pada pergantian *chirp* satu

ke *chirp* berikutnya, masih tampak mengerucut, ini yang disebut efek *playback*, yang disebabkan oleh besarnya *time sweep* yang digunakan tidak dikurangi *time delay*. Gambar 11. Menunjukkan sinyal output *mixer* simulasi berupa frekuensi *beat* 450 KHz dan delay 6 μ s. Frekuensi *beat* merupakan fungsi jarak, dimana frekuensi *beat* maksimum berbanding lurus dengan jarak maksimum. Sesuai perancangan, frekuensi *beat* maksimum = 1,54 MHz, jarak maksimum 3,1 Km, dan *delay* maksimum = 20,47 μ s. Sesuai perhitungan untuk delay = 6 μ s diperoleh frekuensi *beat* = 451,4 KHz.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil yang telah dianalisa maka dapat ditarik kesimpulan:

- Dalam penelitian ini telah dilakukan desain, simulasi dan analisis perhitungan jarak dan kecepatan target serta simulasi sistem radar menggunakan simulink matlab dengan hasil sebagai berikut:
- Simulasi sistem radar dapat berfungsi sebagai alat pendeteksi jarak target terhadap parameter sistem radar yang diinputkan dan dapat dilakukan kalibrasi sebelum dilakukan pengukuran dengan mengatur waktu sampling komponen zero order hold.
- Penelitian yang telah dilakukan terbatas pada pengolahan data diluar sistem radar (non real time).
- Metode optimasi kurva fitting berfungsi untuk meningkatkan range resolution sistem Radar Demonstration Kit (RDK) sebesar 0.005 m dan ketepatan jarak 15,2 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak terkait dengan penelitian ini terutama kepada Kalemjiantek Kodiklat TNI AD yang telah memberikan kesempatan studi S2 di Universitas Brawijaya dan Kepala Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI yang telah memberikan dukungan peralatan dan data untuk bahan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Anuja Chaudhari, 2015, Frequency Estimator to Improve Short Range Accuracy in FMCW Radar.
- [2]. Ashish Kr. Roy, 2014, Transmitter and Receiver Design at L-band and X-band for FMCW Radar Altimeter, The Journal of Instrumentation, Automation and Systems
- [3]. Graham M Broker, 2005, Understanding Millimetre Wave FMCW Radars, International Conference on Sensing Technology, New Zealand
- [4]. Hao Hsien Ko, 2008, Range Resolution Improvement for FMCW Radars, Proceeding European Radar Conference
- [5]. Kurt Peek, An Analysis of the Effect of Digital Phase Error on the Performance of a FMCW – Doppler Radar, Thesis Master of Science in Applied Physics
- [6]. Mashury Wahab, 2008, Rancang bangun Radar Pengawasan Pantai INDRA II, Prosiding seminar Radar Nasional, PPET LIPI
- [7]. Purwoko Adhi, 2008, Pembangunan Chirp untuk Radar FMCW menggunakan DDS, Prosiding Seminar Radar Nasional, PPET LIPI
- [8]. W. Sediono, 2009, First Result of the Signal Processing of INDERA, International Research Centre for Telecommunication and Radar