

# Teknologi Radar

## *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW): Prinsip Kerja dan Simulasi*

Ananto Eka Prasetiadi

Universitas Nurtanio, Bandung, Indonesia

Email : ananto.prasetiadi@yahoo.com

***Abstrak** – Salah satu teknologi radar yang sedang berkembang adalah teknik Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) yang memanfaatkan modulasi frekuensi untuk mempelajari suatu objek. Dalam tulisan ini, akan dibahas mengenai prinsip kerja radar FMCW untuk mempelajari suatu objek, khususnya penentuan lokasi objek tersebut. Selain itu, sistem radar ini akan disimulasikan dengan bantuan MATLAB.*

### **I. Pendahuluan**

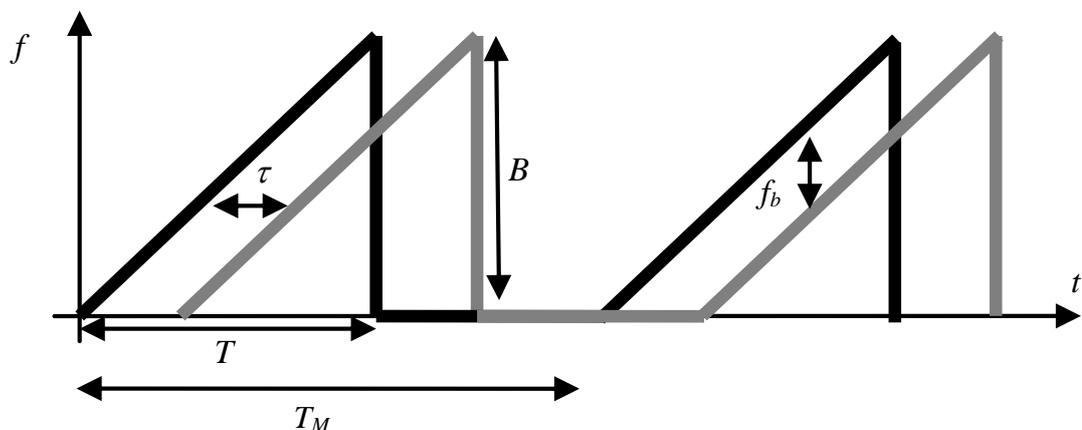
Penggunaan radar yang memanfaatkan modulasi frekuensi dimulai sejak hampir 90 tahun yang lalu, tepatnya pada tahun 1928 ketika J.O. Bentley mematenkan temuannya, yaitu *Airplane Altitude Indicating System* [1] atau suatu peralatan yang mampu memberikan informasi tentang ketinggian suatu pesawat terbang. Transmitter akan mengirimkan suatu sinyal yang frekuensinya dimodulasi oleh suatu sinyal segitiga dan dipancarkan ke permukaan bumi dari atas pesawat terbang. Sinyal ini dipantulkan oleh permukaan bumi kembali ke pesawat. Karena memanfaatkan modulasi FM, sinyal yang diterima oleh radar memiliki frekuensi yang berbeda dengan frekuensi sinyal yang dikirimkan saat itu karena adanya *delay* yang sebanding dengan ketinggian pesawat tersebut dari atas tanah. Artinya, ketinggian suatu pesawat dapat diketahui dari perbedaan frekuensi yang dapat diperoleh dengan memasukkan sinyal yang akan dikirimkan dengan sinyal yang telah diterima ke dalam suatu komponen, seperti *mixer* dan detektor.

Pada tahun-tahun selanjutnya, radar FMCW mulai memasuki dunia industri. Berhubung cukup sederhana dan mudah untuk digunakan, penggunaan radar FMCW semakin luas sebelum dimulainya Perang Dunia II [1].

## II. Prinsip Kerja Radar FMCW

Radar FMCW merupakan teknologi radar yang memanfaatkan sinyal-sinyal yang berbentuk segitiga yang ditumpangkan atau dimodulasikan dalam frekuensi dengan sinyal sinusoidal kontinu. Dengan kata lain, radar ini menggunakan teknik *Frequency Modulation* (FM) sehingga sinyal segitiga akan mengakibatkan frekuensi sinyal sinusoidal tersebut meningkat dalam suatu periode tertentu. Oleh karena itu, sinyal segitiga ini terkadang disebut sebagai “*chirp*” (kicauan) yang berasal kicauan burung yang biasanya memiliki sifat yang sama, yaitu frekuensi meningkat dalam suatu periode [2]. Sinyal termulasi kemudian ditransmisikan sehingga mengenai suatu target sehingga akan terpantulkan kembali menuju radar, kemudian diolah sedemikian rupa sehingga informasi tentang target dapat diperoleh.

Sinyal *baseband* segitiga dapat dilihat pada gambar 1 [3]. Pada gambar ini, terdapat dua buah sinyal, yaitu sinyal yang ditransmisikan (warna hitam) dan sinyal yang diterima (warna abu-abu).



Gambar 1. Sinyal *Baseband* Radar FMCW [3]

Pada gambar 1 di atas, terdapat beberapa parameter radar FMCW, yaitu:

1. *delay time* ( $\tau$ ), yaitu waktu yang diperlukan sinyal untuk mencapai ke target lalu kembali lagi ke penerima
2. *bandwidth* sinyal ( $B$ ), yaitu rentang frekuensi sinyal radar FMCW
3. *sweep time* ( $T$ ), yaitu waktu yang dibutuhkan sinyal untuk berubah dari frekuensi terendah sampai tertinggi (waktu sinyal segitiga)
4. periode transmisi sinyal ( $T_M$ ) atau selang waktu antar sinyal segitiga

Untuk setiap saat, sinyal yang ditransmisikan dikalikan dengan sinyal yang diterima. Dengan proses pemfilteran, diperoleh sinyal yang memiliki frekuensi selisih dari frekuensi kedua sinyal tersebut. Frekuensi ini disebut frekuensi *beat*. Dari sifat kesebangunan segitiga pada gambar 1, dapat dilihat bahwa frekuensi *beat* dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

$$f_b = \frac{B}{T} \tau \quad (1)$$

Dari persamaan 1, terlihat bahwa frekuensi *beat* sebanding dengan *delay time*. Dengan diketahuinya *delay time*, jarak antara radar dan target dapat diketahui dari persamaan:

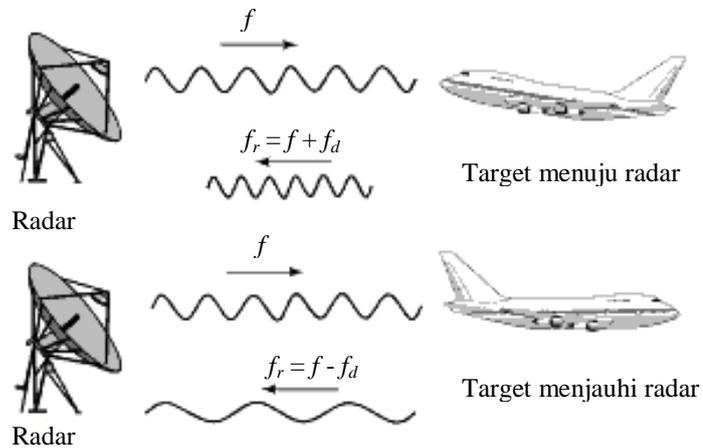
$$R = \frac{c\tau}{2} \quad (2)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2 ke persamaan 1, dapat disimpulkan bahwa dengan mengetahui frekuensi *beat*, maka jarak target dapat dihitung dengan [4]:

$$R = f_b \frac{cT}{2B} \quad (3)$$

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam sistem radar ini adalah adanya efek Doppler, yaitu perubahan frekuensi sinyal yang diterima karena adanya pergerakan target. Apabila target bergerak mendekati radar, maka frekuensi sinyal

yang diterima akan menjadi lebih besar dengan perbedaan frekuensi sebesar  $f_d$ . Begitu juga sebaliknya untuk target yang bergerak menjauhi radar. Agar lebih jelas, dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2. Ilustrasi Efek Doppler [5]

Pergeseran frekuensi Doppler ( $f_d$ ) sendiri sebanding dengan kecepatan target yang dapat dihitung dengan [5]:

$$f_d = \frac{2v_t}{v_o} f \quad (4)$$

Dengan kata lain:

$$v_t = \frac{f_d}{2f} v_o \quad (5)$$

Keterangan:

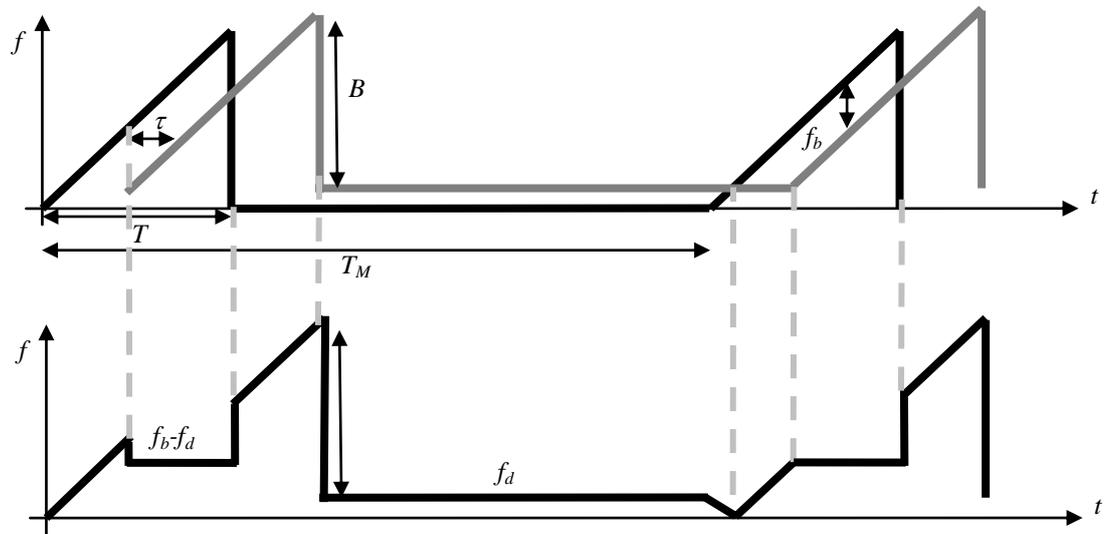
$v_t$  = kecepatan target (m/s)

$f_d$  = pergeseran frekuensi Doppler (Hz)

$f$  = frekuensi sinyal yang dikirimkan (Hz)

$v_o$  = kecepatan gelombang elektromagnetik di medium (m/s)

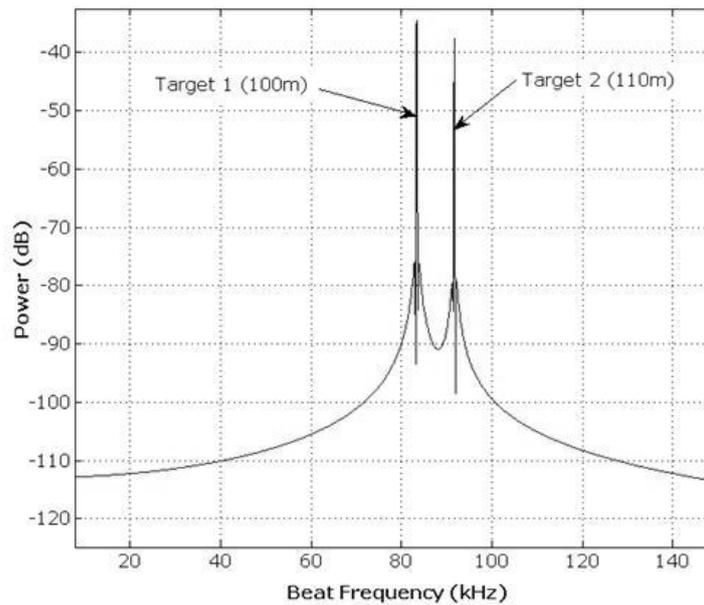
Sinyal hasil deteksi sendiri memiliki frekuensi seperti ini [6].



Gambar 3. Sinyal Hasil Deteksi [6]

Pada gambar 3, terlihat akibat dari adanya efek Doppler terhadap frekuensi sinyal yang diterima (warna abu-abu pada gambar atas), yaitu frekuensi tersebut dapat mengalami kenaikan ataupun penurunan sebesar  $f_d$ . Pergeseran frekuensi ini akan terlihat pada selang waktu antara sinyal terima dan pengiriman sinyal segitiga selanjutnya. Dengan diketahuinya informasi tentang  $f_d$ , maka kecepatan target dapat diketahui dari persamaan (5).

Setelah sinyal yang dipantulkan oleh target diterima oleh radar, langkah selanjutnya yang perlu dilakukan adalah memproses sinyal tersebut sehingga didapatkan informasi tentang target. Berhubung informasi yang ingin diketahui adalah frekuensi dari sinyal, seperti frekuensi *beat* dan Doppler, maka sinyal dapat ditransformasikan dari domain waktu ke domain frekuensi, salah satu caranya adalah dengan konversi ke sinyal digital, lalu melakukan *Fast Fourier Transform* (FFT) [7]. Dengan melewati sinyal melalui *lowpass filter* ke domain frekuensi, didapatkan domain frekuensi, misalnya seperti gambar berikut.



Gambar 4. Contoh Hasil Pemrosesan Sinyal yang Diterima [7]

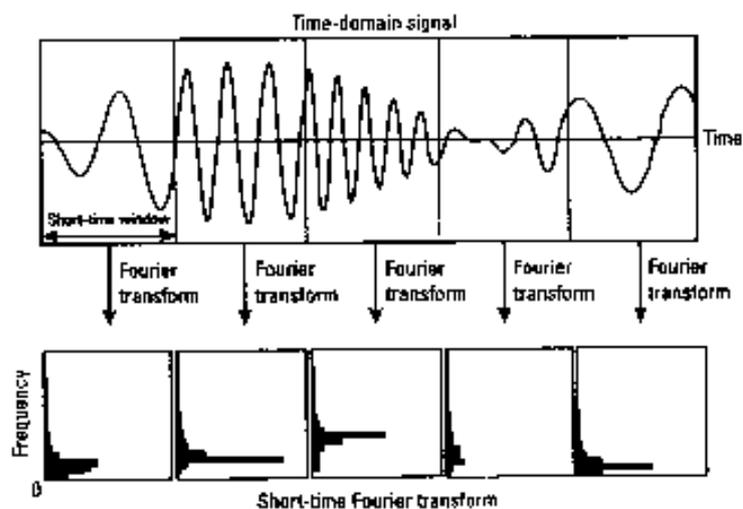
Pada gambar 4, dapat dilihat bahwa frekuensi *beat* dapat diketahui. Dengan demikian, jarak target dari radar juga dapat diketahui dari persamaan (3).

Pemrosesan sinyal dengan algoritma FFT mudah untuk sinyal yang frekuensinya tidak berubah terhadap waktu. Akan tetapi, untuk sinyal yang komponen spektrumnya berubah terhadap waktu, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3 di mana frekuensinya berganti-ganti (bervariasi dari 0 sampai  $B + f_d$ ), pengamatan sinyal akan sulit karena dengan mentransformasikan sinyal ke domain frekuensi, informasi tentang waktu kemunculan suatu spektrum frekuensi sukar untuk diketahui mengingat transformasi ke domain frekuensi tidak akan memberikan informasi tentang waktu. Oleh karena itu, biasanya digunakan gabungan domain waktu-frekuensi untuk analisis. Salah satu contoh transformasi yang memetakan ke domain waktu-frekuensi adalah *Short Time Fourier Transform* (STFT) [8], yaitu suatu modifikasi dari transformasi Fourier yang menganalisis sinyal secara lokal dengan membatasi sinyal tersebut dengan suatu fungsi *window*  $W(t)$  yang memiliki durasi tertentu. Secara matematis, STFT dinyatakan dengan [9]:

$$STFT(t', \omega) = \int_t [x(t)W(t-t')e^{-j\omega t} dt] \quad (6)$$

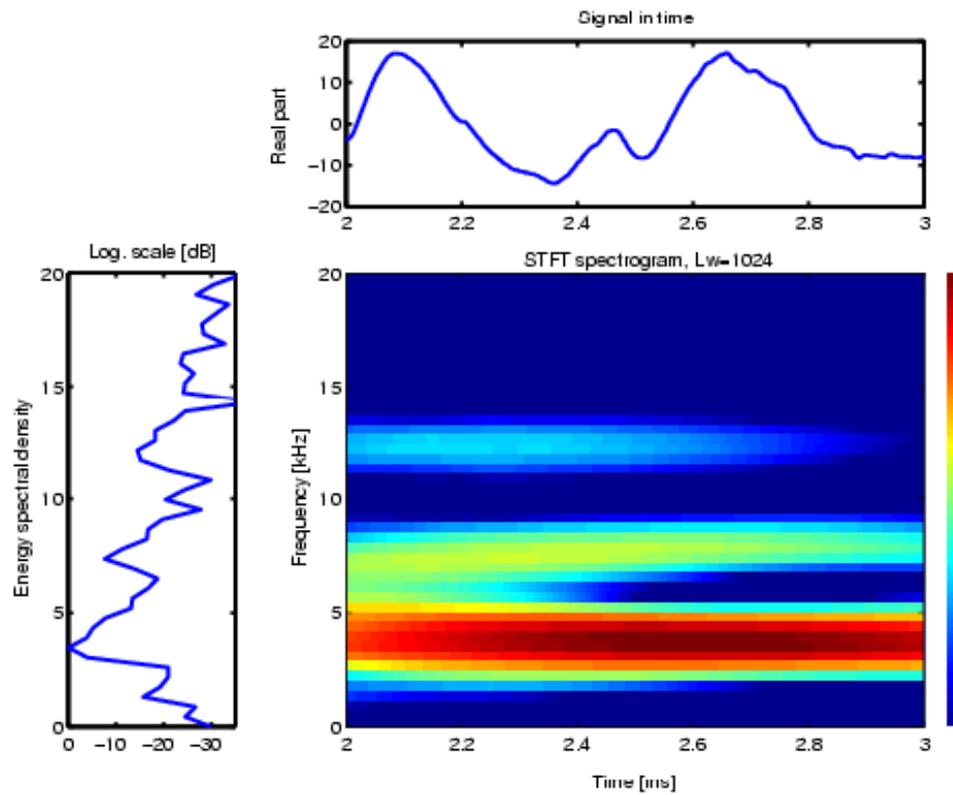
Dengan menggeser-geser fungsi *window* dari ujung sinyal ke ujung lainnya, maka akan diperoleh hasil STFT yang merupakan fungsi frekuensi dan waktu. Panjang *window* yang dipergunakan akan mempengaruhi hasil yang diperoleh. Apabila *window* terlalu panjang, maka STFT hampir tidak ada bedanya dengan transformasi Fourier yang tidak memiliki informasi tentang waktu kemunculan spektral. Demikian juga apabila *window* terlalu pendek, informasi frekuensi sinyal tidak akan didapatkan [9].

Berikut ini adalah contoh hasil STFT [8], terlihat bahwa waktu kemunculan komponen *spektral* dapat diketahui.



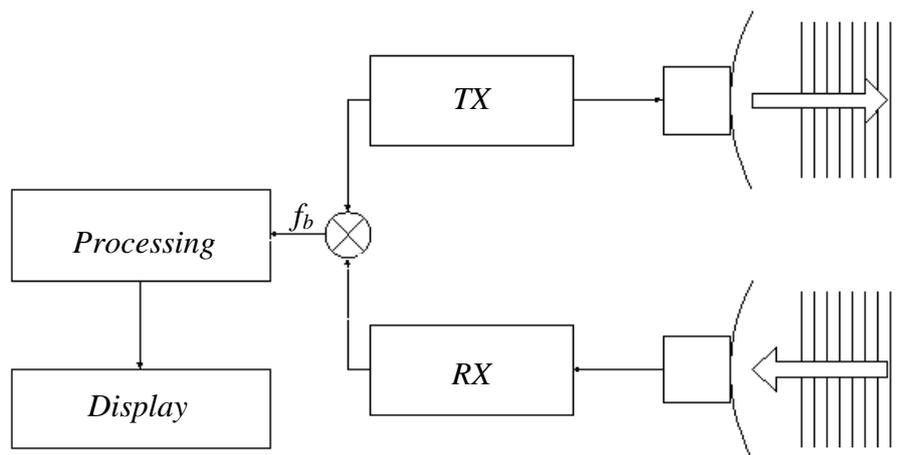
Gambar 5. Contoh *Short Time Fourier Transform* [8]

Hasil STFT biasanya berupa bilangan kompleks. Agar dapat dibuat suatu gambar 3 dimensi yang memperlihatkan hubungan frekuensi, waktu, dan hasil STFT, maka digunakan spektrogram, yaitu kuadrat dari *magnitude* hasil STFT yang menggambarkan energi dalam gabungan domain waktu-frekuensi. Berikut ini adalah contoh spektrogram [8].



Gambar 6. Contoh Spektrogram [8]

Penjelasan-penjelasan di atas dapat disederhanakan ke dalam diagram blok radar FMCW sebagai berikut [10].



Gambar 7. Diagram Blok Radar FMCW [10]

Pertama-tama, sinyal segitiga dibangkitkan dan dimodulasikan secara FM pada transmitter. Sinyal tersebut dikirimkan ke target melalui suatu antena. Sinyal yang dikirimkan akan mengenai target dan dipantulkan kembali ke radar. Sinyal pantul ditangkap antena penerima lalu dikalikan dengan sinyal yang dikirimkan oleh transmitter. Hasil perkalian yang kemudian difilter akan menghasilkan frekuensi *beat* sehingga jarak dapat dideteksi dengan menggunakan teknik pemrosesan sinyal seperti FFT atau STFT.

### **III. Simulasi Prinsip Kerja Radar FMCW**

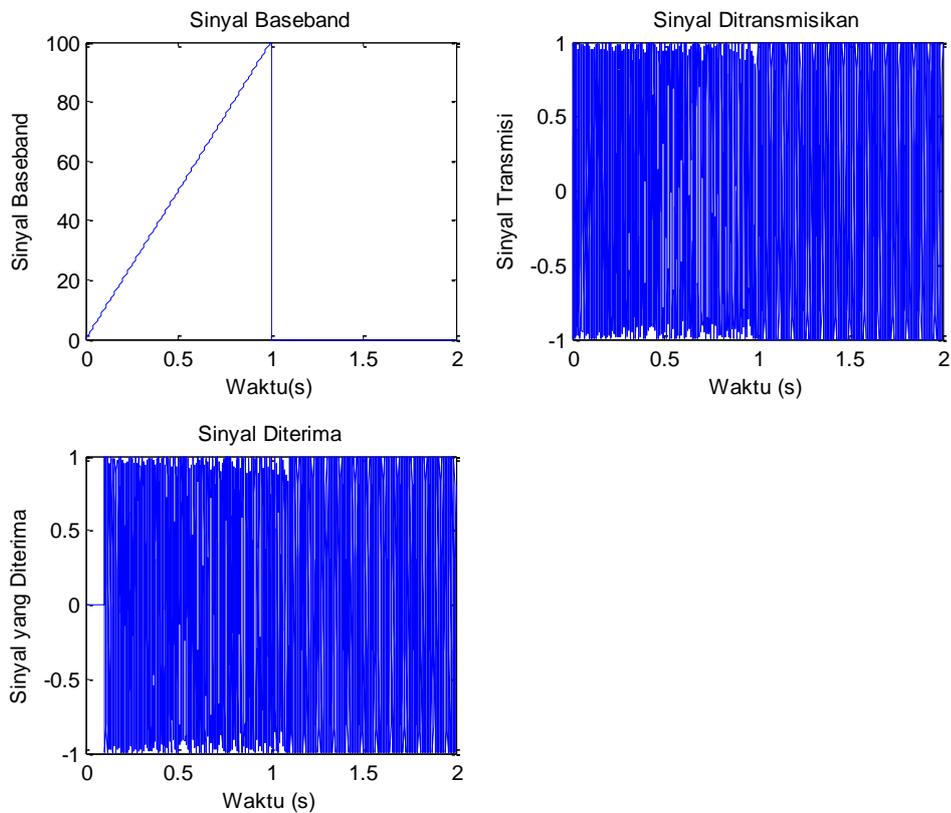
Dari diagram blok tersebut, kita dapat melakukan simulasi cara kerja radar FMCW. Dalam tulisan ini, penulis menggunakan MATLAB dengan *script* yang dapat dilihat pada lampiran.

Parameter yang dipilih dalam simulasi ini adalah:

1. Frekuensi *carrier*: 100 Hz
2. Perbedaan frekuensi maksimum dan minimum: 100 Hz
3. Waktu sinyal segitiga: 1 s
4. Periode antar sinyal segitiga: 2 s
5. Delay: 0,1 s

Sebagai catatan, pemilihan parameter ini dimaksudkan agar bentuk sinyal yang ditampilkan pada simulasi terlihat dengan jelas dan belum tentu merepresentasikan sistem yang sebenarnya. Jika menggunakan parameter yang sebenarnya, misalnya frekuensi *carrier* dalam orde GHz ke atas, maka akan hasil simulasi akan kurang terlihat.

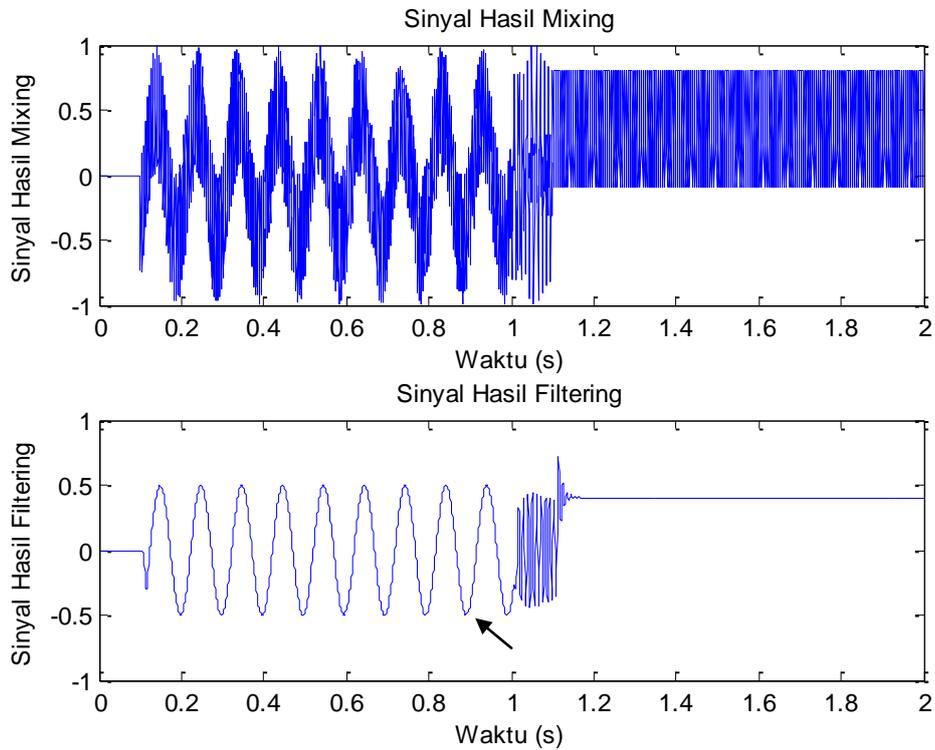
Berikut ini adalah hasil simulasi, dimulai dari bentuk sinyal yang dikirimkan dan diterima (gambar 8).



Gambar 8. Sinyal yang Dikirim dan Diterima

Dari gambar ini, terlihat bahwa dengan menggunakan sinyal *baseband* berbentuk segitiga, frekuensi sinyal termodulasi FM akan mengalami peningkatan frekuensi. Demikian juga sinyal yang diterima kembali di radar, meskipun ter-*delay* beberapa detik. Dalam simulasi ini, diasumsikan sinyal ter-*delay* sebesar 0.1 s.

Sinyal yang diterima akan di-*mixing* dengan sinyal yang dikirimkan, lalu difilter untuk menghilangkan komponen frekuensi tinggi. Hasilnya adalah sebagai berikut.

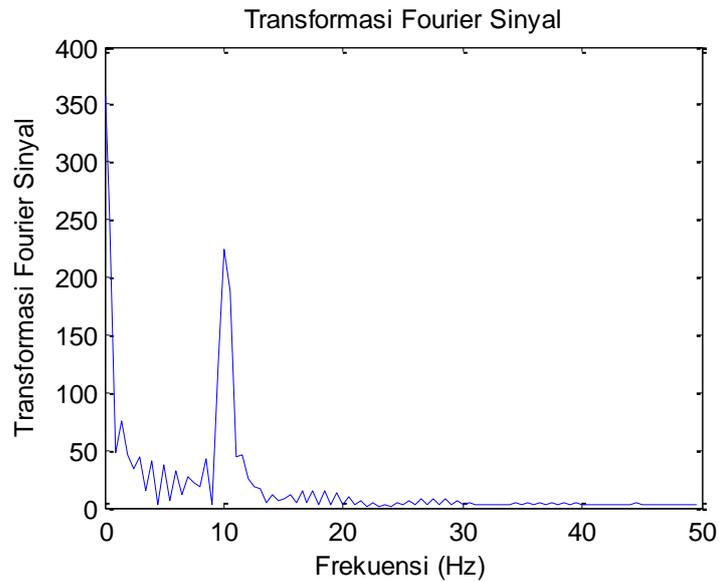


Gambar 9. Sinyal Hasil *Mixing* dan *Filtering*

Terlihat bahwa setelah pemfilteran terdapat komponen frekuensi *beat* (tanda panah). Periode sinyal tersebut adalah 0,1 s, berarti frekuensi *beat*-nya adalah 10 Hz. Hal ini sesuai dengan perhitungan dengan menggunakan persamaan (1), yaitu:

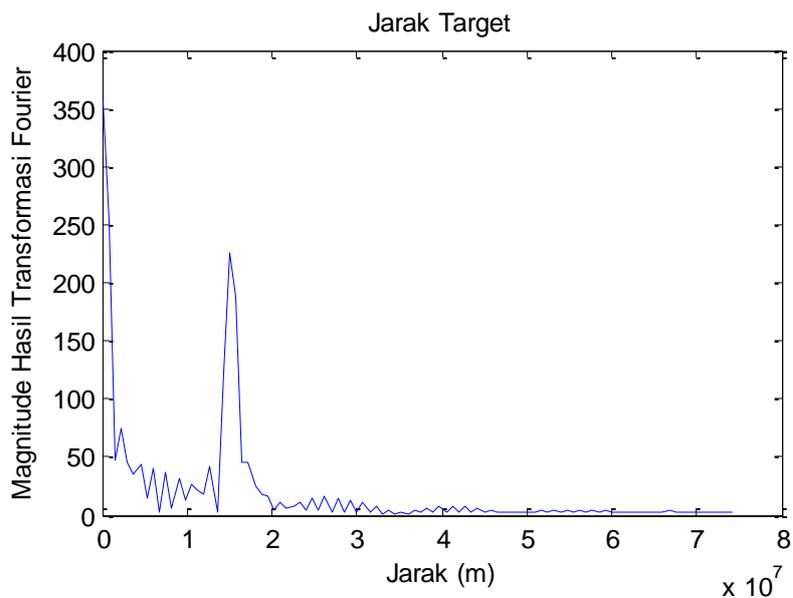
$$f_b = \frac{B}{T} \tau = \frac{100}{1} \times 0.1 = 10 \text{ Hz}$$

Sinyal tersebut kemudian diolah, misalnya dengan menggunakan FFT, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.



Gambar 10. Transformasi Fourier dari Sinyal Hasil *Filtering*

Pada gambar 10, terlihat bahwa frekuensi yang cukup dominan adalah 10 Hz. Frekuensi ini merupakan frekuensi *beat* yang sama dengan hasil perhitungan sebelumnya. Dengan memetakan sumbu frekuensi ke dalam jarak dengan menggunakan persamaan (3), maka diperoleh gambar berikut.



Gambar 11. Hubungan Jarak dan Hasil Transformasi Fourier

Informasi seperti pada gambar 11 lebih mudah untuk dimengerti oleh pengguna. Dari gambar 11, dapat dilihat bahwa terdapat target yang berjarak kurang lebih  $1,5 \times 10^7$  m. Jika dibandingkan dengan persamaan (3), maka akan diperoleh:

$$R = f_b \frac{cT}{2B} = 10 \times \frac{3 \times 10^8 \times 1}{2 \times 100} = 1.5 \times 10^7 \text{ m}$$

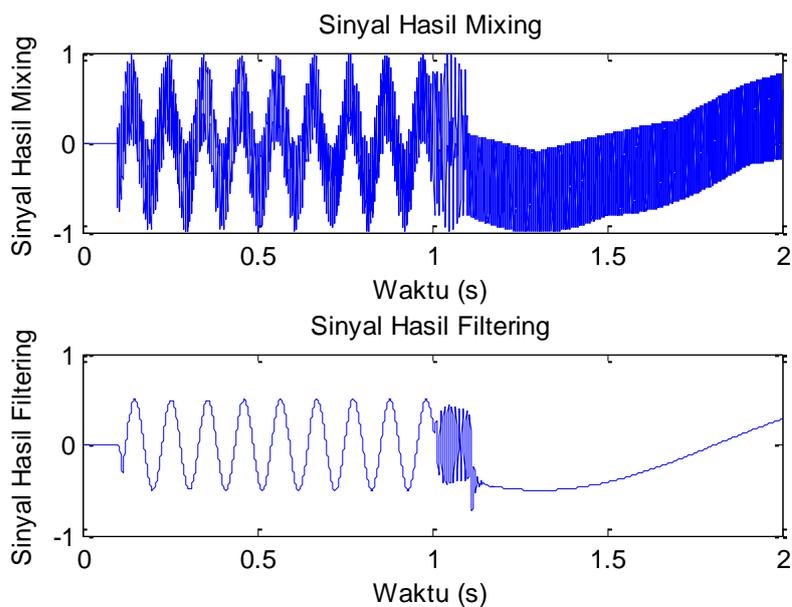
Hasil ini sama seperti yang ditunjukkan oleh gambar 11.

#### IV. Pengaruh Kecepatan Objek

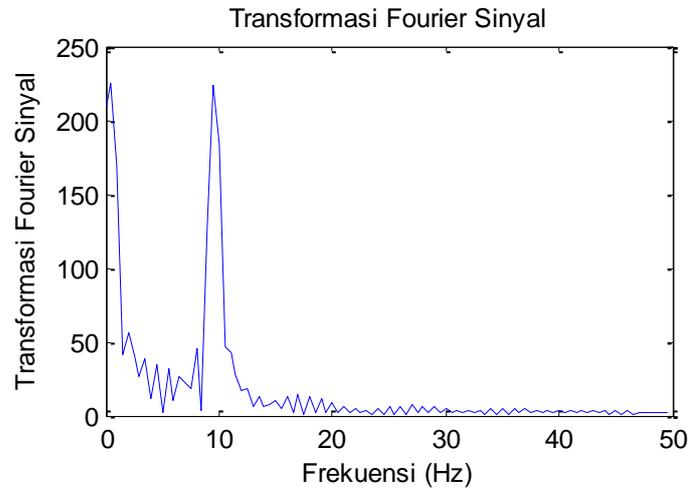
Untuk mensimulasikan benda dengan objek bergerak, variabel  $v_{\text{target}}$  diset dengan nilai tertentu. Agar pengaruh efek Doppler cukup terlihat, dipilih target mendekati radar dengan kecepatan sama dengan kecepatan maksimum yang dapat dideteksi oleh radar FMCW, yaitu [11]:

$$|v_{\text{max}}| = \frac{\lambda}{4T} \quad (7)$$

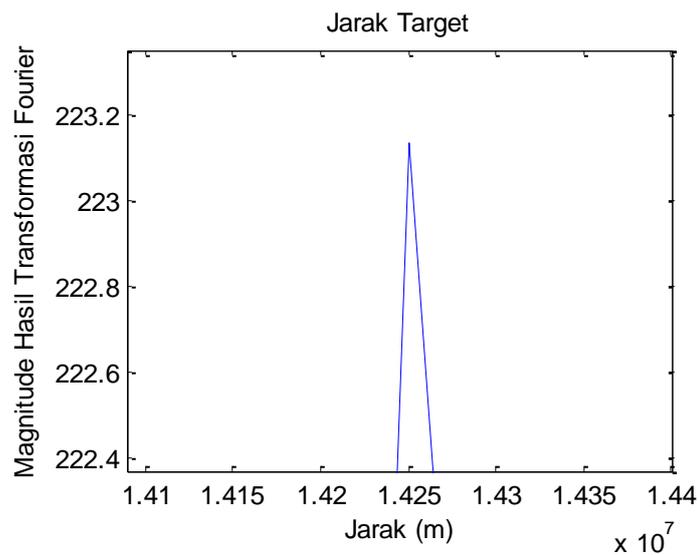
Dari perhitungan, diperoleh bahwa kecepatan maksimum target yang dapat dideteksi adalah  $7,5 \times 10^5$  m/s. Hasil simulasi yang didapatkan kurang lebih sama seperti pada simulasi sebelumnya, kecuali sinyal hasil *mixing* sampai ke *display* jarak target. Berikut ini adalah perbedaan yang dimaksud.



Gambar 12. Sinyal Hasil *Mixing* dan *Filtering* untuk Kecepatan Target  $7,5 \times 10^5$  m/s



Gambar 13. Hasil Transformasi Fourier Sinyal Pada Gambar 12 (bawah)



Gambar 14. *Display* Jarak Target.

Pada gambar 13, terlihat bahwa sinyal di bagian kanan berbentuk melengkung yang disebabkan oleh adanya frekuensi Doppler pada rentang waktu tersebut. Hal ini sesuai dengan gambar 3 bagian bawah, di mana pada selang waktu antara akhir dari sinyal yang diterima dengan sinyal yang akan dikirimkan selanjutnya terdapat komponen frekuensi konstan  $f_d$ . Implikasi dari hal ini adalah transformasi Fourier dari sinyal hasil *filtering* akan sedikit berubah, seperti yang dapat dilihat pada gambar 13. Jika dibandingkan dengan gambar 10, terlihat bahwa komponen DC

yang ada pada gambar tersebut bergeser sedikit ke arah kanan yang menandakan keberadaan sinyal AC yang memiliki frekuensi sebesar frekuensi Doppler. Puncak spektrum selanjutnya yang terletak di 10 Hz bergeser ke arah kiri. Hal ini terjadi karena jika benda mendekati radar, frekuensi yang diterima akan lebih besar. Dengan demikian, selisih antara frekuensi sinyal yang dikirimkan dan diterima (frekuensi *beat*) akan mengecil (gambar 3). Dengan mengecilnya frekuensi *beat*, maka jarak yang dideteksi juga akan semakin kecil mengingat frekuensi *beat* sebanding dengan jarak radar ke target. Artinya, akan terjadi kesalahan dalam pengukuran jarak jika efek Doppler ini diabaikan, seperti yang diperlihatkan pada gambar 14.

Frekuensi *beat* yang terukur jika efek Doppler diabaikan adalah:

$$f_b' = f_b - f_d = 10 - 0.5 = 9.5 \text{ Hz}$$

$$R = f_b' \frac{cT}{2B} = 9.5 \times \frac{3 \times 10^8 \times 1}{2 \times 100} = 1,425 \times 10^7$$

Hasil perhitungan ini menunjukkan kesamaan dengan gambar 14, yaitu jarak target yang terdeteksi adalah  $1,425 \times 10^7$  m, berbeda 5% dengan posisi sebenarnya dari target, yaitu  $1,5 \times 10^7$  m.

## Penutup

Dari tulisan ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Radar berbasis FMCW dapat digunakan untuk mencari informasi tentang target, misalnya jarak terhadap radar dan kecepatan target. Informasi ini dapat diperoleh dengan memanfaatkan frekuensi *beat* dan frekuensi Doppler yang sebanding dengan kedua besaran tersebut. Dengan teknik pemrosesan sinyal seperti FFT dan STFT, maka akan diperoleh grafik yang lebih dapat dipahami oleh pengguna.
2. Apabila diabaikan, frekuensi Doppler dapat mempengaruhi hasil perhitungan jarak target. Hal ini terlihat dari hasil simulasi.

## Referensi

- [1]. I.V. Komarov dan S.M. Smolskiy. *Fundamental of Short Range FM Radar*. MA: Artech House, 2003.
- [2]. R.L. Smith, "Micro Synthetic Aperture Radar Using FMCW Technology," *Thesis*, Department of Electrical and Computer Engineering, Brigham Young University, Utah, 2002.
- [3]. R. Parthasarathy, "Fine Resolution Radar for Near-Surface Layer Mapping," *Thesis*, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kansas, Kansas, 2002.
- [4]. M. Jankiraman. *Design of Multi-Frequency CW Radars*. North Carolina: SciTech Publishing, Inc., 2007
- [5]. G.S.N. Raju. *Radar Engineering and Fundamentals of Navigational Aids*. New Delhi: I.K. International Publishing House, 2008.
- [6]. B. Boukari, E. Moldovan, and S. Ares, "A Heterodyne Six-Port FMCW Radar Sensor Architecture Based On Beat Signal Phase Slope Techniques", *Progress In Electromagnetics Research Proc.*, PIER 93, pp. 307-322, 2009.
- [7]. *Radar Signal Processing (The FMCW & FMICW Radar Model)* (Nov. 11, 2010), [Online], Available: [http://www.advsolned.com/example\\_fmew.html](http://www.advsolned.com/example_fmew.html)
- [8]. B. Nagarajan, "Time Frequency Analysis – An Application to FMCW Radar," *Thesis*, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kansas, Kansas, 2004.
- [9]. E.Y. Hamid. "Wavelet dan Analisa Multiresolusi" *Diktat Kuliah*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2009.
- [10]. Continuous Wave Radar (Nov. 11, 2010) [Online], Available: <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/cwradar/cwradar.htm>
- [11]. S.J. Frasier, T. Ince, F.J. Lopez-Dekker, "Performance of S-Band FMCW Radar For Boundary Layer Observation" *15th Conference on Boundary Layer and Turbulence Proc.*, July 2002.

## Lampiran

### Script MATLAB untuk simulasi radar FMCW:

```
clear all;
clc;

%Parameter Radar FMCW
fc=100; %frekuensi carrier
B=100; %Beda frekuensi maksimum dan minimum
T=1; %Waktu chirp
TM=2; %Periode chirp
c=3*10^8; %kecepatan cahaya
v_target=0; %Kecepatan target
fd=2*v_target/c*fc; %Frekuensi Doppler
kf=1; %Konstanta modulasi FM

delta_t=0.001; %Waktu sampling

chirp_time=0:delta_t:T;
chirp_baseband_signal=B*chirp_time; %sinyal segitiga chirp

zero_time=T+delta_t:delta_t:TM; %sisanya nol
zero_signal=zeros(1,length(zero_time));

baseband_time=0:delta_t:TM;
baseband_signal=[chirp_baseband_signal zero_signal]; %gabungan
figure(1);

subplot(2,2,1); plot(baseband_time,baseband_signal); title('Sinyal Baseband');
xlabel('Waktu(s)'); ylabel('Sinyal Baseband');

%Modulasi FM, integralkan chirp baseband
int_chirp_baseband=integrasi(chirp_baseband_signal,chirp_time);
mt=[int_chirp_baseband zero_signal];
signal_time=0:delta_t:TM;

transmitted_signal=cos(2*pi*fc*signal_time+2*pi*kf*mt);
subplot(2,2,2); plot(signal_time,transmitted_signal);
title('Sinyal Ditransmisikan'); xlabel('Waktu (s)'); ylabel('Sinyal Transmisi');

%Sinyal Radar mengenai target dan terdelay
delay_time=0.1;
I=temukan(delay_time,signal_time);
transmitted_signal_with_doppler=cos(2*pi*fc*signal_time+2*pi*kf*mt+2*pi*fd*signal_time);
received_signal=[zeros(1,I) transmitted_signal_with_doppler(1:length(signal_time)-I)];
subplot(2,2,3);
plot(signal_time,received_signal); title('Sinyal Diterima'); xlabel('Waktu (s)');
ylabel('Sinyal yang Diterima');

%Proses Mixing
figure(2); subplot(2,1,1);
mixed_signal=received_signal.*transmitted_signal;
plot(signal_time,mixed_signal); title('Sinyal Hasil Mixing'); xlabel('Waktu (s)');
ylabel('Sinyal Hasil Mixing');

%Filtering
Orde_filter=10;
fs=1/delta_t;
Wmax=0.5*fs;
Wn=fc/Wmax;
[C,A]=butter(Orde_filter,Wn); %Menggunakan filter butterworth dengan cutoff = fc
filtered_signal=filter(C,A,mixed_signal);
subplot(2,1,2);
plot(signal_time,filtered_signal); title('Sinyal Hasil Filtering'); xlabel('Waktu (s)'); ylabel('Sinyal Hasil Filtering');

%Processing dan Display
```

```

y=fft(filtered_signal);
y=abs(y);
Y=y(1:ceil(length(y)/2));
freq=((1:length(Y))-1)*fs/(length(Y)-1)/2;
figure(3);
plot(freq(1:100),Y(1:100)); title('Transformasi Fourier Sinyal');
xlabel('Frekuensi (Hz)'); ylabel('Transformasi Fourier Sinyal');

figure(4);
delay=freq*T/B;
range=c*delay/2;
plot(range(1:100),Y(1:100)); title('Jarak Target'); xlabel('Jarak (m)');
ylabel('Magnititude Hasil Transformasi Fourier');

```