

3.3.1	Model Sinyal untuk Estimasi Kecepatan dan Jarak Kompresif Menggunakan Radar FMCW.....	49
3.3.2	Skenario Simulasi	53
3.3.3	Pemrosesan Sinyal Kompresif untuk Estimasi Jarak-Kecepatan-Sudut Kedatangan (AoA) dalam Aplikasi Radar FMCW.....	57
3.3.4	Pemrosesan Sinyal Waktu-Diskrit	58
3.3.5	Model Pemrosesan Sinyal Untuk Radar FCM	61
3.3.6	Model Pemrosesan Sinyal Waktu-Diskrit.....	63
3.3.7	Transformasi <i>Fourier</i> Diskrit 3D.....	65
3.3.8	Estimasi Jarak, Kecepatan, dan AoA.....	67
3.3.9	Pemrosesan Sinyal FMCW Kompresif.....	70
BAB 4 HASIL PENELITIAN		84
4.1	Estimasi <i>Azimuth</i> dan Rekonstruksi <i>Backscatter</i> dengan Matriks <i>Random Sub-Sampling</i> dan Regresi LASSO <i>Single-Snapshot</i>	84
4.2	Estimasi <i>Azimuth</i> dan Rekonstruksi <i>Backscatter</i> dengan Matriks Random Gaussian dan regresi LASSO <i>Single-Snapshot</i>	89
4.3	Estimasi <i>Azimuth</i> dengan CBF-ULA <i>Multiple Snapshots</i> dan Estimasi <i>Range</i> .	95
4.4	Estimasi <i>Azimuth</i> dengan CS <i>Multiple Snapshots</i> dan <i>Estimasi Range</i>	98
4.5	Perbandingan Estimasi <i>Azimuth</i> dengan CS vs CBF dan Estimasi <i>Range</i>	101
4.6	Estimasi <i>Range-Azimuth</i> secara Sekuensial dengan CS	102
4.6.1	Estimasi <i>Azimuth</i>	104
4.6.2	Estimasi <i>Range</i>	105
4.7	Estimasi <i>Range-Azimuth-Velocity</i> secara Sekuensial dengan CS.....	107
4.8	Hasil Estimasi Kecepatan dan Jarak Kompresif Menggunakan Radar FMCW	109
4.9	Hasil Simulasi <i>Compressive Signal Processing</i> untuk Estimasi Jarak-Kecepatan-AoA dalam Aplikasi Radar FMCW	114
BAB 5 KESIMPULAN		121
BAB 6 KEBERLANJUTAN PENELITIAN.....		122
DAFTAR PUSTAKA		124

Gambar 1.1 a) Konfigurasi sistem radar HF di tepi pantai dengan satu target [1] dan b) model geometrinya dengan dua target	1
Gambar 1.2 Ilustrasi tensor data radar saat 3 (tiga) target terdeteksi dengan $N_s = 7$, $N_c = 3$, dan $N_e = 4$	3
Gambar 1.3 Contoh lalu lintas maritim di sekitar Pulau Jawa.....	5
Gambar 1.4 Ilustrasi kompresi 3D pada tensor ($M_e > N_e$, $M_s \gg N_s$, dan $M_c \gg N_c$).....	6
Gambar 2.1 Blok diagram pengolahan isyarat radar HF konvensional [17].	13
Gambar 2.2 Contoh blok diagram radar FMCW dengan larik antenna [18].	14
Gambar 2.3 Algoritma <i>beamforming</i> pada pengolahan isyarat dengan FMCW yang disederhanakan untuk 3 (tiga) elemen penerima di (a) ranah Doppler (d), dan (b) ranah waktu (x).	15
Gambar 2.4 Aplikasi CS [IEEE Xplore].....	18
Gambar 2.5 Perkembangan metode <i>radar imaging</i> [31].	19
Gambar 2.6 Sinyal referensi tanpa derau diasumsikan, kiri: $s_1(t)$, dan kanan: $s_2(t)$	24
Gambar 2.7 Sinyal terpulihkan yang dinormalisasi dengan variasi n jumlah elemen ULA, (a) $n = 3$, (b) $n = 8$, dan (c) $n = 9$	24
Gambar 2.8 Sinyal terpulihkan yang dinormalisasi dengan AWGN dan variasi N jumlah elemen ULA (a) $N = 3$, (b) $N = 9$, dan (c) $N = 16$	25
Gambar 2.9 Model isyarat FMCW yang dipancarkan dan diterima pada bidang $f-t$..	26
Gambar 2.10 Contoh ilustrasi <i>chirp</i> dalam satu waktu sapuan di ranah waktu $A-t$ (atas) dan di ranah $f-t$ (bawah) dengan S adalah <i>slope</i>	26
Gambar 2.11 Ilustrasi frekuensi IF konstan dari target ke- k di depan radar.....	29
Gambar 2.12 Ilustrasi isyarat Tx, Rx, dan IF.....	30
Gambar 2.13 Blok diagram kerja radar dari isyarat RF ke isyarat IF dari target tunggal.	30
Gambar 2.14 Larik seragam dengan sebuah isyarat target dan N isyarat interferer.	30
Gambar 2.15 Ilustrasi frekuensi spektrum <i>range</i> -FFT dengan beberapa puncak vs jarak.	32
Gambar 2.16 Runtun <i>chirp</i> yang dipancarkan.	32
Gambar 2.17 Penyusunan isyarat IF per <i>chirp</i> dalam matriks.....	32
Gambar 2.18(a) profil <i>range</i> dan (b) profil <i>range-velocity</i>	33
Gambar 2.19 Pemodelan isyarat terima pada ULA N antenna	34
Gambar 2.20 Contoh SCB untuk 3 target, 8 elemen larik, dan 5 untai RF.	38
Gambar 2.21 Blok diagram estimasi <i>range</i> , <i>azimuth</i> , <i>velocity</i> sekuensial dengan CS... ..	43
Gambar 3.1 Alur Penelitian	48
Gambar 3.2 Representasi geometris dari dua objek di depan sistem FMCW yang divisualisasikan pada permukaan datar dengan sistem koordinat polar.	60
Gambar 3.3 Bingkai FMCW yang dipancarkan terdiri atas tiga <i>chirp</i> , serta penerimaan ketiga <i>chirp</i> tersebut dari $P = 3$ target oleh satu antenna dalam ULA. Setelah melalui proses pengambilan sampel, data hasil sampel kemudian diproses menggunakan 2D-DFT dan transformasi satuan untuk memperoleh peta spektrum 2D jarak-kecepatan yang bersesuaian.	65
Gambar 3.4 ULA dengan $L = 4$ elemen, dan peta spektrum 2D yang dihasilkan setelah operasi <i>range</i> -DFT. Selanjutnya, <i>angle</i> -DFT dilakukan pada domain spasial untuk memperoleh data yang diperlukan dalam estimasi informasi AoA... ..	68
Gambar 3.5 Model pemrosesan sinyal radar FMCW konvensional untuk memperoleh informasi jarak, kecepatan, dan AoA dari target [76], [78], [80].	71

Gambar 3.6 Pemrosesan sinyal FMCW terkompresi yang diusulkan untuk estimasi jarak, kecepatan, dan AoA dari target. Sinyal FMCW yang diterima terlebih dahulu diproses oleh blok kompresi, kemudian blok rekonstruksi menghasilkan spektrum 3D jarak–Doppler–AoA.....	71
Gambar 3.7 Tensor tereduksi yang memuat sampel data sebagai hasil dari kompresi pada domain spasial, domain waktu, dan domain <i>chirp</i>	74
Gambar 3.8 Penambahan derau pada blok kompresi.....	75
Gambar 3.9 Spektrum magnitudo 2D yang dinormalisasi di domain jangkauan–frekuensi Doppler untuk skenario 1, diperoleh dengan melakukan penjumlahan pada \mathcal{S} sepanjang dimensi I	82
Gambar 3.10 Spektrum magnitudo 2D yang dinormalisasi dalam domain jangkauan–frekuensi–AoA untuk Skenario 1, diperoleh dengan melakukan penjumlahan atas \mathcal{S} pada dimensi n_c	82
Gambar 4.1 SCB vs CBF <i>single snapshot</i> untuk dua target pada sudut 30° dan -30° ...	85
Gambar 4.2 SCB vs CBF untuk dua target pada sudut -1° dan 1°	85
Gambar 4.3 SCB vs CBF untuk dua target pada sudut -1° dan 1° (<i>enlarged</i>).....	85
Gambar 4.4 Parameter % RTE <i>regulation vs obtained</i> dengan $n_{power}=0,00001mW$...	86
Gambar 4.5 Spektrum sudut SCB dari 6 variasi $M=10$ dan $\lambda=0,01$	88
Gambar 4.6 Spektrum sudut SCB dari 6 variasi <i>sparse array</i> $M=10$ dan $\lambda=0,04$	88
Gambar 4.7 Pengaruh <i>length N</i> terhadap spektrum sudut SCB.....	88
Gambar 4.8 Estimasi SCB dengan matriks kompresi Gaussian untuk variasi parameter regulasi λ : a) $\lambda=0,01$; b) $\lambda=0,02$; c) $\lambda=0,03$; dan d) $\lambda=0,04$	90
Gambar 4.9 Spektrum sudut SCB dengan matriks kompresi Gaussian resolusi 3°	91
Gambar 4.10 Pengaruh M terhadap resolusi sudut dua target berdekatan -1° dan 1°	91
Gambar 4.11 Lambda vs akurasi rekonstruksi sumber di a) 30° dan -30° , b) 21° dan 30°	95
Gambar 4.12 Blok diagram estimasi <i>range-azimuth</i> dengan CBF.....	96
Gambar 4.13 Hasil spektrum sudut dan frekuensi isyarat yang diterima $K=6$	97
Gambar 4.14 Contoh spektrum frekuensi dari dua target berjarak sama dengan komponen frekuensi yang saling menjumlah (kiri) dari elemen larik ke-1 dan meniadakan (kanan) dari elemen larik ke-15.....	98
Gambar 4.15 Blok diagram alur simulasi hingga estimasi <i>range-azimuth</i> dengan SCS.....	99
Gambar 4.16 Pengaruh jumlah sampel terhadap rata-rata %RTE di rentang $\lambda=0,001-0,1$	99
Gambar 4.17 Pengaruh M terhadap rata-rata %RTE di $\lambda=0,001-0,04$ dan $n_{power}=0,001mW$	100
Gambar 4.18 Pengaruh M terhadap rata-rata %RTE di $\lambda=0,001-0,04$; $n_{power}=0,000001mW$	100
Gambar 4.19 Spektrum sudut (a) dan spektrum <i>range</i> frekuensi (b) dari CS $N=26$ $M=13$	101
Gambar 4.20 Spektrum sudut (a) dan spektrum <i>range</i> frekuensi (b) dari CBF $N=16$..	102
Gambar 4.21 Estimasi <i>range</i> dan <i>azimuth</i> oleh (a) CBF dan (b) CS untuk ‘*’ lokasi target dan ‘o’ estimasi lokasi.....	102
Gambar 4.22 Blok diagram estimasi <i>range-azimuth</i> target secara kompresif sekuensial.....	103
Gambar 4.23 Spektrum sudut <i>azimuth</i> dari pesat kompresi 0,1 dan 0,5.....	104
Gambar 4.24 Perbandingan galat estimasi <i>azimuth</i> dengan variasi T_s dan <i>noise power</i>	104
Gambar 4.25 Pengaruh pesat kompresi (k_z) pada akurasi estimasi <i>azimuth</i>	105
Gambar 4.26 Pengaruh λz dan T_s terhadap galat rekonstruksi.....	105

Gambar 4.27 Spektrum <i>range</i> dengan dan tanpa CS pada sisi positif.....	105
Gambar 4.28 Pandangan radar sederhana terhadap estimasi lokasi target a) dari \mathbf{Y} , dan b) dari rekonstruksi <i>backscatter</i> (biru : target nyata, merah: target estimasi).	106
Gambar 4.29 Estimasi <i>range</i> , <i>azimuth</i> , dan kecepatan dari radar FMCW secara kompresif sekuensial.....	107
Gambar 4.30 Visualisasi posisi target sesungguhnya (lingkaran merah) dan estimasinya (lingkaran kuning) pada peta (a) RA, (b) VA, dan (c) RV.	108
Gambar 4.31 Pengaruh daya derau terhadap RMSE dengan variasi pesat kompresi untuk estimasi (a) <i>azimuth</i> , (b) <i>velocity</i> , (c) <i>range</i> , (d) <i>velocity</i> maksimum, dan (e) <i>range</i> maksimum.	109
Gambar 4.32 Plot spektrum jarak-kecepatan yang dihasilkan pada eksperimen pertama. Tiga puncak pada sumbu jarak dan kecepatan positif menunjukkan estimasi jarak dan kecepatan relatif dari target. Adapun tiga puncak pada sumbu jarak dan kecepatan negatif merupakan cerminan dari puncak-puncak yang muncul pada sumbu positif.	110
Gambar 4.33 Nilai RMSE (dalam meter) dari estimasi jarak terhadap jarak sebenarnya. RMSE dihitung untuk berbagai nilai rasio kompresi temporal M_s / N_s dan rasio kompresi antar <i>chirp</i> M_q / Q . Varians derau ditetapkan sebesar 10 mW.	111
Gambar 4.34 Nilai RMSE (dalam m/det) dari estimasi kecepatan terhadap kecepatan sebenarnya. RMSE dihitung untuk berbagai nilai rasio kompresi temporal M_s / N_s dan rasio kompresi <i>chirp</i> M_q / Q	113
Gambar 4.35 Spektrum jarak-kecepatan yang dihasilkan pada percobaan ketiga. Lima puncak pada sumbu jarak positif menunjukkan estimasi jarak dan kecepatan relatif dari target. Lima puncak pada sumbu jarak negatif merupakan cerminan dari puncak-puncak yang ditemukan pada sumbu jarak positif.	113
Gambar 4.36 Spektrum magnitudo 2D yang ternormalisasi pada domain frekuensi- Doppler dan AoA untuk Skenario 1, diperoleh melalui penjumlahan tensor \mathcal{S} terhadap dimensi n_s	114
Gambar 4.37 Spektrum magnitudo 2D yang ternormalisasi pada domain frekuensi- Doppler dan AoA untuk Skenario 2, diperoleh melalui penjumlahan tensor \mathcal{S} terhadap dimensi n_c	115
Gambar 4.38 Spektrum magnitudo 2D yang ternormalisasi pada domain frekuensi- Doppler untuk Skenario 2, diperoleh melalui penjumlahan tensor \mathcal{S} terhadap dimensi l	115
Gambar 4.39 Spektrum magnitudo 2D yang ternormalisasi pada domain frekuensi- Doppler dan AoA untuk Skenario 2, diperoleh melalui penjumlahan tensor \mathcal{S} terhadap dimensi n_s	116
Gambar 4.40 Performa RMSE dari estimasi jarak sebagai fungsi dari M_s/N_s dengan berbagai kombinasi M_c/N_c , M_l/L and σ_2	118
Gambar 4.41 Performa RMSE dari estimasi AoA sebagai fungsi dari M_s/N_s dengan berbagai kombinasi M_c/N_c , M_l/L and σ_2	118
Gambar 4.42 Performa RMSE dari estimasi kecepatan sebagai fungsi dari M_s/N_s dengan berbagai kombinasi M_c/N_c , M_l/L and σ_2	119

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Publikasi terkait implementasi CS pada radar	9
Tabel 1.2 Perbandingan Model yang Diusulkan dengan Referensi Kunci	11
Tabel 2.1 Radar HF Komersial berbasis FMCW	12
Tabel 2.2 Penerapan CS di radar	19
Tabel 4.1 %RTE SCB vs CBF sampel tunggal dari target di sudut 30° dan -30°	87
Tabel 4.2 %RTE SCB vs CBF sampel tunggal dari target di sudut -1° dan 1°	87
Tabel 4.3 Variasi konfigurasi matriks <i>random sub-sampling</i> dengan $M=10$	87
Tabel 4.4 Pengaruh variasi nilai M terhadap resolusi sudut SCB.....	91
Tabel 4.5 Variasi jumlah K dan M untuk $N=37$	92
Tabel 4.6 Pengaruh M untuk N dan K tetap terhadap absolut selisih sudut estimasi.....	93
Tabel 4.7 RTE <i>Single Snapshot</i> SCB vs CBF dua objek berbeda sudut 30° dan -30°	94
Tabel 4.8 RTE <i>Single Snapshot</i> SCB vs CBF dua objek berbeda sudut 21° dan 30°	94
Tabel 4.9 Estimasi spektrum sudut dan lokasi target dengan CBF, ULA $N=10$, $K=2$...	96
Tabel 4.10 %RTE antara sudut target dengan hasil estimasi $K=2$	97
Tabel 4.11 Parameter Target Simulasi Estimasi <i>Range-Azimuth</i> Sekuensial dengan CS.	104
Tabel 4.12 Nilai Estimasi <i>Range</i> dalam km.	106
Tabel 4.13 Parameter target sesungguhnya dan estimasinya.....	107
Tabel 4.14 RMSE estimasi target dari 100 iterasi.	108
Tabel 4.15 Pengaturan untuk pemrosesan sinyal FMCW kompresif	116
Tabel 4.16 Parameter untuk $P = 6$ target pada Skenario 1.	117
Tabel 4.17 Parameter untuk $P = 6$ target pada Skenario 2. Target bergerak yang arahnya menuju penerima FMCW ditandai dengan kecepatan bernilai negatif.....	117