

Metode Reduksi *Clutter* Dinamis pada Sistem *Radar-Drone* untuk Deteksi Tanda Vital Pernafasan

ALOYSIUS ADYA PRAMUDITA¹, ALDI RIFALDI DWINANDA¹, BAMBANG SETIA NUGRAHA², HARFAN HIAN RYANU¹

¹PUI-PT Intelligent Sensing-IoT, Telkom University, Indonesia

²Fakultas Teknik Elektro, Telkom University, Indonesia

Email: pramuditaadya@telkomuniversity.ac.id

Received 13 September 2023 | *Revised* 11 Oktober 2023 | *Accepted* 24 Oktober 2023

ABSTRAK

Pengembangan radar pendeteksi tanda vital yang dikombinasikan dengan kemampuan deteksi di balik penghalang diarahkan untuk menghasilkan teknologi pencarian korban selamat di bawah reruntuhan. Elaborasi teknologi drone untuk membawa radar dalam menjangkau area yang sulit akan mendukung efektifitas penggunaan teknologi tersebut. Namun fluktuasi ketinggian terbang memungkinkan munculnya clutter dinamis. Clutter dinamis berpengaruh signifikan pada hasil deteksi. Metode untuk mengurangi clutter dinamis diperlukan dan pada paper ini diusulkan metode reduksi clutter dengan penggunaan data fluktuasi ketinggian untuk mengidentifikasi respons doppler tambahan akibat clutter dinamis. Hasil digunakan untuk mengendalikan pemfilteran akhir dari hasil deteksi fasa sinyal radar. Simulasi dan eksperimen laboratorium dengan radar Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) telah dilakukan dan hasil menunjukkan bahwa metode usulan secara signifikan dapat memperbaiki hasil deteksi.

Kata kunci: Radar, Drone, Reruntuhan, Tanda Vital, FMCW.

ABSTRACT

The development of a radar for detecting vital signs combined with the ability to detect an object behind obstacles is aimed at producing technology to search for survivors buried under the rubble. Elaboration of drones for conveying a radar to reach difficult areas will support the effective use of this technology. However, fluctuations in flight altitude allow dynamic clutter to emerge. The existence of dynamic clutter has a significant influence on the detection results. A method to reduce dynamic clutter in radar altitude is needed, and this paper proposes a dynamic clutter reduction method that consists of utilizing the altitude fluctuation data itself to identify additional Doppler responses due to dynamic clutter and then used to control the post-filtering of the phase detection results. Laboratory simulations and experiments with FMCW radar have been carried out, showing that the proposed method can significantly improve the detection results.

Keywords: Radar, Drone, Rubble, Vital Sign, FMCW.

1. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan beberapa lempeng tektonik continental dan laut. Potensi bencana geologi seperti gempa bumi cukup tinggi sehingga diperlukan manajemen masalah bencana yang tangguh, meliputi antisipasi dan pasca bencana. Pencarian korban tertimbun di bawah reruntuhan merupakan kegiatan penting dan menjadi prioritas tahapan pasca bencana. Teknologi untuk mempercepat pencarian korban hidup sangat diperlukan untuk mempercepat evakuasi. Ada beberapa metode untuk mendeteksi korban pasca bencana telah diusulkan dalam penelitian sebelumnya, seperti aplikasi dari metode pengenalan suara (**Yamazaki, dkk, 2019**), menggabungkan kamera dengan radar untuk mendeteksi orang jatuh (**Ivanovs, dkk, 2019**), sistem sensor terdiri dari sensor CO₂, kamera termal dan mikrofon (**Zhang, dkk, 2018**) dan penggunaan kamera (**Goian, dkk, 2019**). Studi tentang penggunaan sistem radar untuk mendeteksi korban merupakan bidang penelitian potensial, terutama terkait kebutuhan akan pendeteksian korban di bawah reruntuhan pasca bencana (**Liang, dkk, 2018**) (**Li, dkk, 2018**). Elaborasi dari konsep deteksi perpindahan kecil yang berhubungan dengan manusia tanda vital berdasarkan sistem radar (**Pramudita & Suratman, 2021**) (**Pramudita, dkk, 2020**) (**Ambarini, dkk, 2018**) dan konsep *Through Wall Radar* mendorong penelitian untuk mengembangkan metode mendeteksi korban di balik tembok (**Yang, dkk, 2021**) (**Gennarelli, dkk, 2016**). Medan yang berbahaya dan bahaya lainnya dapat menghambat kemampuan tim SAR (*Search and Rescue*) untuk menjangkau korban selamat, terutama mereka yang terjebak di bawah reruntuhan. Oleh karena itu, metode yang cepat, akurat, dan aman untuk menemukan dan menyelamatkan para korban selamat sangatlah penting.

Sistem radar telah digunakan untuk mendeteksi tanda-tanda vital di balik penghalang dan berpotensi diterapkan untuk menemukan korban hidup di bawah reruntuhan. Konsep *radar-drone* dapat digunakan untuk menjangkau lokasi bencana yang terkadang sulit dijangkau tim SAR. Pengembangan *radar-drone* untuk deteksi korban hidup menjadi penelitian lebih lanjut. Fakta bahwa fluktuasi ketinggian *drone* selama penerbangan berpotensi menimbulkan interferensi doppler pada radar. Permasalahan ini dibahas dalam penelitian ini dengan mempelajari dampaknya terlebih dahulu dan akan dijadikan bahan pertimbangan dalam mengembangkan metode mitigasi lebih lanjut. Pembahasan selanjutnya dalam makalah ini meliputi pemodelan teoritis pengaruh fluktuasi ketinggian *drone* terhadap sinyal radar, studi simulasi, studi pemodelan laboratorium, pembahasan hasil yang diperoleh, dan terakhir kesimpulan.

Kegiatan penelitian ini mengacu pada beberapa hasil penelitian tentang metode mitigasi *clutter* pada sistem radar pendeteksi tanda vital pernapasan korban hidup di balik dinding. Metode mitigasi *clutter* statis diusulkan dengan penerapan pembobotan pada setiap hasil deteksi yang nilainya ditentukan oleh hasil korelasi silang (**Pramudita, dkk, 2022**). Namun demikian penerapannya pada sistem *radar-drone*, akan berpotensi munculnya *clutter* dinamis yang disebabkan karena adanya variasi gerakan *drone* saat terbang.

Pada penelitian sebelumnya juga telah dilakukan kajian terhadap pengaruh material dan ukuran dinding penghalang terhadap hasil deteksi tanda vital pernapasan. Jenis dan ketebalan memberikan pengaruh terhadap sinyal radar yang berpotensi mengurangi akurasi jika tidak diperhitungkan (**Ridhia, dkk, 2022**).

Penggunaan *drone* bersama sistem sensor seperti radar (**Pramudita, dkk, 2022**) (**Yan, dkk, 2018**) atau bersama lidar menjadi motivasi dalam mengelaborasi teknologi *drone* dalam membangun sistem pendeteksian korban hidup di bawah reruntuhan yang relevan dalam

menjangkau area-area yang mungkin sulit dijangkau manusia **(Almeida, dkk, 2019)** **(Wakabayashi, dkk, 2020)**.

Respons doppler yang diakibatkan variasi elevasi *drone* sangat diperlukan untuk deteksi yang akurat. Keberadaan beberapa sumber *clutter* pada penggunaan *radar-drone* yang perlu diidentifikasi dan diatasi sehingga akurasi deteksi dapat dipertahankan. Adanya respons doppler akibat variasi ketinggian terbang *drone* yang tidak diakomodasi pada metode reduksi *clutter* pada sistem radar konvensional sebelumnya. Kajian simulasi dan eksperimen laboratorium untuk mengamati lebih rinci pengaruh gerakan mikro pada radar saat melakukan pendeteksian tanda vital pernapasan telah dilakukan dan metode untuk mengurangi *clutter* dinamis karena fluktuasi ketinggian radar diusulkan dengan kombinasi proses pemfilteran yang sederhana. Konsep terperinci tentang metode usulan, konsep eksperimen dan hasil yang ditunjukkan oleh metode usulan dalam mengatasi ketidakakuratan deteksi tanda vital pernapasan dengan sistem *radar-drone* dibahas pada bagian-bagian selanjutnya.

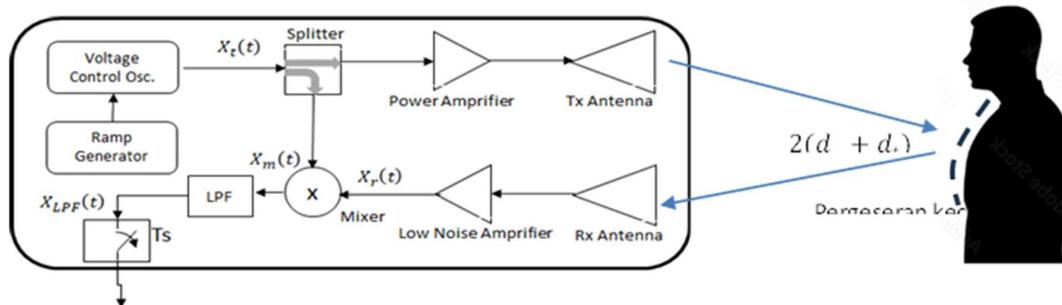
2. METODOLOGI

Pada bagian ini dijelaskan model pengaruh perubahan ketinggian radar saat dimuat pada *drone* yang direpresentasikan dengan adanya fasa yang berubah terhadap waktu yang muncul pada sinyal radar. Kajian simulasi dan eksperimen laboratorium dilakukan untuk mengamati perilaku gelombang radar dengan adanya pengaruh gerakan radar dari waktu ke waktu. Penjelasan tentang sistem radar *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) dibahas untuk memberikan gambaran konsep deteksi yang digunakan. Kemudian, pemodelan pengaruh ketinggian *drone* terhadap sinyal radar diformulasikan dengan menambahkan faktor fasa berubah waktu yang polanya sama dengan fluktuasi ketinggian *drone*. Berdasarkan formulasi persamaan sinyal radar yang diperoleh, maka dikembangkan model simulasi komputer untuk mengamati pengaruh fluktuasi ketinggian terhadap keluaran sinyal radar. Hasil simulasi kemudian menjadi acuan dalam mengembangkan metode yang digunakan untuk mereduksi *clutter* dinamis yang dihasilkan oleh fluktuasi tersebut. Data fluktuasi ketinggian *drone* saat terbang dapat digunakan untuk estimasi fluktuasi jarak radar terhadap target. Berdasarkan pertimbangan tersebut. Model atau *drone* dilengkapi dengan sistem pendeteksian fluktuasi ketinggian. Pada kondisi aktual, radar dilengkapi dengan sensor *altitude* seperti, lidar, barometer atau penerima *Global Positioning System* (GPS). Pada eksperimen laboratorium sensor *ultrasonic* ditambahkan untuk mengestimasi fluktuasi jarak radar terhadap target.

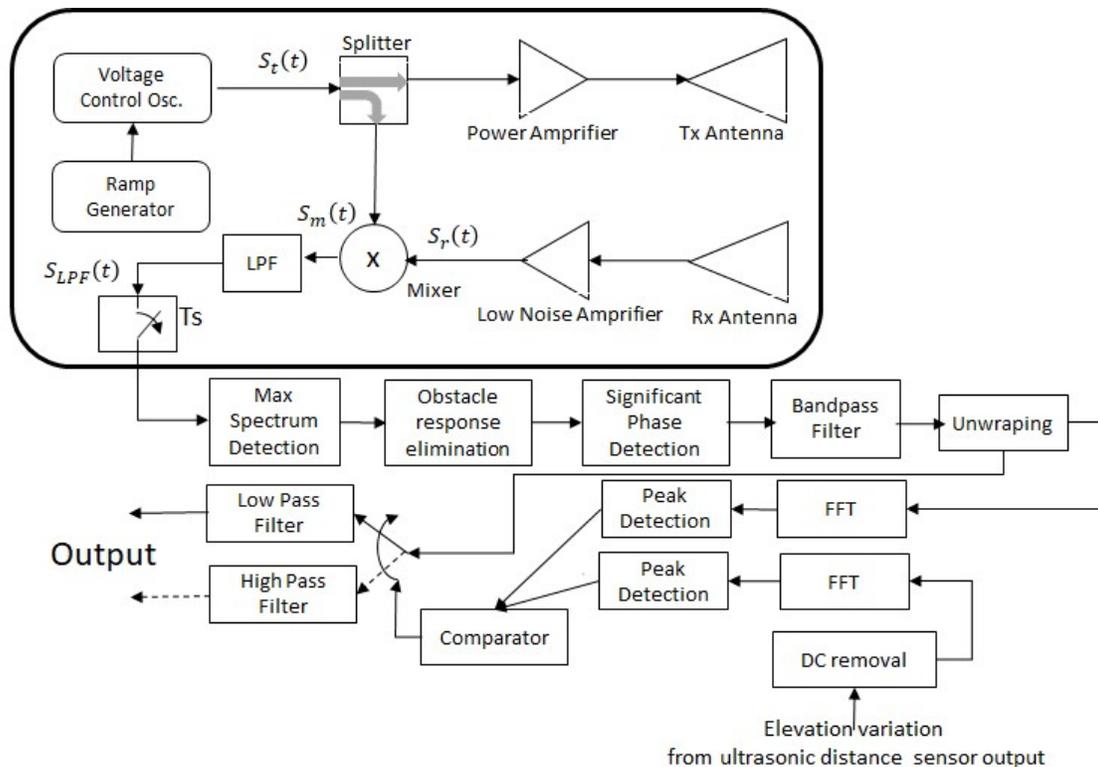
2.1 Radar FMCW untuk Deteksi Tanda Vital Pernafasan

Sistem radar FMCW pada umumnya **(Jannah, dkk, 2021)** dapat diilustrasikan pada Gambar 1. Radar FMCW bekerja dengan cara memancarkan gelombang elektromagnetik secara terus menerus yang dihasilkan dengan memodulasi frekuensi sinyal sinusoidal dengan sinyal *sawtooth*. Informasi jarak target dapat diperoleh dengan mendeteksi spektrum puncak dari keluaran *low pass filter* yang disebut *beat frequency*. Konsep deteksi pernafasan dengan menggunakan radar pada prinsipnya adalah deteksi pola gerakan mikro pada tubuh yang dihasilkan saat tubuh menarik dan menghembuskan nafas. Ketika gelombang radar mengenai dinding dada atau perut maka gerakan kecil pada dinding dada yang berkaitan dengan aktivitas pernapasan maka menghasilkan pergeseran fasa berubah waktu pada sinyal pantul radar. Pergeseran fasa berubah waktu memiliki pola yang serupa dengan gerak dada saat menghirup dan menghembuskan napas secara bergantian. Ketika pergeseran fasa berubah waktu tersebut dapat diekstrak dari gelombang radar, maka pola pernapasan potensial dapat diestimasi.

Konsep deteksi tanda vital pernafasan dengan radar ditunjukkan pada Gambar 1. Konsep teoritik metode pendeteksian tanda vital pernafasan dengan beberapa pendekatan telah dibahas pada beberapa penelitian sebelumnya (**Pramudita, dkk, 2020**) (**Pramudita & Suratman, 2021**) (**Pramudita, dkk, 2022**). Namun permasalahan *clutter* dinamis belum dibahas pada penelitian penelitian tersebut. Saat sistem radar dipasang pada *drone* yang akan membawa radar pada lokasi-lokasi pencarian, maka fluktuasi ketinggian *drone* saat terbang ataupun *hovering* akan menimbulkan respons doppler baru yang memungkinkan mengganggu hasil deteksi. Elaborasi parameter fluktuasi ketinggian *drone* pada persamaan sinyal radar, selanjutnya dibahas pada 2.2.



Gambar 1. Komponen Sistem FMCW dan Deteksi Tanda Vital Pernafasan



Gambar 2. Metode Usulan untuk Reduksi *Clutter* Dinamis

Metode usulan ditunjukkan pada Gambar 2 dan merupakan bagian dari *post processing* radar yang bertujuan untuk memperoleh data estimasi pola atau tanda pernafasan dari target.

- a. Pada bagian pertama adalah proses deteksi puncak spektrum dari keluaran LPF dengan melakukan perhitungan *Fast Fourier Transform* (FFT) terlebih dahulu.

- Puncak spektrum akan didominasi oleh pantulan penghalang (material reruntuhan). Langkah selanjutnya adalah menggunakan hasil deteksi puncak spektrum tersebut untuk mengeliminasi seluruh spektrum puncak dan sebelumnya.
- Bagian kedua adalah mendeteksi komponen frekuensi yang memiliki variasi fasa paling besar. Bagian ini dimulai dengan menghitung varian dari setiap runtun fasa yang diamati pada hasil FFT di dalam rentang *Region Of Interest* (ROI). Rentang ROI ditentukan berdasarkan kedalaman jelajah deteksi. Dalam hal ini menyesuaikan dengan tingkat penetrasi gelombang radar. *Bandpass filter* digunakan untuk membatasi luaran deteksi fasa sehingga hanya mempertimbangkan variasi pada rentang laju pernapasan manusia antara 0.15 hingga 1 Hz. Proses *unwrapping* dilakukan untuk mengoreksi perubahan fasa di luar rentang 2π . Secara rinci proses *unwrapping* dapat ditinjau pada **(Pramudita, dkk, 2022)**.
 - Bagian ketiga adalah proses FFT untuk hasil deteksi fasa dan hasil deteksi fluktuasi ketinggian radar dari sensor jarak ultrasonik. Proses FFT diikuti dengan pendeteksian puncak spektrumnya. Kemudian keduanya dibandingkan pada komparator.
 - Proses penentuan hasil deteksi akhir adalah membandingkan lokasi puncak spektrum hasil deteksi fasa dan dari hasil deteksi fluktuasi ketinggian dengan terlebih dahulu dilakukan penghilangan nilai DC. Hasil perbandingan akan menentukan pemilihan proses pemfilteran sinyal akhir akan menggunakan LPF atau HPF. Dengan aturan sebagai (1) dengan $H_{LPF}(t)$, $H_{HPF}(t)$, $S_{unwrap}(t)$ berturut turut adalah respons filter LPF, HPF yang digunakan pada proses pemisahan *clutter* dinamis di mana frekuensi *cut-off* ditentukan oleh letak puncak spektrum fluktuasi ketinggian radar. Variabel r dan u merupakan titik frekuensi yang menjadi letak puncak spektrum dari keluaran detektor fasa dan keluaran sensor fluktuasi ketinggian.

$$S_{final}(t) = \begin{cases} H_{LPF}(t) * S_{unwrap}(t), & \text{jika } r < u \\ H_{HPF}(t) * S_{unwrap}(t), & \text{jika } r > u \\ H_{LPF}(t) * S_{unwrap}(t), & \text{jika } r = u \end{cases} \quad (1)$$

Posisi berbaring (terlentang, tengkurap atau miring) target memberikan pengaruh pada besar *amplitude* pergeseran kecil yang terdeteksi oleh radar, namun demikian pola pernafasan tidak signifikan dipengaruhi oleh posisi berbaring. Hasil telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya **(Pramudita, dkk, 2022)** sehingga hal ini akan menjadi referensi dalam menentukan daya pancar yang diperlukan untuk dapat mencakup variasi *amplitude* akibat kondisi tersebut. Pada paper ini lebih difokuskan pada permasalahan *clutter* dinamis yang diakibatkan oleh variasi ketinggian *drone* saat membawa radar, di mana kejadiannya dapat dianggap tidak gayut terhadap posisi berbaring target.

2.2 Pengaruh Ketinggian Drone

Jika $X_t(t)$ didefinisikan sebagai sinyal yang ditransmisikan pada ujung pemancar sistem radar FMCW maka sinyal tersebut ditulis sebagai Persamaan (2).

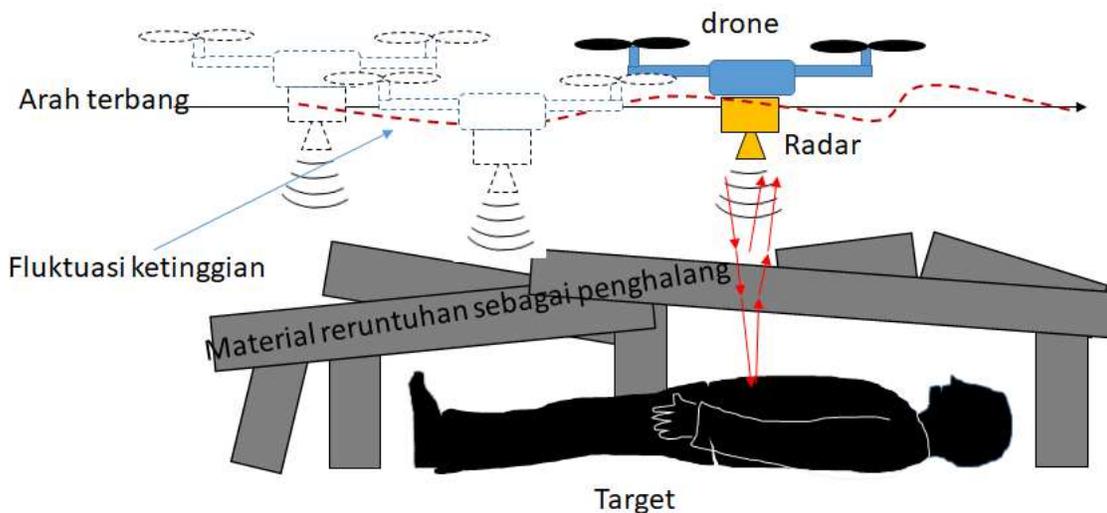
$$X_t(t) = A_{ot} \cos \left(\left(2\pi f_o + 2\pi \frac{\Delta_f t}{T_c} \right) t \right) \quad (2)$$

A_{ot} adalah amplitudo sinyal dan f_o adalah frekuensi minimum sinyal FMCW. Sedangkan t , Δ_f , T_c masing-masing sebagai waktu, *bandwidth*, dan periode *chirp*. Pada FMCW, sinyal *chirp* dihasilkan dengan memodulasi osilator pengatur tegangan dengan keluaran *ramp generator*. Sinyal yang diterima dapat dituliskan pada persamaan (3) dengan A_{or} , Δ_{tot} merupakan

amplitudo sinyal dan total *delay* yang berkaitan dengan propagasi sinyal radar. Dalam deteksi tanda vital pernafasan menggunakan radar, Δ_{tot} terdiri dari Δ_{tdo} yang mewakili jarak target ke radar dan $\Delta_{t\theta r}(t)$ sebagai perpindahan kecil yang bervariasi terhadap waktu terkait dengan aktivitas pernafasan. Selanjutnya pada kasus radar *drone* Δ_{tot} juga dipengaruhi oleh fluktuasi ketinggian *drone* ($\Delta_{t\theta d}(t)$) seperti yang diungkapkan pada Persamaan (4).

$$X_r(t) = A_{or} \cos \left(2\pi \left(f + \frac{\Delta_f(t - \Delta_{tot})}{T_c} \right) (t - \Delta_{tot}) \right) \quad (3)$$

$$\Delta_{tot} = \Delta_{tdo} + \Delta_{t\theta r}(t) + \Delta_{t\theta d}(t) \quad (4)$$



Gambar 3. Ilustrasi Pendeteksian Tanda Vital menggunakan *Radar-Drone*

Data tanda vital dapat diperoleh dari Δ_{tot} . Setelah deteksi sinyal *beat*, jarak target dapat diperkirakan dari Δ_{tdo} (Wang, 2015) dan dengan menerapkan deteksi fasa, data tanda vital dapat diperoleh. Gambar 3 mengilustrasikan pendeteksian korban hidup di bawah reruntuhan menggunakan *radar-drone*. Saat *drone* membawa radar, fluktuasi ketinggian *drone* selama penerbangan juga akan muncul di keluaran detektor fasa. Data ini berpotensi mengganggu sinyal tanda vital. Informasi tentang gangguan ini penting dalam mengembangkan metode untuk memitigasi efek fluktuasi ketinggian *drone* terhadap kinerja deteksi *radar-drone*.

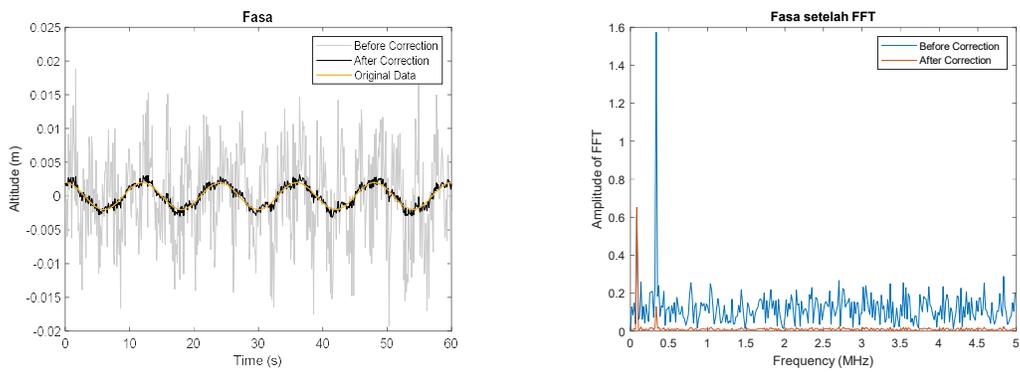
2.3 Studi Simulasi

Berdasarkan pendekatan teoritis, simulasi komputer dilakukan untuk studi lebih lanjut. Fungsi *noise* sinusoidal dijabarkan sebagai fluktuasi ketinggian *drone*, kemudian simulasi deteksi tanda vital pernafasan dilakukan berdasarkan sinyal FMCW terpantul yang telah dilakukan pradeteksi. FFT diterapkan pada keluaran LPF untuk mendapatkan *beat frequency* yang digunakan untuk menentukan jarak antara *drone* dan target. Dengan asumsi ketinggian *drone* tercatat selama penerbangan, maka data fluktuasi ketinggian tersedia dan dapat digunakan untuk mengoreksi hasil deteksi fasa.

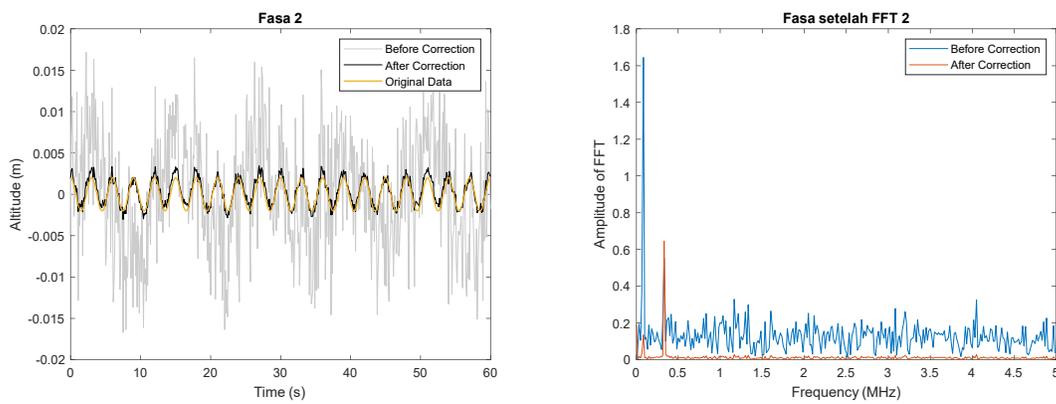
Gambar 4, 5 dan 6 menunjukkan hasil simulasi untuk fluktuasi *drone* yang berbeda. Hasilnya direpresentasikan dalam domain waktu dan frekuensi. Hasilnya menunjukkan bahwa fluktuasi ketinggian *drone* sangat mempengaruhi keluaran deteksi fasa. Tanpa koreksi, tanda-tanda vital pernafasan tidak muncul pada keluaran deteksi fasa. Data fluktuasi ketinggian *drone* yang direkam selama penerbangan dapat digunakan untuk mengurangi pengaruhnya terhadap hasil deteksi tanda vital. Itu bisa dilihat pada Gambar 4 bahwa data tanda vital tampak lebih

kelas setelah dikurangi keluaran deteksi fasa dengan data fluktuasi ketinggian *drone*. Untuk penelitian lebih lanjut, perlu dikembangkan mekanisme menghilangkan efek *drone* dengan mengelaborasi data ketinggian *drone*. Gambar 4 menunjukkan kejadian fluktuasi ketinggian radar yang menyebabkan adanya respons doppler yang lebih tinggi dibanding dengan laju pernapasan. Jika tidak dilakukan perbaikan maka proses deteksi puncak akan menyebabkan ketidakakuratan dalam ekstraksi dapat fasa yang bersesuaian. Gambar 5 menunjukkan kejadian jika respons doppler dari fluktuasi ketinggian berada pada frekuensi lebih rendah dibanding tanda vital pernapasan. Sedangkan pada Gambar 6 ditunjukkan kejadian di mana respons doppler dari fluktuasi ketinggian memiliki frekuensi yang sama dengan tanda vital pernapasan. Proses identifikasi puncak spektrum frekuensi dari respon doppler yang bersumber dari fluktuasi ketinggian radar dapat digunakan sebagai acuan proses pemfilteran dalam menekan level *clutter* sehingga hasil deteksi menjadi lebih akurat.

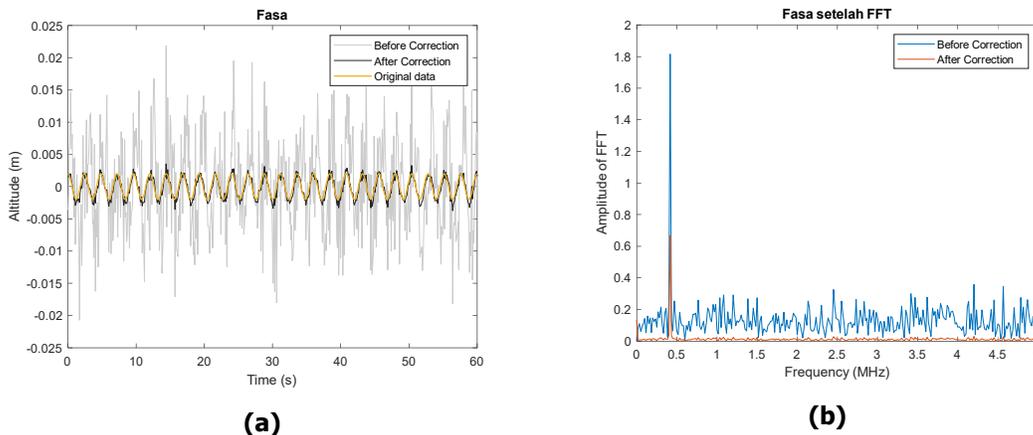
Hasil simulasi menunjukkan bahwa *filtering* atau subtraksi dapat digunakan untuk menghilangkan pengaruh fluktuasi ketinggian *drone* terhadap pendeteksian tanda vital pernapasan. Jika frekuensi fluktuasi berbeda dengan tanda-tanda vital, pemfilteran akan memberikan kontribusi yang optimal. Namun pada kondisi di mana frekuensinya sama, proses pengurangan juga dapat dilakukan untuk menekan *clutter* dinamisnya.



(a) **(b)**
Gambar 4. Hasil Simulasi Deteksi Tanda Vital Pernapasan dengan Laju 5 Kali per Menit untuk Fluktuasi Frekuensi pada Kawasan Waktu dan Frekuensi. (a) Kawasan Waktu dan (b) Kawasan Frekuensi



(a) **(b)**
Gambar 5. Hasil Simulasi Deteksi Tanda Vital Pernapasan dengan Laju 20 Kali per Menit untuk Fluktuasi Frekuensi pada Kawasan Waktu dan Frekuensi. (a) Kawasan Waktu dan (b) Kawasan Frekuensi

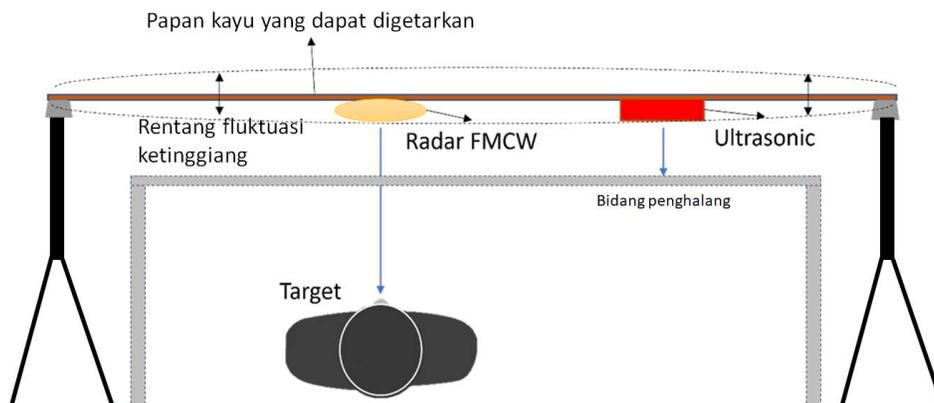


Gambar 6. Hasil Simulasi Deteksi Tanda Vital Pernafasan dengan Laju 25 Kali per Menit untuk Fluktuasi Frekuensi pada Kawasan Waktu dan Frekuensi. (a) Kawasan Waktu dan (b) Kawasan Frekuensi

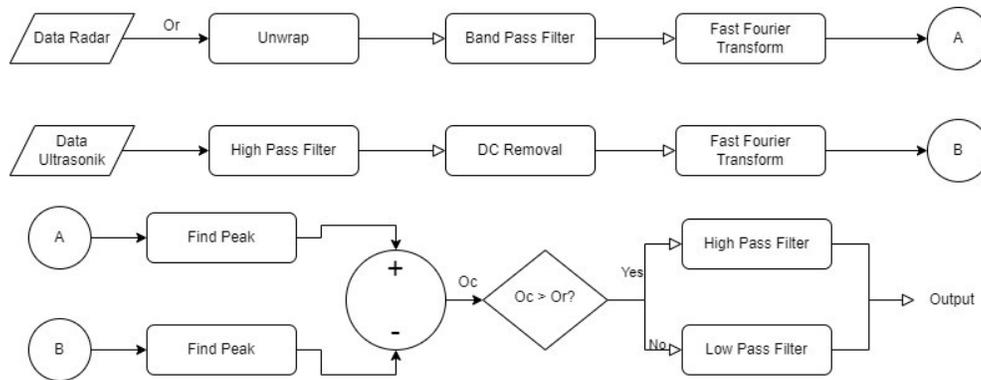
3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

3.1 Eksperimen Laboratorium

Gerakan kecil pada dada dapat mewakili tanda-tanda vital pernapasan saat bernapas. Doppler akan muncul ketika jarak antara target dan radar bervariasi terhadap waktu. Pergerakan target dan/atau radar dapat menyebabkan jarak target berubah-ubah terhadap waktu. Radar ditempatkan pada *drone* dapat menyebabkan pergerakan radar tambahan. Model percobaan laboratorium dibangun untuk studi lebih lanjut. Gambar 7 menunjukkan model laboratorium eksperimental yang digunakan untuk mengamati pengaruh fluktuasi ketinggian *drone* terhadap hasil deteksi. Modul radar dari uRAD dengan frekuensi 24 GHz, *bandwidth* 240 MHz, periode *chirp* 2.5 s, dan frekuensi sampling 200 KHz digunakan dalam percobaan. Radar ditempatkan pada kayu horizontal di atas target. Sensor ultrasonik juga ditempatkan pada kayu horizontal untuk mencatat fluktuasi ketinggian. Fluktuasi ketinggian dihasilkan dengan menggerakkan kayu. Pada sistem *drone* sebenarnya, fluktuasi ketinggian dapat diperoleh dari sensor altimeter seperti lidar atau barometer.

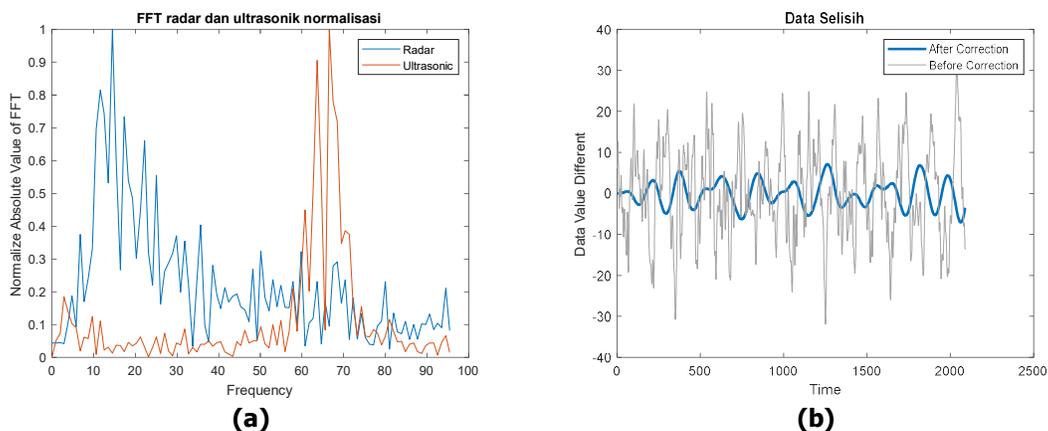


Gambar 7. Model Eksperimental Deteksi Tanda Vital dengan Ketinggian yang Berfluktuasi

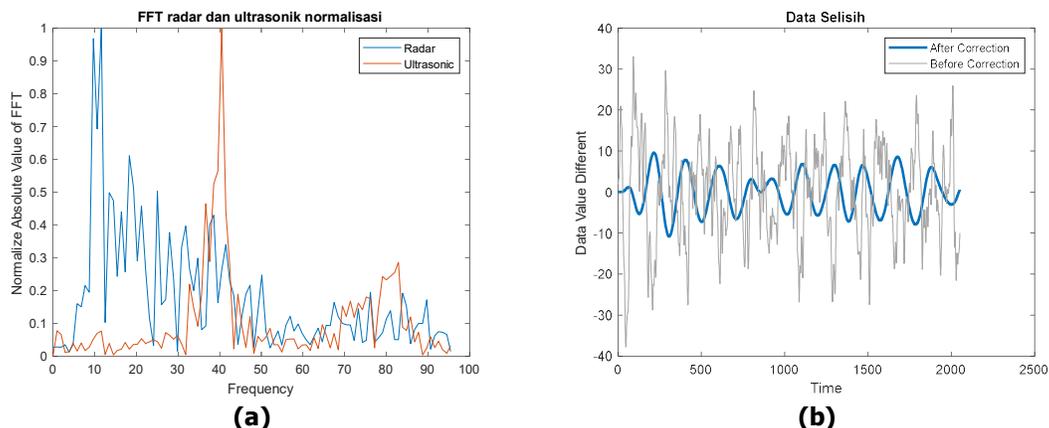


Gambar 8. Diagram Alir Pengolahan Data Radar dan Data Ultrasonik

Gambar 8 menampilkan alur pengolahan data radar dan dan sensor ultrasonik. Data radar dalam bentuk hasil pendeteksian fasa dan diikuti dengan proses *unwrapping* kemudian difilter menggunakan filter *bandpass* Butterworth dan kemudian melewati proses FFT untuk mengubahnya menjadi kawasan frekuensi untuk dapat dideteksi lokasi puncak spektrumnya pada detektor puncak. Data ultrasonik juga difilter menggunakan filter *high-pass* Butterworth untuk mewakili proses eliminasi komponen DC dan kemudian diterapkan FFT. Hasil deteksi puncak spektrum dari radar dan sensor fluktuasi ketinggian akan dibandingkan letak frekuensinya pada komparator dan digunakan sebagai acuan dalam memilih pemfilteran akhir menggunakan LPF atau HPF. Gambar 9.b menampilkan tanda vital pernapasan setelah fluktuasi ketinggian *drone* dihilangkan. Metode usulan berhasil mereduksi *clutter* dinamis akibat fluktuasi ketinggian radar. Hasil akhir menunjukkan bahwa sistem usulan berhasil mendeteksi laju pernapasan target secara lebih akurat. Jumlah puncak dan lembah pada hasil deteksi memiliki kesamaan jumlah dengan pola pernapasan target. Gambar 10, menunjukkan hasil pada sampel percobaan yang lain dan hasilnya menunjukkan kemampuan dari metode usulan dalam menekan *clutter* dinamis dan memperbaiki hasil deteksi.



Gambar 9. Hasil Eksperimen untuk Laju Pernapasan 11 Kali per Menit. (a) Data Kawasan Frekuensi dari Keluaran *Unwrapping* dan Sensor Ultrasonik dan (b) Hasil Akhir Deteksi Tanda Vital Pernapasan



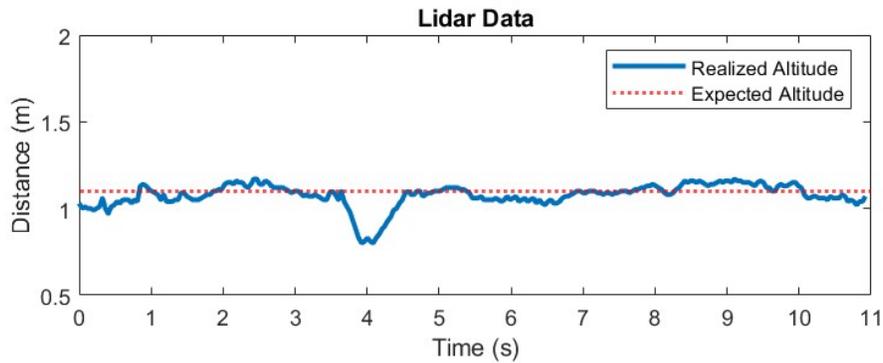
Gambar 10. Hasil Eksperimen untuk Laju Pernafasan 10 Kali per Menit. (a) Data Kawasan Frekuensi dari Keluaran *Unwrapping* dan Sensor Ultrasonik dan (b) Hasil Akhir Deteksi Tanda Vital Pernafasan

Hasil simulasi pada Gambar 4, 5 dan 6 serta hasil pengukuran pada Gambar 9, 10 menunjukkan bahwa metode usulan dengan proses seleksi pemfilteran lolos atas atau bawah mampu mengeliminasi *clutter* dinamis yang menyertai sinyal radar. Hasil deteksi tanda vital pernafasan yang diamati dari laju pernafasan (jumlah pernafasan per menit) menjadi lebih tepat untuk dideteksi. Satu siklus pernafasan diwakili oleh menghirup dan menghembuskan nafas yang diwakili oleh pasangan puncak positif dan puncak negatif yang berurutan. Misal pada Gambar 4 menunjukkan hasil deteksi untuk pernafasan dengan laju lima kali per menit. Ketika tanpa koreksi, maka *clutter* dinamis akan menyebabkan hasil deteksi puncak pada dua puluh kali permenit. Metode usulan berhasil mengoreksi hasil deteksi seperti ditunjukkan juga pada pada Gambar 4.b di mana puncak dominan pada laju 0.082 Hz (lima kali per menit).

Hasil pengukuran pada Gambar 10 juga menunjukkan keberhasilan metode usulan dalam mengatasi masalah *clutter* dinamis. Tanpa koreksi maka hasil yang terdeteksi adalah 67 kali per menit sedangkan hasil koreksi diperoleh hasil deteksi sepuluh kali per menit, di mana hasil sesuai dengan jumlah aktual pernafasan dari target. Pada hasil lain seperti Gambar 9, jumlah aktual pernafasan dari target sebesar sebelas kali per menit terdeteksi pada 41 tanpa proses koreksi dan diperoleh tiga belas kali per menit dengan koreksi menggunakan metode usulan. Terdapat perbedaan hasil dengan kondisi aktual namun hasil koreksi lebih mendekati nilai aktual dibanding tanpa koreksi. Tabel 1 menunjukkan perbandingan hasil eksperimen tanpa melibatkan metode usulan dan dengan melibatkan metode usulan sebagai koreksi hasil deteksi laju pernafasan. Nampak bahwa penerapan metode usulan dapat meningkatkan akurasi pendeteksian laju pernafasan. Kesalahan rata-rata hasil deteksi laju pernafasan dapat ditekan hingga 1.4 kali per menit.

Tabel 1. Hasil eksperimen pada beberapa objek dengan laju pernafasan yang berbeda.

Laju pernafasan aktual (Pernafasan/menit)	Sebelum Koreksi	Setelah Koreksi
9	77	11
10	67	10
11	41	13
15	73	14
20	64	22



Gambar 11. Hasil Observasi Sifat Fluktuasi Ketinggian Saat *Hovering*

Observasi pada sifat natural *drone* juga telah dilakukan secara terpisah untuk mengetahui sifat fluktuasi ketinggiannya saat terbang pada kendali elevasi konstan. Hasil observasi menjadi data penting sebagai pengetahuan awal terhadap karakteristik *drone* yang nantinya dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan teknik yang lebih relevan dan sederhana. Hasil observasi terhadap sifat natural fluktuasi ketinggian *drone* saat dikendalikan terbang dengan ketinggian konstan ditunjukkan pada Gambar 11. Frekuensi doppler yang terukur berdasarkan fluktuasi tersebut dengan frekuensi lebih rendah dibanding variasi fasa akibat target, sehingga hasil ini dapat menjadi acuan bahwa penggunaan filter HPF lebih relevan dan jika pemrosesan ditetapkan hanya dengan satu jenis filter maka proses komparasi, perhitungan FFT serta deteksi puncak dapat eliminasi pada pemrosesan.

4. KESIMPULAN

Metode untuk mengurangi pengaruh *clutter* dinamis yang disebabkan oleh fluktuasi ketinggian radar saat mendeteksi tanda vital telah diusulkan dan dikaji konsep ilmiah serta eksperimen laboratoriumnya. Setelah melakukan pengujian dan analisis dari hasil kegiatan simulasi dan pengujian laboratorium, maka metode reduksi *clutter* dinamis pada sistem *radar-drone* pendeteksi tanda vital untuk pencarian korban merupakan bagian *post processing* yang penting untuk mendeteksi dengan lebih akurat. Fluktuasi ketinggian *drone* sangat mempengaruhi keluaran deteksi fase radar yang ditunjukkan oleh hasil simulasi ataupun eksperimen laboratorium. Untuk menghilangkan fluktuasi ketinggian *drone*, maka elaborasi data sensor altimeter dapat digunakan untuk mengekstraksi respons doppler yang muncul dari fluktuasi ketinggian radar. Proses identifikasi frekuensi dari respons doppler tanda vital pernapasan dan dari fluktuasi ketinggian radar digunakan untuk mengeliminasi *clutter* dinamis dengan menerapkan pemfilteran. Hasil komparasi letak frekuensi kedua sinyal kemudian menjadi acuan dalam memilih jenis filter yang digunakan dalam pemfilteran akhir dari sinyal fasa yang telah dilakukan *unwrapping*. Hasil menunjukkan bahwa metode memiliki kemampuan dalam mengoreksi hasil deteksi sehingga deteksi laju pernapasan dari target menjadi lebih akurat.

DAFTAR RUJUKAN

- Almeida, D.R.A dkk. (2019). Monitoring the Structure of Forest Restoration Plantations with a Drone-Lidar System. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 192–198, DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.014.
- Ambarini, R, A. A. Pramudita, & E. Ali. (2018). Single-Tone Doppler Radar System for Human Respiratory Monitoring. *Proceeding of EECSI*.
- Gennarelli, G, G. Ludeno, F. Soldovieri. (2016). Real-Time Through-Wall Situation Awareness Using a Microwave Doppler Radar Sensor, *Remote Sensors*, 8(8), 621.
- Goian, A, R. Ashour, U. Ahmad, T. Taha, N. Almoosa, L. Seneviratne. (2019). Victim Localization in USAR Scenario Exploiting Multi-Layer Mapping Structure. *Remote Sensing*, 11(22), 2704.
- Ivanovs, A, A. Nikitenko, M. Di Castro, T. Torims, A. Masi & M.Ferre. (2019). Multisensor Low-Cost System for Real Time Human Detection and Remote Respiration Monitoring. *IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, (pp. 254-257), DOI: 10.1109/IRC.2019.00047.
- Jannah, S, A. A. Pramudita, & F. Y. Suratman. (2021). Experiment of FMCW Radar for Small Displacement Detection using VNA. *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, (pp. 1–6).
- Liang, B, Y. Jin, D. Yang, D. Zhao & Y. Zhang. (2018). An Accelerated Algorithm for Detecting Micro-Moving Objects of Radar Life Detector of Smart Campus Based on Block Data Analysis. *IEEE Access*, 6, 57994 – 58003, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872967.
- Li, Z, dkk. (2018). Detection of People Trapped under the Ruins Using Dual-frequency IR-UWB Radar. *15th European Radar Conference (EuRAD)*, (pp. 83-86), DOI:10.23919/EuRAD.2018.8546530.
- Pramudita, dkk. (2022). Radar System for Detecting Respiration Vital Sign of Live Victim Behind the Wall. *IEEE Sensors Journal*, 22(15), DOI: 10.1109/JSEN.2022.3188165.
- Pramudita, & F. Y. Suratman. (2021). Low-Power Radar System for Noncontact Human Respiration Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-15, DOI: 10.1109/TIM.2021.3087839.
- Pramudita, F. Suratman, D. Arseno. (2020). Modified FMCW system for non-contact sensing of human respiration. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 44, 1-11, DOI:10.1080/03091902.2020.1753835.

- Ridhia, F., A. A. Pramudita, & Y. Wahyu. (2022). Pengaruh Dinding Penghalang pada Deteksi Tanda Vital Pernapasan dengan Through Wall Radar. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, DOI: 10.22146/jnteti.v11i4.4349.
- Wakabayashi, M, H. G. Okuno, & M. Kumon. (2020). Multiple Sound Source Position Estimation by Drone Audition Based on Data Association Between Sound Source Localization and Identification. *IEEE Robot Autom Lett*, 5(2), 782–789. DOI: 10.1109/LRA.2020.2965417.
- Wang, S dkk. (2015). A Novel Ultra-Wideband 80 GHz FMCW Radar System for Contactless Monitoring of Vital Signs. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 4978–4981. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319509.
- Yan, J dkk. (2018). Vital-SAR-Imaging With a Drone-Based Hybrid Radar System. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 66(12), 5852–5862, DOI: 10.1109/TMTT.2018.2874268.
- Yang, D, dkk. (2021). The Overview of Human Localization and Vital Sign Signal Measurement Using Handheld IRUWB Through-Wall Radar. *Sensors*, 21(2), 402, DOI:10.3390/s21020402.
- Yamazaki, Y, M. Tamaki, C. Premachandra, C. J. Perera, S. Sumathipala & B. H. Sudantha. (2019). Victim Detection Using UAV with On-board Voice Recognition System. *IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, (pp. 555-559), DOI: 10.1109/IRC.2019.00114.
- Zhang, D, S. Sessa, R. Kasai, S. Cosentino, C. Giacomo, Y. Mochida, H. Yamada, M. Guarnieri, A. Takanishi. (2018). Evaluation of a Sensor System for Detecting Humans Trapped under Rubble: A Pilot Study. *Sensors*, 18(3), 852.