

Kajian Pemrosesan Sinyal Pada Data Raw Synthetic Aperture Radar (SAR) Dengan Menggunakan Range Doppler Algorithm (RDA)

Oleh :
Musyarofah
Katmoko Ari Sambodo
Muchammad Soleh

Abstrak

Telah dikaji pemrosesan sinyal (signal processing) pada data raw synthetic aperture radar (SAR) dengan menggunakan range Doppler algorithm (RDA). Hingga saat ini, perkembangan teknologi pemrosesan sinyal SAR di dunia cukup pesat. Beberapa algoritma signal processing untuk data raw SAR yang telah dikembangkan antara lain range Doppler algorithm (RDA), chirp scaling algorithm (CSA), omega-K algorithm, dan SPECAN algorithm. Dibandingkan dengan algoritma yang lain, RDA memiliki kelebihan, yaitu menghasilkan efisiensi block processing lebih tinggi karena menggunakan pemisahan operasi domain frekuensi pada range dan azimuth. Selain itu, RDA mempertahankan kesederhanaan operasi satu-dimensi dengan pemisahan pemrosesan pada masing-masing arah, menjadi pemrosesan pada arah range dan azimuth. Pemisahan pemrosesan dimungkinkan karena perbedaan yang besar pada skala waktu antara data sinyal pada arah range dan azimuth. Pada paper ini akan dibahas tahapan pemrosesan sinyal SAR dengan menggunakan RDA. Kajian dilakukan dengan studi literatur dan simulasi dengan menggunakan software pemrosesan sinyal SAR. Data yang digunakan dalam simulasi adalah data raw Radarsat-1. Dari hasil uji simulasi, dapat disimpulkan bahwa RDA cukup efisien, sederhana dan mampu memproses data raw SAR menjadi citra terfokus yang cukup untuk aplikasi penginderaan jauh. Untuk penelitian selanjutnya, perlu dikaji perbandingan dengan menggunakan algoritma yang lain. Diharapkan kajian ini dapat memberikan kontribusi terhadap penguasaan teknologi pemrosesan sinyal SAR, khususnya pada pengembangan teknologi stasiun bumi dan sensor satelit LAPAN selanjutnya.

Kata kunci: pemrosesan sinyal, data raw, synthetic aperture radar (SAR), range Doppler algorithm (RDA)

Abstract

Raw data signal processing of synthetic aperture radar (SAR) by using a range Doppler algorithm (RDA) have been assessed. Until now, the development of SAR signal processing technology in the world quite rapidly. Several signal processing algorithms for SAR raw data have been developed, such as range Doppler algorithm (RDA), Chirp scaling algorithm (CSA), Omega-K algorithm, and SPECAN algorithm. Compared with the other algorithms, the RDA has its advantage, namely block processing efficiencies which are higher due to use of separation of frequency domain operation in the range and azimuth direction. In addition, RDA maintains simplicity of one-dimensional operation with processing separation in each direction, a processing in the range and azimuth direction. Processing separation is possible because of the difference in time scale between data signals in the range and azimuth direction. This paper will discuss the stages of SAR signal processing using RDA. The assessment was conducted with study of literature and simulation using SAR signal processing software. The data used in the simulation is raw data of RADARSAT-1. From the result of simulation test, it can be concluded that the RDA is efficient, simple, and able to process SAR raw data into focused image sufficiently for remote sensing applications. For further research, a comparison with other algorithms needs to be assessed. It is hoped this study will contribute to the mastery of SAR signal processing technology, particularly to the technology development of LAPAN ground station and the next LAPAN satellite sensor.

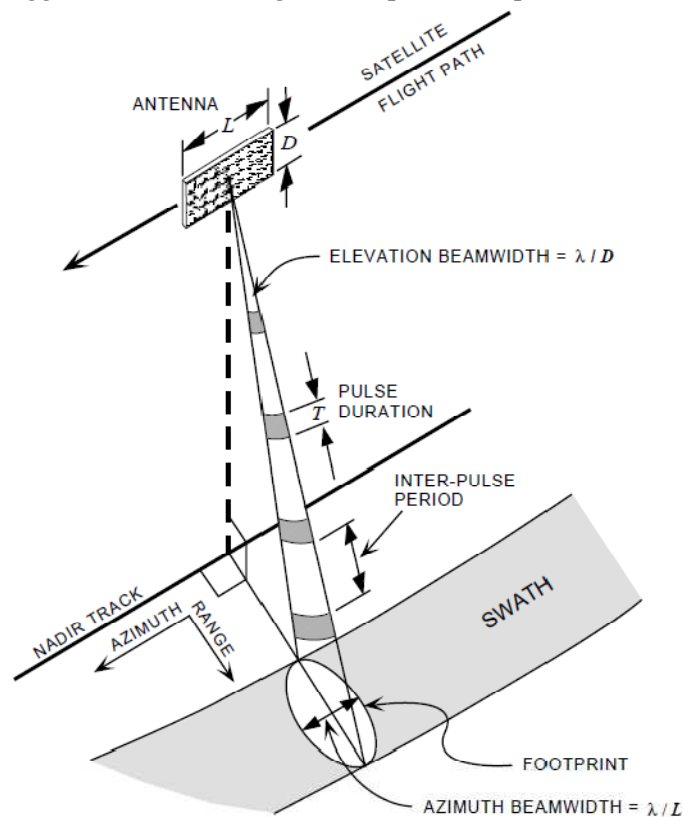
Keyword: signal processing, raw data, synthetic aperture radar (SAR), range Doppler algorithm (RDA)

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya penggunaan data *synthetic aperture radar* (SAR) pada dasarnya disebabkan oleh kelebihan sensor radar, yang mampu mengiluminasi target dengan sendirinya tanpa bergantung pada energi elektromagnetik dari cahaya matahari. Sehingga, sensor ini dapat beroperasi sepanjang

waktu dalam berbagai kondisi cuaca, siang ataupun malam. Selain itu, gelombang elektromagnetik yang digunakan radar mampu menembus awan dan uap air dengan sedikit atau tanpa pelemahan sinyal pada pantulannya. Dengan demikian, penggunaan radar (SAR) sesuai untuk wilayah dengan prosentase tutupan awan yang cukup tinggi seperti di Indonesia. Dengan menggunakan radar, hamburan energi elektromagnetik yang dipantulkan material objek sifatnya berbeda jika dibandingkan dengan optik, sehingga data radar (SAR) dapat memberikan informasi yang melengkapi (komplemen) data optik, dan terkadang mampu membedakan fitur permukaan objek dengan lebih baik dibandingkan data dari sensor optik.

Sistem akuisisi data penginderaan jauh dengan menggunakan radar berbeda dengan optik. Pada sistem akuisisi data optik, sensor mencitra target dengan hanya mendeteksi dan merekam energi reflektansi target (objek) ketika diiluminasi cahaya matahari. Sedangkan pada radar, sistem akuisisinya mencitra suatu target dengan cara mengarahkan berkas (*beam*) radar ke target. Arah *beam* mendekati tegak lurus terhadap arah pergerakan sensor (*platform*). *Beam* yang dipancarkan dari sensor akan mentransmisikan sinyal elektromagnetik dalam bentuk pulsa *phase-encoded*. Selanjutnya, sistem sensor radar akan merekam *echo* sinyal radar yang dipantulkan target. Gambaran umum pencitraan suatu target dengan menggunakan *side looking SAR* dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Konfigurasi *scanning* untuk *side looking SAR* dengan antenna *rectangular*.

Sistem akuisisi radar (SAR) berbasis pada empat prinsip utama, yaitu:

- Kemampuan sistem (antena) dalam memancarkan sinyal dalam bentuk pulsa elektromagnetik. Pulsa dipancarkan secara singkat dan intens ke arah target dengan memperhatikan ketepatan (presisi) arahnya;
- Kemampuan sistem (antena) dalam mendeteksi atenuasi *echo* yang dihamburkan atau dipantulkan oleh target. Ketepatan (presisi) arah tetap diperhatikan dalam pendeteksian;
- Kemampuan sistem untuk menghitung selang waktu (*delay*) antara pemancaran dan pendeteksian. Dengan menghitung selang waktu, maka jarak (*range*) dari sensor ke target juga dapat ditentukan;
- Kemampuan sistem untuk memindai (*scan*) target dengan *beam* yang dipancarkannya. *Scanning* yang terarah menyebabkan sistem dapat memeriksa area yang diperluas (*extended area*) pada target.

Tingkat kecerahan (*brightness*) pada citra SAR sebanding dengan amplitudo *echo* sinyal yang dipantulkan oleh target. Amplitudo sinyal pantul dari target yang diterima oleh detektor diukur dan direkam untuk mengkonstruksi citra. Pada sistem radar yang koheren seperti SAR, fase *echo* yang diterima juga diukur dan digunakan untuk mengkonstruksi citra. Untuk membentuk citra, pengukuran intensitas gelombang sinyal harus dilakukan dalam dua arah yang saling tegak lurus. Yaitu, pada arah *range* (*cross-track*) yang sejajar (paralel) dengan *beam* radar dan arah *azimuth* (*along-track*) yang searah dengan pergerakan sensor. Dengan demikian, sistem pencitraan pada radar (SAR), terutama pemrosesan sinyalnya, lebih kompleks jika dibandingkan dengan sensor optik.

Untuk mengolah data *raw* (sinyal) SAR menjadi citra cukup fokus, beberapa algoritma *signal processing* telah dikembangkan. Yaitu, *range Doppler algorithm* (RDA), *chirp scaling algorithm* (CSA), *omega-K algorithm*, dan *SPECAN algorithm*. RDA secara akurat dan efektif mengakomodasi parameter yang bervariasi terhadap jarak, seperti *Doppler centroid*, tingkat (*rate*) modulasi frekuensi *azimuth*, dan *range cell migration*. CSA menghasilkan kualitas citra lebih bagus dari citra yang dihasilkan RDA, karena CSA mengganti *interpolator* untuk koreksi *range cell migration* dengan *scaling operation* dalam domain waktu *range* atau domain frekuensi *azimuth*. Algoritma *omega-K* mengkoreksi *range migration* dengan *range migration* pada domain frekuensi dua dimensi dan mampu mengatasi *aperture* paling lebar dan sudut *squint* tertinggi. Untuk data dengan resolusi menengah dan resolusi rendah seperti citra *quick look*, dikembangkan algoritma SPECAN yang meminimalkan kebutuhan memori dan komputasi dengan penggunaan *Fast Fourier Transform* (FFT) tunggal dan pendek pada operasi kompresinya.

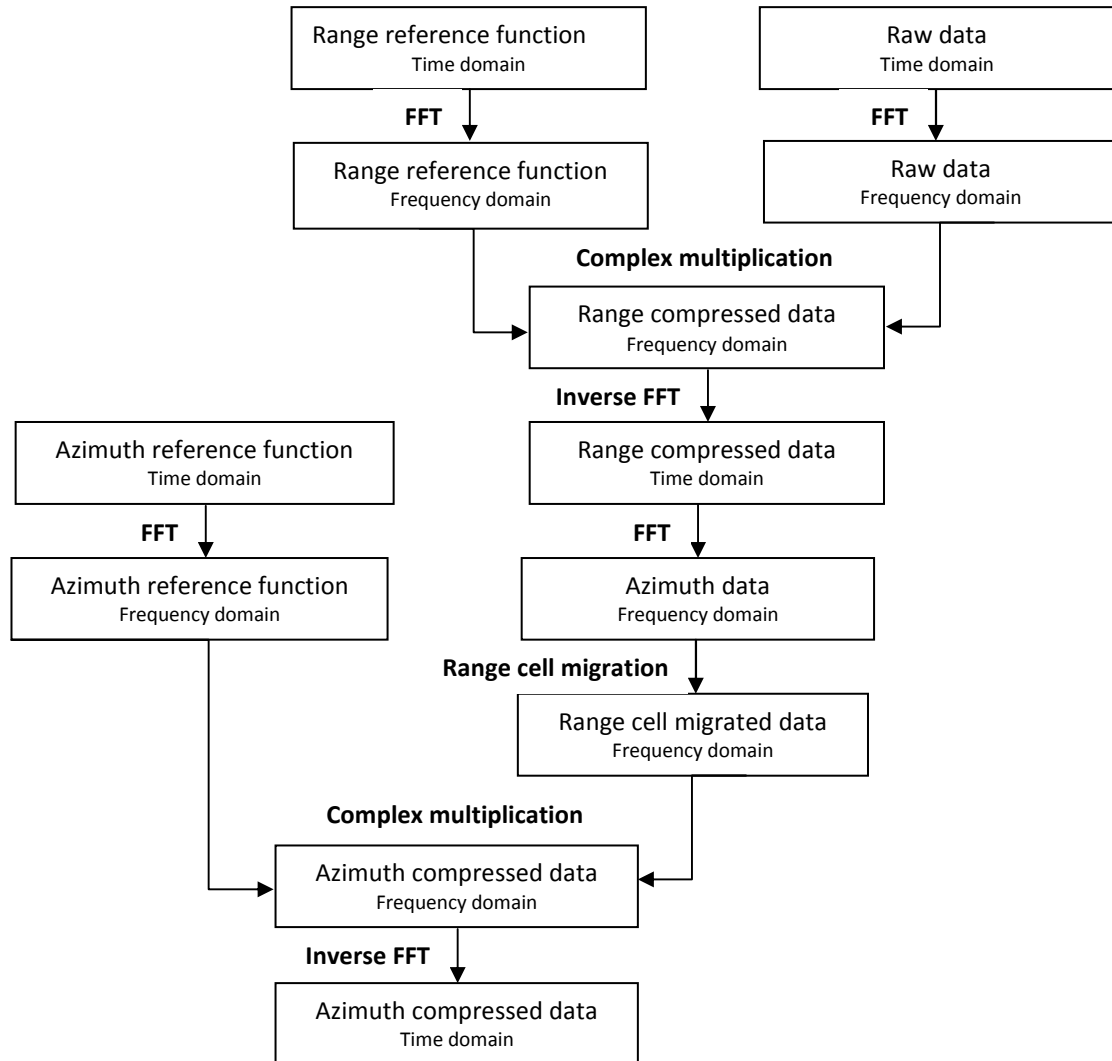
RDA didesain untuk menghasilkan efisiensi *block processing*, dengan menggunakan operasi domain frekuensi pada arah *range* dan *azimuth*. Selain itu, RDA mempertahankan kesederhanaan operasi satu-dimensi. Kelebihannya adalah pemisahan *processing* pada dua arah, yang dimungkinkan dengan adanya perbedaan yang cukup besar pada skala waktu antara data sinyal pada arah *range* dan *azimuth*. Perbedaan skala waktu pada *range* dan *azimuth* tersebut dikoreksi dengan menggunakan operasi *range cell migration correction* (RCMC). Efisiensi *block processing* juga dihasilkan oleh operasi RCMC, mengingat prosesnya dilakukan dalam domain waktu *range* dan domain frekuensi *azimuth*. Domain ini disebut sebagai domain "*range Doppler*" karena frekuensi *azimuth* sinonim dengan frekuensi Doppler. Sehingga, algoritma ini disebut *range Doppler algorithm* (RDA) karena adanya operasi RCMC yang dilakukan dalam domain *range Doppler* ini. Operasi RCMC merupakan fitur yang membedakan RDA dengan algoritma yang lain. RCMC bergantung pada parameter-parameter yang bervariasi terhadap jarak. RDA juga berbeda dengan algoritma lain karena kemampuannya dalam mengakomodasi variasi jarak pada parameter-parameter yang dihitung dengan relatif mudah. Seluruh operasi dilakukan dalam larik data satu-dimensi, sehingga menghasilkan pemrosesan yang sederhana dan efisien.

Pada *paper* ini akan dibahas tahapan *signal processing* data *raw* SAR dengan menggunakan RDA. Hasil kajian tahapan pemrosesan sinyal SAR ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap penguasaan teknologi pemrosesan sinyal SAR, khususnya pada pengembangan teknologi stasiun bumi dan sensor satelit LAPAN selanjutnya.

2. METODOLOGI

Teknik utama yang digunakan pada RDA adalah *matched filtering*, teknik umum dalam komunikasi, yang merupakan operasi korelasi antara sinyal tertentu (*template signal*) dengan sinyal yang belum diketahui (*unknown signal*). Operasi korelasi ini ekuivalen dengan konvolusi antara *unknown signal* dengan *template signal* berkebalikan waktu (*time reversed*). Konvolusi ini dapat digunakan untuk mendeteksi *template signal* pada *unknown signal*. Untuk implementasi efisiensi, seluruh proses konvolusi *matched filter* dilakukan dengan perkalian dalam domain frekuensi.

Pada Gambar 2.1 ditampilkan diagram alir tahapan proses pengolahan sinyal data *raw* SAR dengan menggunakan RDA. RDA memproses sinyal dua-dimensi SAR dalam dua arah, *range* dan *azimuth*, secara terpisah. Sehingga, terdapat dua proses utama pada RDA, yaitu pemrosesan dalam arah *range* (*range processing*) dan arah *azimuth* (*azimuth processing*).



Gambar 2.1. Diagram Alir Tahapan *Signal Processing* Data Raw SAR dengan Menggunakan RDA.

Range Processing

Untuk mendapatkan resolusi tinggi pada arah *range*, pulsa *rectangular* singkat dipancarkan secara intens ke arah target. Selanjutnya, sinyal pantul dari target yang tidak lebih pendek dari pulsa yang dipancarkan, disampling dan dirata-ratakan pada seluruh interval waktu. Nilai rata-rata hasil sampling tersebut merupakan intensitas terhambur dari permukaan pada *slant range* yang sesuai dengan setengah waktu perjalanan bolak-balik sinyal. Karena rata-rata interval dibatasi dengan panjang pulsa, resolusi *range* secara langsung berbanding lurus dengan panjang pulsa. Maka, resolusi tinggi dapat dihasilkan jika pulsa yang dipancarkan sensor pendek (*short pulse*) dan, dengan demikian, level intensitas gelombang sinyal yang dibutuhkan menjadi sangat tinggi. Intensitas gelombang sinyal yang tinggi diperlukan agar diperoleh energi yang cukup besar, sehingga energi sinyal pantul cukup besar dan dapat dideteksi. Kebutuhan intensitas yang tinggi menyebabkan kebutuhan daya untuk sistem SAR yang mengorbit menjadi sangat tinggi.

Untungnya, dalam *signal processing* kebutuhan akan *short pulse* dapat diatasi dengan penggunaan teknik perpanjangan pulsa (*extended pulse*) dengan intensitas rendah. Dengan menggunakan teknik ini, kebutuhan daya rendah, tetapi menghasilkan energi sinyal yang cukup besar. Sehingga, energi sinyal pantul juga cukup dapat dideteksi oleh sensor penerima. Meskipun terdapat konsekuensi, yaitu pantulan dari titik-titik pada interval jarak yang berdekatan akan saling tumpang tindih (*overlap*), tetapi bentuk pulsa cukup dapat dibedakan. Sehingga, dimungkinkan analisis sinyal pantul untuk mengurai (*resolve*) elemen lapisan sinyal. Dengan penguraian elemen sinyal, perbedaan antar elemen sinyal dapat diperoleh. Penguraian elemen sinyal ini dilakukan menggunakan

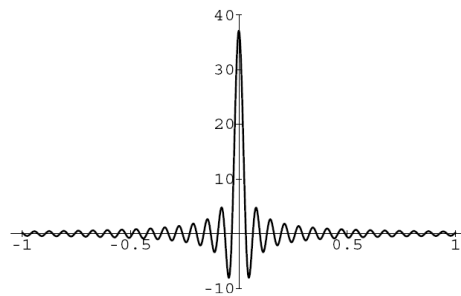
matched filter. Pada dasarnya, *matched filter* akan mengenali elemen sinyal yang berbeda dan menampung selama periode tertentu (*delayed*) secara berturut-turut dan mengkompresnya. Sehingga, seluruh elemen sinyal yang berbeda terkompres menjadi *spike* pendek dengan intensitas yang sebanding dengan perpanjangan *echo*.

Terdapat sejumlah cara untuk mengimplementasikan *matched filter*, dan cara termudah untuk memvisualisasikannya adalah dengan teknik korelasi. Autokorelasi sinyal didefinisikan sebagai fungsi *lag* (atau penundaan (*delay*) waktu). Fungsi autokorelasi akan mempunyai nilai rendah untuk *lag* yang besar. Artinya, sinyal tak terkorelasi dengan dirinya sendiri ketika tertunda (*delayed*). Teknik ini membutuhkan sinyal yang berbeda. Tujuan pembuatan sinyal yang berbeda adalah untuk memilih salah satu sinyal tersebut dengan menggunakan fungsi autokorelasi yang sangat sempit (*narrow*). Karena intensitas sebanding dengan perpanjangan *echo*, maka *echo* dikorelasikan dengan pulsa sinyal yang ditransmisikan ke target pada arah *range*. Sehingga, dihasilkan pulsa yang sempit pada *lag* yang sebanding dengan waktu perjalanan bolak-balik. Dengan demikian, *echo* sesuai (*match*) dengan pulsa asli dari target (pada arah *range*) yang terdapat pada *delay*.

Bentuk pulsa yang tidak terkorelasi pada *lag* yang besar, diberikan oleh frekuensi yang harmonik, yang meningkat secara linier terhadap waktu, disebut sebagai *linear frequency modulation* (*linear FM*). Selain itu, juga diberikan oleh *chirp* dalam rentang frekuensi tertentu yang dihasilkan pada durasi terbatas. *Chirp* terbatas memodulasikan frekuensi pembawa f_0 , dengan panjang T dan laju frekuensi *chirp*, a , mempunyai fungsi autokorelasi yang kompleks dan dapat dinyatakan sebagai

$$acf_f(\tau) = \Phi(\tau) \cdot (T - |\tau|) \cdot \frac{\sin(\pi a \tau (T - |\tau|))}{\pi a \tau (T - |\tau|)} \quad (1)$$

Φ adalah *harmonic* pembawa yang dimodulasi dengan pulsa segitiga dan *sinc* waktu kuadratik. Pada Gambar 2.2 ditampilkan fungsi autokorelasi *chirp*, yang menunjukkan bentuk *envelope*. Terlihat dengan jelas bahwa *chirp* telah dikompres menjadi *spike* yang sempit.



Gambar 2.2. Fungsi autokorelasi *chirp* (satuan waktu dalam mikrosekond dan sumbu vertikalnya adalah korelasi dalam satuan energi watt-mikrodetik).

Peningkatan (*gain*) resolusi, atau rasio kompresi pulsa, merupakan produk *time-bandwidth* dari sinyal *chirp*. Sehingga, untuk resolusi tinggi dibutuhkan sinyal dengan *time-bandwidth* tinggi. *Time-bandwidth* yang tinggi berimplikasi pada laju *chirp* yang besar, karena durasi pulsa dibatasi sejumlah pertimbangan, khususnya kebutuhan untuk menerima melebihi interval untuk mencitrakan target dengan sapuan yang lebar pada permukaan target.

Secara matematis, operasi filter dinyatakan sebagai konvolusi input f dengan fungsi respons impuls h . Untuk membuat konvolusi menyerupai autokorelasi, maka $h(t) = f^*(-t)$, sehingga

$$g(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) h(\tau - t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t' + \tau) f^*(t') dt' = acf_f(\tau) \quad (2)$$

Dengan demikian, autokorelasi senilai dengan konvolusi, yaitu (*matched filtering* dengan konjugat kompleks berkebalikan (*invers*) waktu dari sinyal original (asli). Pada dasarnya, *matched filtering* mencari perkiraan solusi untuk *invers* konvolusi sinyal input. Untuk menyelesaikan h pada $f * h = \delta$, dimana δ adalah fungsi delta Dirac, satuan impuls adalah pada waktu nol. Kegunaan fungsi delta adalah sifat *sifting*-nya (*identitas* konvolusi), yaitu mengekstraksi nilai sinyal pada waktu tertentu, dimana

$$f * \delta = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(\tau - t) dt = f(\tau) \quad (3)$$

Anggap pulsa $f(t)$ ditransmisikan dan sinyal pantul disampling pada interval Δt . Jika $N + 1$ sampel diambil, respon terukur pada antenna akan menjadi

$$s(t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i f(t - i\Delta t) \quad (4)$$

dimana α_i adalah tingkat hamburan dari *range* sesuai dengan waktu sampel $i\Delta t$ dan akan disuperposisikan pada kasus ketika $\Delta t < T$. Dengan mengkonvolusikan respon terukur pada antenna dengan invers pulsa, dan menggunakan versi diskrit sifat *sifting*, diperoleh g yang merupakan seri waktu diskrit dengan nilai α_i , sebagai

$$g_i := g(i\Delta t) = \alpha_i, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (5)$$

Fungsi ini merupakan bentuk paling sesuai untuk merepresentasikan baris pada citra.

Untuk efisiensi perhitungan g , lebih praktis dengan melakukan transformasi Fourier pada data ke domain frekuensi, dimana sesuai dengan Teorema Konvolusi, konvolusi pada domain waktu sama dengan perkalian pada domain frekuensi dan begitu juga sebaliknya. Transformasi fungsi respons impuls, $\mathcal{F}\{h\}$, diketahui sebagai fungsi respons frekuensi,

$$\mathcal{F}\{f^*(-t)\} = (\mathcal{F}\{f\})^* \quad (6)$$

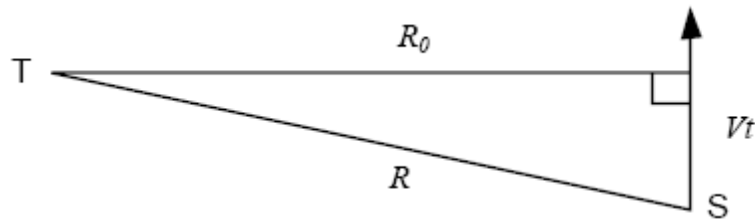
Yang merupakan konjugat kompleks transformasi pulsa. Dalam *SAR processing* dikenal sebagai fungsi referensi dan juga mempunyai bentuk *chirp* karena Gaussian (kompleks) adalah juga Gaussian. Transformasi Fourier untuk data diskrit dapat dilakukan secara efisien dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) dan inversnya (FFT⁻¹). Sehingga, operasi *filtering* terdiri dari FFT, perkalian dengan fungsi referensi diikuti dengan invers FFT.

Fungsi ambiguitas merupakan generalisasi autokorelasi bentuk gelombang sinyal, yang mengukur keberhasilan kompresi pulsa dalam hal kemampuannya menghasilkan resolusi target. Untuk mengkompensasi ambiguitas *sidelobe*, digunakan *weighting* (atau *windowing*) pada sinyal pantul selama waktu integrasi. *Windowing* dapat dilakukan dalam domain frekuensi dimana secara efisien dapat dimasukkan ke fungsi referensi. Hasil modifikasi sinyal ini adalah pengurangan amplitudo *sidelobe* pada saat pelebaran *main lobe* output pulsa terkompres. Untuk tingkat pengurangan *sidelobe* yang tetap, fungsi *weighting* dapat ditentukan sebagai solusi optimalisasi masalah yang meminimalkan lebar *main lobe*. Hasilnya adalah fungsi *window* kosinus dengan bentuk *pedestal*, $W(f) = \alpha + \beta \cos(2\pi f/B)$, dimana B adalah *bandwidth* dan $\alpha + \beta = 1$. Teknik *windowing* yang paling banyak digunakan adalah dengan menggunakan *window* Hamming.

Azimuth Processing

Resolusi pada arah *azimuth* dipengaruhi oleh nilai *beamwidth* sinyal beam. Semakin kecil *beamwidth*, semakin tinggi resolusi yang diperoleh. Nilai *beamwidth* berbanding terbalik dengan ukuran antenna dan panjang gelombang pembawa sinyal (*carrier*). Sehingga, untuk memperoleh resolusi tinggi pada arah *azimuth* diperlukan antenna yang besar. Penggunaan antenna yang besar pada sistem penginderaan jauh SAR dengan satelit tidak dimungkinkan, karena akan mempengaruhi bobot dan volume satelit. Sehingga, diperlukan cara lain untuk menghasilkan nilai *beamwidth* yang kecil, yaitu dengan menggunakan teknik sampling. Informasi dari sinyal pada arah *azimuth* disampling pada resolusi tinggi. Kemudian, sinyal *echo* dari target didistribusikan pada sejumlah sampel sesuai dengan perpanjangan spasial pada arah *along track*. Informasi *azimuth* juga disuperposisikan pada *cluster* sampel dari lokasi target yang berdekatan, sehingga, seperti pada arah *range*, *signal processing* diperlukan untuk mengintegrasikan data ini ke pulsa terkompres yang disebabkan target *compact*.

Masalah selanjutnya adalah bagaimana membedakan *echo* sinyal dalam hal posisinya terhadap *beam*, untuk mencari variasi terhadap waktu sepanjang interval (waktu integrasi koheren) ketika *beam* menyapu target. Sinyal yang diterima di antenna yang bergerak akan berubah frekuensinya karena pergeseran Doppler. Frekuensi pergeseran akan sebanding dengan kecepatan relatif sumber dan penerima. Pada Gambar 2.3 ditampilkan geometri untuk menghitung kecepatan relatif satelit, S, dan target, T, untuk memperkirakan pergeseran Doppler sebagai fungsi waktu, t.



Gambar 2.3. Geometri untuk menghitung kecepatan relatif satelit, S, dan target, T, untuk memperkirakan pergeseran Doppler sebagai fungsi waktu, t .

Anggap satelit melintasi target pada jarak terdekat pada waktu $t = 0$ dan *slant range* R_0 yang tegak lurus terhadap lintasan. Jika satelit mempunyai kecepatan orbital V , maka, dengan mengabaikan rotasi bumi, rumus Pythagoras memberikan $R^2 = R_0^2 + (Vt)^2$. Dengan menurunkan persamaan tersebut terhadap waktu, diperoleh $2R \frac{dR}{dt} = 2V^2 t$ atau $\frac{dR}{dt} = \frac{V^2}{R} t$. Ini merupakan aproksimasi ketika lintasan orbit tidak berupa garis lurus. Untuk presisi yang tinggi, variasi frekuensi Doppler sinyal adalah

$$f = f_0 + f_D = f_0 - \frac{2V^2}{\lambda R} t \quad (7)$$

Yang merupakan modulasi frekuensi linier atau *linear FM*. Karena *footprint* cukup kecil dan relatif konstan jika dibandingkan dengan *slant range*, R , dan karena *azimuth* bervariasi, maka sinyal pantul akan disampling pada lokasi-lokasi yang kira-kira sama dengan pulsa *chirp*. Sehingga pada jarak yang tetap, fase sinyal akibat bentuk gelombang *chirp* akan konstan sepanjang sampling *azimuth* pada PRF. Dengan demikian, selama V^2/R tidak bergantung waktu, variasi sinyal dengan *azimuth* adalah *chirp*. Sehingga, teknik kompresi pulsa yang sama dengan *range processing* dapat digunakan. Pada prakteknya, penggunaan *chirp matched filter* untuk *azimuth SAR processing* memberikan hasil yang baik.

Processing Errors

Untuk mengkorelasikan sinyal pantul secara tepat melalui waktu integrasi yang koheren, atau sama halnya untuk mengatur fase untuk beberapa waktu perjalanan sinyal pada *slant range*, diperlukan *timing* yang tepat pada sistem. Hal ini dilakukan dengan *stable local oscillator* (STALO) yang menjalankan sinyal pada akurasi sub-mikrosekon dan mampu menjaga fase hingga $\pi/4$ atau seperdelapan putaran. Sejumlah asumsi pendekatan dan penyederhanaan digunakan sehingga membuat rumus yang digunakan dalam *signal processing* secara geometrik tidak pasti dan membutuhkan koreksi, biasanya pada lokasi piksel data yang diproses.

Error yang terjadi antara lain disebabkan oleh gerak relatif satelit terhadap target, estimasi Doppler, *clutterlock*, autofokus, ambiguitas dan migrasi *range*. Dengan adanya *error* tersebut diperlukan koreksi pada *signal processing*, seperti *range cell migration correction* (RCMC), yang juga diimplementasikan pada algoritma ini, baik dalam arah *range* dan *azimuth*.

Data

Data yang digunakan untuk simulasi *signal processing* dengan menggunakan RDA pada *paper* ini adalah data *raw* Radarsat-1 yang diperoleh dari *Alaska SAR Facility* (ASF). Pada simulasi ini, diasumsikan sudut *squint* sensor SAR kecil (mendekati nol).

3. PEMBAHASAN

Setelah dilakukan simulasi pemrosesan sinyal data *raw* Radarsat-1 dengan menggunakan RDA, diperoleh visualisasi hasil dari beberapa tahap pemrosesan, baik pada arah *range* maupun *azimuth*. Pada Gambar 3.1 ditampilkan tiga citra yang merupakan visualisasi hasil dari proses *ingest data raw*, FFT data *raw* dan IFFT data *range*.



Gambar 3.1. Visualisasi hasil dari proses *ingest* data *raw*, FFT data *raw* dan IFFT data *range*.

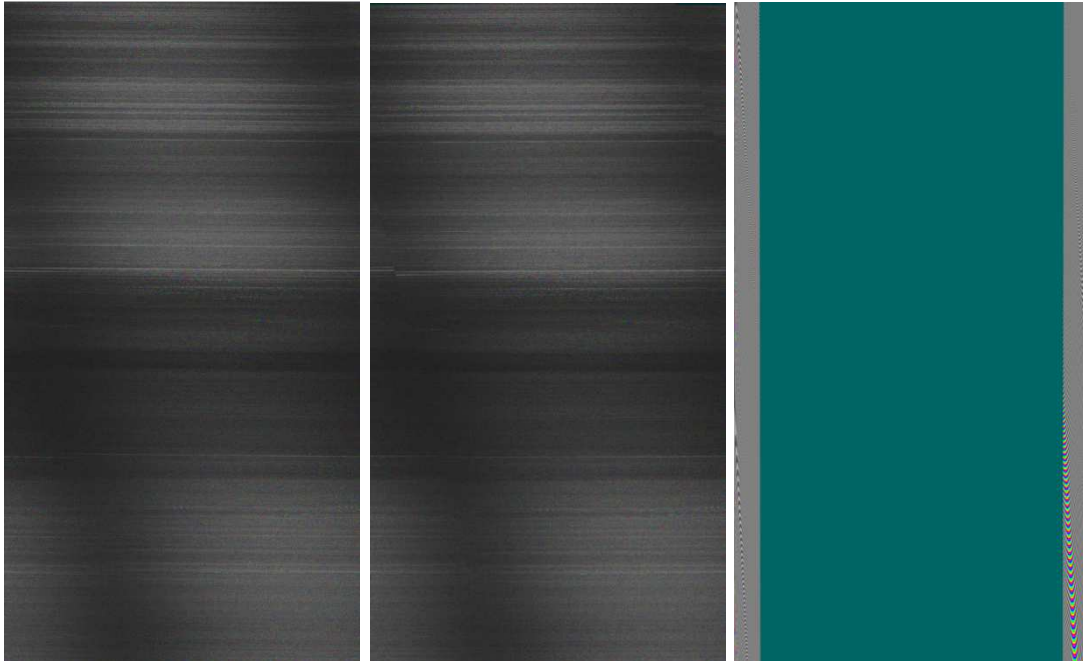
Citra pertama pada Gambar 3.1 merupakan input untuk pemrosesan sinyal dengan menggunakan RDA, yang diperoleh setelah proses *ingest* data *raw* Radarsat-1. Dari citra pertama terlihat bahwa citra masih belum fokus karena masih mentah (*raw*), berupa sinyal dalam bentuk bilangan kompleks yang divisualisasikan. Bentuk objek tidak terlihat dengan jelas dan tidak dapat dibedakan satu dengan lainnya. Warna hitam pada sebagian citra menunjukkan bahwa sebagian target mempunyai emisivitas yang rendah atau mendekati nol, sehingga seluruh energi radar yang datang diserap dan tidak ada yang dipantulkan sama sekali. Contoh objek yang mempunyai karakteristik tersebut adalah objek-objek yang mempunyai ketinggian rendah dan rata, misalnya perairan. Beberapa bagian citra berwarna lebih terang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh energi radar dipantulkan oleh permukaan objek tersebut. Dengan demikian, dapat dikatakan objek tersebut mempunyai emisivitas yang tinggi, mendekati satu. Contoh objek yang mempunyai karakteristik tersebut adalah objek-objek dengan ketinggian tertentu, misalnya gedung, perumahan dan sebagainya.

Citra kedua pada Gambar 3.1 merupakan visualisasi hasil pengolahan setelah proses FFT pada input. Proses FFT tersebut mengkonversi data input, dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Data diakuisisi sebagai fungsi *range*, sehingga tiap garis *range* ditransformasi menjadi satu pada satu waktu. Akibat dari proses tersebut, penampakan citra semakin tidak jelas, *blur*, dan hanya berupa garis-garis terang dan gelap. Walaupun penampakan citra berubah, set data input *raw* setelah FFT mempunyai informasi yang sama seperti data input *raw* pada domain waktu, tetapi dalam domain frekuensi.

Citra ketiga pada Gambar 3.1 merupakan visualisasi hasil pengolahan setelah proses IFFT pada data *range* terkompres. Tahapan proses ini diperoleh setelah data *raw* dalam domain frekuensi dikalikan dengan fungsi referensi *range* yang juga dalam domain frekuensi. Perkalian antara keduanya merupakan perkalian kompleks yang menghasilkan data *range* terkompres dalam domain frekuensi. IFFT dilakukan pada data *range* terkompres dalam domain frekuensi untuk mengkonversi domainnya dari domain frekuensi menjadi domain waktu. Data *range* terkompres terdiri dari konvolusi fungsi referensi *range* dan data *raw* dalam arah *range*. Sesuai dengan teorema konvolusi, konversi dua fungsi ke domain frekuensi diikuti dengan perkalian kompleks, dan konversi kembali ke domain waktu sama dengan konvolusi dua fungsi. Data dikatakan terkompres karena *chirp* telah dihapus/dihilangkan dan

seluruh sinyal kembali dari target tunggal terkompres menjadi area tunggal. Sehingga, setelah proses IFFT, citra berubah menjadi sedikit lebih jelas dibandingkan data *raw* input dalam domain waktu. Walaupun citra masih belum terlalu fokus dan objek-objek masih belum dapat dibedakan dengan jelas, tetapi penampakan citra ini sedikit lebih baik dibandingkan data *raw* input.

Pada Gambar 3.2 ditampilkan visualisasi hasil FFT data *range* terkompres, hasil dari proses *range cell migration* dan hasil pembuatan fungsi referensi *azimuth*.



Gambar 3.2. Visualisasi hasil FFT data *range* terkompres, hasil *range cell migration* dan hasil pembuatan fungsi referensi *azimuth*.

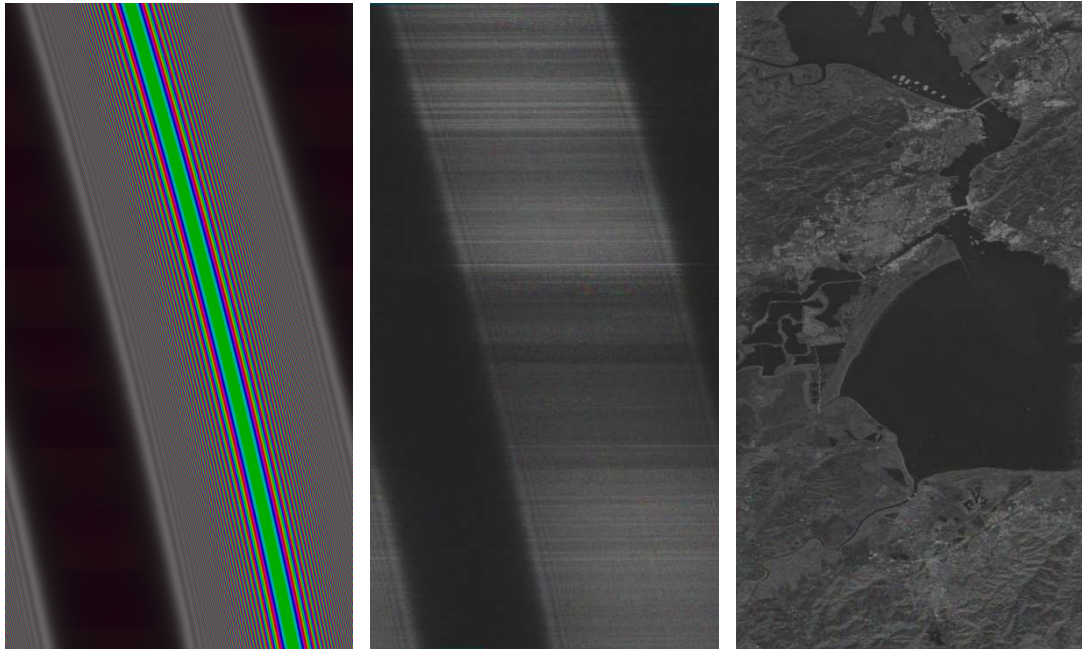
Citra pertama pada Gambar 3.2 merupakan visualisasi hasil FFT data *range* terkompres. Proses FFT data *range* terkompres ini dilakukan setelah IFFT data *range* terkompres. Proses FFT ini mengkonversi domain data *range* terkompres, dari domain waktu berubah kembali menjadi domain frekuensi. Proses *corner-turned* dilakukan pada data, sehingga data yang sebelumnya merupakan kolom pada larik data *raw*, berubah menjadi baris setelah FFT. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa *corner-turned* mengubah orientasi/arah dari *range* menjadi *azimuth*. Set data *range* terkompres setelah FFT ini mempunyai informasi yang sama dengan set data *range* terkompres dalam domain waktu, tetapi dalam domain frekuensi dan arahnya telah berubah menjadi arah *azimuth*. Citra tampak tidak jelas, *blur* dan hanya berupa garis-garis terang dan gelap.

Citra kedua pada Gambar 3.2 merupakan visualisasi hasil *range cell migration* pada data *azimuth* dalam domain frekuensi. Sebagai suatu target yang disampel pada arah *azimuth*, sinyal pantul yang berisi sinyal dengan baris *range* yang sama tidak diperlukan. Migrasi sinyal dari satu bin ke dalam *mean-mean* lainnya dengan beberapa *power* yang diinginkan untuk dikompres adalah dalam kolom yang berbeda dari data secara lengkap. *Range cell migration* (RCM) mengatur kembali seluruh sinyal kembali dari suatu target tunggal ke dalam suatu baris tunggal yang sesuai dari data dalam persiapan untuk kompresi *azimuth*. Seluruh sinyal pantul *azimuth* dari suatu target tunggal sekarang sudah digeser ke dalam baris berurutan sehingga kompresi *azimuth* akan menggiringnya menjadi data yang terfokus secara baik. Jika RCM diabaikan, sinyal pantul dari target dapat didistribusikan melintasi dua atau tiga baris *azimuth*. Hasil dari citra akhirnya akan rendah resolusinya dan mengotori (*smearing*) target pada arah *range*. Sama seperti sebelumnya, citra masih tampak tidak jelas, *blur* dan hanya berupa garis-garis terang dan gelap.

Citra ketiga pada Gambar 3.2 merupakan visualisasi hasil pembuatan fungsi referensi *azimuth*. Fungsi referensi *azimuth* sama dengan fungsi referensi *range*. Pada kasus ini, bagaimanapun, geometri satelit yang bergerak mendahului target mengubah frekuensi sinyal pantul pada arah *azimuth*. Efek Doppler terjadi, sehingga frekuensi menjadi lebih tinggi ketika satelit bergerak mendekati obyek, dan

frekuensi menjadi lebih rendah ketika menjauhi target. Fungsi referensi *azimuth* merupakan deretan bilangan yang merepresentasikan *chirp*, dan dihitung secara unik untuk setiap citra, dan setiap baris *range* yang sama pada arah *azimuth*. Citra hanya tampak sama dengan satu warna.

Pada Gambar 3.3 ditampilkan visualisasi hasil FFT fungsi referensi *azimuth*, perkalian kompleks dan IFFT data *azimuth* terkompres.



Gambar 3.3. Visualisasi hasil FFT fungsi referensi *azimuth*, perkalian kompleks dan IFFT data *azimuth* terkompres.

Citra pertama pada Gambar 3.3 merupakan visualisasi hasil FFT yang dilakukan pada fungsi referensi *azimuth*. Sama halnya dengan FFT sebelumnya, proses FFT pada fungsi referensi *azimuth* ini mengkonversi domain fungsi tersebut dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Fungsi referensi *azimuth* ini mempunyai informasi yang sama dengan fungsi referensi *azimuth* dalam domain waktu, tetapi dalam domain frekuensi. Citra masih tampak tidak jelas, hanya berupa garis-garis terang dan gelap. Sedangkan citra kedua, merupakan visualisasi hasil perkalian kompleks antara fungsi referensi *azimuth* dalam domain frekuensi dengan data *azimuth* dalam domain frekuensi setelah proses RCM. Setiap elemen data dalam domain frekuensi dikalikan dengan konjugat kompleks elemen yang bersesuaian dengan fungsi referensi *azimuth* dalam domain frekuensi. Hasil dari perkalian kompleks tersebut dikonversi kembali dari domain frekuensi menjadi domain waktu dengan menggunakan IFFT. Visualisasi hasil IFFT dapat dilihat pada citra ketiga. Data sekarang telah terkompres ke dalam masing-masing dimensi, *range* dan *azimuth*. Citra akhir diperoleh setelah proses *corner-turned* lagi, untuk mengembalikannya ke dalam arah *range-azimuth* yang dapat dikenali, dan kemudian dikonversi dari data kompleks menjadi data citra dengan informasi amplitudo dan fase. Citra kemudian di resampling untuk ukuran piksel yang diinginkan. Untuk keperluan visualisasi, diberikan dalam bentuk citra yang mengandung informasi fase dan mengkonversinya ke dalam warna yang sesuai dengan *range* fase. Citra tampak lebih fokus, dengan resolusi yang lebih baik sehingga masing-masing objek dapat dibedakan dengan lebih jelas.

4. KESIMPULAN

1. Terdapat dua proses utama pada RDA, yaitu pemrosesan sinyal pada arah *range* (*range processing*) dan pada arah *azimuth* (*azimuth processing*).
2. Untuk efisiensi pemrosesan, operasi FFT dilakukan untuk mengkonversi domain data dari domain waktu menjadi domain frekuensi baik dalam *range processing* maupun *azimuth processing*.

3. RCMC, yang bergantung pada waktu *range* dan frekuensi *azimuth*, dilakukan dalam domain *range Doppler*, dimana sekelompok lintasan target pada jarak yang sama ditransformasi menjadi satu lintasan tunggal. RCMC meluruskan lintasan ini sehingga sejajar dengan sumbu frekuensi *azimuth*.
4. Operasi IFFT dilakukan untuk mengkonversi domain data dari domain frekuensi kembali ke domain waktu, menghasilkan citra kompleks terkompres baik pada arah *range* maupun *azimuth*.
5. Citra yang dihasilkan setelah pemrosesan sinyal data *raw* dengan menggunakan RDA, cukup fokus untuk dimanfaatkan pada aplikasi penginderaan jauh SAR. Diperlukan kajian selanjutnya, yaitu membandingkan RDA dengan algoritma pemrosesan sinyal yang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Olmsted, C., *Imaging Radar*. Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide. 1993.
2. Chastant, L. J., et.al, *Microwave Remote Sensors*. Manual of Remote Sensing. 1975.
3. Cumming, I. G., and Wong, F. H., *The Range Doppler Algorithm*. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithm and Implementation. 2005.
4. Schultz, M., *Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in Matlab*. Thesis presented to the Faculty of the California Polytechnic State University, San Luis Obispo. 2009.
5. Olmsted, C., *SAR Signal Processing Algorithm*. Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide. 1993.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

DATA UMUM

Nama Lengkap : Musyarofah
Tempat & Tgl. Lahir : Demak, 15 Oktober 1980
Jenis Kelamin : Perempuan
Instansi Pekerjaan : Pustekdata – LAPAN
NIP. / NIM. : 198010152008012009
Pangkat / Gol. Ruang : Penata Muda/IIIa
Jabatan Dalam Pekerjaan : Peneliti Pertama
Agama : Islam
Status Perkawinan : Menikah

DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMA Negeri 1 Demak Tahun: 1996 – 1999
STRATA 1 (S.1) : Fisika – FMIPA – IPB Tahun: 1999 – 2004

ALAMAT

Alamat Rumah : Legenda Wisata Zona Van Gogh S5/30, Gn.Putri, Bogor
HP. : 081319485410
Alamat Kantor / Instansi : Jl. Lapan No. 70 Pekayon, Pasar Rebo, Jakarta Timur
Telp. : 021 8710786
Email : musyarofah@lapan.go.id