

ANALISIS EFEK DOPPLER PADA SISTEM KOMUNIKASI ITS-SAT

Agriniwaty Paulus¹⁾, Eko Setijadi²⁾, dan Gamantyo Hendrantoro³⁾

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

Email: ekoset@ee.its.ac.id

Abstrak—Terdapat beberapa bagian yang dikembangkan dalam sistem komunikasi *picosatellite* dan salah satunya adalah analisa efek Doppler untuk informasi berupa citra. Analisa efek Doppler ini menggunakan pemrograman Matlab dengan citra yang berukuran 160×128 piksel, pada eksentrisitas (e) satelit yang diasumsikan 0 sehingga bentuk lintasannya *circular*, dengan ketinggian 700 km dari stasiun bumi, sudut inklinasi sebesar 53° dan sinyal informasi ditransmisikan pada transmisi *downlink* dengan frekuensi *carrier* 2.4 GHz. Efek Doppler terjadi karena adanya pergerakan relatif satelit terhadap stasiun bumi yang mengakibatkan adanya pergeseran frekuensi kerja satelit (Doppler *shift*). Doppler *shift* terbesar terjadi saat satelit berada pada posisi terjauh dari terminal bumi yakni sebesar 51.077 KHz. Selain efek Doppler, kerusakan sinyal informasi juga disebabkan oleh *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Untuk meminimalisasi kerusakan yang terjadi akibat AWGN maka nilai SNR dinaikkan, sedangkan untuk menghilangkan efek Doppler maka data *output* dikompensasi dengan invers dari efek Doppler tersebut. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa BER untuk frekuensi Doppler maksimum maupun minimum adalah mendekati atau hampir sama yaitu 0.5001 dan 0.4998, dan dalam keadaan tanpa terkena Doppler *shift* yaitu ± 0.0197 untuk SNR 0 sampai 10 dB. Sedangkan dari segi kualitas citra, diperoleh bahwa untuk Doppler *shift* maksimum, kualitas citra lebih baik dibandingkan saat Doppler *shift* minimum. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Doppler *shift* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sistem komunikasi *picosatellite* untuk pengiriman informasi citra.

Kata Kunci—AWGN, BPSK, Citra, Doppler *shift*, Modulasi *Baseband*.

I. PENDAHULUAN

Saat ini di beberapa Universitas di dunia sedang gencar-gencarnya diadakan penelitian untuk mengembangkan sistem komunikasi satelit pico pada orbit yang sangat rendah (LEO, *Low-earth orbit*) untuk tujuan eksperimen dan pendidikan. Satelit berukuran sangat kecil ini dinamakan CubeSat karena berbentuk kubus dengan ukuran $10 \times 10 \times 10$ cm³ dengan berat (massa) 1 kg.

ITS sebagai salah satu Universitas yang mengedepankan perkembangan dan penguasaan teknologi khususnya satelit mewujudkan partisipasinya dengan melakukan penelitian untuk mengembangkan sistem komunikasi satelit untuk pengiriman data maupun pengiriman citra yang diberi nama *ITS Satellite* (ITS-Sat). Saat ini ITS-Sat sedang mengembangkan sistem komunikasi satelit pico (*picosatellite*) yang berada di orbit LEO pada frekuensi *S-Band* yaitu 2,4 GHz untuk pengiriman teks dan citra dalam transmisi

downlink. Terdapat beberapa bagian yang dikembangkan dalam sistem komunikasi *picosatellite* dan salah satunya adalah analisa efek Doppler untuk informasi berupa citra. Analisa efek Doppler ini menggunakan pemrograman Matlab dengan citra yang berukuran 160×128 piksel.

Dalam suatu penelitian yang dilakukan oleh Moon-Hee You dkk.[1], terkait penyesuaian metode kompensasi menggunakan prediksi algoritma untuk pergeseran frekuensi Doppler dalam sistem komunikasi mobile pada satelite LEO yang ditransmisikan dengan menggunakan frekuensi *carrier* 2.4 GHz ditunjukkan bahwa dengan ketinggian satelit 1000 km diperoleh pergeseran frekuensi Doppler terbesar ± 50 kHz dengan durasi kemunculan satelit 13.3 menit. Sebuah bentuk penelitian lain dilakukan oleh Ewald van der Westhuizen dan Gert-Jan van Rooyen [2], menyatakan bahwa kompensasi terhadap efek Doppler adalah masalah yang signifikan dalam sistem komunikasi satelit LEO. Efek pergeseran frekuensi Doppler menyebabkan pergeseran frekuensi *carrier* 2.4 GHz yang digunakan. Dengan ketinggian satelit 500 km dikemukakan bahwa pergeseran frekuensi Doppler yang terjadi yaitu ± 96 kHz.

Dengan latarbelakang frekuensi *carrier* dan orbit satelit yang sama, maka di lakukanlah suatu penelitian untuk mengetahui berapa besar pergeseran frekuensi Doppler yang terjadi bila satelit berada pada ketinggian 700 km dan mengevaluasi pengaruh pergeseran frekuensi Doppler tersebut terhadap pengiriman citra hasil tangkapan satelit menuju terminal bumi dengan menggunakan modulasi BPSK. Evaluasi ini dilakukan dengan memperbandingkan hasil citra *output* yang ditransmisikan melalui kanal AWGN apabila terpengaruh Doppler *shift* maksimum, Doppler *shift* minimum dan tanpa terpengaruh Doppler *shift* dalam hal ini gangguan yang dialami dalam transmisi citra hanya AWGN. Dari hasil pengkondisian besar Doppler *shift*, maka dilakukan pula perhitungan terhadap nilai bit *error rate* (BER) untuk kondisi Doppler *shift* maksimum, minimum dan tanpa Doppler *shift*.

Selain itu dilakukan pula kompensasi terhadap citra yang telah terkena Doppler dengan mengalikan dengan invers dari persamaan Doppler. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh kembali kualitas citra sebelum terkena Doppler dan hanya terkena AWGN.

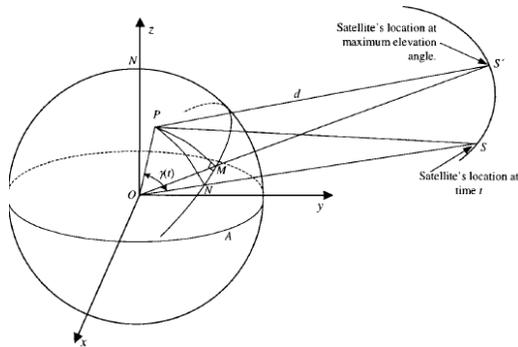
II. KARAKTERISTIK DOPPLER

Pergeseran Doppler diperoleh dari normalisasi pergeseran Doppler yang sama dengan (v/c), dimana v adalah kecepatan

relatif satelit sehubungan dengan terminal dan c adalah kecepatan cahaya. Pergeseran frekuensi Doppler diperoleh hanya pada saat satelit terlihat pada terminal bumi. Durasi kemunculan satelit akan meningkat seiring dengan meningkatnya sudut elevasi maksimum satelit [3].

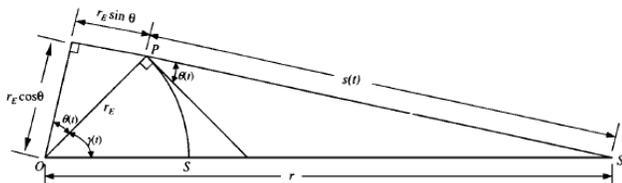
Untuk memperoleh perumusan pergeseran frekuensi Doppler langkah pertama adalah dengan memperoleh persamaan untuk Doppler *shift* yang diberikan oleh terminal bumi dan sudut elevasi maksimum. Analisis ini dilakukan seperti yang terlihat dari lokasi terminal yaitu sistem koordinat *Earth-centered fixed* (ECF) dengan menggunakan persamaan trigonometri untuk segitiga bola.

Berdasarkan geometri pada Gambar 1, dimana sistem koordinatnya adalah ECF, titik P merupakan lokasi terminal di bumi yang dapat mengamati sudut elevasi maksimum (θ_{max}). Titik M adalah posisi subsatelit di terminal bumi saat sudut elevasi maksimum.



Gambar 1 Geometri Satelit selama Kemunculan Satelit pada lokasi P

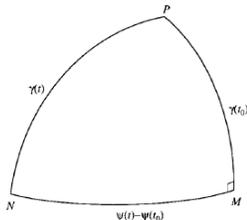
Slant range $s(t)$ atau kisaran miring diperoleh dari hukum *cosinues* yang diterapkan pada segitiga (*plane triangle*) SOP ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2 Plane Triangle SOP

sehingga diperoleh persamaan (1)

$$s(t) = \sqrt{r_E^2 + r^2 - 2r_E r \cos \gamma(t)} \quad (1)$$



Gambar 3 Spherical Triangle MNP

adalah jarak sudut antara M dan N diukur pada permukaan bumi sepanjang *ground trace*. Persamaan ini dapat diterapkan menggunakan segitiga bola siku-siku MNP pada Gambar 3, sehingga diperoleh persamaan (2).

$$\cos \gamma(t) = \cos (\psi(t) - \psi(t_0)) \cos \gamma(t_0) \quad (2)$$

Persamaan (2) dapat diturunkan dan disubsitusikan kedalam persamaan (1) dan diperoleh persamaan (3) yang baru.

$$\dot{s}(t) = \frac{r_E r \sin(\psi(t) - \psi(t_0)) \cos \gamma(t_0) \cdot \dot{\psi}(t)}{\sqrt{r_E^2 + r^2 - 2r_E r \cos(\psi(t) - \psi(t_0)) \cos \gamma(t)}} \quad (3)$$

Dari Gambar (2) juga diperoleh sudut pusat saat *epoch time* (t_0) adalah sudut elevasi maksimum $\theta(t_0) = \theta_{max}$, ditunjukkan :

$$\cos(\theta_{max} + \gamma(t_0)) = \frac{r_E}{r} \cos \theta_{max} \quad (4)$$

Adapun $\dot{\psi}(t)$ adalah kecepatan *angular* satelit pada *frame* ECF, yang dinyatakan sebagai $\omega_F(t)$. Dengan mensubsitusi $\dot{\psi}(t) = \omega_F(t)$ pada persamaan (3) dan mencatat bahwa normalisasi Doppler ($\Delta f / f$) diperoleh dari $-\dot{s}(t)/c$, didapatkan persamaan (5). Dari persamaan (5), dapat diamati bahwa normalisasi Doppler adalah fungsi dari sudut elevasi maksimum θ_{max} dan kecepatan *angular* satelit $\omega_F(t)$ dari satelit pada *frame* ECF.

Bila t_v dinotasikan sebagai waktu saat satelit terlihat pertama kali diterminal, sudut elevasi dinyatakan θ_v , merupakan sudut elevasi minimum (10^0) terjadi saat t_v . Dari hukum cosinus pada segitiga NMP (Gambar 3) diperoleh hubungan:

$$\cos \gamma(t_v) = \cos (\psi(t_v) - \psi(t_0)) \cos \gamma(t_0) \quad (6)$$

dimana dinyatakan

$$\psi(t_v) - \psi(t_0) = \omega_F(t_v - t_0) = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \gamma(t_v)}{\cos \gamma(t_0)} \right) \quad (7)$$

Menggunakan pendekatan kecepatan *angular*, dan dicatat bahwa durasi total kemunculan (*visibility window duration*) satelit pada terminal $\tau(\theta_{max})$ adalah $2|t_v - t_0|$, diperoleh persamaan durasi total kemunculan satelit di terminal:

$$\tau(\theta_{max}) = \frac{2}{\omega_s - (\omega_E \cos(i))} \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos \theta_v) - \theta_v)}{\cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos \theta_{max}) - \theta_{max})} \right) \quad (8)$$

III. PEMODELAN

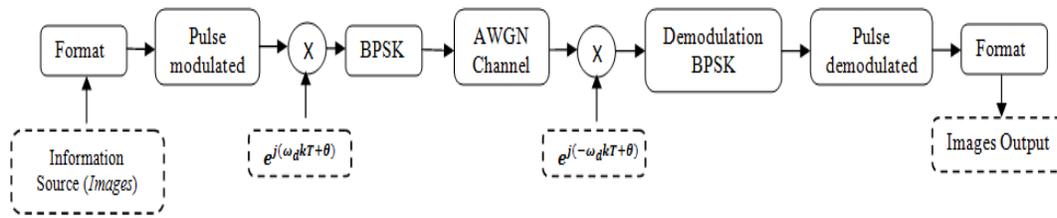
A. Pembangunan Bit Informasi dari Citra Digital

Pemodelan bagan sistem komunikasi pengiriman citra ITS-Sat ditunjukkan pada Gambar 4.

D.

terminal mengamati sudut elevasi maksimum dan $\psi - \psi(t_0)$

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{c} \frac{r_E r \sin(\psi(t) - \psi(t_0)) \cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos \theta_{max}) - \theta_{max}) \cdot \omega_F(t)}{\sqrt{r_E^2 + r^2 - 2r_E r \cos(\psi(t) - \psi(t_0)) \cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos \theta_{max}) - \theta_{max})}} \quad (5)$$



Gambar 4 Pemodelan Bagan Sistem Pengiriman Citra ITS-Sat ke Terminal Bumi

Pemodelan diawali dengan proses formatting yang bertujuan untuk merubah sumber informasi berupa citra RGB ‘red_flower.jpg’ berukuran 160×128 pixels menjadi deretan simbol digital [4]. Formatting ini dilakukan dengan mengubah susunan warna yang telah diberi rentang nilai 0-255 menjadi deretan bit-bit biner dimana setiap warna *Red*, *Green* dan *Blue* mewakili 8 bit sehingga total bit yang ditransmisikan adalah $160 \times 128 \times (3 \times 4) = 491.520$ bit. Bit-bit biner ini kemudian dilevelkan menjadi nilai-nilai bit yang baru yakni bit ‘1’ menjadi bit ‘1’ dan bit ‘0’ menjadi bit ‘-1’ informasi digital yang telah dilevelkan ini kemudian diproses atau diterapkan dalam modulasi pulsa.

Ketika modulasi pulsa diterapkan untuk simbol biner, maka menghasilkan bentuk sinyal biner atau disebut sinyal pulsa [4]. Sinyal pulsa yang dihasilkan adalah sinyal bipolar NRZ dan merupakan sinyal *baseband* untuk sistem modulasi BPSK.

B. Pemodelan Doppler Shift

Simulasi perhitungan besarnya pergeseran frekuensi Doppler dilakukan dengan menggunakan pendekatan matematis (5) Dalam pendekatan matematis ini digunakan beberapa parameter yang menjadi acuan dalam perhitungan frekuensi Doppler sebagaimana diperlihatkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Parameter-Parameter Dalam Perhitungan Frekuensi Doppler

No	Parameter	Variabel	Nilai
1	Jarak pusat bumi ke permukaan bumi	r_E	6378 km
2	Ketinggian satelit	h	700 km
3	Eksentrisitas / lintasan orbit satelit	e	0
4	Konstanta gravitasi geosentris bumi	GM (μ)	$398600.5 \frac{km^3}{s^2}$
5	Sudut elevasi maksimum	θ_{max}	90°
6	Sudut elevasi minimum	θ_{min}	10°
7	Frekuensi <i>carrier downlink</i>	fc	2.4 GHz
8	Sudut inklinasi	i	53°

Agar dapat dilakukan perhitungan besarnya pergeseran frekuensi Doppler terlebih dahulu dilakukan perhitungan untuk beberapa parameter yang belum diketahui nilainya yaitu: jarak pusat bumi ke satelit (r), kecepatan relatif satelit (ω_s), kecepatan *angular* bumi (ω_E), kecepatan *angular* satelit

(ω_f), durasi kemunculan satelit ($\tau(\theta_{max})$), jarak sudut M-N ($\psi(t) - \psi(t_0)$), dan Doppler ternormalisasi ($\frac{\Delta f}{f}$). Jarak pusat bumi ke satelit diperoleh dengan :

$$r = r_E + h \tag{9}$$

Persamaan untuk kecepatan relatif satelit (ω_s) diturunkan dengan menggunakan pendekatan persamaan Hukum Kepler III [5], dimana dianggap $n = \omega_s$ dan karena lintasan orbit merupakan orbit *circular*, maka panjang sumbu *semi-major*

$$a^3 = r^3 : \quad \omega_s = \sqrt{\frac{\mu}{r^3}} \tag{10}$$

Untuk menghitung kecepatan *angular* rotasi bumi (ω_E) juga digunakan pendekatan Hukum Kepler III [5], yaitu $n = 2\pi / T$:

$$\omega_E = \frac{(2 \times 180^\circ) \times 3.14}{180^\circ} \times \frac{1}{24 \text{ jam} \times 3600 \text{ detik}} \tag{11}$$

Dengan mengetahui nilai kecepatan relatif satelit dan kecepatan *angular* rotasi bumi, maka nilai kecepatan angular satelit dapat dihitung [3]:

$$\omega_f = \omega_s - (\omega_E \times \cos(i)) \tag{12}$$

Selanjutnya adalah menghitung jarak sudut dengan menggunakan persamaan (7). Dengan menggunakan sudut elevasi minimum (θ_v) = 10° dan sudut elevasi maksimum (θ_{max}) = 90°, durasi kemunculan satelit $\tau(\theta_{max})$ dihitung dengan menggunakan persamaan (8), sehingga dapat dilakukan penurunan persamaan $\tau(\theta_{max}) = 2|t_v - t_0|$ untuk memperoleh perumusan jarak sudut (7).

Setelah semua parameter yang dibutuhkan telah diketahui nilainya, maka dilakukan perhitungan Doppler ternormalisasi $\frac{\Delta f}{f}$ (5). Dari nilai Doppler ternormalisasi yang telah diperoleh, nilai Doppler *shift* dicari dengan mengalikan Doppler ternormalisasi dengan frekuensi *carrier* transmisi *downlink* 2,4 GHz.

C. Proses Modulasi BPSK

Phase Shift Keying (PSK) adalah salah satu bentuk modulasi digital dimana dalam proses modulasinya fasa dari sinyal pembawa (*carrier*) berubah sesuai dengan perubahan sinyal informasi (pemodulasi). Sinyal informasi berupa aliran pulsa biner yang berubah – ubah diantara dua level tegangan yaitu 0 dan 1.

Dalam modulasi BPSK, sinyal pemodulasi menggeser fasa sinyal *carrier* $s_i(t)$ ke salah satu dari dua kondisi yaitu fasa 0° atau 180°

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + 2\pi i/M) \tag{14}$$

dimana,

$$i = 1, 2, \dots, M \quad 0 \leq t \leq T$$

E = Energi simbol

T = Durasi waktu simbol

M = Simbol pesan (2^k , dimana k = jumlah bit tiap simbol)

Dalam simulasi ini, modulasi BPSK dimodelkan dengan menggunakan persamaan (9) yang perumusannya diambil dari referensi [3].

$$r_k = x_k e^{j(\omega_d k T + \theta)} + n_k \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (15)$$

dimana T adalah periode symbol; $x_k \in \{\pm 1\}$ sinyal *baseband* ekuivalent yang akan dimodulasikan; θ merupakan *random phase error* (diasumsikan 0); N adalah jumlah bit yang ditransmisikan dan k indeks dari N; n_k adalah AWGN; sedangkan $\omega_d = 2\pi f_d$ merupakan frekuensi *carrier* 2.4 GHz untuk transmisi citra melalui kanal *downlink* dimana frekuensi *carrier* ini telah mengalami efek Doppler normalisasi (5) yang menyebabkan terjadinya pergeseran frekuensi *carrier* sehingga dihasilkan sinyal termodulasi BPSK yang telah mengalami pergeseran frekuensi akibat efek Doppler.

Pemodelan sinyal termodulasi BPSK dilakukan dengan mengambil nilai pergeseran frekuensi Doppler terbesar dan nilai pergeseran Doppler terkecil untuk kemudian ditransmisikan melalui kanal AWGN.

D. Kanal AWGN

Simulasi pembangkitan AWGN dilakukan dengan menentukan besarnya energi bit (E_b) dan *signal to noise ratio* (SNR) terlebih dahulu sehingga dapat dilakukan perhitungan terhadap daya *noise* (N_o). Hubungan ketigannya ditunjukkan dalam persamaan (14).

$$SNR = \frac{E_b}{N_o} \quad (16)$$

Terdapat dua kondisi sinyal yang melalui kanal AWGN seperti yang dimodelkan dalam Gambar 4. Sinyal pertama adalah sinyal termodulasi BPSK yang telah mengalami Doppler *shift* maksimum maupun minimum sedangkan sinyal kedua adalah sinyal *baseband* equivalent yang hanya mengalami gangguan *noise* berupa AWGN.

E. Kompensasi Doppler

Kompensasi terhadap persamaan efek Doppler ini dilakukan untuk menghilangkan pengaruh efek Doppler pada sinyal *carrier* dan melihat pengaruhnya terhadap kualitas *output* citra

F. Demodulasi BPSK

Proses demodulasi mengembalikan sinyal yang telah terkena efek Doppler dan AWGN ke sinyal asli berupa deretan simbol digital. Proses *formatting* akan mengembalikan deretan simbol digital menjadi deretan desimal 0-255 dan akan mengembalikannya menjadi informasi *output* berupa citra.

Proses terakhir adalah dengan menentukan performansi *bit-error* pada *output* dalam bentuk grafik dengan menggunakan persamaan [4]:

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{E_d}{2N_o}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{(2A)^2 T}{2N_o}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}}\right) \quad (17)$$

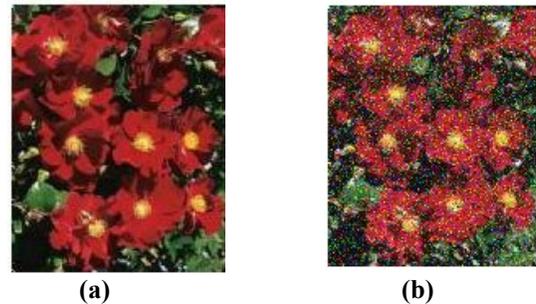
Tabel 2. Doppler Shift Terhadap Variasi Sudut Elevasi Max.90⁰ dan Waktu

No.	Waktu (s)	Elevasi	Doppler shift (Hz)
1	240.3727	76.0008	-49865
2	180.3727	79.4852	-47287
3	120.3727	82.9896	-41510
4	60.3727	86.4839	-27713
5	0.3727	90.0217	-00119
6	-59.6273	86.5273	27458
7	-119.6273	83.0330	41403
8	-179.6273	79.5386	47241
9	-239.6273	76.0442	49843
10	-299.6273	72.5499	51077

IV. HASIL DAN ANALISA SIMULASI

A. Penambahan AWGN pada Sinyal Baseband Equivalent BPSK

Penambahan AWGN pada sinyal *baseband* akan menyebabkan amplitudo terdistorsi sehingga terjadi perubahan nilai amplitudo dari sinyal *baseband* modulasi bergantung pada besar SNR yang digunakan pada sinyal AWGN dimana semakin besar nilai SNR yang digunakan, semakin kecil efek AWGN terhadap amplitudo *baseband* modulasi dan demikian sebaliknya. Pengaruh ini ditunjukkan dalam kualitas citra pada Gambar 5.



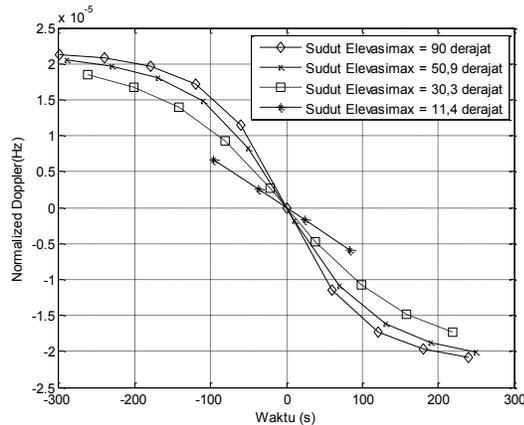
Gambar 5 (a) Sinyal Input (b)Pengaruh AWGN Terhadap Kualitas Citra Output saat SNR 0 dB

B. Pergeseran Frekuensi Doppler

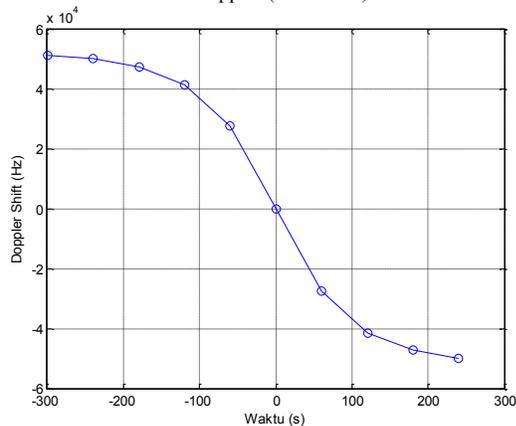
Kurva - S pada Gambar 6 menunjukkan variasi normalisasi Doppler terhadap variasi waktu untuk beberapa lintasan orbit dengan sudut elevasi maksimum yang berbeda-beda yakni 90°, 50.9°, 30.3°, dan 11.4°. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa semakin besar waktunya maka semakin besar pergeseran Doppler yang terjadi dan begitupun sebaliknya. Variasi waktu menunjukkan waktu kemunculan satelit atau waktu saat satelit terlihat pada terminal bumi.

Grafik normalisasi Doppler kurva-S hasil simulasi ini sedikit berbeda dengan kurva-S pada *paper* acuan [4]. Perbedaan ini berupa nilai frekuensi normalisasi Doppler pada *paper* acuan yang lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi normalisasi Doppler pada simulasi. Hal ini disebabkan oleh perbedaan ketinggian satelit yang digunakan. Dalam hal ini, berlaku hubungan berbanding terbalik antara frekuensi dengan jarak atau ketinggian, dimana untuk ketinggian satelit 1000 km yang diterapkan pada *paper* acuan akan menghasilkan frekuensi normalisasi Doppler yang lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi normalisasi Doppler hasil simulasi yang menggunakan ketinggian satelit 700 km.

Berdasarkan hasil simulasi frekuensi Doppler ternormalisasi maka dapat diperoleh hasil simulasi Doppler *shift* untuk lintasan pada sudut elevasi maksimum 90°. Dengan demikian jarak satelit terdekat dengan terminal bumi terjadi saat posisi satelit berada tepat di atas terminal bumi. Dari grafik pada Gambar 7 diperoleh bahwa Doppler *shift* terbesar yaitu pada saat satelit berada pada jarak terjauh dari stasiun bumi (sudut elevasi 10°) yakni 51.007 KHz dan Doppler *shift* terkecil saat satelit berada tepat di atas terminal bumi (sudut elevasi 90°) yakni 199 Hz.



Gambar 6 Grafik Normalisasi Doppler (h=700 km)



Gambar 7 Grafik Doppler Shift Lintasan Downlink pada Sudut Elevasi Maksimum 90°

C. Sinyal Baseband BPSK Terkena Efek Doppler dan AWGN

Hasil perkalian antara sinyal modulasi *baseband* dengan persamaan efek Doppler diperoleh bentuk sinyal yang analog. Hal ini dipengaruhi oleh adanya fungsi Doppler yang terdapat dalam persamaan (15). Berikut adalah analisa secara matematisnya (*random phase error* $\theta=0$):

$$|r_k| = |x_k \times e^{j(\omega_d k T + \theta)}| = |x_k (\cos 2\pi f_d + j \sin 2\pi f_d)| = x_k \cos 2\pi f_d$$

dimana x_k adalah *baseband equivalent*, f_d adalah frekuensi doppler ternormalisasi yang nilainya diperoleh dari perkalian frekuensi doppler dengan frekuensi *carrier* 2,4 GHz, sehingga $\cos 2\pi f_d$ menjadi sinyal termodulasi. Akibatnya ketika terjadi proses perkalian antara x_k dan $\cos 2\pi f_d$ menghasilkan sinyal termodulasi BPSK.

D. Kurva BER Bit Error Rate

Jumlah bit yang *error* pada simulasi untuk frekuensi Doppler *shift* yang berbeda adalah konstan yakni rata-rata

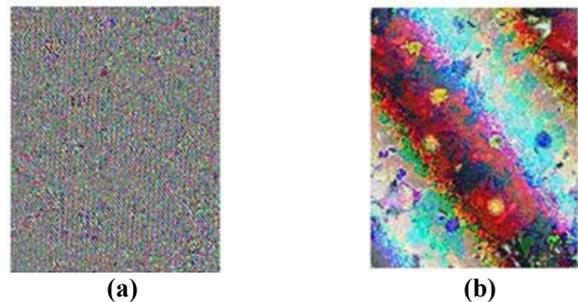
0.5001 untuk berapapun nilai pergeseran frekuensi Doppler meskipun nilai SNR yang digunakan semakin besar. Dari kurva untuk frekuensi Doppler *shift* 51.007 KHz pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa bit yang *error* pada simulasi (kurva yang ditunjukkan dengan warna biru) adalah setengah dari jumlah bit yang ditransmisikan. Sedangkan jumlah bit yang *error* ketika hanya terkena AWGN adalah sama dengan BER perhitungan secara teoritis untuk setiap nilai SNR (Gambar 9). Nilai BER untuk setiap variasi SNR ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2 Perbandingan BER

SNR	BER Teori	BER Simulasi AWGN	BER Simulasi Doppler 119 Hz	BER Simulasi Doppler 51.007 KHz
0	0.0786	0.0787	0.4998	0.5001
1	0.0563	0.0563	0.4998	0.5001
2	0.0375	0.0375	0.4998	0.5001
3	0.0229	0.0228	0.4998	0.5001
4	0.0125	0.0126	0.4998	0.5001
5	0.0060	0.0060	0.4998	0.5001
6	0.0024	0.0024	0.4998	0.5001
7	0.0008	0.0008	0.4998	0.5001
8	0.0002	0.0002	0.4998	0.5001
9	0.0000	0.0000	0.4998	0.5001
10	0.0000	0.0000	0.4998	0.5001

E. Output Citra Setelah Melewati Kanal Transmisi Doppler dan AWGN

Perbandingan kualitas citra *output* yang diperoleh untuk nilai Doppler *shift* yang terbesar dan Doppler *shift* yang terkecil diperlihatkan pada Gambar 10 Berdasarkan hasil kualitas citra *output* yang diperoleh, nampak bahwa saat frekuensi Doppler *shift* terbesar, kualitas citra *output* jauh lebih baik dibandingkan saat frekuensi Doppler *shift* lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh penerapan persamaan frekuensi Doppler *shift* seperti yang telah dijelaskan sebelumnya dimana semakin tinggi frekuensi termodulasi ($f_c \times f_d$), maka semakin banyak bit informasi citra digital yang ditumpangkan dalam sekali pengiriman sehingga proses pembentukan kembali bit citra akan lebih cepat dibandingkan bila frekuensi termodulasinya rendah.



Gambar 10 Kualitas Citra Output pada Frekuensi Doppler Shift (a)119 Hz SNR 10 dB (b) 51.107 KHz SNR 10 dB

F. Kompensasi Doppler

Kompensasi Doppler dilakukan dengan mengalikan invers persamaan Doppler sehingga secara teoritis, *output* citra yang diperoleh seharusnya hanya mengalami gangguan *noise* AWGN, namun pada kenyataannya *output* citra yang diperoleh tidak sebagus *output* citra pada saat hanya terkena AWGN. Hal ini disebabkan karena adanya *burst error* yang berada pada kanal AWGN sehingga sulit untuk dideteksi dan dihilangkan. Secara matematis ditunjukkan sebagai berikut:

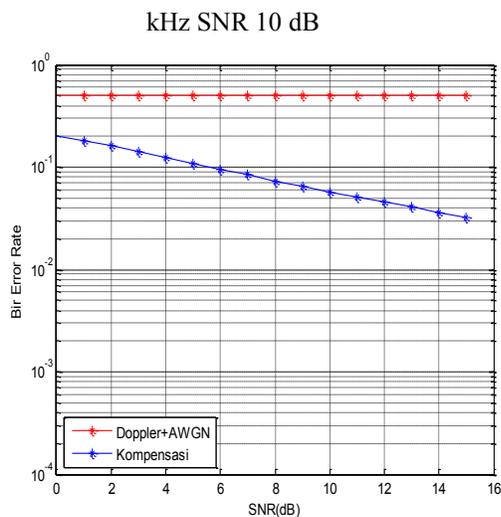
$$\check{r}_k = r_k \times e^{j(-\omega_d k T + \theta)} = (x_k e^{j(\omega_d k T + \theta)} + n_k) \times e^{j(-\omega_d k T + \theta)}$$

$$\check{r}_k = x_k + n_k e^{j(-\omega_d k T + \theta)}$$

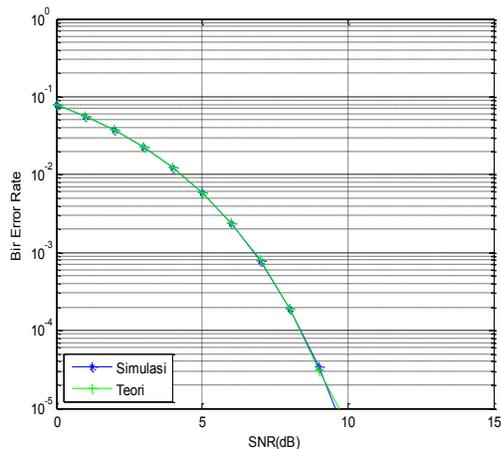
Hasil kompensasi Doppler pada *output* citra diperlihatkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Kualitas Kompensasi Citra *Output* pada Frekuensi Doppler Shift (a)119 Hz SNR 10 dB (b) 51.107



Gambar 8 Respon Kurva BER *Baseband* BPSK Terkena Dopler Shift 51.107 KHz dan AWGN



Gambar 9 Kurva BER Sinyal Modulasi *Baseband* yang Terkena AWGN

V. KESIMPULAN

Ketinggian satelit dari terminal bumi, berbanding terbalik dengan normalisasi Doppler semakin tinggi satelit, normalisasi Doppler semakin kecil. Dimana pada *paper* acuan dengan ketinggian satelit 1000 km normalisasi Doppler terbesar adalah 2×10^{-5} Hz, sedangkan pada hasil simulasi untuk ketinggian 700 km normalisasi Doppler terbesarnya adalah \pm

2.1×10^{-5} Hz. Selain itu diperoleh pula durasi total kemunculan satelit pada *paper* sekitar 4.01 menit, 11.3 menit, 12.7 menit dan 13.2 menit untuk masing-masing sudut elevasi maksimum 11.4°, 30.3°, 50.9° dan 90° sedangkan untuk simulasi, menghasilkan durasi total kemunculan satelit sekitar 3.2 menit, 8.7 menit, 9.6 menit dan 9.9 menit dengan urutan sudut elevasi yang sama.

Perbandingan performansi BER simulasi dari sinyal *baseband* yang terkena AWGN terhadap BER teori adalah sama yakni untuk SNR 0 dB diperoleh BER ± 0.07864 . Sedangkan performansi BER pada sinyal termodulasi BPSK yang terkena Doppler dan AWGN adalah konstan yakni rata-rata 0.5001 untuk berapapun nilai pergeseran frekuensi Doppler.

Berdasarkan hasil kualitas citra *output* yang diperoleh, nampak bahwa saat frekuensi Doppler *shift* terbesar, kualitas citra *output* jauh lebih bagus dibandingkan dengan saat frekuensi Doppler *shift* lebih rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian strategis nasional 2012 Kemdikbud “Pengembangan stasiun bumi untuk komunikasi data, citra dan video dengan satelit LEO VHF/UHF/S-band menuju kemandirian teknologi satelit” yang telah memberikan dukungan finansial.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] You, Moon-Hee, dkk., “Adaptive Compensation Method Using the Algorithm for the Doppler Frequency Shift in the LEO Mobile Satellite Communication System”, Hanyang University, Seoul, Korea, 2000.
- [2] Westhuizen, Ewald van der., Gert-Jan van Rooyen., “Baseband Carrier Recovery and Phase Tracking as a Doppler Compensation Technique for a zero-IF SDR”, Stellenbosch University, Boston, 2005.
- [3] Ali, Irfan, dkk., “Dopler Applications in Leo Satellite Communication Systems”, Kluwer Academic Publishers, USA, 2002.
- [4] Sklar, Bernard., “Digital Communications : Fundamentals and Applications 2nd edition”, Prentice Hall International, New Jersey, 2001.
- [5] Abidin, Hasanuddin Z., “Sistem Orbit”, Geodesy Research Division, Institut Teknologi Bandung, 2007.