

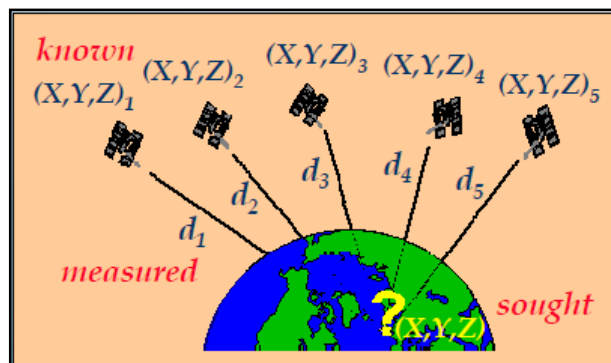
BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini berisi rangkuman referensi dari studi literatur untuk pengerjaan penelitian ini. Menjelaskan tentang GPS, metode penentuan posisi, static diferensial, koreksi-koreksi yang berpengaruh dalam pengolahan data GPS.

2.1 Global Positioning System (GPS)

GPS adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit. Sistem yang dapat digunakan oleh banyak orang sekaligus dalam segala cuaca ini, didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga dimensi yang teliti, dan juga informasi mengenai waktu, secara teliti di seluruh dunia (Abidin, 2007).

Pada dasarnya konsep dasar penentuan posisi dengan GPS adalah reseksi jarak, yaitu pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit yang koordinatnya diketahui (Abidin, 2007). Ilustrasi dari prinsip penentuan posisi dengan GPS dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS (Abidin, 2007)

Ketelitian pengamatan posisi dengan GPS akan tergantung pada empat faktor yaitu: metode penentuan posisi yang digunakan, geometri dan distribusi dari satelit-satelit yang diamati, ketelitian data yang digunakan, dan strategi/ metode pengolahan data yang diterapkan.

Masing-masing faktor tersebut mempunyai beberapa parameter yang berpengaruh pada ketelitian posisi yang akan diperoleh dari GPS (Abidin, 2007). Contoh beberapa parameter tersebut diberikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Faktor dan parameter yang mempengaruhi ketelitian penentuan posisi dengan GPS (Abidin, 2007)

Faktor	Parameter
Ketelitian data	• Tipe data yang digunakan (pseudorange, fase) • Kualitas receiver GPS
Geometri satelit	• Jumlah satelit • Lokasi dan distribusi satelit
Metode penentuan posisi	• <i>Absolut & differential positioning</i> <i>Static, rapid static, pseudo-kinematic, stop-and-go, kinematic</i> • <i>One & multi station referensis</i>
Strategi pemrosesan data	• Real time & post processing • Strategi eliminasi dan pengkoreksian kesalahan dan bias • Metode estimasi yang digunakan • Pemrosesan <i>baseline</i> dan perataan jaringan

2.2 Metode Penentuan Posisi dengan GPS

Pada dasarnya tergantung pada mekanisme pengaplikasiannya metode penentuan posisi dengan GPS dapat dikelompokkan atas beberapa metode yaitu: *absolute*, *differential*, *static*, *rapid static*, *pseudo-kinematic*, dan *stop-and-go*, seperti ditunjukkan seccara skematik pada tabel berikut.

Tabel 2.2 Metode-metode penentuan posisi dengan GPS (Abidin, 2007)

Metode	ABSOLUT	DIFFERENSIAL	Titik	Receiver
STATIC	✓	✓	Diam	Diam
KINEMATIK	✓	✓	Bergerak	Bergerak
RAPID STATIC		✓	Diam	Diam (singkat)
PSEUDO-KINEMATIC		✓	Diam	Diam dan bergerak
STOP-AND-GO		✓	diam	Diam dan

2.2.1 Metode Penentuan Posisi Statik diferensial

Pada Tugas Akhir ini teori yang akan dijelaskan hanya metode survei GPS statik diferensial saja. Pada penentuan posisi diferensial, posisi suatu titik ditentukan relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya. Prinsipnya dengan melakukan pengurangan data (diferensial) dari dua buah receiver (statik), maka beberapa kesalahan dan bias dari data akan dapat dieliminasi atau direduksi. Tentu saja proses ini akan meningkatkan akurasi dan presisi posisi yang akan dihasilkan. Selengkapnya efek pengurangan data dapat dilihat pada Tabel 2.3 :

Tabel.2.3Konsekuensi diferensial data GPS (Teknik Diferensial) [Andreas, dkk. 2008]

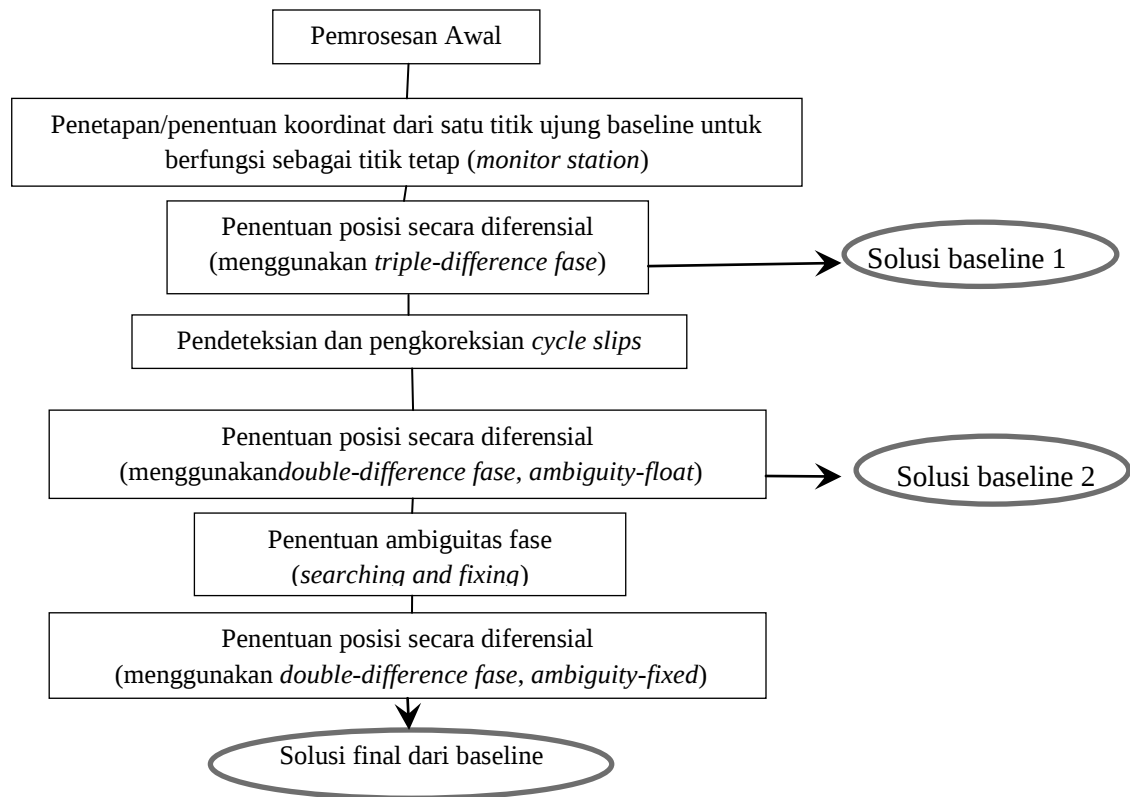
Kesalahan dan Bias data GPS	Dapat dihilangkan	Dapat di reduksi	Tidak dapat dihilangkan dan atau direduksi	Keterangan
Jam Satelit	✓			
Jam Receiver	✓			

Kesalahan dan Bias data GPS	Dapat dihilangkan	Dapat di reduksi	Tidak dapat dihilangkan dan atau direduksi	Keterangan
Orbit		√		Tergantung panjang baseline
Ionosfer		√		Tergantung panjang baseline
Troposfer		√		Tergantung panjang baseline
Multipath			√	
Noise			√	

Pada prinsipnya, survei GPS bertumpu pada metode penentuan posisi statik secara diferensial dengan menggunakan data fase. Dalam hal ini pengamatan satelit GPS umumnya dilakukan baseline perbaseline selama selang waktu tertentu dalam suatu jaring kerangka. Pada pemrosesan datanya, untuk menentukan koordinat dari titik-titik dalam jaringan umumnya melalui tiga tahapan utama, yaitu :

- Pengolahan data dari setiap baseline dalam jaringan,
- Perataan jaring yang melibatkan semua baseline untuk menentukan koordinat dari titik-titik dalam jaring, dan
- Transformasi koordinat titik-titik tersebut dari datum WGS84 ke dalam datum yang diinginkan.

Pengolahan dari setiap baseline pada dasarnya adalah bertujuan untuk menentukan nilai estimasi vektor baseline atau koordinat relatif. Secara umum diagram alir proses pengolahan suatu baseline GPS dapat dilihat pada Gambar 2.5. Proses estimasi yang digunakan untuk mengolah baseline umumnya berbasiskan pada metode perataan.



Gambar 2.2 Diagram alir pengolahan baseline GPS [Abidin, 2007]

Pada penentuan vektor baseline dalam survei GPS umumnya menggunakan data fase persamaan (2.1). Persamaan pengamatan yang terbentuk dari pengamatan fase GPS secara umum [Abidin, 2007], yaitu :

$$L_i = \rho + dp + dtrop - dion_i + (dt - dT) + MC_i - \lambda_i \cdot N_i + \vartheta C_i \dots\dots\dots(2.1)$$

di mana,

$L_i = \lambda_i \cdot \phi_i$ = jarak fase pada frekuensi f_i (m), ($i = 1, 2$),

ρ = jarak geometris antara stasiun pengamatan dengan satelit (m),

λ = panjang gelombang sinyal (m),

dp = kesalahan jarak oleh kesalahan informasi orbit (m),

$dtrop, dion_i$ = bias yang disebabkan oleh refraksi troposfer dan ionosfer (m),

dt, dT = kesalahan dan offset dari jam *receiver* dan jam satelit (m),

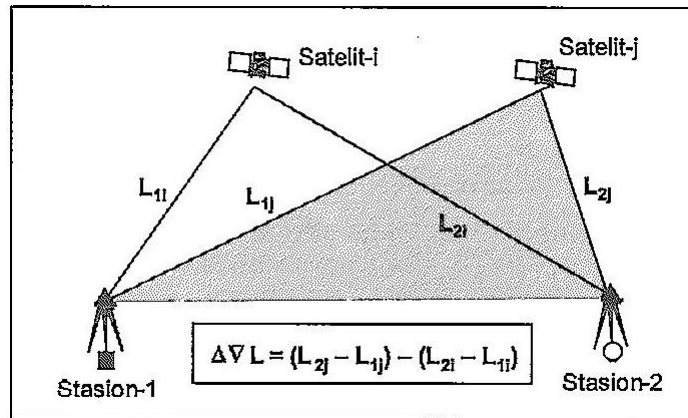
MC_i = efek dari *multipath* dari hasil pengamatan L_i (m),

N_i = ambiguitas fase dari sinyal L_1 dan L_2 (dalam jumlah gelombang), dan

ϑC_i = *noise* dari hasil pengamatan L_i (m).

Persamaan (2.1) di atas disebut sebagai data fase satu arah (OW). dari data OW tersebut dapat dilakukan diferensial data antar *receiver*, satelit, atau epok, sehingga menghasilkan data SD. Lalu data SD antar *receiver* dan satelit saling dikurangkan, maka menghasilkan data DD, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan Persamaan (2.2). Konsekuensi dari pengurangan data pada tahap ini, yaitu :

- kesalahan jam *receiver* dan satelit sudah tereliminasi,
- kesalahan orbit dan bias ionosfer sudah tereduksi cukup signifikan,
- seandainya kondisi meteorologis kedua titik relatif sama, maka efek dari bias troposfer juga akan tereduksi, dan
- sifat integer dari nilai ambiguitas fasenya masih dapat dieksploitasi.



Gambar 2.3 Data DD *receiver*-satelit [Abidin, 2007]

$$\begin{aligned}
\Delta \nabla L_{12}^{ij} &= \Delta L_{12}^j - \Delta L_{12}^i, \\
&= \Delta \nabla \rho_{12}^{ij} + \Delta \nabla d\rho_{12}^{ij} + \Delta \nabla dtrop_{12}^{ij} - \Delta \nabla dion_{12}^{ij} + \Delta \nabla MC_{12}^{ij} - \\
&\quad \lambda \cdot \Delta \nabla N_{12}^{ij} + \Delta \nabla \vartheta C_{12}^{ij} \dots\dots\dots(2.2)
\end{aligned}$$

Untuk keperluan survei GPS dengan baseline pendek, pengaruh kesalahan multipath umumnya diabaikan. Sedangkan pengaruh kesalahan karena kesalahan informasi orbit, ionosfer, dan troposfer umumnya diasumsikan sudah tereduksi secara signifikan, sehingga persamaan (2.2) menjadi :

$$\begin{aligned}
\Delta \nabla L_{12}^{ij} + \Delta \nabla \vartheta C_{12}^{ij} &= \Delta \nabla \rho_{12}^{ij} - \lambda \cdot \Delta \nabla N_{12}^{ij} \\
&= \rho_2^j(t) - \rho_1^j(t) - \rho_2^i(t) + \rho_1^i(t) - \lambda \cdot \Delta \nabla N_{12}^{ij} \dots(2.3)
\end{aligned}$$

di mana $\Delta \nabla \vartheta C_{12}^{ij}$ adalah noise serta residu kesalahan dan bias pengamatan yang masih tersisa. Seandainya vektor koordinat stasiun-1 ($\mathbf{X}_1$) sebagai titik referensi dan stasiun-2 ($\mathbf{X}_2$) dinyatakan sebagai (X_1, Y_1, Z_1) dan (X_2, Y_2, Z_2), dan vektor-vektor koordinat satelit I dan j sebagai $\mathbf{X}^i(t)$ dan $\mathbf{X}^j(t)$ sebagai ($X^i(t), Y^i(t), Z^i(t)$) dan ($X^j(t), Y^j(t), Z^j(t)$), maka :

- $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}^i(t)$ dan $\mathbf{X}^j(t)$ diketahui nilainya, dan
- $\mathbf{X}_2$ akan ditentukan bersama-sama dengan $\Delta \nabla N_{12}^{ij}$.

Karena itu, nilai $\rho_1^j(t)$ dan $\rho_1^i(t)$ pada dasarnya telah diketahui. Sedangkan $\rho_2^j(t)$ dan $\rho_2^i(t)$ dapat diformulasikan :

$$\begin{aligned}
\rho_2^i(t) &= |\mathbf{X}^i(t) - \mathbf{X}_2| \\
&= \sqrt{X^i(t)^2 - X_2^2 + Y^i(t)^2 - Y_2^2 + Z^i(t)^2 - Z_2^2} \dots(2.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho_2^j(t) &= |\mathbf{X}^j(t) - \mathbf{X}_2| \\
&= \sqrt{X^j(t)^2 - X_2^2 + Y^j(t)^2 - Y_2^2 + Z^j(t)^2 - Z_2^2} \dots(2.5)
\end{aligned}$$

Seandainya koordinat stasiun-2 didekati dengan suatu nilai pendekatan, yaitu X_2^0 (X_2^0, Y_2^0, Z_2^0), dimana :

$$\begin{aligned} X_2 &= X_2^0 + dX_2, \\ Y_2 &= Y_2^0 + dY_2, \\ Z_2 &= Z_2^0 + dZ_2 \dots\dots\dots(2.6) \end{aligned}$$

maka persamaan (2.4) dan (2.5) dapat dilinearisasikan, sehingga :

$$\rho_2^i(t) = \rho_2^{i,0}(t) + cx^i(t).dX_2 + cy^i(t).dY_2 + cz^i(t).dZ_2 \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\rho_2^j(t) = \rho_2^{j,0}(t) + cx^j(t).dX_2 + cy^j(t).dY_2 + cz^j(t).dZ_2 \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana $\rho_2^{i,0}(t)$ dan $\rho_2^{j,0}(t)$ adalah jarak geometris pendekatan antara stasiun-2 dan satelit-satelit i dan j pada epok t, dan

$$\begin{aligned} cx^i(t) &= [X_2^0 - X^i(t)] / \rho_2^{i,0}(t), \\ cx^j(t) &= [X_2^0 - X^j(t)] / \rho_2^{j,0}(t), \\ cy^i(t) &= [Y_2^0 - Y^i(t)] / \rho_2^{i,0}(t), \\ cy^j(t) &= [Y_2^0 - Y^j(t)] / \rho_2^{j,0}(t), \\ cz^i(t) &= [Z_2^0 - Z^i(t)] / \rho_2^{i,0}(t), \text{ dan} \\ cz^j(t) &= [Z_2^0 - Z^j(t)] / \rho_2^{j,0}(t) \dots\dots\dots(2.9) \end{aligned}$$

Jika persamaan (2.7) dan (2.8) disubstitusikan ke persamaan(2.3), maka :

$$\begin{aligned} \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t) + \Delta \nabla \vartheta C_{12}^{ij}(t) &= \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t) + \nabla cx^{ij}(t).dX_2 + \nabla cy^{ij}(t).dY_2 + \\ &\nabla cz^{ij}(t).dZ_2 - \lambda. \Delta \nabla N_{12}^{ij} \dots\dots\dots(2.10) \end{aligned}$$

di mana :

$$\begin{aligned}\Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t) &= \rho_2^{j,0}(t) - \rho_1^j(t) - \rho_2^{i,0}(t) + \rho_1^i(t), \\ \nabla c x^{ij}(t) &= c x^j(t) - c x^i(t), \\ \nabla c y^{ij}(t) &= c y^j(t) - c y^i(t), \text{ dan} \\ \nabla c z^{ij}(t) &= c z^j(t) - c z^i(t) \dots\dots\dots(2.11)\end{aligned}$$

Pada persamaan (2.10), data pengamatan adalah $\Delta \nabla L_{12}^{ij}(t)$ dan parameter yang akan ditentukan adalah dX_2 , dY_2 , dZ_2 dan $\Delta \nabla N_{12}^{ij}$. Persamaan (2.10) terbentuk dari 2 satelit dan 2 *receiver* pada epok yang sama.

Seandainya kita menggunakan formulasi umum perataan parameter pada persamaan (2.12) berikut :

$$V = AX - L \dots\dots\dots(2.12)$$

di mana V adalah vektor koreksi pengamatan, A adalah matriks desain, X adalah vektor parameter, dan L adalah vektor pengamatan, maka :

$$V_{1 \times 1} = [\Delta \nabla \theta C_{12}^{ij}(t)] \dots\dots\dots(2.13)$$

$$A_{1 \times 4} = [\nabla c x^{ij}(t) \quad \nabla c y^{ij}(t) \quad \nabla c z^{ij}(t) \quad -\lambda] \dots\dots\dots(2.14)$$

$$X_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} dX_2 \\ dY_2 \\ dZ_2 \\ \Delta \nabla N_{12}^{ij} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$L_{1 \times 1} = [\Delta \nabla L_{12}^{ij}(t) - \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t)] \dots\dots\dots(2.16)$$

Berdasarkan persamaan (2.12) di atas, maka minimal dibutuhkan 4 data persamaan (2.10) yang terbentuk dari satelit i dan j pada 4 epok dan tidak terjadi *cycle slips* agar parameter matriks X dapat dipecahkan.

Seandainya jumlah satelit yang diamati ada 4 (i, j, k, dan l) dari 2 titik yang sama, maka akan diperoleh 3 data fase DD. Sehingga jumlah parameter yang dicari menjadi bertambah menjadi 6 yaitu : dX_2 , dY_2 , dZ_2 , $\Delta \nabla N_{12}^{ij}$, $\Delta \nabla N_{12}^{ik}$, dan $\Delta \nabla N_{12}^{il}$.

Pada persamaan DD, koordinat titik 2 pendekatan didapatkan dari pengolahan data TD. Dimana data TD ini merupakan pengurangan dari 2 data DD (Gambar 2.7). Secara matematis persamaan TD yaitu :

$$\delta \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t_1, t_2) = \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t_2) - \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t_1) \dots \dots \dots (2.17)$$

di mana,

$$\begin{aligned} \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t_1) + \Delta \nabla \theta C_{12}^{ij}(t_1) = & \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t_1) + \nabla c x^{ij}(t_1).dX_2 + \nabla c y^{ij}(t_1).dY_2 + \\ & \nabla c z^{ij}(t_1).dZ_2 - \lambda. \Delta \nabla N_{12}^{ij} \dots \dots \dots (2.18) \end{aligned}$$

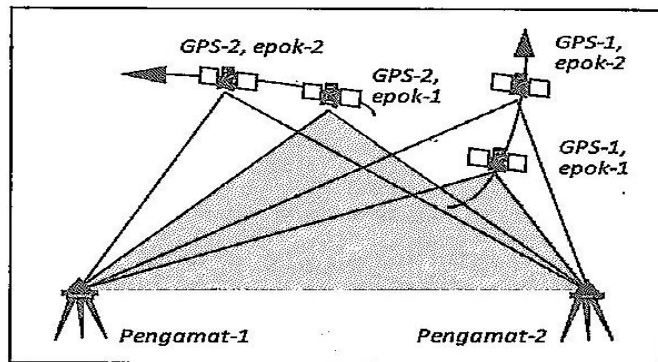
$$\begin{aligned} \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t_2) + \Delta \nabla \theta C_{12}^{ij}(t_2) = & \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t_2) + \nabla c x^{ij}(t_2).dX_2 + \nabla c y^{ij}(t_2).dY_2 + \\ & \nabla c z^{ij}(t_2).dZ_2 - \lambda. \Delta \nabla N_{12}^{ij} \dots \dots \dots (2.19) \end{aligned}$$

Jika persamaan (2.18) dan (2.19) kita substitusikan ke persamaan (2.17), maka :

$$\begin{aligned} \delta \Delta \nabla L_{12}^{ij}(t_1, t_2) + \delta \Delta \nabla \theta C_{12}^{ij}(t_1, t_2) = & \delta \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t_1, t_2) + \delta \nabla c x^{ij}(t_1, t_2).dX_2 + \\ & \delta \nabla c y^{ij}(t_1, t_2).dY_2 + \delta \nabla c z^{ij}(t_1, t_2).dZ_2 \dots \dots (2.20) \end{aligned}$$

dimana dengan mengacu ke persamaan (2.7) dan (2.8) sebelumnya :

$$\begin{aligned} \delta \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t_1, t_2) = & \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t_2) - \Delta \nabla \rho_{12}^{ij,0}(t_1), \\ \delta \nabla c x^{ij}(t_1, t_2) = & \nabla c x^{ij}(t_2) - \nabla c x^{ij}(t_1), \\ \delta \nabla c y^{ij}(t_1, t_2) = & \nabla c y^{ij}(t_2) - \nabla c y^{ij}(t_1), \text{ dan} \\ \delta \nabla c z^{ij}(t_1, t_2) = & \nabla c z^{ij}(t_2) - \nabla c z^{ij}(t_1) \dots \dots \dots (2.21) \end{aligned}$$



Gambar.2.4 Data *Triple Differencereceiver-satelit-epok* untuk kasus 2 receiver, 2 satelit, dan 2 epok pengamatan [Abidin, 2007]

Pada persamaan (2.20) di atas, parameter yang dicari yaitu dX_2 , dY_2 , dan dZ_2 . Dengan koordinat pendekatan untuk titik 2 didapatkan dari penentuan posisi absolut dengan data pseudorange. Jika diasumsikan *receiver* telah mengamati sebanyak n_s satelit yang sama pada sejumlah n_e epok dan tidak terjadi *cycle slips*, maka akan terdapat sebanyak $(n_e - 1) \cdot (n_s - 1)$ data TD yang terbentuk. Dengan terbentuknya minimal 3 data dari persamaan (2.20) dan menerapkan perataan parameter, maka koordinat stasiun-2 dapat dipecahkan dan dianggap sebagai masukan awal pada proses DD.

Setelah proses perataan parameter DD diterapkan dan dipecahkan, maka akan menghasilkan ambiguitas fase. Namun, ambiguitas fase dari hasil DD ini masih berbentuk bilangan real. Untuk merubah menjadi bilangan bulat umumnya mencakup dua tahap, yaitu *searching* dan *fixing* dari suatu set ambiguitas fase. Untuk lebih jelasnya bagaimana proses pemecahan bilangan ambiguitas fase ini dapat dilihat pada [Leick, 1995; Hofmann-Wellenhof, 1997; Misra and Enge, 2001]. Lalu tahap selanjutnya dilakukan proses perataan parameter DD kembali, mengacu pada persamaan (2.10), tetapi parameter yang dicari hanyalah dX_2 , dY_2 , dan dZ_2 saja, sedangkan $\Delta \nabla N_{12}^{ij}$ menjadi data pengamatan. Dengan begitu didapatkan solusi final untuk koordinat stasiun-2.

Persamaan (2.10) dan (2.20) di atas hanya berlaku untuk baseline yang dianggap saling berdekatan. Namun ketika baseline yang terbentuk relatif jauh, maka kesalahan dan bias karena kesalahan informasi orbit satelit, ionosfer, dan troposfer tidak dapat diabaikan. Proses pemodelan dan estimasi kesalahan dan bias yang digunakan pada setiap perangkat lunak akan berbeda-beda. Untuk lebih jelasnya mengenai model dan estimasi kesalahan dan bias pada setiap perangkat lunak, umumnya dapat dibaca pada masing-masing buku manualnya.

2.3 Efek Ionosfer Pada Data GPS

Berikut ini merupakan rangkuman dari paper “Teori dan Aplikasi GPS-Ionosfer” (Wijaya, 2012). Ionosfer merupakan salah satu sumber utama yang bisa memberikan kesalahan dalam pengukuran jarak menggunakan teknik GPS. Besarnya kesalahan jarak ukur akibat efek gangguan perambatan sinyal di ionosfer lebih besar ketimbang di troposfer. Kemudian, dinamika ionosfer lebih kompleks dibandingkan troposfer, sehingga pemodelan koreksi ionosfer menjadi rumit. Selain itu, ionosfer merupakan medium yang dispersive untuk gelombang radio, sehingga besarnya kesalahan jarak ukur akan bergantung dari frekuensi yang digunakan.

Penjalaran sinyal GPS sepanjang medium atmosfer akan mengalami perlambatan (*delayed*) dan pembelokan arah lintasan (*curved path*). Brunner dan Gu (1991) serta Jakowski dkk., (1994) telah melakukan studi untuk melihat besarnya kesalahan jarak ukur GPS akibat efek ionosfer.

Kesalahan jarak ukur akibat *delay* di ionosfer bisa mencapai 300 m pada sudut elevasi 10° , sedangkan pada arah zenith (90°) sekitar 20 m. Sedangkan, kesalahan jarak akibat pembelokan sinyal (efek *curvature*) bisa mencapai desimeter untuk sudut elevasi 10° .

Karena efek ionosfer bergantung kepada frekuensi, maka dengan menggunakan model kombinasi linear sinyal GPS L1 ($f_1 = 1,57542$ GHz) dan L2 ($f_2 = 1,2276$ GHz), efek tersebut bisa direduksi sampai 90% (Jakowski dkk., 1994). Dengan menggunakan model kombinasi linear yang dikembangkan oleh Brunner dan Gu (1991), efek ionosfer bisa direduksi sampai 99%.

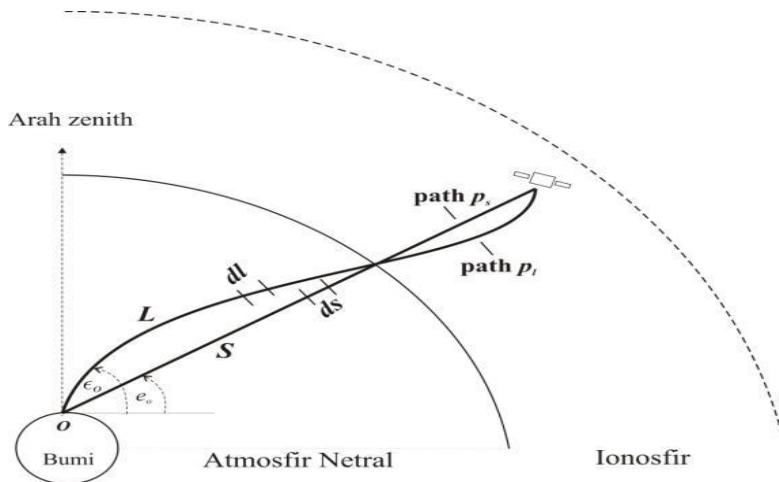
Secara umum, efek dinamika ionosfer akan mempengaruhi penjalaran sinyal GPS dalam berbagai bentuk, antara lain (Klobuchar, 1996):

- Perlambatan data modulasi sinyal GPS (*data pseudorange*).
- Percepatan data fase GPS (*carrier phase advance*).
- Pergeseran Doppler (*Doppler shift*).
- Rotasi Faraday dari polarisasi-linear sinyal GPS.
- Pembelokan arah lintasan sinyal GPS (*curvature effect*).
- Distorsi dari bentuk gelombang (*waveforms*).
- Perubahan acak amplitudo gelombang (*amplitude fading or scintillation*).
- Perubahan acak fase gelombang (*phase scintillation*).

2.4 Koreksi Ionosfer Untuk Data GPS

2.4.1 Teori Dasar Koreksi Atmosfir

Secara teori, koreksi atmosfer untuk gelombang radio menggunakan prinsip *geometric optics* (Born and Wolf, 1999 Wheelon, 2001) untuk menyederhanakan fenomena yang kompleks dari perambatan gelombang. Berdasarkan prinsip ini, fenomena penjalaran gelombang bisa disederhanakan oleh ilustrasi pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ilustrasi geometrik perambatan gelombang radio di medium atmosfer. L merupakan jarak elektronik, S jarak lurus antara *receiver* dan satelit, dan e_0 sudut elevasi. Sedangkan, dl dan ds adalah panjang elemen dari L & S (Wijaya, 2012).

Jarak ukuran GPS adalah jarak elektronik yang dinyatakan sebagai integral indeks refraksi sepanjang lintasan sinyal P_i sehingga memenuhi persamaan berkas sinyal (Born dan Wolf, 1999):

$$L = \int_{p_l} n(f, r) dl \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana $n(f, r)$ merupakan indeks refraksi atmosfer sebagai fungsi dari frekuensi f dan vektor posisi r .

Seperti terlihat pada Gambar 1, jarak ukuran L bukan merupakan jarak lurus S (jarak geometrik antara *receiver* dan satelit) yang dibutuhkan dalam perhitungan geodesi. Oleh karena itu, jarak ukuran L harus terlebih dahulu dikoreksi sehingga diperoleh jarak lurus S . Jarak lurus bisa diperoleh jika medium bersifat vakum, dimana akan bernilai satu. Dengan menggunakan persamaan (2.22), jarak lurus S bisa dinyatakan oleh

$$S = \int_{p_s} ds \dots \dots \dots (2.23)$$

Besarnya koreksi atmosfer τ didefinisikan sebagai selisih antara L dan S , dan dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau \equiv L - S \equiv \int_{p_l} n(f, r) dl - \int_{p_s} ds \dots \dots \dots (2.24)$$

Dengan sedikit trik matematika, persamaan (2.7) bisa ditulis ke dalam bentuk:

$$\tau = \int_{pl} n_{f,r} - 1 \, dl + \int_{pl} dl - \int_{ps} ds \dots\dots\dots(2.25)$$

Karena nilai $n_{f,r}$ untuk medium atmosfer mendekati nilai 1, maka nilai $n_{f,r} - 1$ pada persamaan (2.25) akan bernilai sangat kecil. Untuk lebih memudahkan perhitungan, maka dikenalkan bilangan refraktifitas $N_{f,r}$ yang didefinisikan dengan:

$$N_{f,r} \equiv n_{f,r} - 1 \cdot 10^6 \dots\dots\dots(2.29)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.29) ke persamaan (2.28), maka koreksi atmosfer τ bisa dinyatakan oleh:

$$\tau = 10^{-6} \int_{pl} N_{f,r} \, dl + k \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana k adalah efek *curvature* yang dinyatakan dengan:

$$K = \int_{pl} dl - \int_{ps} ds = \int_{pl} dl - S \dots\dots\dots(2.31)$$

Berdasarkan persamaan (2.30), bisa dilihat bahwa secara fisis koreksi atmosfer berisi dua efek yaitu: (i) efek penambahan jarak ukuran akibat perambatan gelombang radio mengalami perlambatan (*delay*) dan (ii) efek pelengkungan lintasan sinyal atau lebih dikenal dengan efek *curvature*.

2.4.2 Formulasi koreksi Ionosfer

Menurut Budden (1985) dan Brunner dan Gu (1991), refraktifitas ionosfer untuk data *pseudorange* GPS (gelombang group/ modulasi) yang memiliki polarisasi sirkular mengikuti aturan tangan kiri (*left hand circularly polarized*) adalah sebagai berikut (kolisi antar elektron ionosfer diabaikan):

$$N_{f,r} \cdot 10^{-6} = \frac{C_x}{2f^2} N_e(r) + \frac{C_x C_y}{2f^3} N_e(r) H_0(r) \cos \theta(r) + \frac{C_x^2}{8f^4} N_e^2(r) \dots\dots(2.32)$$

dimana C_x dan C_y adalah konstanta yang didefinisikan sebagai berikut:

$$C_x \equiv \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m} \approx 80,6 \dots\dots\dots(2.33)$$

$$C_y \equiv \frac{\mu_0 e}{2\pi m} \approx -35185,9399827 \dots\dots\dots(2.34)$$

N_e merepresentasikan densitas *elektron* ionosfer yang bergantung pada vektor posisi r , m adalah masa elektron, e adalah *charge* elektron, ε_0 dan μ_0 adalah permitifitas dan permabilitas ruang vakum, H_0 adalah amplitudo dari medan magnet bumi, dan θ adalah sudut antara lintasan sinyal GPS dan medan magnet bumi H_0 .

Persamaan (2.32) merupakan bentuk matematis dari refraktifitas dalam deret binomial sampai orde tinggi (orde tiga). Definisi orde pada persamaan (2.32) merupakan fungsi dari $1/f^n$ yaitu $1/f^2$ (orde 1), $1/f^3$ (orde 2), $1/f^4$ (orde 3).

Secara fisis refraktifitas ionosfer sangat dipengaruhi oleh parameter N_e , H_0 dan θ yang berubah sesuai waktu dan tempat. Karena densitas *elektron* ionosfer memegang peranan penting dalam proses dinamika ionosfer, akan lebih bermanfaat kalau persamaan (2.32) dinyatakan hanya sebagai fungsi dari N_e . Dalam hal ini, Brunner dan Gu (1991) menyederhanakan persamaan (2.32) ke dalam bentuk sebagai berikut:

$$N f, r = 10^6 a(f) N_e(r) \dots\dots\dots (2.35)$$

Dimana a adalah suatu konstanta yang bergantung frekuensi dan memiliki persamaan berikut:

$$a f = \frac{c_x}{f^2} + \frac{c_x c_y}{2f^2} \overline{H_0 \cos \theta} + \frac{c_x^2}{8f^4} N_m \beta \dots\dots\dots (2.36)$$

N_m adalah nilai maksimum dari densitas elektron, β adalah konstanta *shape parameter* ($\beta = 0,66$), dan $\overline{H_0 \cos \theta}$ adalah nilai rata-rata dari intensitas medan magnet longitudinal yang dihitung pada tinggi ionosfer rata-rata (*mean ionospheric height*). Bassiri dan Hajj (1993) telah membuat model yang cukup akurat untuk menentukan nilai $\overline{H_0 \cos \theta}$ sepanjang lintasan satelit.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.35) ke persamaan (2.30), maka koreksi ionosfer τ_{ion} untuk data GPS adalah sebagai berikut:

$$\tau_{ion} = a f \int_{pl} N_e r dl + k \dots\dots\dots (2.37)$$

Koreksi ionosfer tergantung dari kuantitas $\int_{pl} N_e r dl$. Dalam bidang ionosfer, kuantitas ini dikenal dengan istilah *Slant Total Electron Content* (STEC) yang secara fisis menyatakan jumlah total elektron dalam silinder berdiameter 1 m^2 sepanjang lintasan sinyal. TEC merupakan parameter utama dalam mempelajari dinamika ionosfer.

Perubahan spasial-temporal TEC merupakan indikator utama terjadinya proses-proses fisis dalam ionosfer.

Persamaan (2.37) memiliki arti fisis dan implikasi untuk dua kasus berikut:

- Kualitas data ukuran GPS dipengaruhi oleh TEC sepanjang lintasan sinyal satelit. Untuk penentuan posisi geodesi, data GPS harus diolah sedemikian rupa sehingga efek TEC pada data ukuran bisa dihilangkan. Untuk kasus ini, jarak lurus S yang akurat bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan $S = L - \tau_{ion}$ (lihat persamaan 2.24).
- Dalam data ukuran GPS terkandung informasi TEC yang memegang peranan penting dalam proses dinamika ionosfer.