



Prosiding Seminar Sains Antariksa



Homepage: <http://www.lapan.go.id>

KAJIAN ALGORITMA PERHITUNGAN KERAPATAN ELEKTRON IONOSFER DENGAN TEKNIK *GLOBAL POSITIONING SYSTEM – RADIO OCCULTATION*

(Study Of Ionosphere Electron Density Algorithm Calculation With Global Positioning System Global – Radio Occultation Technique)

Boby Arnold¹⁾, Peberlin Sitompul²⁾, Rizal Suryana²⁾, Bagus Alit¹⁾
 Universitas Widyatama¹⁾, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional²⁾,
 Email : boby.mogot@gmail.com, peberlin.sitompul@lapan.go.id,

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015
 Direvisi: 16-10-2016
 Disetujui: 19-10-2016
 Diterbitkan: 24-10-2016

Kata kunci:

GPS-RO, Geometric optics, TEC, Kerapatan Elektron

GPS-RO (*Global Positioning System - Radio occultation*) merupakan teknik penginderaan jauh yang menggunakan okultasi gelombang elektromagnetik GPS untuk mengamati atmosfer bumi. Pada tulisan ini dilakukan kajian proses perhitungan kerapatan elektron ionosfer berdasarkan data yang diperoleh dari satelit penerima. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data level 1b, dengan informasi waktu, posisi satelit dan beda fase L1 dan L2. Untuk menghitung kerapatan elektron menggunakan metode *Geometric optics* (GO) dengan perhitungan sudut pembelokan atau *bending angle* antara dua satelit yaitu GPS sebagai pemancar dan satelit Low Earth Orbit (LEO) sebagai penerima sinyal. Tulisan ini akan membahas algoritma perhitungan *total electron content* (TEC) dan kerapatan elektron di ionosfer.

ABSTRACT

Keywords:

GPS-RO, Geometric optics, TEC, Electron Density

GPS - RO (*Global Positioning System - Radio occultation*) is a remote sensing technique that using electromagnetic waves of GPS occultation to observe the Earth's atmosphere. In this paper, the study of ionospheric electron density calculation process done based on obtained data from the satellite receiver. The used data in this research is level 1b data, with time information, the satellite position and difference phase L1 and L2. Calculation of the electron density use Geometric Optics (GO) method by calculating the angle deflection or bending angle between the two satellites, GPS as a transmitter and Low Earth Orbit (LEO) as a signal receiver. This paper will discuss the algorithm for calculating of TEC and the electron density in the ionosphere.

1. Pendahuluan

Atmosfer bumi adalah salah satu lingkungan fisik yang sangat penting bagi kelangsungan hidup manusia. Perubahan cuaca harian dan perubahan iklim jangka panjang dapat mempengaruhi berbagai aspek kehidupan manusia. Di lapisan atmosfer bumi terdapat berbagai fenomena atmosfer yang tidak terlihat dari permukaan bumi dengan

mata. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian tentang fenomena atmosfer yang terjadi pada lapisan atmosfer bumi.

Pada kajian ini berfokus pada lapisan ionosfer. Ionosfer merupakan wilayah atmosfer yang terionisasi oleh radiasi matahari. Dimana lapisan ini berperan penting bagi kelistrikan atmosfer yang membentuk batas dalam lapisan magnetosfer dan mempengaruhi kualitas

perambatan gelombang radio ke tempat-tempat yang jauh di permukaan bumi.

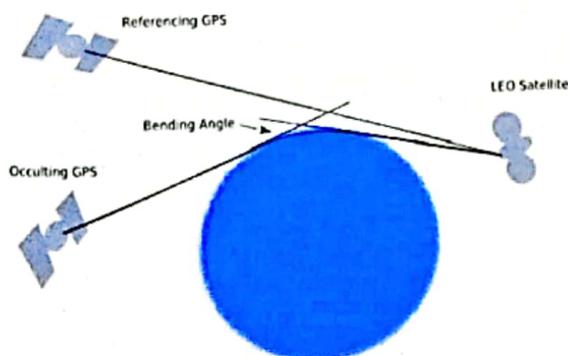
Perhitungan TEC dan kerapatan elektron digunakan untuk menentukan jumlah elektron yang terdapat di lapisan ionosfer. Banyak metode yang sudah digunakan dalam menghitung nilai kerapatan elektron, dengan menggunakan Ionosonda (Lilensten, et al., 2005; Tsai, 2001), GPS (Ciraolo, 2000), GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) (Yamamoto, 2008). Dalam penelitian ini kami menggunakan metode (*Geometric Optics*) GO.

2. Landasan Teori

2.1 Radio Okultasi

Radio okultasi adalah salah satu teknik yang digunakan untuk melakukan pengukuran terhadap atmosfer (Hajj dan Romans, 1998). Teknik ini dapat digunakan sebagai perhitungan untuk perkiraan cuaca dan bisa juga untuk pemantauan perubahan iklim. Teknik ini menggunakan satelit berorbit rendah (LEO) sebagai satelit penerima dan satelit GPS sebagai pemancar. Sinyal yang melewati atmosfer akan mengalami pembiasan sepanjang lintasan sinyal tergantung pada suhu, uap air dan kerapatan elektron (Kursinski, 1997).

Posisi relatif antara satelit GPS dan perubahan satelit LEO dari waktu ke waktu akan memungkinkan untuk mengamati lapisan-lapisan atmosfer dan ionosfer secara vertikal.



Gambar 2-1. GPS radio occultation (Xinan L. 2009)

2.1 Geometric optics

Geometric Optics (GO) telah digunakan untuk menggambarkan perambatan gelombang untuk misi antar planet (M.D.Meincke,1999). Hasil dari GPS/MET yang merupakan pengujian pertama teknik GPS-RO, dan menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan teknik pengukuran lain (Kursinski, 1997). GO merupakan metode dengan menggunakan persamaan Maxwell, dimana panjang gelombang limit menuju 0 (Meincke, 1999).

Geometrik optic menggunakan prinsip perambatan cahaya, sebagai instrument yang berguna untuk penelitian media-media disepanjang lintasan cahaya. Untuk penyederhanaan, diasumsikan bahwa gelombang merambat dijalur yang lurus dan homogen (Hajj dan Romans, 1998). Dimana gelombang tersebut bisa diserap ataupun dipantulkan tergantung indeks bias medianya.

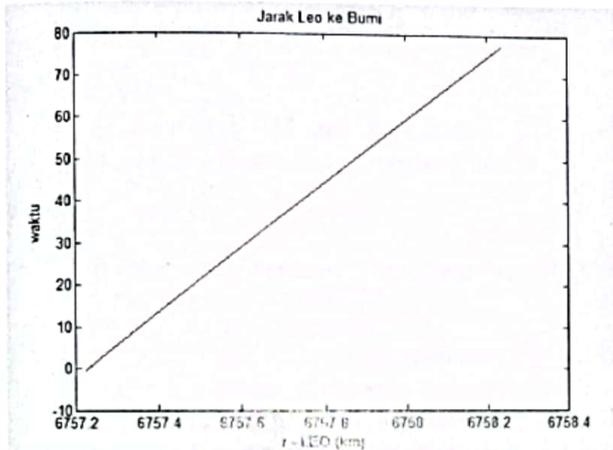
2.2 Bending angle dan Impact parameter

Bending angle merupakan sudut pembelokan yang terbentuk antara satelit GPS dengan satelit LEO. Ketika gelombang elektromagnetik melintasi media yang mempunyai indeks bias berbeda, maka gelombang akan mengalami pembiasan, yang dapat dijelaskan oleh hukum Snellius (Xinan, 2009). Indeks bias pada atmosfer bumi adalah fungsi kontiniu dan berbanding lurus dengan ketinggian (Xinan, 2009). Jadi tidak ada antarmuka yang jelas antara lapisan-lapisan dengan perbedaan nilai indeks bias, yang berubah hanyalah sudut pembelokannya saja. Indeks bias juga tergantung pada bujur, lintang dan waktu, meskipun variasinya lebih kecil dibandingkan dengan ketergantungan puncaknya. Untuk membuatnya lebih sederhana maka diasumsikan bahwa indeks bias merupakan fungsi ketinggian dalam posisi multi-layer.

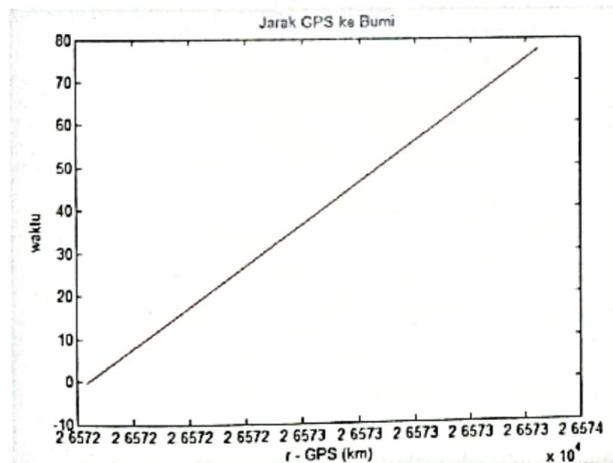
Impact parameter merupakan jarak tegak lurus antara jalur lintasan sinyal dan permukaan bumi yang dibuat oleh sebuah objek sinyal yang mendekat. *Impact parameter* digunakan sebagai indeks dalam perhitungan RO, karena kita dapat mengukur profil indeks pada titik okultasi dengan ketinggian umum dan derivasi dari *impact parameter* serta refraksinya.

3. Data dan Metode

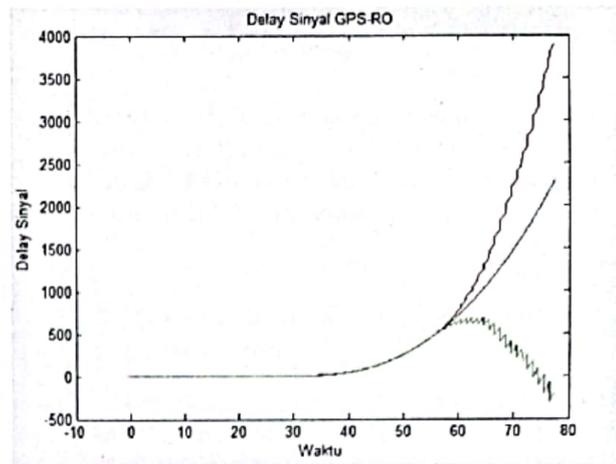
Data yang digunakan adalah data level 1b dimana data tersebut sudah diolah sehingga memperoleh nilai yang dibutuhkan dalam perhitungan. Koordinat dari masing masing satelit yakni x, y, z dari satelit GPS dan satelit LEO diolah sehingga memperoleh nilai r yang diperlukan dalam perhitungan. Data yang digunakan diperoleh dari website cdaac.



Gambar 3-1. Nilai jarak satelit LEO ke Bumi (rLeo). (UCAR, data 2004)



Gambar 3-2. Nilai jarak satelit GPS ke Bumi (rGPS). (UCAR, data 2004)



Gambar 3-3. Nilai delay sinyal GPS RO, fase L1(biru), L2(merah), dan LC(hijau). (Data tahun 2004, UCAR)

Dalam Gambar 3-1 dan Gambar 3-2 terdapat nilai r LEO dan r GPS yang merupakan jarak antara titik pusat satelit ke bumi, disini digunakan sebagai titik pusat satelit adalah koordinat posisi satelit, dan untuk bumi adalah 0. Sedangkan pada Gambar 3-3 menunjukkan nilai fase L1, fase L2, dan beda fase LC sebagai pembandingan.

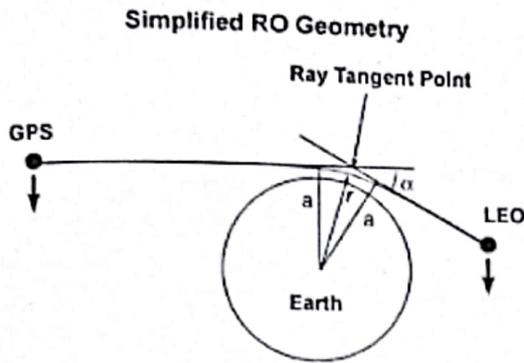
4. Pembahasan

4.1 Teknik Radio occultation

Pada teknik *radio occultation* menggunakan pendekatan vertikal, ini disebabkan oleh gerak relatif antara satelit GPS dan satelit LEO. Secara teoretis, panjang gelombang di ionosfer adalah fungsi dari kerapatan elektron seperti persamaan 4-1:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = -4.03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} \quad \dots(4-1)$$

Dimana n adalah indeks refraksi, kerapatan elektron per meter kubik, dan adalah frekuensi pemancar dalam satuan hertz. Satelit GPS secara terus-menerus memancarkan sinyal sirkuler pada dua frekuensi, L1 = 1,5754 GHz, dan L2 = 1,2276 GHz.



Gambar 4-1. Model Geometry RO dengan satelit GPS dan LEO (Aoyama, 2013)

4.2 Abel Inversion Bending angle pada GPS-LEO

Pada pendekatan *geometrical optics* gelombang radio melewati ionosfer, kemudian mengalami pembiasan sesuai dengan hukum Snellius sehingga memperoleh gradient kerapatan elektron secara vertical dan indeks refraksi. Parameter-parameter yang diperoleh adalah: *bending angle* (α), *impact parameter* (a), dan *tangent point* (θ). Disaat satelit GPS – LEO bergerak, maka sinyal akan mengalami turunkaik melalui atmosfer, sesuai dengan *impact parameter* yang ada pada hukum Snellius, seperti persamaan (4-2) berikut,

$$\alpha = (a) = - \int_{r_t}^{r_{GPS}} d\alpha + \int_{r_t}^{r_{LEO}} d\alpha$$

$$\approx -2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad \dots(4-2)$$

Tanda negatif dari *bending angle* menunjukkan bahwa lengkungan sinar berada jauh dari pusat bumi. Sehingga pengaturan okultasi *bending angle* menurun dari nol sampai nilai maksimum negatif, dan kemudian meningkat menjadi positif ketika gelombang merambat melalui ionosfer yang lebih rendah. *Bending angle* berbanding lurus dengan jumlah perubahan tingkat fase, dan biasanya nilai negatif berubah ke positif terjadi ketika penundaan fase besarnya maksimum di dekat puncak F2. Menggunakan *Abel Inversion* dengan asumsi simetri bola, refraktifitas sesuai pada *tangent point* (θ) dapat dinyatakan dalam *bending angle* (α), dan *impact parameter* (a) seperti persamaan (4-3),

Seminar Nasional Sains Antariksa 2015 LAPAN Bandung, 22 November 2015

$$n(r_t) \approx \text{Exp} \left(\frac{1}{\pi} \int_{a_t}^{\infty} \frac{\alpha(a)}{a^2 - a_t^2} da \right) \quad \dots\dots(4-3)$$

Dimana adalah *impact parameter* untuk tangen point. Sehingga *refractivity* dapat dengan mudah dikonversi ke fungsi jari-jari untuk memperoleh ketinggian.

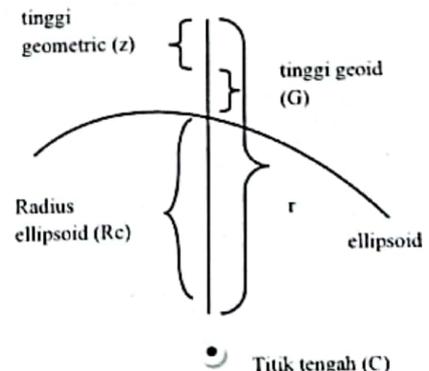
4.3 Menentukan Ketinggian pada Radio Occultation

Langkah langkah dalam menentukan Mean Sea Level (MSL) ketinggian (z), seperti ditunjukkan Gambar 4-2 :

1. Penentuan lintang/ bujur dari bagian gelombang pada titik okultasi (dimana titik berada pada fase melebihi 500 meter diatas tinggi normal yaitu 3-4 km).
2. Menghitung pusat sphericity (C) dan jari-jari kelengkungan (R_c) dari persimpangan okultasi satelit dan ellipsoid.
3. Perhitungan *bending angle* pada pusat C.
4. Radius r terdefinisi sebagai jarak ke pusat bumi C.
5. G adalah koreksi geoid (JGM2 geoid).

Jadi perhitungan dalam matematikanya seperti persamaan 4-4 :

$$z = r - R_c - G \quad \dots(4-4)$$



Gambar 4-2. Ketinggian berdasarkan ellipsoid (Aoyama, 2013)

4.4 Menentukan Profil TEC

Pada siang hari besar *bending angle* tidak lebih besar dari 0.03° untuk kedua L1 dan L2 frekuensi GPS di wilayah F (Haji and Romans, 1998; Schreiner, 1999). Pemisahan gelombang dari garis propagasi dapat dengan mudah diperkirakan : h (dalam rad) LR, dimana LR adalah jarak antara titik singgung dan posisi LEO. Estimasi ini menunjukkan bahwa kesalahan tinggi biasanya kurang dari 2 km, yang jauh lebih kecil dari skala vertikal dari kerapatan elektron di ionosfer. Secara umum sinyal propagasi L1 dan L2 berbeda, oleh karena itu data TEC yang dihitung pada masing masing jalur akan sedikit berbeda. Namun, karena pada frekuensi GPS yang tinggi berbanding terbalik dengan panjang gelombang sehingga *bending angle* dapat diabaikan, maka asumsi garis lurus propagasi dapat digunakan. Dan akan dapat menghitung nilai TEC yang sama, apakah dihitung melalui S1 atau S2. Oleh karena itu elektron total (T) dan kerapatan elektron (n_e), indeks bias (n), dapat ditentukan seperti persamaan 4-5 :

$$T = \int n_e dl = -\frac{f^2}{40.3} \int (n - 1) dl$$

$$= -\frac{f_1^2 S_1}{40.3} = -\frac{f_2^2 S_2}{40.3} = \frac{(S_1 - S_2) f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} \quad \dots\dots(4-5)$$

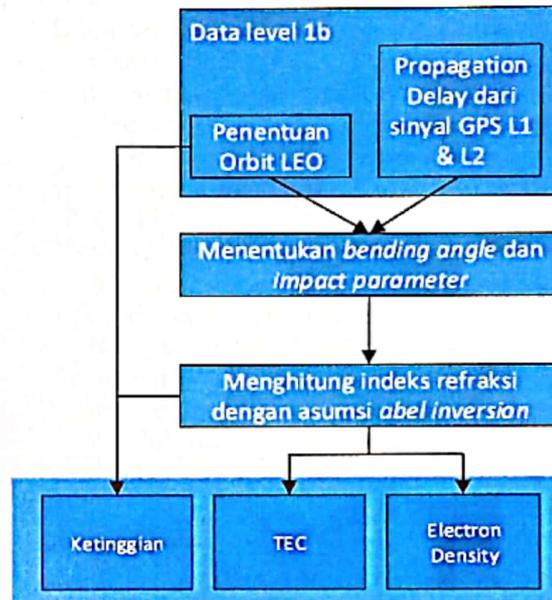
Dengan, T dalam e/m^2 dan S_1, S_2 dalam meter. Perhitungan dual frekuensi GPS untuk perhitungan TEC dapat secara otomatis menghapus kedua orbit dan kesalahan waktu, serta penentuan orbit sehingga menghasilkan ketepatan yang lebih baik. Dengan asumsi simetri bola, TEC dikaitkan dengan kerapatan elektron dapat dinyatakan seperti persamaan (4-6) :

$$\tilde{T}(r_r) = 2 \int_{r_t}^{r_{LEO}} \frac{r n_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_t^2}} dr \quad \dots\dots(4-6)$$

Dengan menerapkan transformasi abel, sama seperti dilakukan dengan inversi melalui *bending angle*, asumsi propagasi garis lurus, dan kerapatan elektron, maka dapat diperoleh persamaan integral seperti 4-7 :

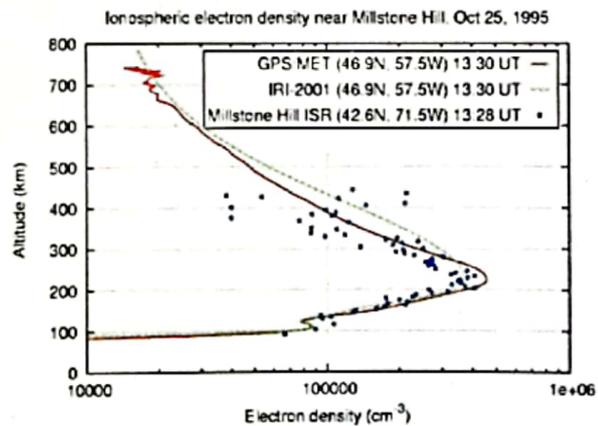
$$n_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_t}^{r_{LEO}} \frac{d\tilde{T}(r)/dr}{\sqrt{r^2 - r_t^2}} dr \quad \dots\dots(4-7)$$

Adapun proses untuk menentukan kerapatan elektron berdasarkan ketinggian adalah :



Gambar 4-3. Algoritma perhitungan kerapatan elektron dengan teknik GPS-RO

Sehingga dalam grafik akan dapat ditentukan nilai TEC dan kerapatan elektronnya berdasarkan tinggi seperti Gambar 4-4 :



Gambar 4-4. Contoh grafik kerapatan elektron berbanding dengan ketinggian di daerah (UCAR, 1995)

5. Kesimpulan

Dalam tulisan ini algoritma perhitungan kerapatan elektron di ionosfer sudah dijelaskan dan kami menarik kesimpulan bahwa berdasarkan data yang dimiliki maka bisa dihitung nilai TEC dan kerapatan elektron itu sendiri. Data yang dimiliki adalah posisi GPS dan LEO, waktu, nilai fase L1 dan L2. Tahapan pertama adalah menghitung nilai dari *bending angle* dan *impact parameter* dari data yang diketahui. Tujuan dari menghitung *bending angle* adalah sesuai dengan pendekatan *geometrical optics* bahwa sinar melewati ionosfer, kemudian dibiaskan menurut hukum Snellius sehingga memperoleh gradient kerapatan elektron secara vertical dan indeks refraksi. Kemudian di inversi dengan *Abel Inversion* sehingga tangen pointnya diintegrasikan kembali, sehingga memperoleh indeks refraksi. Dengan indeks refraksi kita dapat menghitung kerapatan elektron dan TEC dan dibandingkan dengan ketinggian yang dapat dihitung dari titik pusat (C) dan jari-jari kelengkungan (R_c) dari persimpangan okultasi satelit dan ellipsoid.

Dengan algoritma ini maka dapat dibuat aplikasi untuk menghitung kerapatan elektron dan TEC dengan data yang dimiliki, untuk kemudian dibandingkan dengan nilai dari pengamatan langsung, ataupun dengan metode selain GPS-RO. Sehingga diperoleh nilai yang lebih pasti dari kerapatan elektron itu sendiri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih ke Institusi LAPAN, yang memberikan kesempatan kepada Penulis untuk melaksanakan kerja praktek di Pusat Sains Antariksa - LAPAN untuk mempelajari terkait algoritma GPS-RO.

Rujukan

- Aoyama Y. (2013). Bulletin : National Institute Of Polar Research Japan 2012 - 2013]. <http://www.nipr.ac.jp/>
- Ciraolo, L. (2000). Results and problems in GPS TEC evaluation, Proceedings of the Radio Communications Research Units, 1st GPS TEC Workshop, Chilton, 47-60.
- Hajj, G. A. and L. J. Romans. (1998). Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment, Radio Sci., 33(1), 175-190.
- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy. (1997). Observing Earth's atmosphere with *radio occultation* measurements using the Global Positioning System, J. Geophys. Res., 102, 23429-23465.
- Lilensten, J., Lj. R. Cander, M. T. Rietveld, P.S. Cannon dan M. Barthelemy. (2005). Comparison of EISCAT and ionosonde electron densities : application to a ground-based ionospheric segment of a space weather programme, Annales Geophysicae, 23, 183-189.
- Meinke M. D. (1999). Inversion Methods for Atmospheric Profiling with GPS Occultations , Danish Meteorological Institute, Scientific Report Vol. 99-11 , pp. 8.
- Schreiner, W. S., S. V. Sokolovskiy, C. Rocken, and D. C. Hunt. (1999). Analysis and validation of GPS/MET *radio occultation* data in the ionosphere. Radio Sci., 34, 949-966.
- Tsai L. C., J. Y. Liu, W.H. Tsai, W. S. Schreiner, F.T. Berkey. (2001). Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data, Earth Planets Space, 53, 193-205.
- Xinan. L. (2009). Retrieval of High Vertical Resolution Atmospheric Profiles from GPS *Radio occultation* Measurements. Department of Communications and Computer Engineering Graduate School of Informatics, Kyoto University.
- Yamamoto, M. (2008). Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, Earth Planets Space, 60, e21-e24.
- Seminar Nasional Sains Antariksa 2015 LAPAN Bandung, 22 November 2015