

**REKONSTRUKSI TOMOGRAFI KERAPATAN ELEKTRON  
IONOSFER BERBASIS PENGAMATAN GRBR DI INDONESIA**  
**(TOMOGRAPHY RECONSTRUCTION OF IONOSPHERIC  
ELECTRON DENSITY BASED ON GRBR OBSERVATION IN  
INDONESIA)**

Timbul Manik<sup>1</sup>, Mario Batubara<sup>1</sup>, Musthofa Lathif<sup>1</sup>, Yana Robiana<sup>1</sup>, Mamoru Yamamoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) Indonesia

<sup>2</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Japan  
e-mail: [timbul.manik@lapan.go.id](mailto:timbul.manik@lapan.go.id)

**ABSTRAK**

*Riwayat Artikel:*

Diterima:  
22 Desember 2017  
Direvisi:  
10 April 2018  
Disetujui:  
28 September 2018  
Diterbitkan:  
19 Nopember 2018

*Kata kunci:*

Pengamatan GRBR,  
TEC, rekonstruksi  
tomografi, ART

GRBR (GNU-*Radio Beacon Receiver*) untuk pengamatan TEC dan Sintilasi Ionosfer dikembangkan di Indonesia sejak tahun 2010 merupakan kerjasama penelitian LAPAN dengan RISH Universitas Kyoto. GRBR dioperasikan di ekuator bertempat di Kototabang (0.2°S, 100.32°T), Pontianak (0.05°S, 109.25°T, Tomohon (1.21°U, 124.49°T), and Biak (1.08°S, 136.05°T), serta di pulau Jawa bertempat di Sumedang (6.91°S, 107.84°T), Yogyakarta (7.68°S, 110.26°T) and Watukosek (7.34°S, 112.65°T). Baru-baru ini telah dilakukan pengamatan berbasis *campaign* di pulau Jawa guna memperoleh TEC ionosfer berbasis data *beacon* untuk meronstruksikan kerapatan elektron ionosfer. Tiga penerima yang dioperasikan di Pameungpeuk (7.63°S, 107.69°T), Sumedang dan Indramayu (6.35°S, 107.96°T) menerima sinyal dari satelit LEO dengan orbit polar guna memperoleh TEC secara bersamaan di tiga lokasi tersebut. Data yang diperoleh digunakan untuk merekonstruksi tomografi kerapatan elektron ionosfer dengan menggunakan teknik rekonstruksi aljabar (ART) sederhana dan dibandingkan dengan profil vertikal ionosfer dari model IRI-2012 untuk lintang yang berbeda, dan juga dengan pengamatan ionosonda. Makalah ini mendiskusikan algoritma dan data yang digunakan untuk implementasi ART. Hasil awal rekonstruksi tomografi menunjukkan profil vertikal kerapatan elektron dengan nilai maksimum hingga sekitar  $5-8 \times 10^5 \text{el/cm}^3$ .

**ABSTRACT**

*Keywords:*

GRBR observation,  
TEC, tomography  
reconstruction, ART

GRBR for observation of ionospheric Total Electron Content (TEC) and Scintillation has been developed in Indonesia since 2009 under and Scintillation has been developed in Indonesia since 2009 under and Scintillation has been developed in Indonesia since 2009 under collaboration of LAPAN and RISH, Kyoto University. The GRBR are installed in equator, ie. at Kototabang (0.2°S, 100.32°E), Pontianak (0.05°S, 109.25°E, Tomohon (1.21°N, 124.49°E), and Biak (1.08°S, 136.05°E).

136.05°E), and in Java island, i.e. at Sumedang (6.91°S, 107.84°E), Yogyakarta (7.68°S, 110.26°E) and Watukosek (7.34°S, 112.65°E). Recently, a campaign-based observation using GRBR has been conducted in Java island to obtain ionospheric beacon-based TEC for reconstruction of the ionospheric electron density. Three receivers installed in West Java, i.e. at Pameungpeuk (7.63°S, 107.69°E), Sumedang (6.91°S, 107.84°E), and Indramayu (6.35°S, 107.96°E) received signal from polar orbit LEO satellites to obtained simultaneous TEC from three locations. The data are then used for tomographic reconstruction of ionospheric electron densities by utilizing a simple algebraic reconstruction technique (ART) and compared to ionospheric vertical profile from IRI-2012 model for different latitude, and also with ionosonde observation. This paper discussed the algorithm and the data used for the implementation of ART. The preliminary results of tomography reconstruction show ionospheric density profile has a range up to the maximum of around  $5-8 \times 10^5 \text{el/cm}^3$ .

## 1. PENDAHULUAN

Informasi tentang karakteristik ionosfer yang diwakili oleh *Total Electron Content* (TEC) sangat berguna untuk telekomunikasi, penentuan posisi satelit dan cuaca antariksa, namun karakterisasi dan parameterisasi ionosfer di daerah khatulistiwa dan lintang rendah tidak mudah diperoleh dan memerlukan banyak instrumen pengamatan. Sebuah konsep yang dikenal dengan tomografi ionosfer telah diusulkan untuk dapat memecahkan masalah ini. Teknik tomografi ionosfer ini memiliki keunggulan yang dapat mencakup ke wilayah-wilayah terpencil yang tidak dapat dijangkau oleh instrumen pengamatan (Manik dan Lathief, 2011, Batubara dkk., 2016).

GNU-*Radio Beacon Receiver* (GRBR) digunakan untuk mengukur TEC ionosfer di wilayah khatulistiwa sejak tahun 2010, dan sejauh ini telah dikembangkan menjadi suatu jaringan pengamatan TEC ionosfer Indonesia. Data dari jaringan ini diproyeksikan akan digunakan untuk tomografi ionosfer, namun jarak antar penerima menjadi masalah serius untuk diterapkan pada konsep tomografi, sehingga dilakukan pengamatan berbasis kampanye dengan menggunakan GRBR.

Makalah ini membahas penerapan tomografi ionosfer dengan menggunakan teknik rekonstruksi aljabar, *Algebraic Reconstruction Technique* (ART). Data yang digunakan berasal dari pengamatan

berbasis kampanye GRBR. Analisis dilakukan berdasarkan hasil awal rekonstruksi tomografi kerapatan elektron ionosfer sepanjang bujur 108 derajat di atas Jawa Barat Indonesia.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

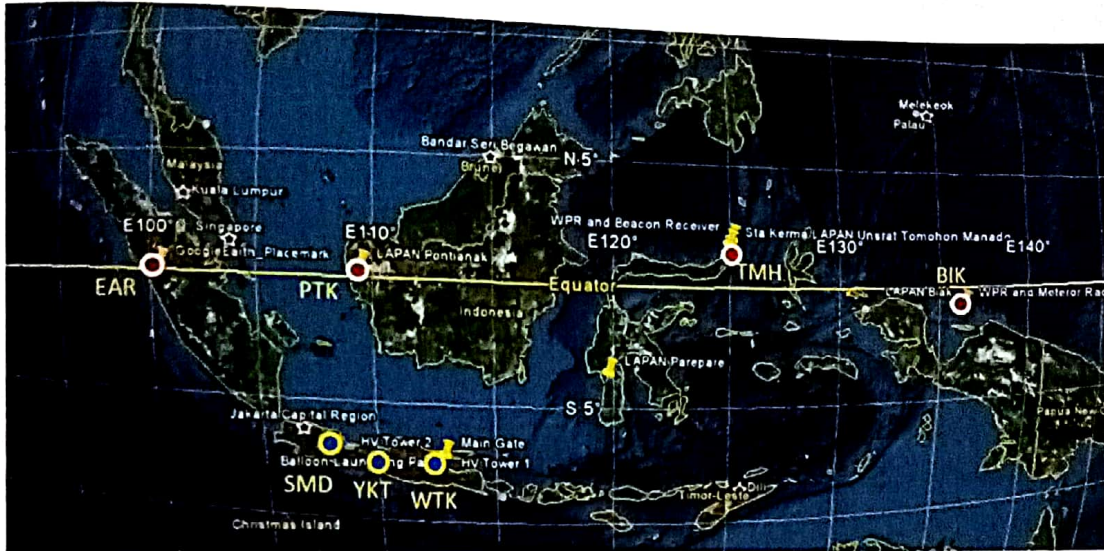
Teknik pengamatan dengan sistem penerima sinyal beacon telah banyak digunakan untuk mempelajari karakteristik lapisan ionosfer, antara lain TEC, sintilasi dan lain-lain. Sistem penerima analog dikembangkan menjadi penerima digital berbasis perangkat yang *open source* dengan nama GNU *Radio Beacon Receiver* (GRBR) (Yamamoto, 2008). GRBR mampu menerima sinyal radio dari satelit orbit rendah (LEO) yang melintas melewati wilayah Indonesia pada frekuensi 150 dan 400 MHz selama 10-15 menit. Pengembangan secara mandiri dilakukan dengan membangun jaringan pengamatan yang *real time*, disebut jaringan pengamatan TEC *beacon* ekuator Indonesia sejak tahun 2010.

Jaringan pengamatan GRBR di Indonesia terdiri dari beberapa penerima *radio beacon* digital yang dipasang di beberapa lokasi, antara lain Kototabang Sumatera Barat, Pontianak Kalimantan Barat, Tomohon Manado Sulawesi Utara, dan Biak Papua, dan di beberapa stasiun dengan jarak yang lebih dekat di pulau Jawa, yaitu di Sumedang Jawa Barat, Yogyakarta dan Watukosek Jawa Timur

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1-1. Jarak antara lokasi pengamatan dalam jaringan pengamatan GRBR Indonesia ditunjukkan pada Tabel 1-1, dengan jarak stasiun pengamatan terdekat adalah 256 km, dan terjauh 3.984 km.

Jaringan pengamatan ini merupakan jaringan pengamatan ionosfer pertama yang didasarkan pada penerima *radio beacon* digital di Indonesia yang meliputi

pengamatan TEC ionosfer dari bagian barat hingga ke bagian timur Indonesia. Data hasil pengamatan yang dikumpulkan di pusat data Sains Antariksa di LAPAN Bandung berpotensi digunakan untuk rekonstruksi tomografi ionosfer untuk wilayah yang luas, serta untuk studi-studi dan analisis ionosfer dan cuaca antariksa lebih lanjut. (Manik dan Lathif, 2011).



Gambar 1-1. Jaringan GRBR di Indonesia.

Tabel 1-1. Jarak antara pengamatan GRBR di Indonesia (km)

	EAR	PTK	SMD	YKT	WTK	TMH	BIK
EAR		1,006	1,119	1,397	1,596	2,732	3,984
PTK	1,006		787	873	917	1,739	2,991
SMD	1,119	787		295	539	2,096	3,181
YKT	1,397	873	295		256	1,888	2,922
WTK	1,596	917	539	256		1,670	2,679
TMH	2,732	1,739	2,096	1,888	1,670		1,237
BIK	3,984	2,991	3,181	2,922	2,679	1,237	

Pemetaan distribusi kerapatan elektron di lapisan ionosfer dapat dilakukan dengan menggunakan teknik tomografi. Salah satu algoritma yang banyak digunakan adalah teknik rekonstruksi aljabar, *Algebraic Reconstruction Technique* (ART) (Pryseet al., 1988).

Thampi dkk. telah melaporkan juga penggunaan ART pada percobaan penerima CRABEX di India (Thampi et al., 2007) dan percobaan pengamatan dengan radio beacon di Jepang (Thampi et al., 2010) yang memanfaatkan nilai selisih frekuensi Doppler dari frekuensi ganda yang dipancarkan oleh satelit untuk menentukan nilai TEC. Nilai TEC yang diperoleh tersebut digunakan untuk

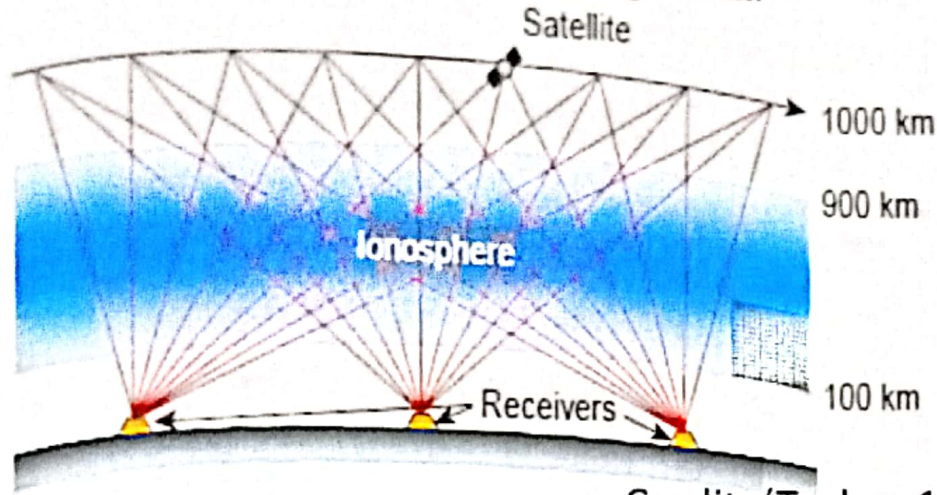
mendapatkan distribusi kerapatan elektron ionosfer.

Perbedaan frekuensi Doppler berkorelasi dengan TEC relatif atau *Slant-Total Electron Content* (S-TEC) sepanjang jalur pancar sinyal satelit. Nilai absolut TEC atau *Vertical-TEC* (V-TEC) adalah data dasar untuk inversi tomografi yang dapat didefinisikan dengan persamaan linier sebagai berikut:

$$Y = Ax + E \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan Y adalah data pengamatan TEC, x adalah parameter kerapatan elektron yang tidak diketahui, A adalah matriks geometri,

dan E adalah diskretisasi kesalahan dari pengukuran.



Credit: (Tucker, 1998)

Gambar 2-1. Metoda pengukuran TEC dengan penerima radio beacon (GRBR), (Tucker, 1998).

Gambar 2-1 menunjukkan ilustrasi grafis sederhana teknik tomografi ionosfer. Apabila tiga penerima atau lebih secara bersamaan mengamati satelit yang melintas, sebagaimana digambarkan dengan garis penghubung antara satelit dengan ketiga sistem penerima tersebut, maka area di ionosfer tersebut dapat memberi banyak informasi TEC pada arah yang berbeda. Dengan informasi TEC ini pemetaan distribusi kerapatan elektron ionosfer dapat dilakukan. (Leitinger *et al.*, 1975, Austen *et al.*, 1988, Thampi *et al.*, 2007, Vierinen *et al.*, 2014).

Sinyal satelit diterima oleh sistem penerima setiap kali satelit melintas. Sinyal satelit menembus ionosfer dengan ketebalan tertentu. Posisi satelit dan data parameter sinyal satelit yang tersimpan di pusat data kemudian dapat dihitung untuk merekonstruksi area cakupan sinyal satelit.

Teknik Rekonstruksi Algebraic (ART) adalah metode rekonstruksi dengan menggunakan proses perhitungan iteratif (perulangan) untuk menyelesaikan masalah pada persamaan multilinier. ART difokuskan untuk merekonstruksi isi setiap elemen matriks ( $m \times n$ ) yang mencerminkan nilai fungsi kerapatan elektron pada dua dimensi. Langkah pengolahan ART adalah pembentukan matriks inialisasi, perhitungan faktor koreksi, proses rekonstruksi, kemudian pengujian konvergensi hasil perhitungan. Di akhir proses, keluaran dari teknik ini adalah

pendekatan numerik yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_j^{k+1} = f_j^k + \alpha \frac{p_i - \sum_{n=1}^N A_{in} f_n^k}{\sum_{n=1}^N A_{in}^2} A_{ij} \dots \dots \dots (2-2)$$

Dengan  $\alpha$  adalah parameter relaksasi,  $p_i$  adalah data yang diamati,  $A$  adalah matriks geometri, dan  $f$  adalah nilai kerapatan elektron.

### 3. DATA DAN METODE

Pengamatan GRBR berbasis kampanye dilakukan pada tanggal 8-10 November 2016 di Jawa Barat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-1. Pengamatan berbasis kampanye ini dilakukan untuk mendapatkan data dari pengamatan TEC dengan penerima yang lebih dekat sehingga dapat diterapkan pada konsep rekonstruksi tomografi ini. Data dari jaringan belum dapat digunakan karena jarak antar penerima yang sangat jauh.

Tiga perangkat penerima radio beacon (GRBR) ditempatkan tiga lokasi yaitu di Anjatan Indramayu (6,35S, 108.33E) (IMY), di Tanjungsari Sumedang (6.91S, 107.83E) (SMD), dan di Pameungpeuk Garut (7.63S, 107.69E) (PMP). Estimasi jarak antara IMY-SMD adalah 62 km, dan SMD-PMP berjarak 80 km. Waktu pengamatan di tiga lokasi disesuaikan dengan tepat, sehingga tidak ada perbedaan waktu saat satelit melintas. Jadwal pendekatan satelit dibuat berdasarkan data TLE. Selama

pengamatan, penerima suar di tiga lokasi mendapat sinyal dari satelit orbit rendah COSMOS2407, COSMOS2463, dan DMFPS15.

(LEO) yang melewati Indonesia, yaitu.



Gambar 3-1. Lokasi pengamatan berbasis kampanye di pulau Jawa, dari Selatan ke utara berturut-turut adalah Pameungpeuk, Tanjungsari dan Indramayu.

Proses pengolahan data GRBR secara off-line dilakukan sebagai berikut:

1. Data TEC relatif (S-TEC) dan trayektori (lintasan) satelit diperoleh dari akuisisi data GRBR.
2. Model global ionosfer IRI-2012 digunakan sebagai inisiasi atau latar belakang TEC.
3. S-TEC dari pengamatan dikoreksi dengan teknik koreksi kesalahan bias, kemudian digunakan dalam perhitungan nilai TEC absolut (V-TEC) dan geometri tomografi.
4. Data lintasan satelit dari pengamatan digunakan untuk membangun jalur pancar satelit, dan dengan perhitungan spasial trigonometri dua dimensi dihasilkan matriks geometri tomografi.
5. Prosedur ART dijalankan dengan masukan data inisiasi ionosfer dari model IRI, data V-TEC, dan matriks geometri untuk mendapatkan matriks tomografi untuk memperoleh rekonstruksi tomografi kerapatan elektron ionosfer.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

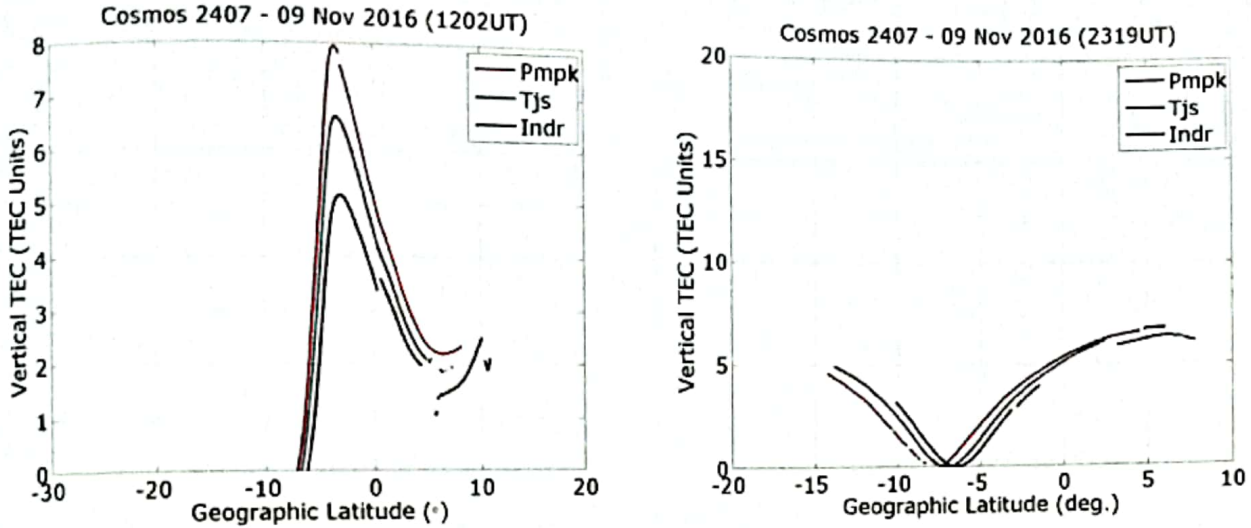
Dari analisis perbedaan fasa antara dua sinyal 150 dan 400 MHz yang diterima

pada setiap lokasi, diperoleh nilai TEC relatif, S-TEC antara satelit dengan penerima, dimana nilai TEC relatif terendah diasumsikan bernilai nol, yang merupakan nilai TEC pada jarak terdekat antara satelit dengan penerima di masing-masing lokasi pengamatan. Nilai S-TEC kemudian dikonversi ke nilai TEC absolut (V-TEC) menggunakan metoda dua stasiun yang dikembangkan oleh Leitinger (Leitinger, 1975), untuk selanjutnya digunakan untuk rekonstruksi tomografi ionosfer. Gambar 4-1 menunjukkan hasil absolut TEC (V-TEC) yang diperoleh di setiap lokasi pengamatan untuk pengamatan masing-masing untuk tanggal 09 November 2016. Hasil pengamatan lainnya ditunjukkan pada Gambar 4-2.

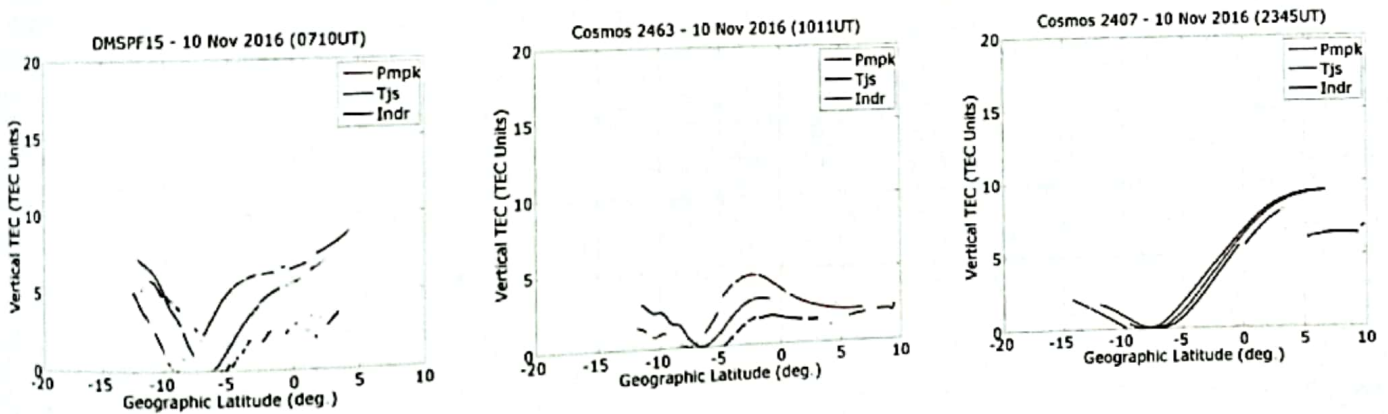
Data pengamatan yang dilakukan di tiga lokasi dikumpulkan dan dilakukan akuisisi data TEC dan trajektori satelit. Waktu perlintasan satelit yang diterima di lokasi pengamatan ditunjukkan pada Tabel 1-1. (Manik et al., 2016). Data yang diperoleh pada pengamatan ini terdiri dari enam set data. Pemrosesan dan analisis data telah dilakukan pada lima set data, sedangkan satu set lagi belum dilakukan karena kualitas data yang kurang baik.

Tabel 4-1. Daftar pengamatan berbasis *campaign* (diterima di Anjatan Indramayu)

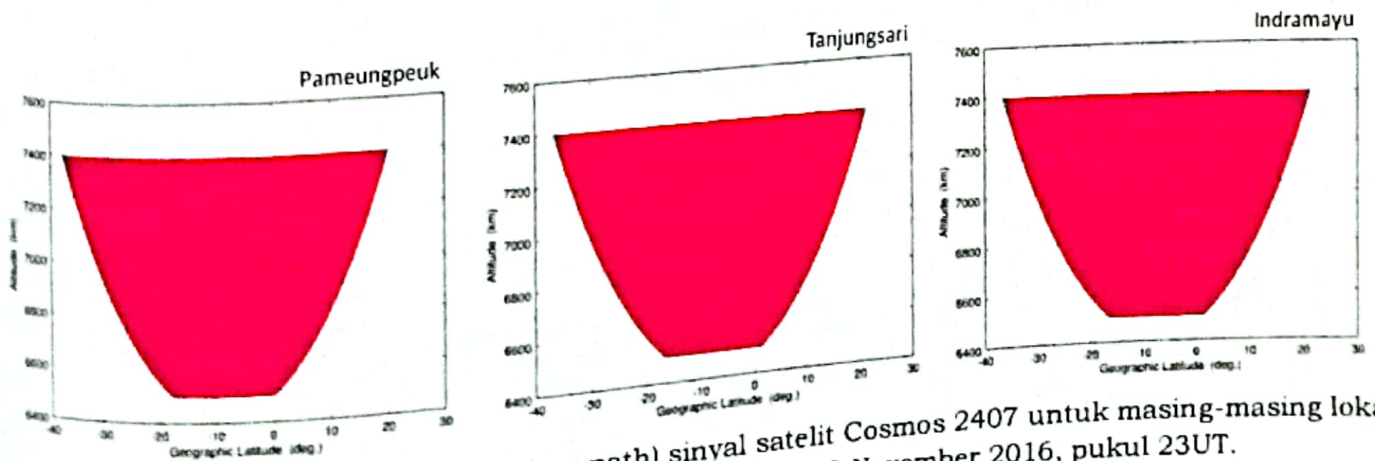
No.	Tanggal	Waktu (UT)	Nama Satelit	Keterangan (arah)
1.	08/11/2016	22:53:30	Cosmos 2407	S-U *
2.	09/11/2016	12:02:39	Cosmos 2407	U-S
3.		23:19:05	Cosmos 2407	S-U
4.	10/11/2016	07:11:27	DMSPF15	S-U
5.		10:12:31	Cosmos2463	S-U
6.		23:45:50	Cosmos 2407	S-U



Gambar 4-1. Hasil konversi TEC relatif ke nilai TEC vertikal untuk masing-masing lokasi pengamatan pada 09 November 2016, pukul 12UT dan 23UT.



Gambar 4-2. Hasil konversi TEC relatif ke nilai TEC vertikal untuk masing-masing lokasi pengamatan pada 10 November 2016, pukul 07UT, 10UT dan 23UT.

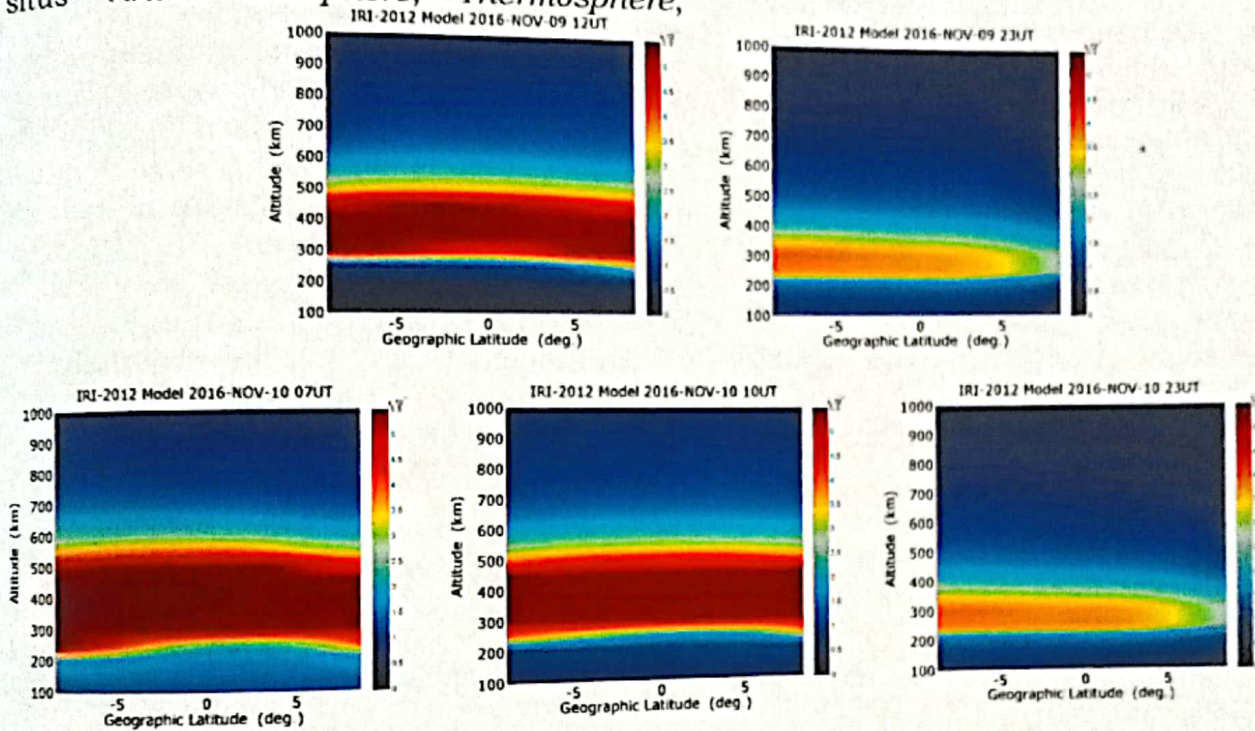


Gambar 4-3. Pembentukan jalur pancar (ray path) sinyal satelit Cosmos 2407 untuk masing-masing lokasi, Pameungpeuk, Sumedang dan Indramayu pada 09 November 2016, pukul 23UT.

Data lintasan satelit dari hasil pengamatan GRBR digunakan untuk menghitung jalur pancar (*raypath*) satelit sehingga dapat diketahui area cakupan rekonstruksi tomografi ionosfer dua dimensi dari ketinggian 100 hingga 1.000 km dengan asumsi penambahan radius panjang Bumi sekitar 6.400 km seperti ditunjukkan pada Gambar 4-2.

Data inisiasi ionosfer diperoleh dari model *International Reference Ionosphere (IRI) 2012* yang diperoleh dari situs *Virtual Ionosphere, Thermosphere,*

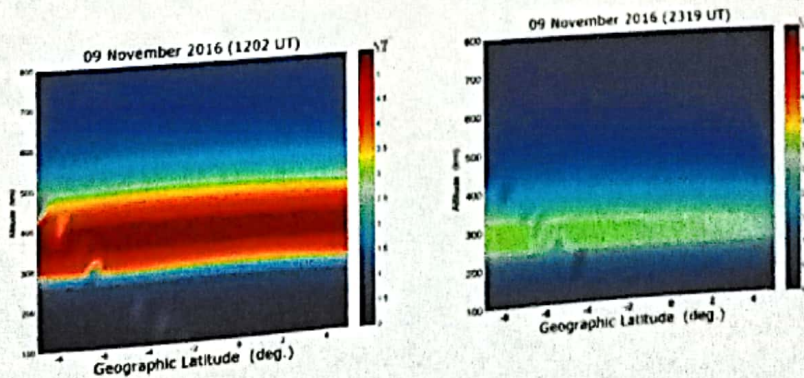
*Mesosphere Observatory* (VITMO) pada [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html) seperti pada Gambar 4-3. Perhitungan rekonstruksi tomografi ionosfer yang dilakukan dengan masukan koordinat data jalur pancar satelit, data TEC vertikal (V-TEC), dan data inisiasi ionosfer sebagai latar belakang TEC ionosfer.

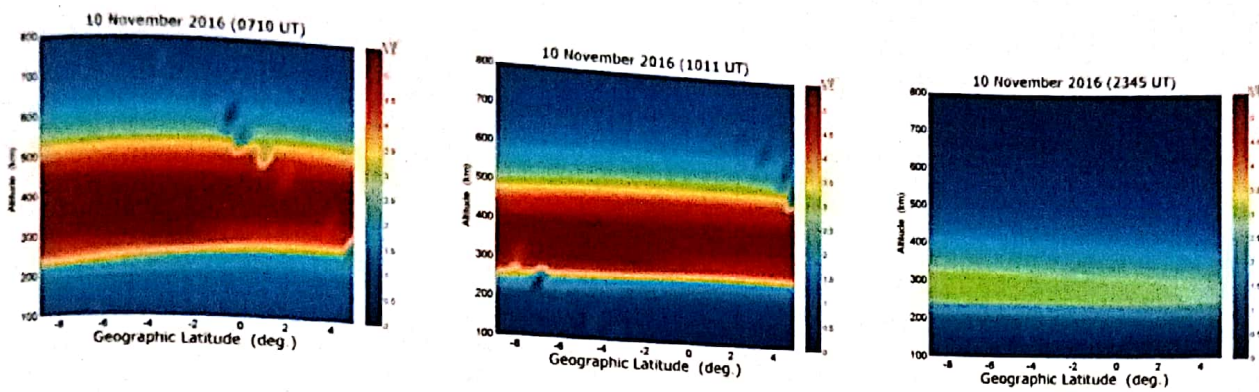


Gambar 4-3. Keluaran model IRI-2012 sebagai inisiasi rekonstruksi tomografi.

Hasil rekonstruksi tomografi kerapatan elektron dari pengamatan berbasis kampanye ini diperlihatkan pada Gambar 4-4. Sumbu vertikal menyatakan ketinggian dalam kilometer dan sumbu

mendatar adalah posisi lintang geografis. Profil vertikal kerapatan elektron dengan tomografi menunjukkan nilai kerapatan elektron berada pada rentang dengan nilai maksimum hingga sekitar  $5-8 \times 10^5 / \text{cm}^3$ .

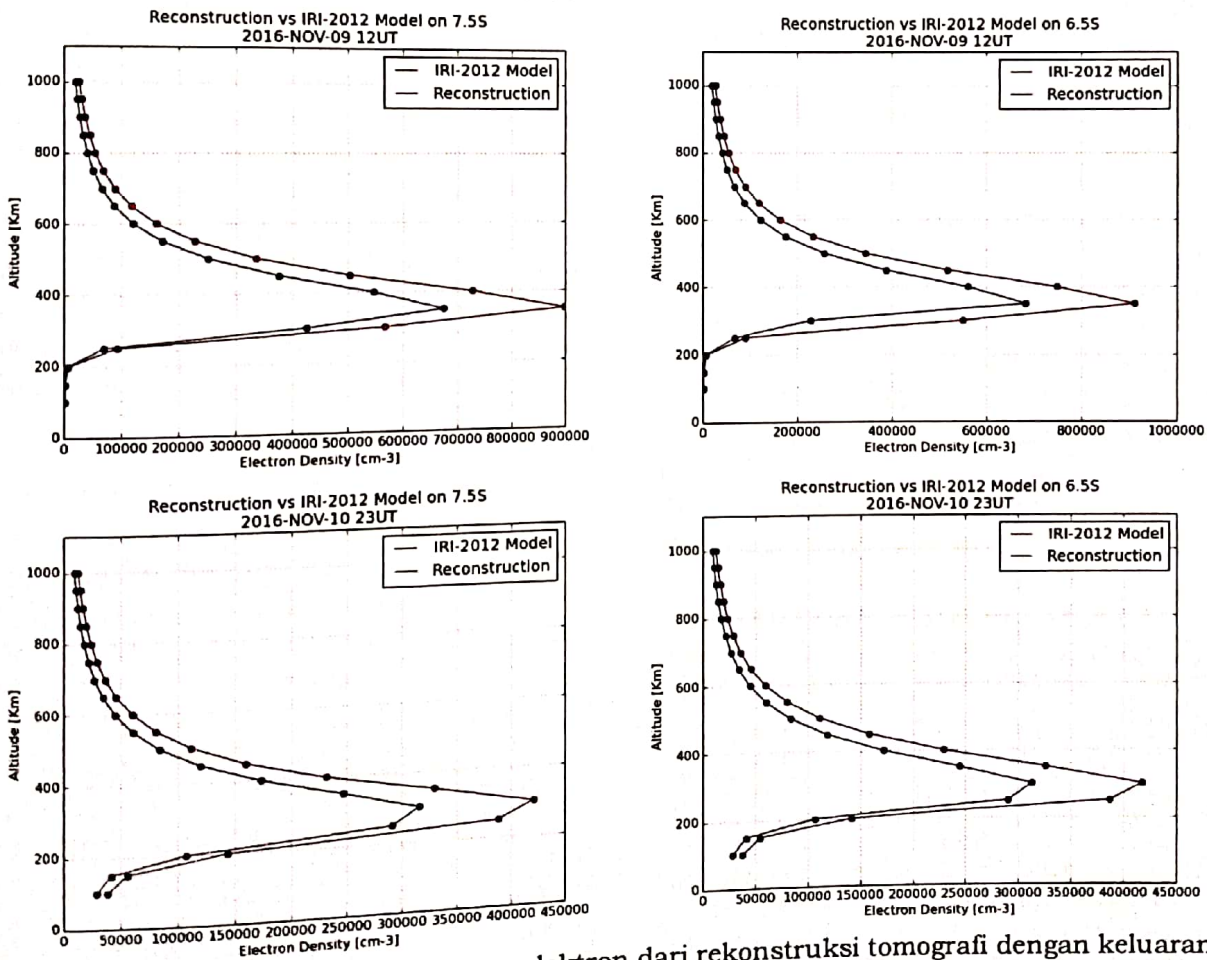




Gambar 4-4. Hasil rekonstruksi tomografi, 9 November 2016 pukul 12 UT dan 23 UT, dan 10 November 2016 pukul 07UT, 10 UT dan 23 UT.

Perbandingan profil kerapatan elektron dari rekonstruksi tomografi dengan keluaran Model IRI-2012 dilakukan untuk menguji hasil tomografi. Grafik perbandingan kerapatan elektron masing-masing untuk pengamatan 09 November 2016 dan 10 November 2016 pada garis lintang yang berbeda yaitu 7.5°S dan 6.5°S ditunjukkan pada Gambar 4-5. Perbandingan ini menunjukkan perkiraan kerapatan elektron dari keluaran model

IRI-2012 masih memberikan nilai yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan yang perbandingan keluaran model IRI-2012 dengan pengamatan ionosonda tahun 2015 yang dilakukan oleh Batubara dkk. (2017), yang menunjukkan variasi yang bersesuaian untuk 24 jam pengamatan, namun nilai  $NmF2$  hasil keluaran model IRI-2012 masih lebih tinggi dibandingkan dengan hasil pengamatan ionosonda.



Gambar 4-5. Perbandingan profil kerapatan elektron dari rekonstruksi tomografi dengan keluaran model IRI-2012 pada 09-Nov-2016 pukul 12UT dan pada 10-Nov-2016 pukul 23UT, masing-masing untuk lintang 7.5S dan 6.5S.

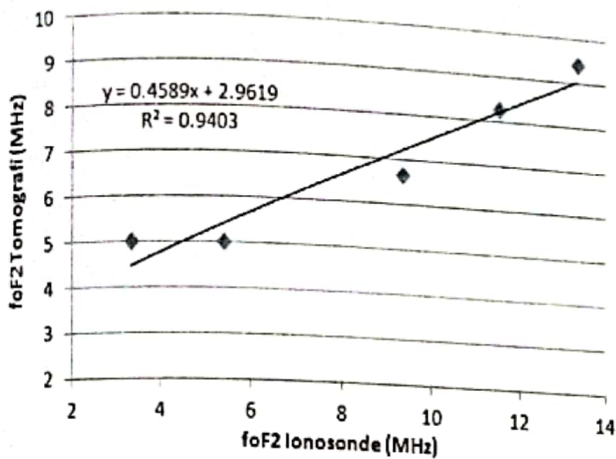
Validasi hasil rekonstruksi tomografi dilakukan dengan cara mengkorelasikan atau membandingkan hasil rekonstruksi

tomografi dengan hasil pengamatan ionosonda dari stasiun terdekat, yaitu dari stasiun LAPAN Sumedang. Sejak awal

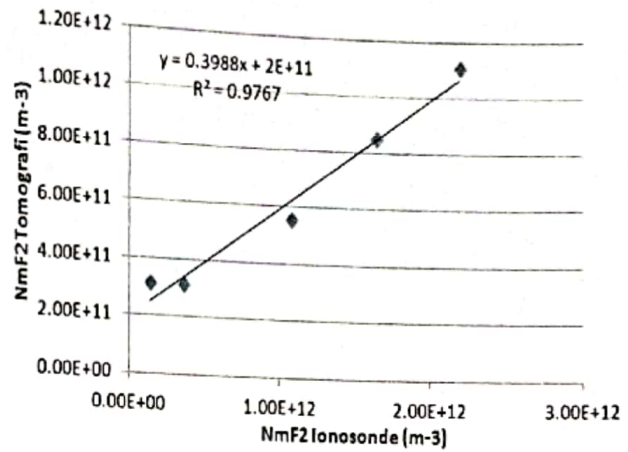


dalam melakukan proses rekonstruksi tomografi ini, data pengamatan ionosonda tidak digunakan sama sekali untuk inisiasi ionosfer, tetapi menggunakan data model

global ionosfer, sehingga tomografi menggunakan data TEC beacon ini terbebas dari data ionosonda.



(a) foF2 tomografi dengan pengamatan



(b) NmF2 tomografi dengan pengamatan

Gambar 4-6. Perbandingan nilai elektron maksimum hasil tomografi dengan pengamatan ionosonda stasiun terdekat.

Nilai TEC yang digunakan untuk tomografi dapat dikorelasikan dengan nilai frekuensi kritis lapisan  $F_2$  ( $foF_2$ ), dengan menganggap bahwa ionosfer memiliki kerapatan yang homogen secara vertikal, dan nilai kerapatan elektron  $N_e$  sama dengan kerapatan elektron maksimum pada lapisan  $F_2$  ionosfer  $NmF_2$ .

Nilai  $foF_2$  dari tomografi dari pengamatan dikorelasikan dengan  $foF_2$  dari data ionosonda pada Gambar 4-6(a). menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan koefisien korelasi 0,94, dengan bias frekuensi yang cukup rendah kurang dari 3 MHz. Apabila dilakukan perbandingan antara nilai maksimum kerapatan elektron  $NmF_2$  tomografi dengan  $NmF_2$  pengamatan ionosonda, seperti pada Gambar 4-6(b), maka diperoleh kesesuaian yang tinggi dengan koefisien korelasi 0,976.

Masih adanya ketidaksesuaian antara hasil rekonstruksi tomografi dengan pengamatan ionosonda dapat disebabkan oleh karena tomografi memperoleh nilai kerapatan elektron yang dikonversi ke nilai frekuensi kritis  $foF_2$  dengan resolusi ketinggian 50 km sedangkan pengamatan ionosonda memberikan nilai dari titik pengukuran langsung. Disamping itu, ketidaksesuaian juga dapat disebabkan terbatasnya data pengamatan berbasis kampanye yang digunakan untuk masuk rekonstruksi tomografi. Untuk itu pengamatan berbasis kampanye lanjutan

dan pemrosesan data yang lebih baik masih perlu dilakukan lagi untuk waktu yang akan datang.

## 5. KESIMPULAN

Rekonstruksi tomografi ionosfer menggunakan teknik rekonstruksi aljabar (*Algebraic Reconstruction Technique/ART*) dari data pengamatan GRBR berbasis kampanye telah berhasil dilakukan dengan baik pada posisi geografis sepanjang 108 bujur timur di Pulau Jawa Indonesia. Proses rekonstruksi tomografi ionosfer telah dilakukan melalui proses seleksi data TEC beacon, konversi nilai TEC relatif (S-TEC) ke nilai TEC absolut (V-TEC) dengan metode dua stasiun Leitinger, pembangunan matriks geometri sebagai dasar rekonstruksi tomografi, dan pembentukan data inisiasi TEC. Profil kerapatan elektron dari rekonstruksi tomografi memiliki nilai dengan rentang berkisar  $5-8 \times 10^5 / \text{cm}^3$ . Validasi hasil tomografi dilakukan dengan membandingkan profil kerapatan elektron hasil rekonstruksi tomografi dengan keluaran model IRI-2012, menunjukkan bahwa perkiraan kerapatan ionosfer keluaran model IRI-2012 masih memberikan nilai yang lebih tinggi. Dilakukan juga perbandingan nilai  $foF_2$  hasil rekonstruksi tomografi dengan pengamatan ionosonda di stasiun terdekat

yang menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan koefisien korelasi 0,94 sedangkan perbandingan nilai NmF2 juga menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan koefisien korelasi 0,976.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di Stasiun-stasiun Pengamat GRBR di Kototabang, Pontianak, Tomohon, Biak, Sumedang, Yogyakarta dan Watukosek atas bantuan dan dukungan dalam pengoperasian GRBR, juga kepada rekan tim scaling dan basis data Ionosfer Pussainsa LAPAN atas bantuan data pengamatan ionosonda. Terima kasih juga disampaikan kepada SMK I Anjatan Indramayu dan Stasiun Pameungpeuk Garut yang telah mengizinkan kami mengoperasikan peralatan GRBR dalam rangka kampanye pengamatan GRBR. Terima kasih juga disampaikan kepada Dr. Smitha V. Thampi, *Physical Research Laboratory*, India atas dukungan yang diberikan. Kegiatan ini merupakan bagian dari program penelitian Pusat Sains Antariksa dan dibiayai oleh DIPA Pusat Sains Antariksa LAPAN.

### DAFTAR RUJUKAN

- Austen, J.R., S.J. Franke, C.H. Liu, K.C. Yeh (1988), Ionospheric imaging using computerized tomography, *Radio Science* 23, pp. 299-307.
- Batubara, M., T. Manik, M. Lathif, and P. Sitompul (2016), Iterative Algorithm for Construction of Electron Density Mapping based on Beacon Satellite Observation Data, *Proceedings of ISAST IV*, 2016.
- Leitinger, R. G. Schmid and A. Tauriainen (1975), An evaluation method combining the differential Doppler measurement from two stations that enables the calculation of electron content of the ionosphere, *J. Geophys.*, 40, 201-213.
- Manik, T., and M. Lathif (2011), Jaringan GRBR Indonesia, *Proc. SNSAA 2011*.
- Manik, T., M. Lathif, P. Sitompul, M. Batubara, R. Suryana, S. Anggarani, dan A.Z. Utama (2016), Rekonstruksi Tomografi ionosfer berbasis TEC-beacon dari jaringan GRBR Indonesia, *Laporan Akhir Program Penelitian Pusat Sains Antariksa LAPAN 2016*, Bandung.
- Pryse, S.E., L. Kersey, C.N. Mitchell, P.S.J. Spencer, and M.J. Williams, (1988). A comparison of reconstruction techniques used in ionospheric tomography. *Radio Science*, vol. 33 Number 6, 1767-1779.]
- Thampi, Smitha V., S. Ravindran, C.V. Devasia, P. Sreelatha, T.K.Pant, R. Sridharan, D.V. Ratnam, A.D. Sharma, C.R. Reddi, J. Jose, and J.H. Sastry (2007), Coherent Radio Beacon Experiment (CRABEX) for tomographic imaging of the equatorial ionosphere in the Indian longitudes: Preliminary results, *Adv. Space Res.*, 40, 436-441.
- Batubara, M., T. Manik, S. Anggraeni, P. Sitompul and M. Lathief (2017), Comparison of Ionospheric Peak Parameters by the Ionosonde Measurement in Sumedang with Global Ionospheric Model, *Proceedings of International Symposium on the 15<sup>th</sup> Anniversary of the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) 2016*.
- Thampi, Smitha V. and Mamoru Yamamoto (2010), First result from the ionospheric tomography experiment using beacon TEC data obtained by means of a network along a longitude of 136°E over JAPAN, *Earth Planets Space*, Vol. 62 (No. 3), pp. 359-364.
- Tucker, Arnold J. (1998), Computerized Ionospheric Tomography, *John Hopkins Apl. Technical Digest*, Vol. 19, Number 1, pp. 66-71.
- Vierinen, J., J. Norberg, M.S. Lehtinen, O. Amm, L. Roininen, A. Vaananen, P.J. Erckson, and D. McKay-Bukowski (2014), Beacon satellite receiver for ionospheric tomography, *Radio Science* doi. 10.1002/2014RS005434.
- Yamamoto, M. (2008), Digital Beacon Receiver For Ionospheric TEC Measurement, *Earth Planets Space*, 60 e21-e24.