

GNU Radio ビーコン受信機の開発状況

山本衛、Smitha Thampi (京都大学生存圏研究所)

1. 研究の背景と目的

わが国には、建設省国土院が全国千地点以上に展開する GPS 受信機網 GEONET がある。我々はこれを用いて日本上空の全電子数(Total Electron Content; TEC)の水平分布を 30 秒毎に算出するシステムを開発し、夏季の夜間に頻繁にあらわれる中規模電離圏擾乱(Middle-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID)の構造を研究してきた(Saito et al., 1998)。GEONET を用いた観測から、MSTID が北西から南東に延びる波面を持ち水平伝搬方向が南西方向に集中するという特徴が極めて明快に示された。しかし MSTID の鉛直構造については理解が不十分である。一方、TEC の観測手法としては、衛星から 2 波 (あるいは 3 波) のビーコン電波を送信し地上でその位相差を測定するという、非常に古典的な手法がある。ビーコン電波を送出する衛星として、高度数百 km から千 km 程度を飛翔する、いわゆる低軌道衛星が使用されるため、地上から見た一回の衛星パスが 10~15 分間と短時間である。衛星パスに沿って多点観測を行い、トモグラフィ解析を行うことによって、衛星パスに沿った電子密度分布の鉛直分布が推定可能である。衛星ビーコン観測は、近年は我が国ではほとんど行われることがなかったが、最近のデジタル信号処理技術の高度化に伴い、デジタル信号技術を使って受信機を安価に開発することができるようになっている。我々は、衛星—地上間の TEC 測定用のデジタル・ビーコン受信機を開発してきた。

開発してきたデジタル・ビーコン受信機 (既製品に比べて価格が 1/10 かつ高性能) は、テスト利用をほぼ終え、研究に実用され始めている。具体的な研究目的は、ひとつは、世界最大の地上 GPS 受信機網 GEONET と新規の衛星ビーコン多地点観測を組合せ、TEC データに基づいたトモグラフィ解析によって、MSTID の空間構造を明らかにすることであり、もうひとつは、低緯度・赤道域における赤道スプレッド F 現象(Equatorial Spread-F; ESF)研究への応用である。最近の取り組みについて紹介する。

2. デジタル・ビーコン受信機

開発したデジタル受信機は、Linux PC、GNU Radio、USRP (Universal Software Radio Peripheral)から構成される。GNU Radio はデジタル送受信機を簡易に実現するために開発されたソフトウェアツールキットであり、多様なライブラリを実装している。GNU Radio は Linux PC 上で動作し、プログラム言語 Python を用いたプログラミングにより、変復調器やフィルタ等の機能が実現できる安価で高性能なデジタル信号処理ボードであり、サンプリング周波数 64 MHz のアナログ・デジタル(A/D)変換器やプログラム可能な論理回路 LSI である FPGA (Field Programmable Gate Array) で構成される信号処理装置等を備え、二周波の同時送受信が可能である。アンテナに

は、無指向性に近くあらゆる方向に円偏波特性を持つ QFH (QuadriFilar Helicoidal) アンテナ(Kilgus, 1969)を自作して使用した。

図 1 にビーコン受信機のブロック図を示す。人工衛星からのビーコン信号は、アンテナにより受信され、プリアンプ(増幅器 1, 4)、帯域通過フィルタ(BPF 1, 2)、外付け増幅器(増幅器 2)等を経て USRP に入力される。150 MHz の信号は直接 A/D 変換され、400 MHz の信号は、いったんドーターボード上でアナログ回路によって数 MHz の信号に変換された上で A/D 変換される。両信号は FPGA に構成されたプログラムによってデジタル復調され、CIC フィルタによってサンプリング周波数が 1/200 に下げられる(周波数 320 kHz)。その後 USB インターフェースを通して LINUX PC 上の GNU Radio プログラムに引き渡される。GNU Radio 上でさらに FIR フィルタで帯域制限された上でサンプリング周波数が 1/10 に下げられ、それぞれ ± 16 kHz の帯域をもつ複素時系列として保存される。

開発した受信機と評価の確立した既存の受信機との比較観測は、2007 年 8 月に JAXA 内之浦宇宙空間観測所(鹿児島県)で、2008 年 8 月に信楽において行われた。いずれもアナログ受信機との比較であったが、TEC 推定値の一致は極めて良好であって、我々の受信機が良好に動作することが確認された。本受信機を GNU Radio Beacon Receiver (GRBR)と名づけ、ハードウェア・ソフトウェアの状況と初期比較観測結果をまとめて論文発表した(Yamamoto, 2008)。またホームページを設けて設計・製作情報の公開を始めた(<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/digitalbeacon/>)。

3. トモグラフィ観測

GRBR の初めての研究利用として、2008 年 7~9 月に下記の 3 地点からの同時観測を実施した。

京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所(滋賀県甲賀市)

京都大学防災研究所潮岬風力実験所(和歌山県串本市)

中部特機産業・福井支店(福井県福井市)

図 2 に示すように、3 地点は、全体で 300km の規模を持つ南北 1 直線状の配置となる。観測状況は良好であって、ほぼ全ての期間にわたってデータを取得した。

図 3 に 7 月 10~11 日に得られたデータに基づくトモグラフィ解析の結果を示す。(a)~(h)がそれぞれ 2008 年 7 月 10 日 12:00UT, 23:00 UT, 7 月 11 日 06:15UT, 08:10UT, 10:00UT, 12:15UT, 20:00UT, 22:00UT に対応している。いずれも緯度範囲 28 度~41 度において電子密度分布が良好に推定された。(a), (e), (f)が MSTID の発生が期待できる夜間に当たっているが、電子密度の分布に緯度構造が現れている(特に(a)と(f)で顕著)、GPS-TEC との詳細な比較には至っていないが、これは MSTID による電子密度変動と考えられる。日中にあたる(c)と(d)については、低緯度側に電子密度の増大が見られるが、これは電子密度の大規模分布が磁気緯度 10 度付近で最大となる、いわゆる赤道異常といわれる分布の北側の様子を捉えたものである。地方時で朝 7~9 時に当る(b)と(h)については、夜の低電子密度の状況が日中に移り変わる状況が現れているも

のと考えられる。

3. 低緯度・赤道域電離圏研究

最近では、GRBR の低緯度・赤道域への展開が開始されている。ESF のプラズマ不安定としての理解は、磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象である。ESF は衛星通信や GPS 測位の障害要因となりうる顕著な擾乱であり、最近では GPS 測位が民間航空機のナビゲーションに採用され始めたため、発生予測が航空機の運行や安全を左右する重要な問題と認識されている。ESF 研究は赤道低緯度電離圏のホットトピックであり続けてきたが、ESF を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。米国は ESF の発生予測を主任務とする衛星 C/NOFS を 2008 年 4 月に軌道投入して観測を開始するなど、国際的にも大きな注目を集めている。

わが国においては、図 4 に示すように、京都大学生存圏研究所、名古屋大学太陽地球環境研究所、(独)情報通信研究機構が中心となって、タイ・ベトナム・インドネシア・中国に広がる電離圏の観測網が整備されつつある。上述の衛星 C/NOFS が 3 周波数のビーコン送信機を搭載していることから、我々は東南アジア域に GRBR 観測網を整備することとした。具体的には、2009 年 1 月にベトナム・バクリウ、3 月上旬にインドネシア・スマトラ島に位置する赤道大気レーダーサイト、3 月下旬にはタイ・プーケットへの GRBR 設置を完了している。さらにベトナム・チェンマイへの設置を予定している。

ESF の日々変動の研究には、多くの観測を組み合わせた総合的な取り組みが必要だ。そのなかでも衛星ビーコン観測は、TEC の変化として ESF 発生以前の段階の電離圏の変動を捉える点で貢献ができると考えている。特に衛星 C/NOFS は低緯度域を中心にほぼ東西に飛翔しているため、南北に磁力線に沿って伸びる構造を持つ ESF をほぼ真横に横切る観測が可能となる。従来にない観測データが得られるものと期待している。

4. まとめ

本研究ではソフトウェア無線専用のオープン・ソフトウェア／ハードウェアを利用した衛星ビーコン観測用のデジタル受信機 GRBR の開発状況について報告した。実利用として、これまで信楽を中心とする 3 点ネットワーク観測を行って、トモグラフィ解析から電子密度の緯度・高度分布の推定を行った。また最近では ESF 研究へ貢献することを狙って東南アジア域への展開を進めつつある。今後は、GRBR の特徴である「低価格」「高性能」「オープン性」を活かして利用者を増やし、観測ネットワークを飛躍的に拡大して行きたい。

参考文献

Kilgus, C. C., Resonant Quadrafilair Helix, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, **AP-17**, 349-351, 1969.

Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki, High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **25** (16), 3079-3082, 1998.

Yamamoto, M., Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, *Earth Planets Space*, **60**, e21-e24, 2008.

(<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2008e/6011e021.pdf>)

GNU Radio, <http://gnuradio.org/>.

The Universal Software Radio Peripheral (USRP), <http://www.ettus.com/>.

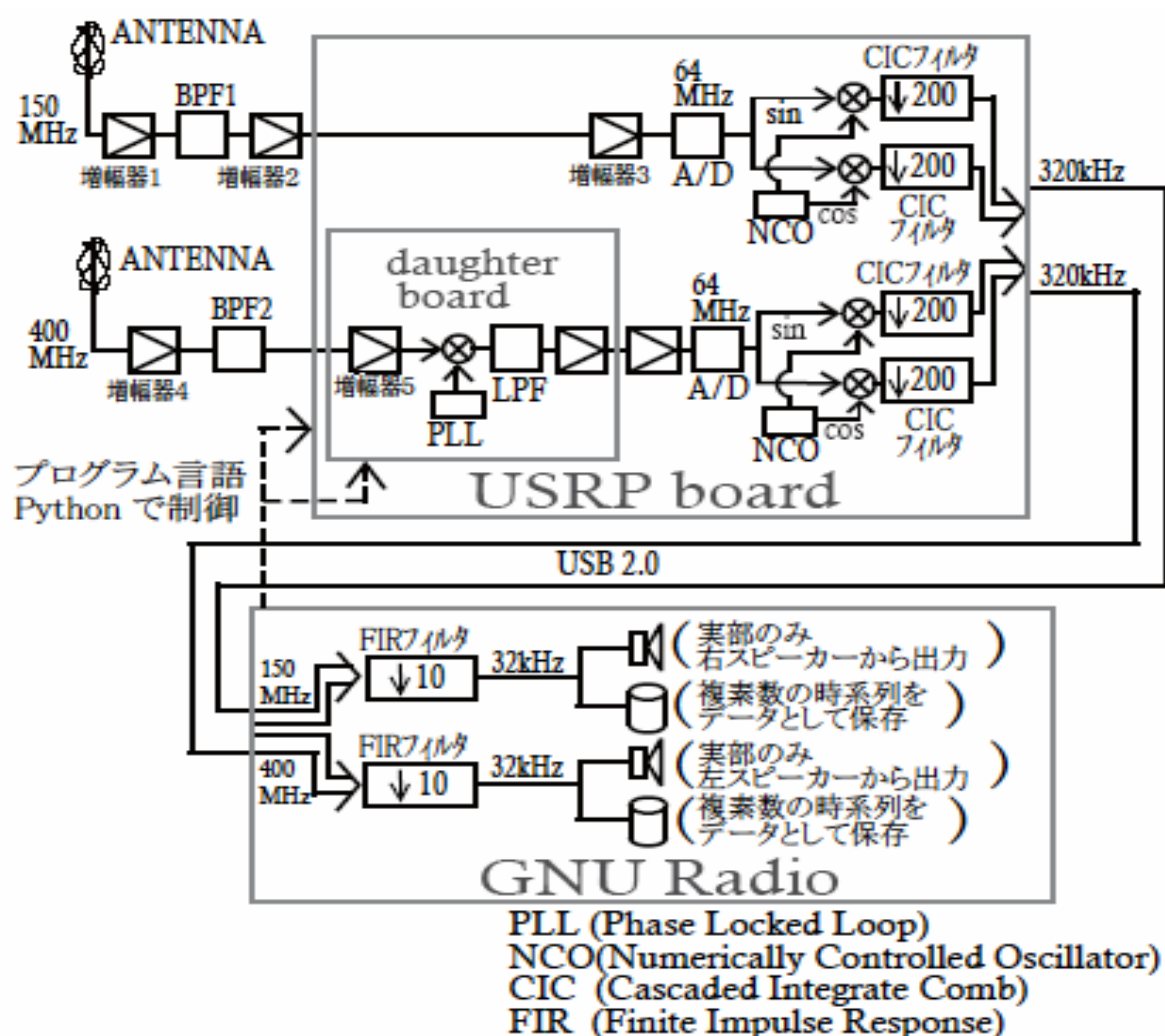


図1：デジタル・ビーコン受信機のブロック図



図 2 : ビーコン受信機の配置図。各点の間隔は約 150km である。衛星パスは南北に近いことトモグラフィ解析に適している。

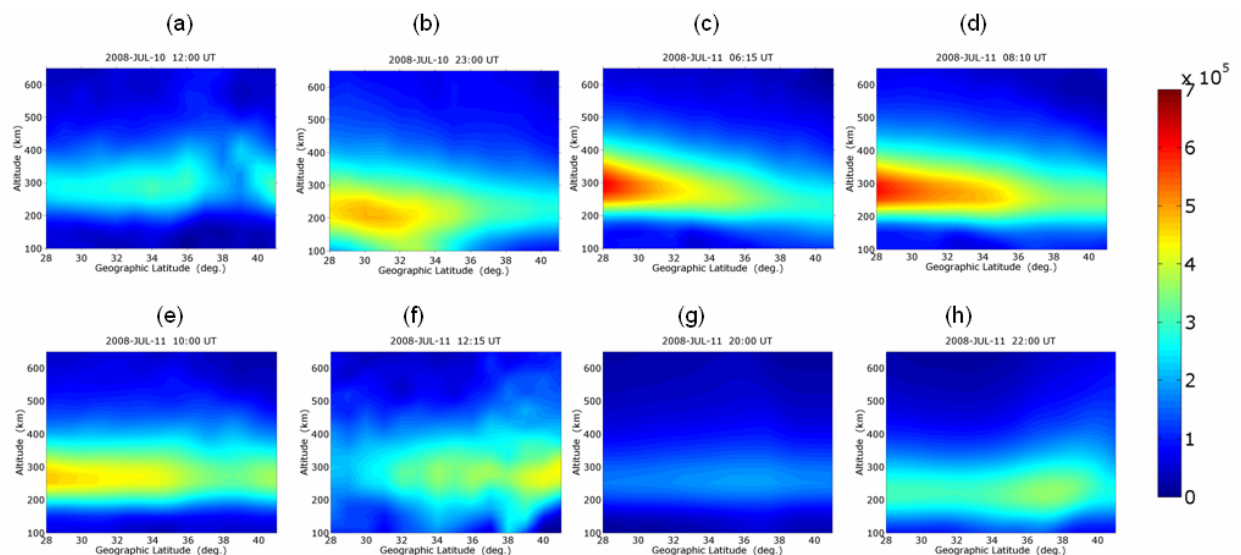


図 3 : 2008 年 7 月 10~11 日の観測からトモグラフィ解析で得られた電子密度分布の緯度・高度分布。(a) 2008 年 7 月 10 日 12:00UT (21:00LT), (b) 23:00 UT (09:00LT), (c) 7 月 11 日 06:15UT (15:15LT), (d) 08:10UT (17:10LT), (e) 10:00UT (19:00LT), (f) 12:15UT (21:15LT), (g) 20:00UT (05:00LT), (h) 22:00UT (07:00LT)。

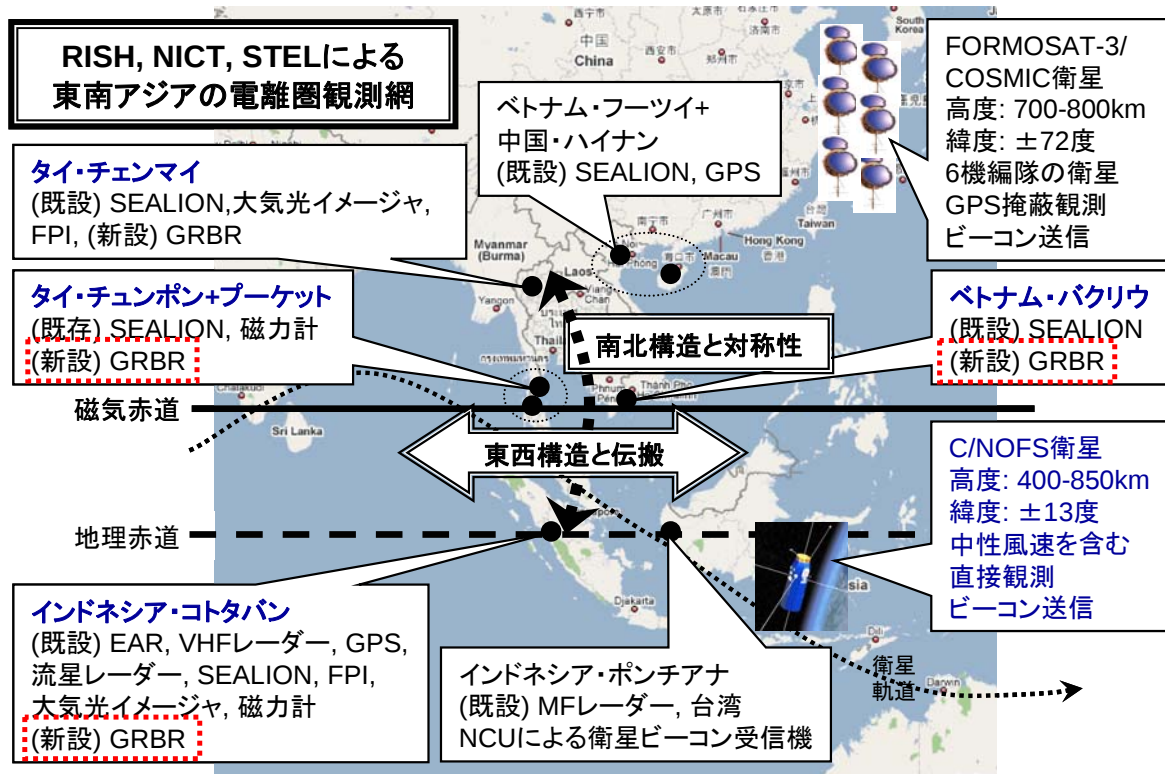


図4：京大生存圏研究所(RISH)、名古屋大学太陽地球環境研究所(STEL)、(独)情報通信研究機構(NICT)による東南アジアの電離圏観測網。2009年3月末現在で、GRBRはベトナム・バクリウ、インドネシア・コタバン、タイ・プーケットに設置済みである。