# **2-8 Programmable SoC を用いた FMCW イオノゾンデの開発** *2-8 Programmable SoC-based FMCW Ionosonde*

#### 石橋弘光 山川浩幸

ISHIBASHI Hiromitsu and YAMAKAWA Hiroyuki

我々は、チェンマイ (タイ)・チュンポン (タイ)・コトタバン (インドネシア)・バクリゥ (ベト ナム)・セブ (フィリピン)の東南アジア 4 か国 5 拠点に展開した赤道域電離圏観測網 (SouthEast Asia Low-latitude lonospheric Network: SEALION) において、可搬型 FMCW イオノゾンデシステ ムによる電離圏観測を 10 年以上にわたって運用している。しかし、基板劣化など機器の老朽化 及び熱帯域で頻発する雷害のため、次第に観測システムの維持や観測継続が困難になってきた。 さらに、近い将来、FMCW イオノゾンデ搭載の FPGA のような主要 IC の供給が、途絶えてしまう ことも懸念されている。こうした経緯から、換装可能な新システムの導入が喫緊の課題として浮 上してきた。ここでは、現在行っている SoC (System-on-a-Chip) プラットホームを用いた次期可 搬型 FMCW イオノゾンデシステムの開発経過の概要を報告する。

NICT's portable and low-power FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) ionosonde system has been under operation for over 10 years at 5 sites in 4 countries in Southeast Asia: Chiang Mai and Chumphon (Thailand), Kototabang (Indonesia), Bac Lieu (Vietnam) and Cebu(Philippines). This ionospheric observation network, called as the Southeast Asia Low-latitude lonospheric Network (SEALION), has basically been operated remotely via the internet. However, because of system deterioration and frequent lightning damages in the tropical region, it becomes difficult to maintain the system and keep observations. In addition, supply of some of indispensable ICs, such as the FPGA embedded in the FMCW ionosonde, will be stopped in near future. Therefore, the development of a new ionosonde system is urgent issue for us to improve the SEALION. We have started to develop a new FMCW ionosonde system using the Xilinx Zynq SoC (System-on-a-Chip). This is a progress report for these past 2 years.

# 1 はじめに

東南アジアに展開している赤道域電離圏観測網 (South East Asia Low-latitude Ionospheric Network: SEALION)[1]で運用中の可搬型 FMCW イオノゾンデ システム(以下「現行可搬型」と呼ぶ)は、運用開始から 20 年近く経過しているため、実装されている電子部品 の耐久性や現地での落雷サージなどに起因する経年劣 化の問題を抱えている。これまで故障のたびにパーツ 交換などの修理対応を行ってきたが、設計寿命を超え た回路基板は、基板パターンが脆く剥落しやすいため、 製造元でも修理困難な機器が増えてきているのが現状 である。また、開発当初は大量生産されていた FPGA 等の主要半導体は、現在では入手困難となっているも のが多く、同じ仕様の代替機の新規製作は難しくなっ ている。そのため、SEALION による赤道域電離圏観 測を今後も安定して運用するためには、こうしたシス テム老朽化の問題に対して早急に対処する必要がある。 一方で、観測サイトは東南アジアに位置するため、現 地作業の機会が限られており、その運用はネットワー ク越しのリモート作業に頼らざるを得ない。ネット ワーク運用に関しては、年々ネットワークセキュリ ティの重要性が増しており、SEALION 開始当初より その運用体制について議論し見直し検討を進めてきた。 ここで、SEALION でのイオノゾンデシステムの運用 にあたっての具体的課題は以下の3項目にまとめられ る。

- ①ネットワークセキュリティ運用
- ②観測サイト内 PC 群の運用効率及び費用対効果の
   改善
- ③熱帯域特有の雷害への対策

①については、観測サイトで運用する PC 群が主な保

護対象となるが、それぞれ個別にセキュリティ対策を 施す一方で、ファイヤウォール機能を有するブロード バンドルータによるネットワークセキュリティの一元 管理を実施することで対応している。②について、現 行可搬型システムの例を挙げると、運用上の必須要件 である機器制御とデータ転送に対して PC を1基ずつ 割り当てる2基体制で当初スタートしたが、相次ぐ CPU 処理性能の向上によって、現在では1基の PC に 機能集約して運用している。③については、観測サイ トで頻発する落雷・停電・瞬停による観測中断や機器 故障に度々悩まされており、長年にわたって各観測サ イトの立地環境に合わせた対策を講じてきた。

本稿では、可搬型の老朽化及び課題②に関連して、 現在取り組んでいる SoC (System-on-a-Chip)を用いた 次期可搬型 FMCW イオノゾンデシステム(以下「次期 可搬型」と呼ぶ)の開発状況について報告する。さらに、 ③に関連して熱帯域に位置する SEALION 観測サイト で頻発する雷害への対策についても紹介したい。

### 2 現行可搬型のデジタル信号処理

まず次期可搬型のベースとなった現行可搬型の FPGA (Field-Programmable Gate Array) によるデジ タル信号処理に触れたい。利用者が構成を設定できる 集積回路として 1990 年代に広く普及した FPGA は、 ハードウェアに依存しないデジタル信号処理回路の製 作・実装が可能な PLD (Programmable Logic Device) の代表格であり、現在に至るまでその高い汎用性と柔 軟性のために家電製品から研究観測機器まで幅広い用 途で使われている。情報通信研究機構(NICT)の FMCW 方式イオノゾンデにおいても、1990 年代後半 から FPGA によるデジタル信号処理回路の集積化が 進み、装置の大幅な省スペース化・軽量化が実現して、 文字どおりの可搬型 FMCW イオノゾンデとして SEALION の海外展開に寄与してきた [4]。しかし、こ れら直接的な恩恵を被る一方で、SEALION の運用を 通じて新たな課題や可能性も表面化してきた。

現行可搬型に実装された SRAM 型 FPGA は、電源 投入のタイミングでコンフィグレーションデータが基 板に搭載された Flash メモリーから FPGA にロードさ れた後、USB 接続された制御 PC から現行可搬型のデ ジタル信号処理インターフェイスとして認識される。 つまり、理屈の上では外部から Flash メモリーにアク セスできれば、ハードウェアに手を加えることなくデ ジタル信号回路の更新が可能であり、運用面でのフレ キシビリィティが格段に増す。しかし、可搬型の開発 当時、Flash メモリー内のコンフィグレーションデー タの更新は、FPGA と JTAG ケーブル等で外部接続さ れた PC 上で行われるのが一般的であり、加えてコン フィグレーションデータ作成にも比較的時間を要した ため、観測の現場で実施される機会はなかった。イン ターネットが普及した現在では、ハードウェアを制御 するファームウェア搭載の電子機器が普及し、開発元 から更新版をダウンロードして機能アップするのが一 般的になっているが、SEALION 開始当初、現行可搬 型では、まだそのようなリモート運用は難しかった。 一方、現行可搬型の制御 PC が担う機能は、観測スケ ジュール管理・周辺機器制御・データ格納等、いずれ も1990年代後半の汎用 PC の能力でも十分対応可能で あり、ハードウェア的には、ハイスペック仕様よりむ しろ運用面でのメリットの大きい省電力・省スペース などのロバスト性が求められた。実際、IoT 隆盛の 2010 年代後半には、Raspberry Pi Foundation によっ て開発された Raspberry Pi などのシングルボードコ ンピュータへの換装も検討された。

## SoC (System-on-a-Chip) プラットホームに 3 よる FMCW イオノゾンデシステムの換装

2010年代に入って、Xilinx 社の ZYNQ や Altera 社 の Cyclone V SoC など Processing System (PS) (CPU + 各種 Peripheral) に FPGA の Programmable Logic (PL) 部を SoC (System-on-a-Chip) として統合し1 チッ プ化した新しいタイプの集積回路が登場した。PL ブ ロックの FPGA にデジタル信号処理回路、PS ブロッ クに Linux などの OS をインストールして PS ブロッ クに実装される各種 Peripheral に周辺機器制御やネッ トワーク通信の機能を割り当てれば、現行可搬型の FPGA や周辺機器、観測制御プログラムなどのハー ド・ソフト両方のリソースを継承して現行可搬型と換 装可能な新しい FMCW イオノゾンデシステムを SoC プラットホーム上に構築することができる。これは、 観測システム継続を保証する上で必須であるが、加え て以下のように多岐にわたる恩恵がSoC導入から見込 める事が判明した。

①前述の現行可搬型が抱える運用上の課題の解消
②制御プログラムのデータ収集機能の高速化が期待 される SoC チップ内部の PS-PL 間バス 現行可搬型の制御 PC-USB-FPGA 方式を凌駕する 高速データ転送が可能である。

- ③ SoC 導入による配線減で、機器制御にありがちな 基板上配線・ケーブルの物理的接続によって生じ るインピーダンスがもたらす信号伝送遅延などの 障害発生リスクの低減
- ④システム構成機器の点数減による故障率の低減
- ⑤一部周辺機器も集約した上での省電力化・小型軽

量化

⑥海外輸送など安定した後方支援を担保する観測装置の耐衝撃性・耐振動性の向上

以上のように SoC 導入の机上検討を重ねた結果、 我々は、新たなプラットホームとして Xilinx 社製 Soc ZYNQ-7000 シリーズ ZC-706 を採用し、次期可搬型 FMCW イオノゾンデシステムの開発に着手した。

#### 3.1 ハードウェア

次期可搬型システムのハードウェア構成は、①制御部、② LPF Bank、③広帯域パワーアンプに大別される。**3.1.1 制御部** 

図1のとおり、Zynq-7000シリーズは、PS ブロック に Arm Cortex-A9 MPCore CPU を中核として、オン チップメモリー・外部メモリーインターフェイス・豊 富な I/O ペリフェラルを備えている。Zynq-7000 SoC ZC706 は、このチップを搭載した組込みシステム用開 発キットであり、機能拡張やカスタマイズ可能な業界 標準の FPGA Mezzanine Card (FMC ANSI/VITA 57.1)を備えるなど、次期可搬型開発のプラットホーム として十分な仕様を有している [2]。

図2に次期可搬型 FMCW イオノゾンデ制御部のブ ロック図、図3に同回路構成図を示す。開発方針は、以 下の三つに集約される。

- ・ FMC を用いた RF 部、送信部、受信部のモジュール化
- 現行可搬型の周辺機器 (PreSelector, OBS Selector など)のオンボード集約化



図 1 ZYNQ-7000 シリーズ 機能ブロック図 Xilinx 社 ZYNQ-7000 紹介記事より引用 (https://japan.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000. html)

- ・現行可搬型とのハードウェア上位互換
  - ①周辺機器 (LPF Bank・広帯域アンプ(後述))と物
     理・論理両面でのインターフェイス互換

②現行可搬型主幹機能の基板実装

SEALION 運用開始当初から、イオノグラムデータの質 の向上や安定運用のために故障修理やメンテナンス作 業に加えて、必要に応じて周辺装置追加や搭載部品の 換装が行われてきた。そこから得られた知見は、基板搭 載部品の選定や周辺機器のオンボード化による点数削 減などの形で次期可搬型の設計に落とし込まれている。 以下の節で、構成要素ごとに設計要点を簡潔に述べる。 3.1.1.1 信号処理系

受信アンテナ(Rx Ant.)から入力された受信信号及 びFMCWレーダー[3]の基準信号となる自分自身の送 信波は、リミッタ切替部によって信号を選択されると 同時に過大入力とならないよう制御され、増幅フィル タ部に入り、後に続く AD 変換に必要なレベルまで増 幅される。このアナログ信号は 125 MSps のサンプリ ングレートの AD 変換回路によって 16 bit のデジタル データに変換される。このデータは、ZYNQへ渡され、 復調したい周波数の正弦波(sin)とその 90° 位相の異な



図 2 次期可搬型 FMCW イオノゾンデ制御部 ブロック図



図3 次期可搬型イオノゾンデ制御部 回路構成図

る正弦波(余弦波:cos)を掛け合わされたそれぞれの信 号を CIC フィルタに入力する。 CIC フィルタは (Cascaded Integrator Combi) 微分回路と積分回路で 構成され、サンプリングデータを 12,500 分の1 に間引 きする。アナログ回路では、低い周波数に変換する周 波数変換回路に相当する。さらに FIR フィルタによっ て必要な信号付近に帯域を絞ると同時にデータ補完を 行い 32 bit 幅の 10 kSps のデジタルデータとし、Dual Port RAM に転送する。次期可搬型は、ここまでの回 路を2系統持っており、二重化されている。受信処理 及びデータ転送を ZYNQ-7000 SoC の PS ブロックで ある ARM プロセッサで行っている。この PS ブロッ クがイオノグラム画像作成、後述する Apache/CGI 処 理など外部とのインターフェイスを担っている。この PS ブロックは送信処理も担っている。送受信に関わ るパラメータは、パラメータファイルとして次期可搬 型の本体内に保存される。このパラメータファイルを PS ブロックの ARM プロセッサが読み取り、送受信を 制御する。この ARM プロセッサは Linux 上で、各種 アプリケーションの実行を行う。次期可搬型は、GPS 受信機を搭載し、時刻信号を基準及び送受信タイミン グの基準信号とする。この基準信号に従って ZYNQ-7000 SoC PS ブロックの ARM プロセッサが動作する。 この ARM プロセッサは、疑似乱数生成回路を制御し、 32 bit の数値的疑似乱数信号を発生させ、FMCW の変 調信号を生成する。同時にこの ARM プロセッサは、 数値発振器 (NCO) を制御し所用周波数の搬送波を生 成する。変調信号を掛け合わせ、送信信号とする。こ こまでは数値的なデジタル信号として処理される。こ の後に続く D/A 変換回路 (DAC) で短波帯のアナログ 信号に変換され増幅回路、外部の広帯域パワーアンプ 及び LPF Bank を経て空間に発射される。

#### 3.1.1.2 RF 系・受信系

・搭載部品の見直し

受信特性に影響する重要部品の一つである LNA (Low Noise Amplifier)は、外来波混信に対して飽 和しにくい高 IP3 特性を有する Mini-Circuits 製 TSS-13 HLN+ を採用した (図 2 RF 系)。また、受信 波の A/D 変換を担う IC には、16 bit/125 MHz で動 作する Analog Devices Inc. 製 AD9268 BCPZ-125-ND を採用している (図2受信系)。

・現行可搬型の周辺機器のオンボード化

以下二つの周辺機器の機能を FMC カード基板上に 実装した (図 2 RF 系)。

① OBS Selector

受信系に搭載されるプログラマブルアッテネータ。 観測の障害となる強い放送波を減衰させる機能を有 する。減衰量は、観測プログラムによって制御され

る。また、アンテナ系から侵入する雷サージから観 測装置を保護するため、観測プログラムからの制御 で受信機への入力をオフにする機能を備える。現行 可搬型では、周辺機器「OBS Selector」の名称で受信 アンテナと受信部の間に装着されている。

(2) Preselector

受信系に搭載される8バンドのBPF (Band Pass Filter)。各バンドの BPF は信号処理系から出力さ れる切替信号で自動選択される。イオノゾンデによ る電離層観測では広範囲の周波数で受信を行うため、 どうしても受信系は受信帯域外の外来波の影響を被 るが、Preselector はこれらの影響による受信器の混 変調を低減させる機能を有する。現行可搬型では、 周辺機器「Preselector」の名称で受信アンテナと受 信部の間に装着されている。

3.1.1.3 送信系

前述の信号処理系で生成された送信信号からアナロ グ信号に変換するDAコンバーターは、16 bit/125 MHz Analog Devices Inc. 製 AD9726 BSVZ-ND を採用して いる。

なお、SEALION で展開する FMCW イオノゾンデ は、一つのアンテナ塔に送信局・受信局を配置する Monostatic 方式のアンテナ系で運用しており、送信ア ンテナから受信アンテナに回り込む直達波の影響を避 けるため、疑似ランダム符号 (Pseudo Random Noise) によって送・受の交互切換えを行う Pulsed Chirp 方式 を採用している[4]。本機でもこの方式を踏襲して、信 号処理系で生成される切替信号によって送・受切替処 理を行っている。さらに、後述する LPF BANK 制御 信号、広帯域パワーアンプ制御信号の受け渡しも送信 系で担っている。

#### 3.1.1.4 GPS 受信系

基板上に GPS モジュール (UART タイプの GPS レ シーバ)を搭載し、外部の汎用 GPS アンテナ(5 V タイ プ、LNA 内蔵型)と接続して運用される。出力信号は、 時刻情報とPPSの2種類で、信号処理系にUART (LVCMOS) インターフェイスを介して渡している。

3.1.1.5 電源系

現行可搬型と大きく異なるのは、電源ユニットを廃 して AC/DC アダプターを採用したことである。これ によって筐体の発熱を押さえることができ、冷却ファ ンも不要となり、重ねて大幅な軽量化・コンパクト化 も実現した。さらに、熱帯域で頻発する停電などの雷 害に備えて ZC706の GPIO を利用した自動停電検出機 能を新たに実装し、当該システムの保護に必要な退避 処理(パワーアンプ保護・無用な電波送信防止・外部 記憶装置保護など)を経て安全かつ自動的にシステム 停止できる運用環境を実現した。後述のように雷害対

策は、SEALION 運用に必須の課題であり、観測サイ ト単位の雷害対策に加え、このような個々の観測機器 レベルの対策も非常に重要である。

#### 3.1.2 LPF Bank

LPF Bank (三光社製 MODEL SKI-19060-20)は、周 波数帯域の連続した8個の Low Pass Filter を内蔵し ており、LPF Bank I/O (Dsub 15 pin)を介して制御部 から制御信号を受け取って高周波リレーによってバン ド変更切替えを行っている。現行可搬型の物理イン ターフェイスを踏襲した設計になっているが、これま での運用実績から高い耐久性を評価された構成部品を 採用するとともに (例えばバンド切替え用スイッチ回 路の GIGAVAC GR6CBA335)、モジュール配置の再 考による省スペース化を実現している。

#### 3.1.3 広帯域パワーアンプ

現行可搬型でも運用されている広帯域パワーアンプ (R&K 製 CA501 K030-5050 R)を引き続き使用してい る。PA I/O を介して制御部から R&K 社策定の拡張リ モートコマンドプロトコルにのっとった制御信号を受 け取り、制御部と連動して GAIN 制御や電源 ON/OFF などリモート操作による観測制御や安全な観測システ ム停止が可能となっている。

### 3.2 ソフトウェア

次期可搬型に採用した ZYNQ-7000 Soc は、CPU(PS ブロック)と FPGA(PL ブロック)の両方の機能を内包 したチップであり、現行可搬型で外付けの制御 PC が 担っていた機能は、次期可搬型では搭載された ZYNQ-7000 Soc に統合されて、外部接続の制御 PC が 不要となっている。この現行可搬型と次期可搬型の違 いは、FMCW イオノゾンデシステムとしてのブート シーケンスに顕著に現れている。現行可搬型は、単体 では Boot Loader の機能を有しておらず、制御 PC 側 からは USB デバイスとして識別される。つまり、観測 制御の主体はあくまで制御 PC であり、現行可搬型は LPF Bank、広帯域パワーアンプ等の周辺装置と同等 の制御 PC の付属装置に過ぎない。これに対して、 ZYNQ-7000 SoC では、多段式の Boot Loader によっ て、PS ブロックの OS (Linux) のブートと PL ブロッ クの FPGA のコンフィグレーション (初期化)を一連 のブートシーケンス中で処理している。あらかじめ ブートデバイスとして外部記憶メディアの SD カード を割り当てた場合、ZYNQ SoC 起動時に下記のとおり ブートプロセスが進行する (図4参照)。

- SD カードから FSBL をロードし、内部 SRAM に 転送し制御を FSBL に移す。
- FSBL が、内部 SRAM で実行される。
   PS ブロックの内蔵 Peripheral の実行
   PL ブロックに BitStream をダウンロードする
   Boot デバイスにプログラムされた Second Boot
   Loader(U-boot)を SDRAM に転送し制御を U-boot
   に移す。
- ③ U-Boot は、SD カードから Linux Kernel と Device Tree をメモリーにロードし、Linux Kernel に制御 を移す。
- ④ Linux Kernel の初期化シーケンスが起動する。
   Kernel に含まれている Device Driver が、メモリーにロードされている Device Tree を参照しながら、各種 Peripheral の設定と起動を行う。

これに引き続いて Linux (Ubuntu)下で FMCW イオ ノゾンデシステムのブートシーケンスが開始される。



	型名 : Xilinx Zynq-7000 SoC ZC706		
OS	Ubuntu 18.04.3 LTS (GNU/Linux 4.9.0-xilinx-v2017.3 armv7l)		
CPU	ARMv7 Processor rev 0 (v7l)		
Memory	1 Gbyte		
SD Card	16 GByte		
	Partition #1 : FAT32 Boot disk		
	Boot.bin # 中身は FSBL, U-boot, PL/FPGA 用 bitstream		
	Image.ub # 中身は Kernel Image, Device Tree		
	Partition #2 : EXT3 Root file system		
	/opt/skmanager # FMCW Ionosonde 制御アプリケーション		

表1	次期可搬型搭載	Xilinx Zynq-7000 SoC ZC706 諸元
----	---------	-------------------------------

OSにはUbuntuを採用し、南極昭和基地で運用して いるモジュラー型 FMCW イオノゾンデシステムの制 御ソフトウェア (Skmanager2 for Linux)を基に開発 した。現行可搬型からの換装に配慮して、制御部/信 号処理系で生成される生データに加えて、現行可搬型 と互換性のあるデータも生成できる仕様になっている。 さらに、制御ソフトウェアの各種データフォーマット、 制御ソフトウェア観測シーケンスについても現行可搬 型から継承されている。

さらに、apache を導入して、WEB ブラウザ経由の 機器制御を実現し、現地だけではなくネットワーク経 由の遠隔監視も可能となったことから、とりわけ東南 アジアに展開するイオノゾンデ観測網の運用体制強化 が期待される。具体的には、①最新の観測状態表示、 ②過去の観測結果一覧表示、③装置ステータス表示、 ④装置自己診断等を実行する CGI が実装されている。

最後に完成した次期可搬型 FMCW イオノゾンデシ ステムの写真を図5~8に示す。

## 4 試験観測

次期可搬型による試験観測結果を示す。2021年6月 現在、国分寺局、北海道サロベツ、鹿児島県山川及び 沖縄県大宜味の各観測拠点でパルス型レーダー



図 5 次期可搬型 FMCW イオゾンデ制御部内部写真



図 6 次期可搬型 FMCW イオゾンデ制御部内部写真

VIPIR2による5分ごとの定常電離層垂直観測が行わ れている[7]。並行して各局相互間の斜入射観測も行わ れているため、試験観測に使えるのは、これら一連の 観測の狭間、およそ1分間しかない。よって、試験送 信可能な1分弱の時間で1回の観測を終えるために、 送信波Sweep Rateを現行可搬型の5倍にあたる 500 kHz/secに設定して試験観測を行った。図9左は、 2021年6月14日18:02(日本標準時)の観測結果であ るが、F層のトレースが明瞭に認められる。図9右に 示すとおり、ほぼ同じ時間帯の18:00(日本標準時)の VIPIR2定常観測にも同様のエコーが認められており、 次期可搬型は適切に動作していると考えられる。

なお、この試験観測は、電離圏観測のための実験試 験局(小平市上水南町 4-2 NICT 内)として令和 3 年 5 月 20 日付で無線局変更許可(無線局種別:実験試験局



図7 次期可搬型 FMCW イオゾンデ制御部 背面写真



図8 次期可搬型 FMCW イオノゾンデシステム 上から順に LPF Bank, 制御部,広帯域パワーアンプ



免許番号:関第1982号)を受けて、次期可搬型の調整のために実施したものである。

# 5 雷害対策

SEALIONの観測サイトは、いずれも現地の協力研 究機関の一角を間借りして運用している。雷サージの 主な侵入経路となる電源環境、接地環境やネットワー クインフラは、観測サイトごとに様々である。また、 SEALIONを展開する熱帯域では、電力網への落雷に よる停電や瞬停も頻発している。我々は、観測サイト ごとに調査を行い、その結果をもとに雷害対策を立案 して実行している。具体的には、耐雷トランス・SPD (Surge Protective Device)・接地系・無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power Supply)等を適所に配置 して雷害から観測システムを包括的に保護する「雷保 護協調」の手法に基づいている。対策の骨子は以下の とおり(図 10)。

- ①接地分離コンセプトに基づく観測システムの保護
   ②外部から絶縁・隔離された観測システム専用接地系の導入
- ③接地分離コンセプトに基づき設計された耐雷トラ ンスの導入
- ④SPD (Surge Protection Device)の適所導入
- ⑤防 雷 システム (PDCE: Para-ryos Desionnizador Carge Electrostatica) の導入
- ⑥UPSの整備(停電・瞬停・瞬停対策)

## 6 むすび

ここまで、喫緊の課題である現行可搬型換装を念頭 に次期可搬型の開発状況を述べてきた。ここで、ソフ トウェア無線 (SDR: Software Defined Radio) 技術の 面に視点を転じてみる[6]。SDR技術の要諦は、アナロ グ高周波部に対してデジタル信号処理部の比率を高め て、ソフトウェアによるシステム機能変更を実現する ことにある。その鍵となるのは、ソフトウェアでシス テム機能変更可能なこと(Reconfigurability)と機器外 部からソフトウェアをダウンロードしてプログラム書 換えが可能なこと(Downloadability)の二つの機能で ある。3.2 で述べたとおり、Zyng-7000 SoC ZC706 採 用によって、次期可搬型はこの二つの機能を獲得して いる(図11)。今後は、ソフトウェア無線機としてのポ テンシャルを生かして、周辺機器などのハードウェア はそのままにコンフィグレーション変更だけで FMCW 方式/パルス方式の切替可能な新しいタイプ のイオノゾンデの開発が期待される。また、観測プロ グラムや OS のアップデートと FPGA のコンフィグ レーションアップデートを一括して実行することも可 能である。これは、プリンタなどの電子機器のファー ムウェア更新と類似の処理である。次期可搬型の導入 で、SEALION で課題となっているネットワーク越し のリモート運用の改善につながることも期待できる。



図10 雷保護協調概念図



FMCW Ionosonde block diagram based on the SDR technique 図 11 SDR 技術に基づく FMCW イオノゾンデのブロック図

### 謝辞

NICT 在職中、次期可搬型 FMCW イオノゾンデの 仕様策定にご尽力いただいた国立極地研究所の近藤巧 氏、Xilinx ZYNQ-7000 SoC の機能評価に有益な助言 をいただいた(株)三光社の石垣善教、武田裕介の両氏、 試験観測にご協力いただいた西岡未知主任研究員に感 謝する。

本研究は、総務省電波利用料委託業務「0155-0112 電 波伝搬の観測・分析の推進」に基づき実施されている。

#### 【参考文献】

- 1 津川卓也, "東南アジア域における電離圏観測: SEALION プロジェクトの 現状と今後の展望,"情報通信研究機構研究報告,本特集号, 2-2, 2021.
- 2 Xilinx, "Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview," https://japan.xilinx.com/ support/documentation/data\_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf
- 3 D. E. Barrick, "FM/CW radar signals and digital processing," NOAA TECHNICAL REPORT ERL, 283-WPL26, 1973.
- 4 野崎憲朗, "3-2-5 FMCW イオノゾンデの開発," 情報通信研究機構季報, vol.55 nos.1-4, pp.257-267, 2009.
- 5 Xilinx, "Zynq-7000 SoC Technical Reference Manual UG585 (v1.13)," April 2, 2021. https://japan.xilinx.com/support/documentation/user\_ guides/ug585-Zynq-7000-TRM.pdf
- 6 藤井義巳, "ソフトウェア無線 (SDR) 技術の最新動向と将来展望," ITU ジャーナル, vol.47, no.11, pp.17-21, 2017,11.
- 7 西岡未知、前野英生、山川浩幸、津川卓也, "VIPIR2 による国内電離圏定 常観測," 情報通信研究機構研究報告,本特集号, 2-1, 2021.

石橋弘光 (いしばし ひろみつ) 電磁波研究所 電磁波伝知のセンター

宇宙環境研究室 惑星間空間物理学、電離層物理学



山川浩幸 (やまかわ ひろゆき)

電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 有期研究技術員