

## ソフトウェア無線システムの導入による あわらキャンパス短波電波観測システムの今後の展望

中城智之\*, 青山隆司\*, 寺嶋一博\*\*

### A prospective view of HF-band radio observation system in Awara campus by introducing a software-defined radio

Tomoyuki Nakajo\*, Takashi Aoyama\* and Kazutaka Terashima\*\*

A HF-band radio observation system at Awara campus in FUT has shown successful results on observation of radio bursts from Sun and Jupiter in the past 10 years. Based on the past achievements, we have recently extended the observation system by introducing “GnuRadio” and “USRP2” which make up a software-defined radio (SDR) system expected to enable us to carry out more advanced observations that has been difficult to realize until now. In this paper, we describe current observation projects based on the SDR for not only Jovian and Solar radio bursts but also radio emissions concerning with lightning in Hokuriku coastal area of Japan sea.

Keywords: software defined radio, Jovian decametric radiation, Solar radio bursts, lightning, environment of Hokuriku area, radio interferometer

#### 1. 序

HF 帯から VHF 帯 (3MHz から 300MHz まで) の電波の領域においては、木星オーロラの発光や太陽フレアの発生に伴い宇宙から到来する電波放射がよく知られている。また、北陸に住む私たちに身近な分野では、北陸地域の日本海沿岸における冬季雷に伴う電波放射が挙げられる。

福井工業大学では、あわらキャンパスにおいて 2000 年から HF 帯の 20-40MHz を受信可能な電波観測システムが導入され、これまで主に木星や太陽起源の電波観測が実施されてきた。本観測システムは、3 基のアンテナによる基線長 100m 級の 3 基線干渉計システムであることが特徴であり、特に木星電波については、干渉計による客観的な出現頻度観測を 10 年近くの長期に亘って実施してきた世界的にも類のない観測システムである。現在、長期間データの解析によってその成果が現われつつあり [1]、今後のさらなるデータの蓄積が期待される。

一方、本学では平成 23 年度より、文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に採択された「北陸地域の環境の計測と保全に関わる研究拠点形成」プロジェクトが 27 年度までの 5 か年計画でスタートした。このプロジェクトは、北陸地域の環境を「大気」「化学」「生物」の 3 領域から統合的に把握し新たな研究分野を切り開くことを目的としており、本電波観測システムも雷

---

\* 電気電子情報工学科、\*\* 大学院電気工学専攻 23 年度卒業生

起源電波の観測による雷雲の監視の視点で大気領域からの寄与を期待されている[2,3]。

## 2. GnuRadio と USRP2 によるソフトウェア無線システム

このように活躍が期待される本観測システムであるが、現在、さらなる成果を挙げるべくソフトウェア無線システムの導入を検討し、必要なシステムの開発を進めている。ソフトウェア無線とは、主な信号処理をソフトウェアで行う無線システムのことで、従来のハードウェアに依存したアナログ方式と比較して、a)受信機の設定を柔軟に変更可能で、b)理想的な信号処理特性を持ち、c)同一の特性を持つ複数の受信システムの製作が容易という特徴を持つため、アナログ方式では実現困難な特性を持つ受信システムの構築が可能である。

図 1 に、導入を予定しているソフトウェア無線システムのブロック図を示す。Ettus Research 社の無線ハードウェア USRP2 (図 2) とオープンソースの信号処理ソフトウェアパッケージ GnuRadio で構成される。アンテナで受信された信号は、USRP2 のアナログのフロントエンド部を通過後、ただちに AD 変換によってデジタル信号に変換され、その後はすべてソフトウェアでの信号処理となる。はじめに FPGA で基本的な信号処理が行われた後、ギガビットイーサネットを介してパーソナルコンピュータに送られる。パーソナルコンピュータでは、GnuRadio のソフトウェア群がさらに高度な信号処理を行う。他のソフトウェア無線が FPGA を中心としたシステムであるのに対して、信号処理の中心がパーソナルコンピュータ上の GnuRadio であることが特徴である。

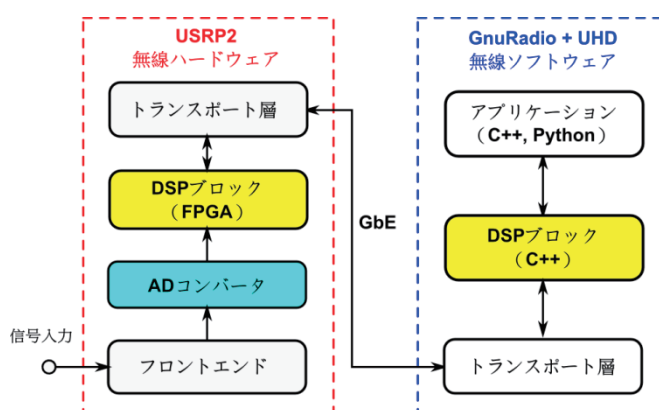


図 1. ソフトウェア無線システムのブロック図



図 2. USRP2 の外観

表 1. GnuRadio + USRP2 とアナログ受信機 NRD-545 の特性比較

項目	GnuRadio+ USRP2	NRD-545
観測可能周波数	1–200MHz	0.1–30MHz
帯域幅	192kHz–25MHz の範囲で可変	1, 2, 4.5, 10kHz から選択可能
位相安定性	1 度以下	5~10 度
ダイナミックレンジ	90dB	30–50dB
入力点雑音輝度温度	$3.8 \times 10^6$ [K]	$10^3 - 10^4$ [K]
ピーク雑音	25MHz ごとに $-60$ dBm (@入力点) のピーク雑音が存在	内部クロックに由来する 20MHz のピーク雑音が存在

表1に、現在あわらキャンパスで使用しているアナログ受信機 NRD-545 と、GnuRadio と USRP2 によるソフトウェア受信機の性能比較の結果を示す。従来のアナログ受信機にはない特徴を生かして、次のような観測が可能になると期待される。

- a) 広い観測可能周波数を生かした 200MHz までの広帯域観測、
- b) 高いサンプリングレートによる帯域幅 25MHz までの広帯域波形観測、
- c) 広いダイナミックレンジを生かした発生電力の微弱な信号から強い信号まで対応する観測、
- d) 高い位相安定度を生かした高精度の電波源位置観測。

### 3. ソフトウェア無線を導入した新観測システムの概要

以上を踏まえ、現在、GnuRadio と USRP2 によるソフトウェア無線システムの広い観測周波数帯域を生かして観測周波数を 200MHz まで拡張し、従来の 20MHz から 40MHz 帯の観測システムと併せて、20–200MHz までを観測可能な HF–VHF 観測システムとするべく開発を進めている。

新しい観測システムに用いる VHF 帯の受信アンテナとして 50–1300MHz を受信可能なクリエートデザイン社の CLP5130-1 を用いる。CLP5130-1 を用いた新しいあわらキャンパス HF–VHF 電波観測システムのブロック図を図3に示す。2面の CLP5130-1 の出力を偏波分離器で右回りと左回り成分に分離し、帯域フィルタで 50–200MHz を選択する。その後、R&K 社の合成器 PDK510 で従来の 20–40MHz の出力と合成、同じく R&K 社の増幅器 LA020-0S で増幅する。LA020-0S は、対象周波数 10–500MHz、増幅度 40dB、雑音指数 1.5dB という広帯域かつ低雑音の高性能増幅器である。前置増幅部の出力は、20–40MHz と 50–200MHz の信号で構成される右回りおよび左回りの信号となる。この信号を、既設の約 335m の 5D-2V 同軸ケーブルで観測室内に伝送する。この同軸ケーブルによる減衰が 15dB から 40dB 程度見込まれるため、観測室内の初段で再度 LA020-0S による増幅を行い、R&K 社の分配器 PDK510 で分岐した後、帯域フィルタで 20–40MHz および 50–200MHz の信号を取り出す。その後、複数のシステムでの観測を可能とするため、さらに分配し、GnuRadio と USRP2 を用いた受信システムに信号を供給するだけでなく、従来の観測システムも引き続き動作させる。GnuRadio と USRP2 を用いた受信システムは、既設の GPS 周波数標準器と組み合わせて用いる。このシステムを 3 基構成し、20–200MHz の範囲をカバーする 3 基線短距離デジタル干渉計として動作可能なシステムとする。

### 4. 中期的展望—今後 5 年間で目標とする成果—

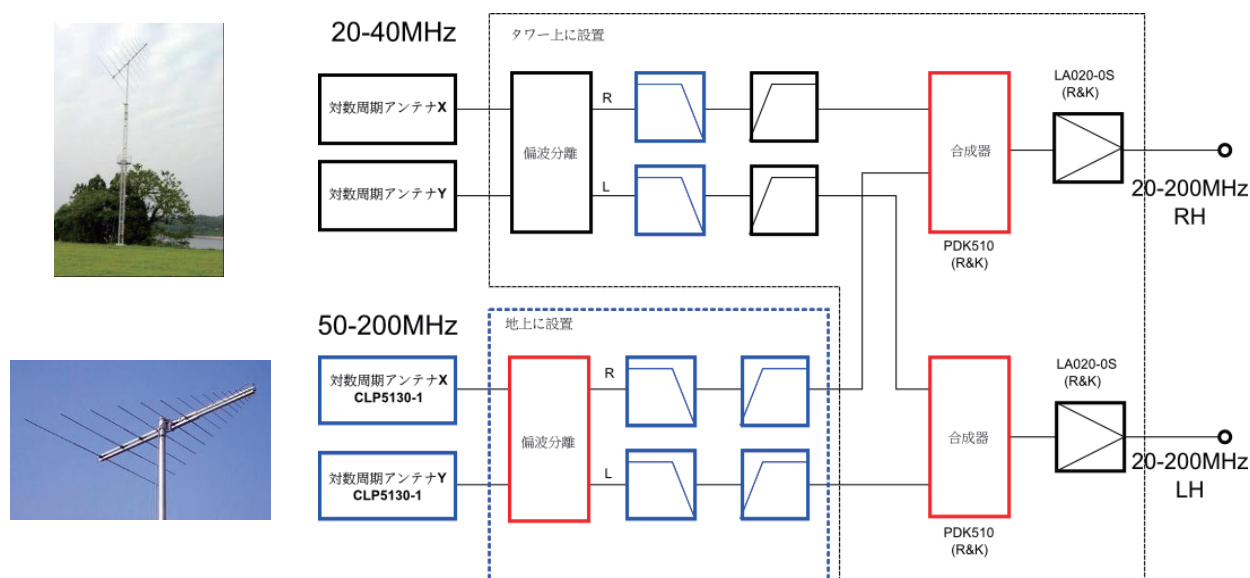
GnuRadio と USRP2 を用いたソフトウェア無線システムの導入による最大の特徴は、広帯域の波形観測が可能となる点である。この特徴と高い位相安定性により、従来にない高い精度での広帯域干渉計観測による電波源の位置およびイメージング観測が実施可能となり、木星、太陽および雷起源の電波観測において次の成果が期待される。

#### 4-1. 木星及び太陽電波

木星電波の研究において残されている課題の一つとして、電波源位置の南北問題がある。HF 帯における木星電波が極域の木星オーロラ帯から放射されていることは従来からよく知られてい

るが、電波放射機構の解明のためには、南北のどちらのオーロラに関係しているかが重要である。しかし現在に至るまで、地球電離層と惑星間空間における伝搬路上のプラズマの影響のため、干渉計を用いた直接観測による実証はなされていない。これまで私たちは、東北大学との共同研究として、基線長 500km 級の超長基線干渉計において 500kHz 離れた 2 周波数で同時に観測を行

(a) アンテナ及び前置増幅部（屋外）



(b) 観測室内

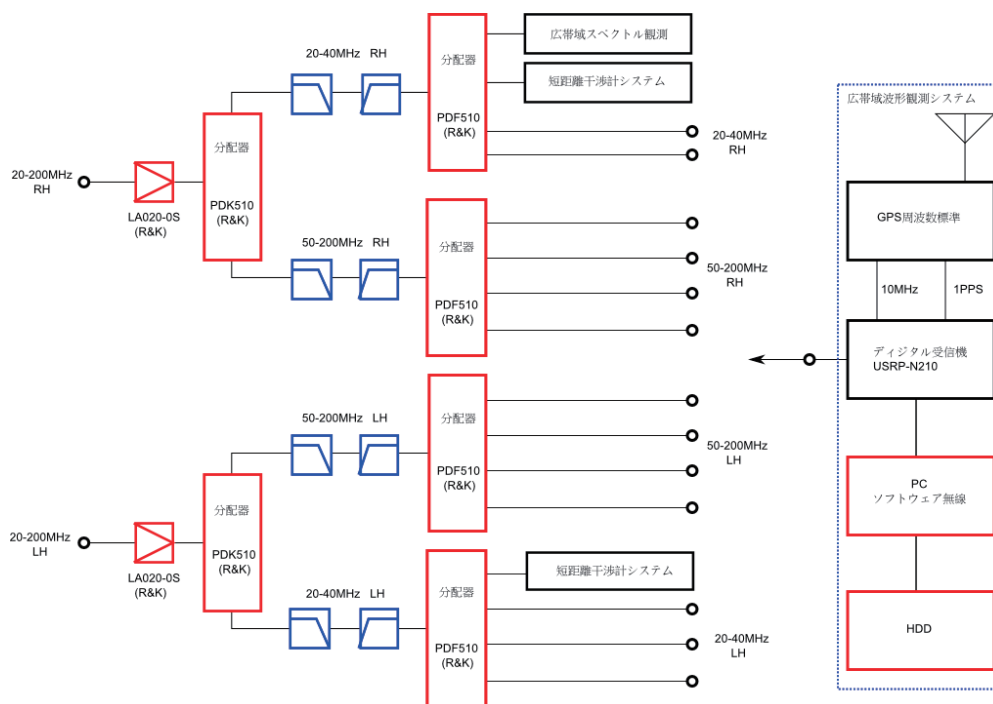


図 3. 開発中の新しい HF-VHF 観測システムのブロック図。(a)アンテナおよび前置増幅部、(b)観測室内の接続。アンテナの写真は、従来の 20-40MHz 帯用（上）と新しく付加する 50-200MHz 用（下）を示す。

うことによって、この問題の克服にチャレンジしており、興味深い観測結果を報告している[4]。図4は、現在、本学および高知高専、東北大学、情報通信研究機構鹿島の共同によって展開されている HF 帯の長基線干渉計ネットワークであり、本学あわらキャンパスは、このネットワークの中心に位置する重要な観測局となっている。今後、このネットワークにおいて GnuRadio と USRP2 のソフトウェア無線システムを用いた広帯域・超長基線観測を行うことにより、伝搬路上プラズマの影響の除去に向けて重要な観測結果が得られることが期待される。加えて、本質的には広帯域の波形観測であるため、これまでは困難であった計測された電波源位置と受信電波のスペクトル上の特徴との対応関係を詳細に把握することも可能となるであろう。

また、太陽電波についても、特に東北大学との共同により、長基線干渉計による信号検出のトライアルを実施する。太陽電波の電波源は空間的広がりが大きいため、長基線干渉計による信号検出には困難が伴うことが予想されるが、従来のアナログ方式では不可能であった柔軟なデータ処理による信号検出を試みる予定である。信号検出に成功すれば、太陽フレアにおける粒子加速メカニズムの理解への大きな貢献となることが期待される。

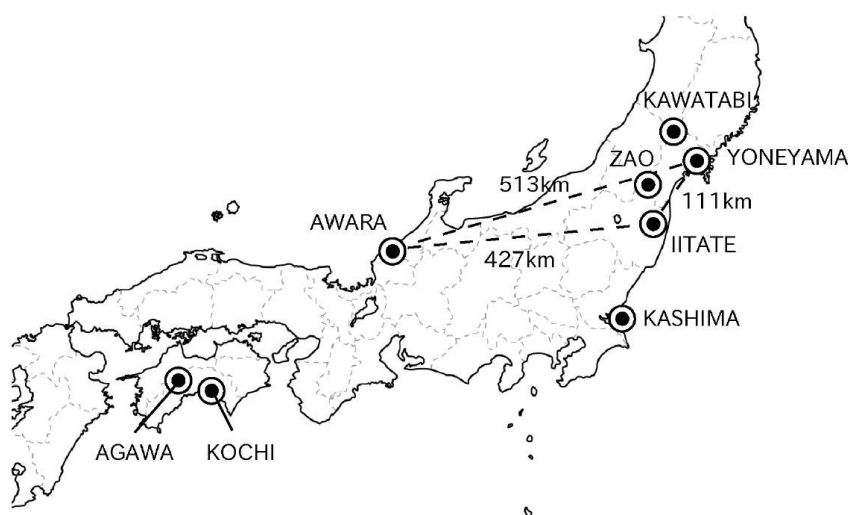


図 4. 国内における HF 帯長距離基線干渉計ネットワーク

#### 4-2. 雷雲起源電波

一方、視点を私たちの住む北陸地域に転ずると、日本海沿岸部は特に冬季に強い雷が観測されることで世界的に有名である。前述の「北陸地域の環境の計測と保全に関わる研究拠点形成」プロジェクトにおいて、雷に伴って発生する電波を観測することにより、冬季雷の発生メカニズムの理解および雷発生の予測技術へ貢献をすることを目標の一つとして考えている。

とはいえ、北陸地域における雷雲および雷電波の観測は、これまで非常によく研究されている分野でもある[5,6]。先行研究との相違点としては、第1に、干渉計の基線長が約10倍長いこと、第2として、本観測システムの高い信号検出感度が挙げられる。従来、雷電波の観測は雷雲内での絶縁破壊によって発生する電流を起源とする電波が観測対象とされており、そのような雷電波は基本的に非常に強い電力フラックスであるため、観測システムの信号検出感度にはあまり注意が払われていない傾向が見受けられる。これに対して、本観測システムは本来、電力フラックスの微弱な宇宙起源電波の受信が目的であるため、従来の雷電波観



測システムと比較して格段に検出感度が高いと考えられる。これらの特徴を生かして、雷雲内における微弱な電波放射を捉え、かつ電波源位置を詳細に把握することに成功すれば、雷雲の発達過程をより詳細に探査することが可能となり、発雷予測の向上に結び付くのではないかと期待している。ただし最終的には、本プロジェクトで設置される 1.3GHz ウィンドプロファイラによる大気運動の詳細観測データ、地球観測衛星による雲観測データおよび数値モデルに基づく風分布予測計算等との照合により、北陸地域の大気運動の大局的視点から統合的に理解していくことが重要であろう。

ここで再度、宇宙空間に視点を転ずると、雷には雲と大地（あるいは、雲内、雲－雲間）の間だけでなく、宇宙空間に向かって発生する放電現象も存在する。このような現象は 90 年代に発見され「スプライト」と呼ばれて注目されているが、その発生機構には不明な点が多い[7]。スプライトは日本では北陸地域の冬季雷雲に伴って特徴的に発生することが知られており、あわらキャンパスにおいて、スプライト起源の電波の広帯域干渉計観測による 2 次元イメージングに成功すれば、スプライト現象の発生機構の理解に大きく貢献できる。特に、北陸地域で、あわらキャンパス以外にもう一つ干渉計観測局を確保できれば、スプライト現象の 3 次元イメージング観測に世界で初めて成功することが期待される。

## 5. 現状と 24 年度の目標

平成 23 年度に、「北陸地域の環境の計測と保全に関わる研究拠点形成」プロジェクトの予算で購入した USRP2 について、GnuRadio と組み合わせたソフトウェア無線システムの構築と特性計測を行い、使用の目途が立った。今年度は、図 3 に示した観測システムの開発を進め、ソフトウェア無線システムを用いた木星、太陽および雷起源電波の初期観測を実施する予定である。

### 参考文献

- [1] Nakajo T., K. Kobayashi, H. Oya, Occurrence probability of Jovian decametric radiation observed by short baseline interferometer system in Fukui University of Technology, Submitted to *Proceedings of International Symposium on Planetary Science* for evaluation, 2012.
- [2] 中城智之, 青山隆司, 「広帯域電波干渉計による雷活動のモニター」, 北陸地域における環境の計測と保全に関する研究拠点形成プロジェクト第 1 回シンポジウム講演予稿集, 福井市, 2011.
- [3] 中城智之, 青山隆司, 「雲・雷研究から見た北陸」, 第 3 回能登総合シンポジウム講演予稿集, 珠洲市, 2012.
- [4] Nakajo T., T. Ono, H. Oya, M. Iizima, 500 km-class dual frequency VLBI observation of Jovian decameter radiation, *Proceedings of 2010 Asia-Pacific Radio Conference (AP-RASC)*, 2010.
- [5] Michimoto K., Meteorological Aspects of Winter Thunderstorms along the Hokuriku Coast of Japan, *28th International Conference on Lightning Protection ICLP 2006 proceedings*, 2006.
- [6] Suzuki et al, Meteorological and electrical aspects of several winter thunderstorms with sprites in the Hokuriku area of Japan, *Journal of Geophysical Research*, **116**, D06205, 2011.
- [7] Myokei et al, A study of the morphology of winter sprites in the Hokuriku area of Japan in relation to cloud charge height, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **71**, 597-602, 2009.

(平成 24 年 3 月 31 日受理)