

令和元年6月24日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17813

研究課題名(和文)超高速並列デジタル分光計による太陽電波微細バースト研究

研究課題名(英文) Study of fine spectral structures of solar radio burst by developing a super high-speed digital spectrometer

研究代表者

岩井 一正 (Iwai, Kazumasa)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：00725848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題ではアナログデジタル変換器と、高速で信号を処理できるFPGAを組み合わせることで、入力信号をリアルタイムでデジタル化し高速フーリエ変換する「デジタル分光計」を開発した。その結果、時間分解能、周波数分解能だけでなく、実効ダイナミックレンジ、高調波特性、安定性などにおいても従来型の一般的な周波数解析装置に比べ高い性能を持つ装置の開発に成功し、この結果をまとめて論文として出版した。本装置を情報通信研究機構の保有する太陽電波望遠鏡に搭載し、太陽電波の連続観測を行った。その結果、多数の太陽電波バーストのスペクトル微細構造を検出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したデジタル分光計を搭載した太陽電波望遠鏡は、世界で最も高分解に太陽電波バーストのスペクトル観測が可能となった。本装置を用いて太陽観測を行った結果、太陽電波バースト中に既存装置では分解不可能だった多数のスペクトル微細構造があることを同定した。これらの科学成果は学術的に非常にインパクトが高く、結果が査読誌に掲載された。

開発したデジタル分光計は共同開発企業が製品として販売し、電波天文学はもとより、信号を高速処理する必要がある広い分野で応用が広がっている。

研究成果の概要(英文)：We have developed a digital fast Fourier transform spectrometer made of an analog-to-digital converter (ADC) and a field-programmable gate array (FPGA). High time and spectral resolutions, highly stable spectroscopy, and a wide dynamic range of the spectrometers were demonstrated in a series of laboratory experiments. The developed digital spectrometers were installed in the solar radio telescope of NICT. We detected many fine spectral structures of solar radio bursts from the test observations. These results are summarized in a paper published by the peer-refereed journal.

研究分野：超高層物理学

キーワード：太陽電波 電波バースト 宇宙天気 FPGA デジタル分光 デジタル分光計

1. 研究開始当初の背景

太陽の大気「コロナ」では、フレアに代表される爆発現象が発生する。その過程で、大量の高エネルギー粒子が生成される。高エネルギーに加速された電子は、周辺のプラズマ大気中の電子を振動させることで MHz から GHz の周波数帯域で電波放射(プラズマ放射)を発生させる。これが太陽電波バーストである。プラズマ放射の放射周波数は放射源の密度に対応し、太陽大気の密度は太陽中心からの距離に依存する。よって電波の発生周波数の時間変動(周波数ドリフト)が電波バーストを発生させる粒子の移動速度(エネルギー)に対応する。この性質を用いて、電波バーストの分光観測による周波数スペクトルの解析から、粒子のエネルギーや伝搬領域の古典的理論が形成されてきた。近年急速に発達が進むデジタルデバイスは電波分光観測を劇的に発展させた。アナログデジタル変換(AD 変換)したデジタル信号を高速フーリエ変換(FFT)することで、高速で高周波数分解な電波分光観測が実現されたのである。例えば、研究代表者らは口径 33メートルの大口径望遠鏡とデジタルハードウェアデバイス(以下 FPGA)によるデジタル FFT 分光計を組み合わせることで、高感度で高分解な太陽電波望遠鏡の開発を行った。その結果、400MHz の帯域幅を 10ms(ミリ秒)の時間分解能、61kHz の周波数分解能で、十分な感度を保ちつつスペクトル観測できる望遠鏡ができた。研究開始当時は、この望遠鏡を用いて研究代表者らによる太陽電波の高分解な電波スペクトル観測から、10ms 以上 1 秒未満の時定数を持つ電波バーストのスペクトル形状や、そのバーストを発生させる高エネルギー粒子の特徴が次々と明らかになりつつあった。この時定数の現象は、加速直後の電子ではなく、加速後、太陽大気中の磁力線に補足された粒子によって放射されると考えられていた。一方、フレア領域で最初に加速される高エネルギー粒子の出すバーストは、発生周波数が 1GHz 程度であり、1ミリ秒(ms)未満の時定数と 0.5MHz 程度の周波数幅を持つことが示唆されている(ミリ秒バースト)。このバーストの発生周波数の時間変動を取り出すには、より高度な電波分光装置が必要だった。

2. 研究の目的

本研究では、(1)「並列デジタル分光計の開発」から極めて高分解な分光観測が可能な電波分光計を開発し、(2)「それを用いた太陽電波バースト観測」からミリ秒バーストの超微細スペクトル構造を世界で初めて分解し、バーストを発生させる粒子の特徴やその加速機構を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 並列デジタル分光計の開発

本研究では、アナログ信号をデジタル信号に変換する AD 変換器と、高速で信号を処理する FPGA を組み合わせることで、超高分解な分光が可能なデジタル分光装置を開発する。分光計の理論的知識を持つ研究代表者らとデジタルデバイスの実装や製品化のノウハウを持つ民間の企業で共同開発を行うことで、研究代表者の持つ広帯域かつ高分解な電波スペクトル取得に特化した分光装置というアイデアを短期間に実装することを実現する。特に高効率な並列 FFT アルゴリズムを用いることで、1 台当たりの生産コストも既存のものに比べ半額程度に抑制する。

(2) 並列デジタル分光計を用いた太陽電波バースト観測と粒子加速機構の理解

次に、完成した分光計を情報通信研究機構(NICT)が運用する太陽電波望遠鏡に搭載し、太陽電波バーストの連続観測を実施する。そこから得られるスペクトルデータを解析することで、フレア直後に発生する太陽電波バーストのスペクトル形状を世界で初めて分解する。特に分解したバーストの周波数ドリフトから、太陽フレアで最初に加速を受ける粒子のエネルギーを、バーストの継続時間から加速現象の時定数を、バーストのバンド幅から加速領域の空間スケールを導出し、加速過程の全貌を明らかにする(図 1 参照)。電波分光データだけでは太陽大気で得られる情報が限られるため、空間分解能の高い国内外の電波干渉計を用いた撮像観測を行い、包括的に加速機構を議論する。

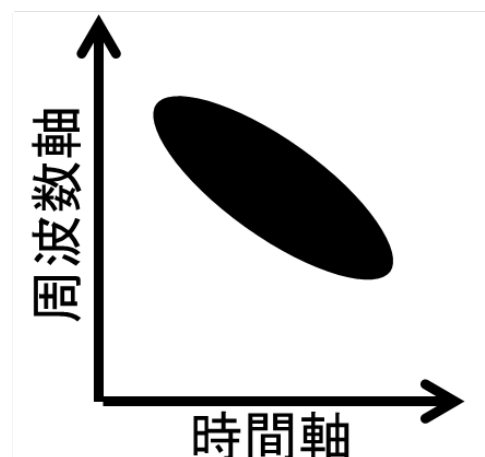


図 1 太陽電波バーストのスペクトルの時間変動の例。図中の傾きが粒子のエネルギーに対応する。

4. 研究成果

(1) 並列デジタル分光計の開発

本研究では、まず FPGA と AD 変換器を組み合わせることで、入力信号をリアルタイムでデジタル化し高速フーリエ変換する「デジタル分光計」を民間企業と共同で開発し、その性能評価を行った。その結果、時間分解能、周波数分解能だけでなく、実効ダイナミックレンジ、高調波

特性、安定性などにおいても従来型の一般的な周波数解析装置に比べ高い性能を持つ装置の開発に成功し、この結果をまとめて論文として出版した（雑誌論文1）。本装置を情報通信研究機構の保有する太陽電波望遠鏡に搭載し、太陽電波の連続観測を行った。その結果、多数の太陽電波バーストのスペクトル微細構造を検出することに成功した。また、本研究で開発したデジタル分光計は、共同開発企業が製品として販売し、電波天文学はもとより、信号を高速処理する必要のある広い分野で応用が広がっている。



図2 本研究で開発・製品化されたデジタル分光計（雑誌論文1より）

(2) 並列デジタル分光計を用いた太陽電波バースト観測と粒子加速機構の理解

電波の分光観測は粒子のエネルギーを導出できるが、粒子の生成領域や伝搬方向はわからない。そこで、分光観測と相補的なこれらの情報を得られる電波干渉計を用いた太陽電波観測を行った。用いた装置は米国国立電波天文台が保有する超大型電波干渉計 JVL A および日本を含む国際チームが運用する ALMA で、現地に実際に滞在して実験を行った。その結果、太陽黒点が放射する電波を広い周波数範囲で高い空間分解能で観測することに成功し、その結果を論文化した（雑誌論文2）。今後は新型分光計の分光データと干渉計による位置情報を合わせた包括的な研究が期待される。

なお、本研究課題は3年の計画で立案されたが、研究代表者が最終年度前年度申請による他の助成を申請し、獲得したため2年で終了となった。上述の通り研究の進捗が良好であり、2年の研究期間でも目標の多くが達成できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. OCTAD-S: digital fast Fourier transform spectrometers by FPGA , **Iwai, Kazumasa**; Kubo, Yūki; Ishibashi, Hiromitsu; Naoi, Takahiro; Harada, Kenichi; Ema, Kenji; Hayashi, Yoshinori; Chikahiro, Yuichi , Earth, Planets and Space , 69 巻 (頁 : 95) , 2017 年 DOI: 10.1186/s40623-017-0681-8
2. ALMA Discovery of Solar Umbral Brightness Enhancement at $\lambda = 3$ mm , **Iwai, Kazumasa**; Loukitcheva, Maria; Shimojo, Masumi; Solanki, Sami K.; White, Stephen M , The Astrophysical Journal Letters , 841 巻 2 号 (頁 : L20) , 2017 年 DOI: 10.3847/2041-8213/aa71b5
3. Variation of the Solar Microwave Spectrum in the Last Half Century , Shimojo Masumi , **Iwai Kazumasa**, Asai Ayumi, Nozawa Satoshi, Minamidani Tetsuhiro, Saito Masao , ASTROPHYSICAL JOURNAL , 848 巻 1 号 , 2017 年 DOI: 10.3847/1538-4357/aa8c75
4. Polarization Characteristics of Zebra Patterns in Type IV Solar Radio Bursts , Kaneda K., Misawa H., **Iwai K.**, Tsuchiya F., Obara T., Katoh Y., Masuda S. , ASTROPHYSICAL JOURNAL , 842 巻 1 号 , 2017 年 DOI: 10.3847/1538-4357/aa74c1
5. Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): Fast-Scan Single-Dish Mapping , White S. M., **Iwai K.**, Phillips N. M., Hills R. E., Hirota A., Yagoubov P., Siringo G., Shimojo M., Bastian T. S., Hales A. S., Sawada T., Asayama S., Sugimoto M., Marson R. G., Kawasaki W., Muller E., Nakazato T., Sugimoto K., Brajsa R., Skokic I., Barta M., Kim S., Remijan A. J., de Gregorio I.,

Corder S. A., Hudson H. S., Loukitcheva M., Chen B., De Pontieu B., Fleishmann G. D., Gary D. E., Kobelski A., Wedemeyer S., Yan Y., SOLAR PHYSICS, 292 巻 7 号, 2017 年 DOI: 10.1007/s11207-017-1123-2

6. Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): High-Resolution Interferometric Imaging, Shimojo M., Bastian T. S., Hales A. S., White S. M., Iwai K., Hills R. E., Hirota A., Phillips N. M., Sawada T., Yagoubov P., Siringo G., Asayama S., Sugimoto M., Brajsa R., Skokic I., Barta M., Kim S., de Gregorio-Monsalvo I., Corder S. A., Hudson H. S., Wedemeyer S., Gary D. E., De Pontieu B., Loukitcheva M., Fleishman G. D., Chen B., Kobelski A., Yan Y., SOLAR PHYSICS, 292 巻 7 号, 2017 年 DOI: 10.1007/s11207-017-1095-2

〔学会発表〕(計 7 件)

7. 岩井一正, Timothy Bastian, Stephen White, 下条圭美, ALMA 太陽観測チーム、ALMA 単面鏡太陽観測のためのビームパタンモデルとデコンボリューション、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年
8. 岩井一正、ALMA 単面鏡太陽画像のデコンボリューション、太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」、2018 年
9. Kazumasa Iwai, M. Loukitcheva, M. Shimojo, S. Solanki, S. White、ALMA Discovery of Solar Umbral Brightness Enhancement at ≈ 3 mm、American Geophysical Union Fall Meeting 2017、2017 年
10. Kazumasa Iwai, M. Loukitcheva, M. Shimojo, S. Solanki, S. White、ALMA Discovery of Solar Umbral Brightening at ≈ 3 mm、Japan Geoscience Union Meeting 2017、2017 年
11. 岩井一正, Loukitcheva Maria, 下条 圭美, Solanki Sami, White Stephe、ALMA による黒点暗部増光の発見、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017
12. 岩井一正, 久保勇樹, 石橋弘光, 直井隆浩, 原田健一, 江間研自, 林由紀, 近廣祐一、汎用デジタル分光装置: OCTAD-S、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017
13. 岩井一正、久保勇樹、石橋弘光、直井隆浩、石井守、鹿児島県山川における NICT 新太陽電波望遠鏡の開発、日本 SKA コンソーシアム「技術開発」地域会議 in 鹿児島、2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。