

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03715

研究課題名（和文）宇宙マイクロ波背景放射LiteBIRD衛星搭載デジタル信号処理器評価システム開発

研究課題名（英文）Development of the onboard digital electronics for the cosmic microwave background mission LiteBIRD

研究代表者

辻本 匡弘（Tsujimoto, Masahiro）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：10528178

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙背景放射（CMB）偏光の大角度の回転方向異方性には、インフレーション理論が予測する原始重力波の密度分布が刻印されている。これを測定するのが LiteBIRD 衛星計画である。本研究では、同計画で必要となる軌道上信号処理のアルゴリズムを開発した。特に問題となる宇宙線信号の物理モデルを構築して擬似データを作成した。アルゴリズムの妥当性をその擬似データと市販ボードを用いた概念実証機で検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国が主導して進める国際観測衛星プロジェクト LiteBIRD において、宇宙線信号による系統誤差は最大のリスクの一つであった。これを定量評価し、衛星設計に早期に反映させて、同プロジェクトの実現性を高めた意義は大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：The theory of Inflation predicts the presence of the primordial gravitational wave at a large scale, which should be observable through its imprints of the linear polarization spatial pattern of the cosmic microwave background. The LiteBIRD satellite currently under design is dedicated for this goal. In this research, we developed the onboard signal processing algorithm. Noise caused by cosmic-ray events is the largest concern. We evaluated its effects by constructing a physical model. We verified our algorithm by using the mock data generated by the model and the commercially available FPGA boards.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙背景放射 (CMB) 偏光の大角度の回転方向異方性には、インフレーション理論が予測する原始重力波の密度分布が刻印されている。これを測定することで、インフレーション理論を検証しその前提たる量子スケールの一般相対論や GUT エネルギーの物理に迫る手段を得る。これら究極の物理に実験的に迫る現実的かつ実現に最も近いのが、我々の LiteBIRD 計画である。同衛星は、高感度の超電導遷移端センサー (TES) を数千個用いて CMB の直線偏光を観測し、2020 年代後半の打上げに向けて概念設計段階にある。

2. 研究の目的

LiteBIRD の核心的技術は 2 つ (1) 膨大な検出器数《感度向上》と (2) 大角度測定に特化した観測《系統誤差抑制》である。両者を活かすためには、衛星機上での最適化されたデジタル信号処理が必須となる。本研究の目的は、機上デジタル処理器の性能評価システムを構築し、模擬データと処理アルゴリズムを開発・実装して、必要な性能を実証することである。

3. 研究の方法

まず、現実的な疑似観測データを作成する。次に、軌道上デジタル信号処理機器の機能・性能要求を明確にし、それを満たすためのデジタル信号処理アルゴリズムを開発する。最後に、市販ボードで概念実証機を作成して、実装する。

4. 研究成果

以下に列挙する研究成果を得た。

(1) 軌道上デジタル信号処理機器の機能・性能要求の明確化

カナダ及びフランスの国際協力パートナーと会合を重ね、同機器の機能・性能の要求分析を行い要求の文書化を行った。研究期間を通して LiteBIRD 衛星設計の検討が各方面から深化された。検出器チャンネル数の増加や望遠鏡間の配分が変わるなど、信号処理系にも影響が及ぶ大きな設計変更がいくつかあったが、モジュラー性や冗長性を確保しながら、国際パートナーと頻繁に会合を重ねて設計を進めた。最終的に、LiteBIRD 衛星のベースラインモデルとして取り込まれ、総説論文 (Hazumi et al. PTEP 2022, in review) に記述された。

(2) 宇宙線ノイズがつくる大角度スケールの系統誤差の評価

先行する Planck 衛星で特に問題となった宇宙線によるノイズを、物理モデルを構築して生成した。太陽・地球系第二ラグランジュ点において 期待される宇宙線環境から始め、粒子シミュレーションを行なって焦点面にデポジットされるエネルギー量と分布を求め、熱シミュレータにより超伝導遷移端検出器までの伝熱を計算し、回路シミュレータにより電氣的応答を計算し、それを掃天シミュレータで空間スペクトルに焼き直して、偏光の角度スペクトル換算での宇宙線の評価を初めて行った。宇宙線入力から角度パワースペクトルまで、end-to-end での物理シミュレーションは本研究のハイライトであり、2本の論文 (Stever et al. 2021, JCAP; Tominaga

et al. 2021, Proc of SPIE) として発表した。

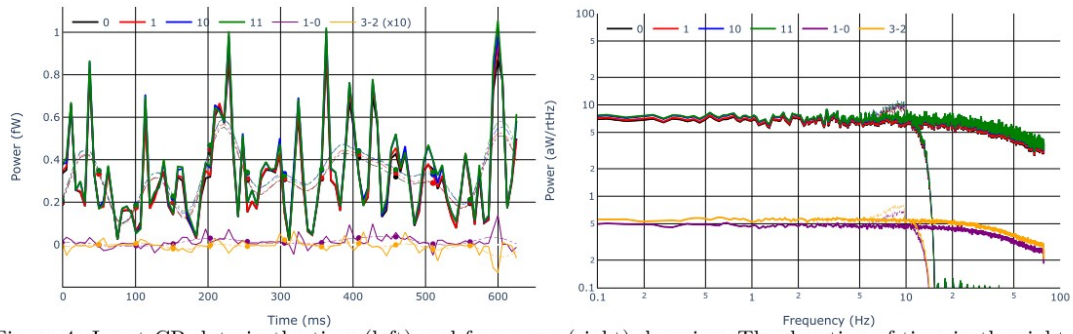


Figure 4: Input CR data in the time (left) and frequency (right) domains. The duration of time in the right is the same with two cycles of $4f_{\text{HWP}}$ of LFT. Different channels are shown in different colors. Only four channels (det 0, 1, 10, 11) are shown for clarity. The difference between (0 and 1) and (2 and 3) is also shown. The 153 Hz data before decimation is shown by thick lines, while the 19 Hz data after decimation is by thin lines. The power can be converted to the equivalent thermo-dynamic temperature with a ratio of $0.2 \text{ aW} \sim 1 \mu\text{K}_{\text{CMB}}$.

図 1: 宇宙線データの時空間 (左) 及び周波数空間 (右) での擬似観測データ (Tominaga et al. 2021)

(3) 軌道上デジタル信号処理アルゴリズムの開発

上記 (1) で設定した要求を満たすアルゴリズムを開発した。(i) 衛星通信帯域に収まる (ii) 圧縮に伴う系統誤差が宇宙論パラメータ決定に影響しない (iii) データの形態によらずロバストに働く、という競合要求の中で最適解を見出した。LiteBIRD では半波長回転板で直線偏光成分を変調させる。変調信号を毀損しない程度に、検出器の信号にローパス多段デジタルフィルタをかける。これを差分化して符号化し、データ量を衛星通信帯域に収まるようにした。

上記 (2) で得た宇宙線の擬似時系列データに、観測帯域で卓越する前景放射成分や、無偏光成分からの漏れ込みを加味して、これを衛星スキャンストラテジに従って掃天観測させる。現時点で、最も現実性の高い観測データを入力値として、アルゴリズムを検証し、最悪ケース (銀河中心通過時) においても性能要求を満たすことを示した。論文 (Tominaga et al. JLTP, in review) として発表した。

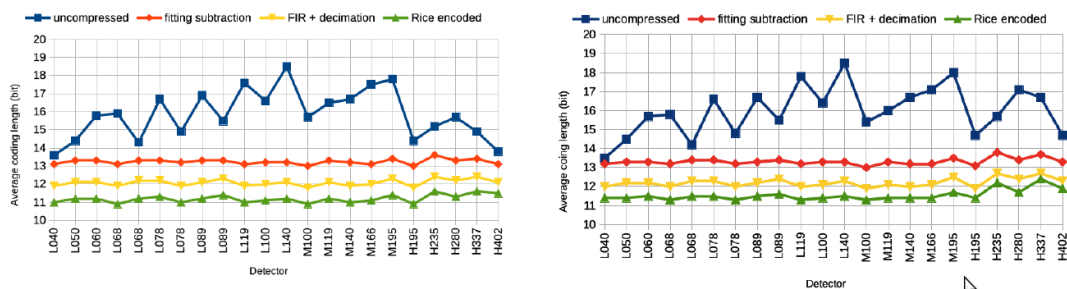


図 2: LiteBIRD 観測周波数ごとの、時系列データの平均ビット長 (左) CMB ダイポール極を通過する日 (右) 銀河中心を通過する日 (Tominaga et al. 2022)

(4) 概念実証機の開発

市販の FPGA ボードを用いて概念実証機を制作した。上記 (3) で開発したアルゴリズムの一部を FPGA で実装し、擬似観測データを処理させて機能を確認した。修士論文 (Tominaga 2021, University of Tokyo) として発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tominaga Mayu, Tsujimoto Masahiro, Stever Samantha L., Ghigna Tommaso, Ishino Hirokazu, Ebisawa Ken	4. 巻 11443
2. 論文標題 Simulation of the cosmic ray effects for the LiteBIRD satellite observing the CMB B-mode polarization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2576127	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tsuji Masatoshi, Tsujimoto Masahiro, Sekimoto Yutaro, Dotani Tadayasu, Shiraishi Maresuke	4. 巻 11443
2. 論文標題 Simulating electromagnetic transfer function from the transmission antennae to the sensors vicinity in LiteBIRD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560899	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hazumi Masashi, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 11443
2. 論文標題 LiteBIRD satellite: JAXA's new strategic L-class mission for all-sky surveys of cosmic microwave background polarization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2563050	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Montier Ludovic, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 11443
2. 論文標題 Overview of the medium and high frequency telescopes of the LiteBIRD space mission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562243	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sekimoto Yutaro, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 11453
2. 論文標題 Concept design of low frequency telescope for CMB B-mode polarization satellite LiteBIRD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2561841	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hazumi, M, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 194
2. 論文標題 LiteBIRD: A Satellite for the Studies of B-Mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 443-452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02150-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hazumi, M, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 199
2. 論文標題 Updated Design of the CMB Polarization Experiment Satellite LiteBIRD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1107-1117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02329-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hasebe T., ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 193
2. 論文標題 Concept Study of Optical Configurations for High-Frequency Telescope for LiteBIRD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 841-850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1915-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki A., ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.	4. 巻 193
2. 論文標題 The LiteBIRD Satellite Mission: Sub-Kelvin Instrument	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1048-1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1947-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsujimoto Masahiro, Nishino Haruki, Sekimoto Yutaro, Hazumi Masashi, Dotani Tadayasu, Ishino Hirokazu, Kibayashi Atsuko, Sakurai Yuki, Matsumura Tomotake, Dobbs Matt, Cliche Jean-Francois, Smecher Graeme, Suzuki Aritoki, Lee Adrian T., Arnold Kam, Montier Ludovic, Mot Baptiste, Signorelli Giovanni, de Bernardis Paolo	4. 巻 10698
2. 論文標題 Current design of the electrical architecture for the payload module of LiteBIRD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2311579	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Tominaga Mayu, Tsujimoto Masahiro, Stever Samantha L., Ghigna Tommaso, Ishino Hirokazu, Ebisawa Ken
2. 発表標題 Simulation of the cosmic ray effects for the LiteBIRD satellite observing the CMB B-mode polarization
3. 学会等名 Astronomical Telescopes and Instruments 2020, SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsuji Masatoshi, Tsujimoto Masahiro, Sekimoto Yutaro, Dotani Tadayasu, Shiraishi Maresuke
2. 発表標題 Simulating electromagnetic transfer function from the transmission antennae to the sensors vicinity in LiteBIRD
3. 学会等名 Astronomical Telescopes and Instruments 2020, SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masashi Hazumi, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.
2. 発表標題 LiteBIRD satellite: JAXA's new strategic L-class mission for all-sky surveys of cosmic microwave background polarization
3. 学会等名 Astronomical Telescopes and Instruments 2020, SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaro Sekimoto, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.
2. 発表標題 Concept design of low frequency telescope for CMB B-mode polarization satellite LiteBIRD
3. 学会等名 Astronomical Telescopes and Instruments 2020, SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ludovic Montier, ..., H. Ishino, ..., M. Tsujimoto, ..., et al.
2. 発表標題 Overview of the medium and high frequency telescopes of the LiteBIRD space mission
3. 学会等名 Astronomical Telescopes and Instruments 2020, SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsujimoto Masahiro, Nishino Haruki, Sekimoto Yutaro, Hazumi Masashi, Dotani Tadayasu, Ishino Hirokazu, Kibayashi Atsuko, Sakurai Yuki, Matsumura Tomotake, Dobbs Matt, Cliche Jean-Francois, Smecher Graeme, Suzuki Aritoki, Lee Adrian T., Arnold Kam, Montier Ludovic, Mot Baptiste, Signorelli Giovanni, de Bernardis Paolo
2. 発表標題 Current design of the electrical architecture for the payload module of LiteBIRD
3. 学会等名 Space Telescopes and Instrumentation 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	石野 宏和 (Ishino Hirokazu) (90323782)	岡山大学・自然科学研究科・教授 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会	開催年
LiteBIRD kick-off symposium	2019年～2019年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------