

宇宙線検出器における リアルタイムパイルアップ分離技術に関する研究開発

伊藤大二郎¹、矢澤博之¹、黒崎将史¹、梅村憲弘¹、毎田充宏¹、
上野遥²、富高真²、松本晴久²、高島健²

¹ 東芝エネルギーシステムズ株式会社,

² 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

本研究は、宇宙線検出器において発生するパイルアップ事象をリアルタイムに分離する新たな信号処理技術の開発を目的とする。従来、宇宙線の高フラックス環境下では、複数の粒子が短時間に検出器へ入射することで信号が重畳し、正確な計数やエネルギー測定が困難となる課題があった。本研究では、信号波形の形状特性に着目し、パイルアップ信号を線形方程式系として定式化した上で、ヤコビ (Jacobi) 法による反復計算を用いた分離アルゴリズムを開発した。さらに、電子回路上での処理を模擬した数値シミュレーション、高精度な模擬信号による実測評価、加速器ビームテストを通じて本手法の有効性を検証した。その結果、分離計算により波高分布形状の回復やピーク統計量の向上といった効果を実データにおいて確認することができた。本技術は、宇宙機搭載を見据えたオンボード・リアルタイム処理に適しており、宇宙線観測の高精度化に大きく寄与するものと期待される。

1. 序論

宇宙空間における放射線環境の把握は、宇宙機の設計や運用において極めて重要である。特に、極域や南大西洋異常帯 (SAA) などフラックスが高い領域では、宇宙線検出器において複数の粒子が短時間に入射することで、検出信号が重畳するパイルアップ事象が頻発する。このパイルアップは、信号の波高や計数率に誤差を生じさせ、観測精度を低下させる要因となる。

JAXA では、軌道上での宇宙線観測データを図 1 に示す「宇宙環境計測情報システム (SEES)」を通じて公開し、宇宙環境の情報発信に活用している [1, 2]。一方、RAPIS-1 衛星に搭載された宇宙線検出器では、図 2 のように極域および SAA においてパイルアップ事象が多く検出されており、宇宙線フラックスの高い状況下での計測方法にはさらなる向上の余地があることが示唆されている。

本研究は、宇宙線検出器におけるパイルアップ事象をリアルタイムで分離する信号処理技術の開発を目的とする。検出器の構成を変更することなく、信号処理のみでパイルアップを分離できれば、既存の検出器にも適用可能な基盤技術となり、観測精度の向上とデータ信頼性の確保に大きく寄与するものと考えられる。リアルタイムな安定計測の実現は、将来の有人探査ミッション等における放射線環境の監視用途にも貢献し得る。



図 1 JAXA の宇宙環境計測システム (SEES) [1, 2]

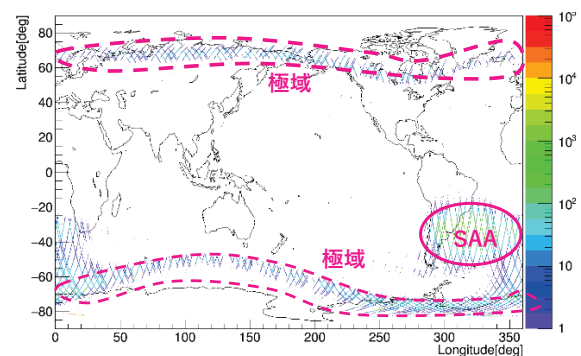


図 2 RAPIS-1 衛星によるパイルアップ検出例 [3]

2. パイルアップの発生機構と影響

パイルアップとは、短時間に複数の宇宙線粒子が検出器に入射し、検出信号が重畳して個々の識別が困難になる事象であり、到来する宇宙線の頻度が高いほど発生しやすい（図 3）。宇宙線粒子が検出器に到達すると、エネルギー損失に比例した電荷が発生し、電荷有感増幅器（CSA）により波高値へと変換される。さらにその信号は波形整形増幅器（Shaper）によって、波高が読み取りやすく、かつ時間幅の短いパルス形状へと整形される。ところが、信号の発生間隔が Shaper の出力パルスの時間幅より短い場合、波形は相互に重畳して複雑化し、計数およびエネルギー計測の精度を著しく阻害する。通常の宇宙線観測における到来事象はポアソン（Poisson）過程に従うランダム性があるため、フラックスの増大とともにパイルアップ発生確率は上昇する。

パルス時間幅の単純な短縮はパイルアップの抑制に寄与し得るが、検出器の電荷収集時間、計測回路の信号対雑音比等の装置的制約により無制限な短縮は困難である。ゆえに、センサ側の構成を改変せずに信号処理によって重畳成分を分離する手法の実現が望まれる。

加えて、高フラックス下でパイルアップが非常に高い割合で発生することを鑑みれば、各事象の波形情報を地上に送信し地上側で信号処理を行う手法は、テレメトリ帯域の逼迫という新たな制約を生じさせるため現実的ではない。この理由から軌道上のオンボード処理によるリアルタイムでの信号復元技術を確認する必要がある。

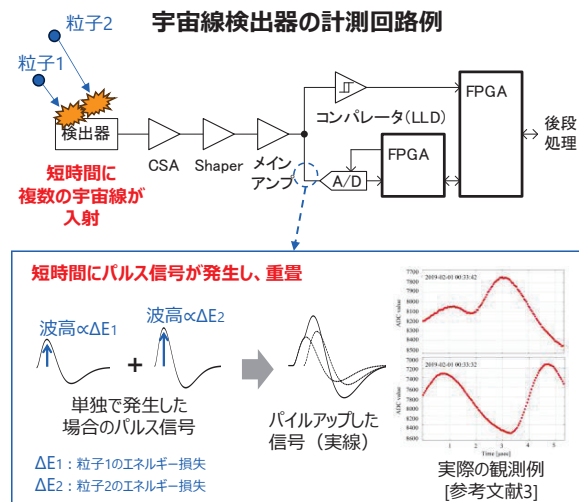


図 3 パイルアップの説明図

3. 信号分離の理論的枠組み

本研究では、パイルアップ信号の分離に向けて、まず事象の定式化を行った。波形整形増幅器により整形された単発パルスは、時間方向に一定で、エネルギー（電圧）方向に伸縮する統一された形状を有し、パイルアップ信号は単発信号の線形結合として表される。この性質に基づけば、各パルスがピークに到達する時刻における観測電圧 b_i は、真の波高値 x_i （未知数）と、パルス間隔 ΔT に依存する係数 A_{ij} で表現できる。図 4 に示す二信号の基本例では、

$$\begin{aligned} b_1 &= x_1 + A_{12} \cdot x_2 \\ b_2 &= A_{21} \cdot x_1 + x_2 \end{aligned} \quad (1)$$

と書け、一般化すると

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad (2)$$

である。ここで $\mathbf{A}$ は波形整形増幅器の出力パルスを規格化したテンプレート波形に基づく $N \times N$ の正方行列（ N は重畳したパルス数）であり、その要素 A_{ij} はピークからの時間差 ΔT に応じてテンプレート波形の参照により得た値である。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & A_{12} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & 1 & & A_{2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}$$

ピーク時刻は高速分路（Fast shaper）で検出し、低速分路（Slow shaper）のピーク電圧をサンプルする既存技術により取得できるため（図 5）、係数 $\mathbf{A}$ と観測値 $\mathbf{b}$ を用いて式 2 の関係から未知の $\mathbf{x}$ を求解可能である。

本研究では、この線形方程式系の機械的解法として反復法の一つであるヤコビ法を適用する。ヤコビ法は $\mathbf{A} = \mathbf{D} + \mathbf{L} + \mathbf{U}$ （対角・下三角・上三角）と分割し、

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{D}^{-1} \cdot (\mathbf{b} - (\mathbf{L} + \mathbf{U}) \cdot \mathbf{x}^{(k)}) \quad (4)$$

を繰り返して方程式系の漸近解を得る（ k は反復回数を示す）手法であり、実際に必要な演算は加減算と乗算のみである他、要素毎に独立した計算が可能という利点から並列化・パイプライン化が容易であるため、オンボード実装用のリアルタイム処理と親和的である[4]。

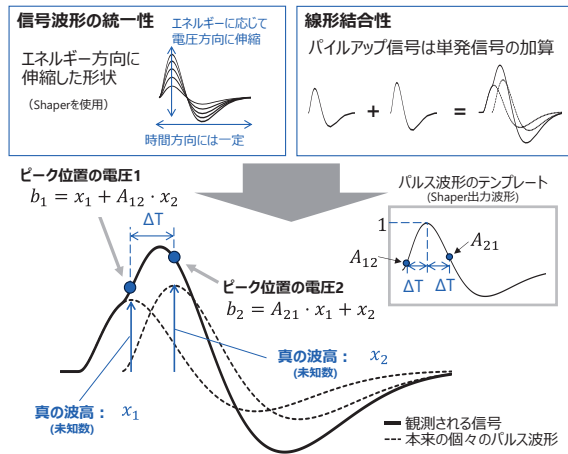


図4 パイルアップ波形の定式化

- ・高速分路 (Fast shaper) によって信号発生を検出
- ・低速分路 (Slow shaper) の電圧をサンプリング

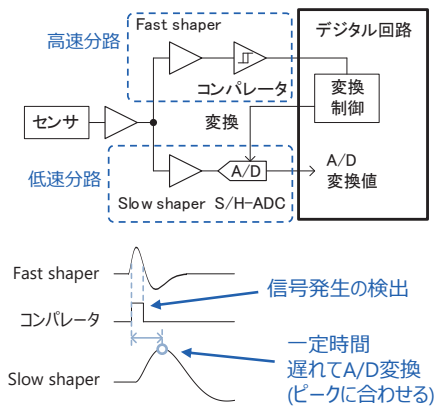


図5 ピーク時刻の検出回路 (既存技術)

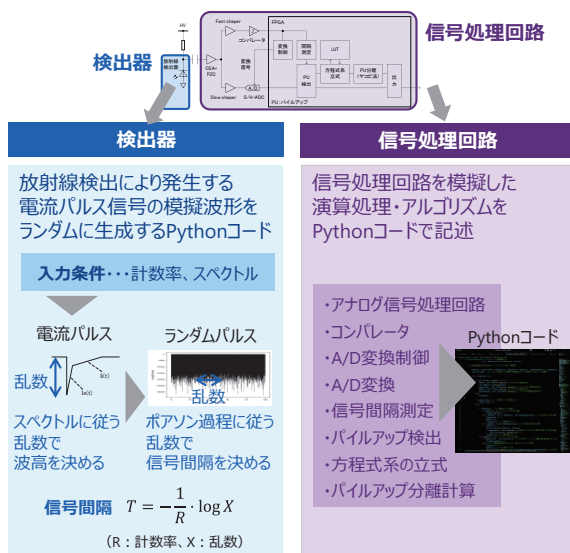


図6 数値計算モデルの概略

4. アルゴリズムの数値的検証

前項で提案した手法の有効性を図6の数値モデルで検証した。Pythonを用い、指定したエネルギースペクトルに従う乱数で波高を、さらにポアソン過程に従う乱数で到来間隔を与える形で、放射線検出により生じる電流パルスを大量に発生させた長い時系列の入力信号配列モデルを生成し、アナログ処理 (CSA、PZC、Shaper)、A/D変換器、パイルアップ発生検出、テンプレート波形参照による行列要素 A_{ij} の決定、方程式系の立式、ヤコビ反復による分離計算といった信号処理の各手順をPythonコードで記述した装置モデルに入力し、その応答をシミュレーションした。

波形レベルの検証では、同一波高の三つの信号が重畳した例において、分離前は先行信号の影響で測定値が真値から大きく外れるのに対し、分離後は真値に漸近することを確認した (図7)。波高分布レベルの検証では、ピーク部分の統計量の回復とスペクトル形状全体の回復傾向が認められ、分離アルゴリズムが机上段階で有効に働くことを示した (図8)。

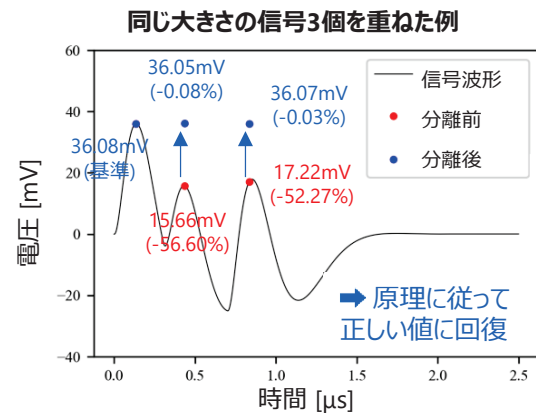


図7 波形レベルの机上検証例

Cs-137のエネルギースペクトルを模擬した例 (10⁶ cps)

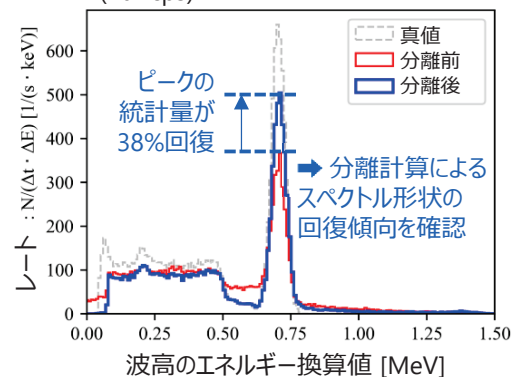


図8 波高分布レベルの机上検証例

5. 実証装置の開発と評価

数値検証により具体化した設計指針やアルゴリズムに基づき、リアルタイム分離機能を搭載する実証装置を開発した。装置は、シリコン半導体検出器、高圧電源、アナログ信号処理回路、サンプル・ホールド型のA/D変換回路、ヤコビ反復等のデジタル処理を実装したFPGA、分離前後の値を出力可能なデータ出力部から構成する。実証装置のブロック図と検証体系を図9に示す。

時刻決定の要となる信号検出には、図10のように高速分路の閾値超過時間（Time Over Threshold; TOT）の中心を検出時刻として採用し、波高に依存する検出時差（タイムウォーク）を抑制した[5]。テンプレート波形はFPGA内蔵ROMに格納し、測定した信号間隔に基づいてAの要素をLUT参照で決定、ヤコビ反復を逐次高速実行するアーキテクチャとした。

ファンクションジェネレータを用いた模擬信号評価では、長い任意波形が扱える高速型のジェネレータにより、模擬的に生成したパイルアップ波形を実際の電気信号として再生し実証装置に入力した。二点のパルス発生間隔をスイープする評価では、検出限界を越える間隔が確保されれば分離後の波高が安定して真値へ回復することを確認した（図11）。また、一定エネルギーでランダムな間隔で生成した信号を入力する評価では、分離後の波高分布が入力エネルギーの近傍に回帰し、分離計算により有効データの割合が改善する事確かめた（図12）。

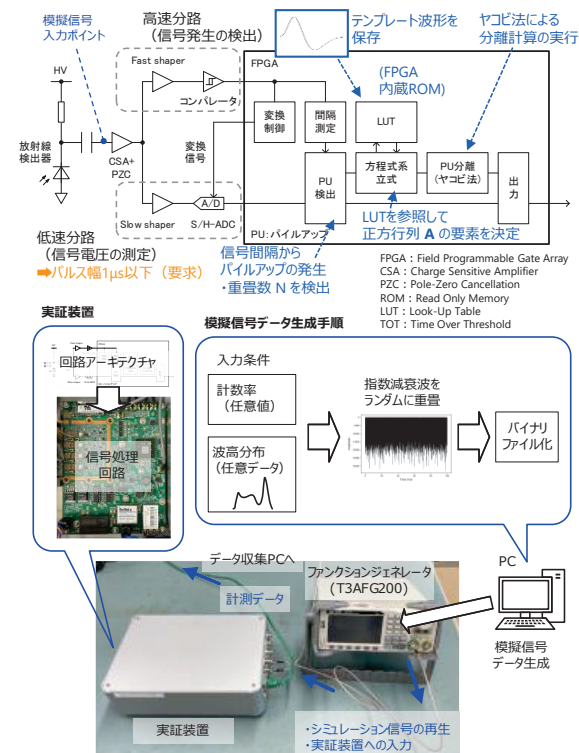


図9 実証装置のブロック図と検証体系

信号検出の改良

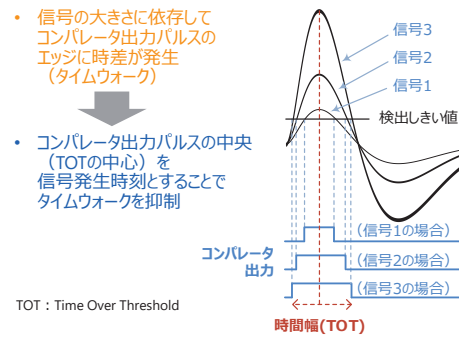


図10 TOT を利用したタイムウォーク抑制[5]

連続したパルス信号の時間間隔を徐々に変化させながら測定し、網羅的に分離結果を確認

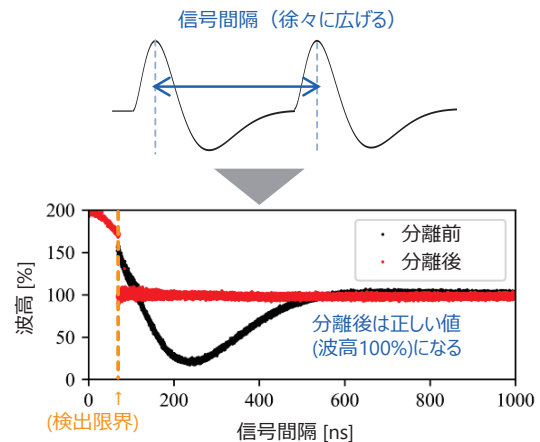


図11 信号間隔の網羅的検証例

エネルギーを固定したランダム信号を入力し、波高分布において分離後のデータが入力エネルギー付近に集まる傾向を確認

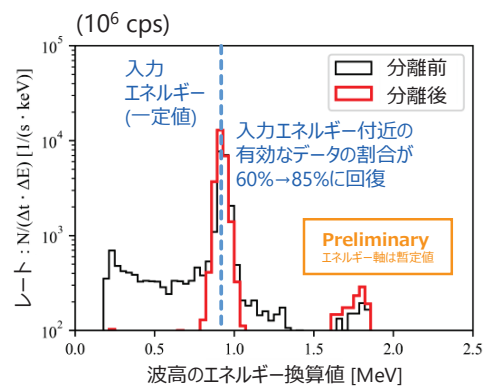


図12 波高分布レベルの検証例

6. ビーム試験による実証的検証

実際の放射線計測における妥当性を評価すべく、図13のように真空チャンバ内に実証装置を設置し、最大2 MVの加速電圧を持つペルトロン加速器で生成した電子ビームを検出器へ照射した（JAXA 筑波宇宙センターで実施）。

得られた波高分布において、ピーク部の統計量の回復と、低エネルギーデータ量の低減という二点の有効性を確認した（図14）。これは、先行で生じたパルスのアンダーシュートへの重畳や、小さなパルスの重畳により見かけ上の波高が歪んだ事例が、分離により補正されたものと解釈できる。現時点ではこの電子線の結果を中間成果として得ており、今後は陽子など異なる線種での試験と解析を進める計画である。

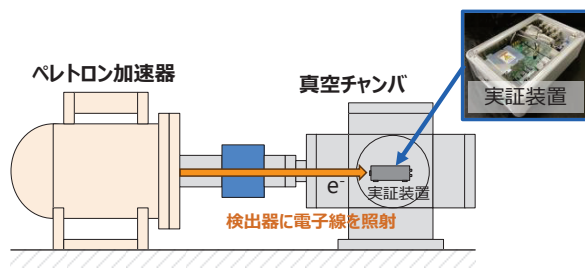


図13 ビーム試験の体系

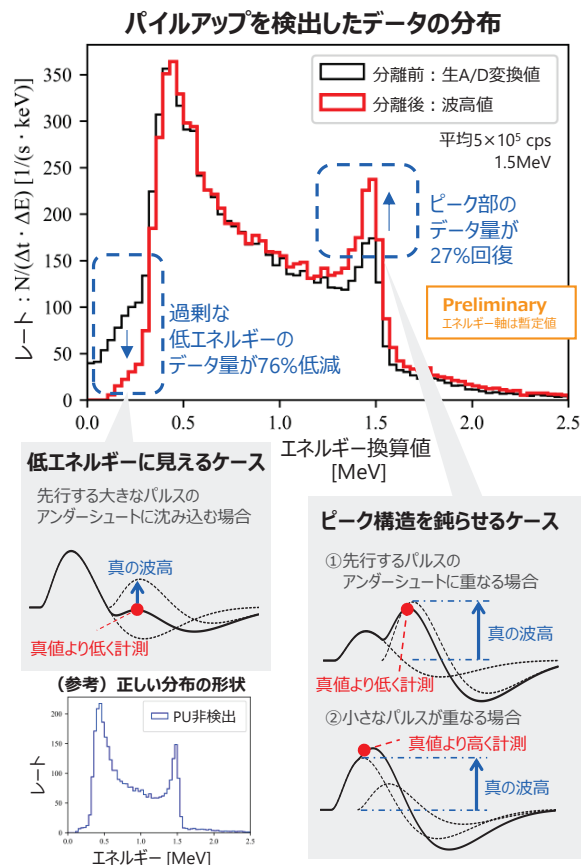


図14 電子ビーム照射により得た波高分布

7. 総括と今後の展望

本研究では、オンボード・リアルタイム処理に適したパイルアップ分離方式を提案し、定式化した事象とヤコビ反復による分離計算、Pythonモデルによる机上検証、実証装置の製作と模擬信号評価、および電子ビーム試験による中間成果を示した。消費電力の大きな高速A/Dサンプリングに依存せず、サンプル・ホールド型A/D変換とTOTを用いた高精度時刻決定、およびヤコビ反復処理のFPGA実装技術の組合せにより、信号分離によるエネルギースペクトルの回復効果を確認した。今後は、陽子等への線種の拡張、演算処理の合理化、LLD（Lower Limit Discriminator）レベル未満の信号の影響評価等の検討を進め、宇宙機搭載を見据えた実運用要件の確立を図る。

謝辞

本研究を実施するにあたり、貴重な機会を与えてくださった宇宙航空研究開発機構（JAXA）に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構（JAXA）、宇宙環境計測情報システム（SEES）、
https://sees.tksc.jaxa.jp/fw/dfw/SEES/Japanese/Top/top_j.shtml
- [2] 上野遥、「宇宙用放射線検出器の計測技術向上に関する研究」、日本物理学会第77回年次大会、一般シンポジウム講演発表資料、2022年
- [3] H. Ueno, K. Kamiya, H. Matsumoto, M. Tomitaka, T. Takashima, "On-Orbit Pile-Up Detection and Digital Pulse Shape Measurement Results in the Radiation Telescope," IEEE Transactions on Nuclear Science, 68(8), pp.1764–1771, 2021.
- [4] 特許第7093083号、「放射線計測装置」、東芝エネルギーシステムズ株式会社・国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
- [5] 特許第7391752号、「放射線計測装置」、東芝エネルギーシステムズ株式会社