超小型X線衛星NinjaSatにおける信号 波形を用いたX線とバックグラウンド







の弁別



2025/2/12

喜多豊行









X線帯域はブラックホールや中性子星周囲の高エネルギー現象を探る良い波長 宇宙X線は地球大気で吸収されてしまうため、人工衛星での観測が必須

超小型衛星NinjaSat

- ・2023年11月11日に打ち上げ、1年以上の運用
- ・大きさ:10×20×30 cm³ 重さ:約9 kg →通常のX線衛星に比べ低コスト・短期間での開発・柔軟な運用が可能
- ・高度550 kmの太陽同期軌道に投入
- ・ガスX線検出器(Gas Multiplier Counter)(GMC)







卒業研究発表会







ガスX線検出器(Gas Multiplier Counter)

封入ガス:XeArDME(75%/24%/1%)@1.2 atm 観測エネルギー帯域 2~50 keV 有効面積: 32 cm³ @6 keV/2台 (超小型衛星では過去最大)

GMCの検出原理



バックグランド(BGD)信号

荷電粒子 →この二つとX線信号を波形情報から切り分けたい 電気ノイズ →地上に送信できるデータの容量に限りがあるため、上空で自動的に波形解析を していくつかの波形パラメータを地上に降ろしている。 →今回は3つの波形パラメータ(立ち上がり時間、相関係数、波高)を用いる

立ち上がり時間(PSDIndex)

立ち上がり部分を三角形で近似 →PSDIndex = S(面積)÷H(波高)×2





相関係数(Similarity) 2.

内側電極での波形と外側電極での波形のピアソン相関係数 $\frac{\sum (f_{\text{T}}[i] - \bar{f}_{\text{T}})(f_{\text{T}}[i] - \bar{f}_{\text{T}})}{\sqrt{\left(\sum (f_{\text{T}}[i] - \bar{f}_{\text{T}})^2\right)\left(\sum (f_{\text{T}}[i] - \bar{f}_{\text{T}})^2\right)}}$ Similarity =

X線信号	電極のどちら か一方に電子 を落とす確率 が高い	Similarity 小	60 - Swii indino 20 - 0 -
荷電粒子 or 電気ノイ ズ	斜め方向に貫 通した場合、 両電極に電子 を落とす確率 が高い	Similarity 大	$\begin{bmatrix} 300 \\ 250 \\ 200 \\ 150 \\ 100 \\ 50 \\ -50 \\ -100 \\ 0.5 \end{bmatrix}$







NINJACH



※青の点線:現在採用されているカット条件(5 < PSDIndex < 20)</p>

解析目的

軌道上で得られた信号波形のパラメータを用いて、バックグラウンド(BGD)のイベントカット条 件を再検証した









今回用いた2種類のデータ ◆(Crab+BGD)データ X線信号:かに星雲(中性子星、X線天文での標準光源) イベント数:3.254983×10⁶個 観測期間:4日間



※青の点線:現在採用されているカット条件 5 < PSDIndex < 20

◆BGDデータ

検出器の向き:X線源がほとんどない暗い方向 イベント数:4.514519×106個 観測期間:11日間



電気ノイズ増加による、信号取得率の悪化



※青の点線:現在採用されているカット条件 Similarity < 0.4 , 5 < PSDIndex < 20







※青の点線:現在採用されているカット条件 Similarity < 0.4 , 5 < PSDIndex < 20



電気ノイズ(Similarity<0.82でcut済み)



※青の点線:現在採用されているカット条件 Similarity < 0.4 , 5 < PSDIndex < 20



()

NINJACH

※青の点線:現在採用されているカット条件 Similarityのcut条件による取得率の変化 Similarity < 0.4 , 5 < PSDIndex < 20 Crab+BGD BGD (Crab+BGD)+BGD 10⁻¹ 10^{-1} 10¹ 30 30 30 10⁻² 10^{-2} 25 25 25 20 SDIndex 15 bSDIndex PSDIndex PSDIndex 10^{-3.}01 conut ratio 10⁻⁴ 01 20 10^{-3.}01 conut ratio 10⁻⁴ 01 PSDIndex 12 ratio 10⁰ 10 10 10 10⁻⁵ 10^{-5} ^l10⁻⁶ 10⁻⁶ 10^{-1} 5 0.6 Similarity (ch) 0.7 0.7 0.8 0.8 0.6 0.5 0.6 0.4 0.7 0.8 0.4 0.5 0.5 0.4 Similarity (ch) Similarity (Crab+BGD)+BGD Crab+BGD BGD 10^{1} 10^2 10^{-2} 30 30 30 10-3 10-3 25 25 25 bSDIndex PSDIndex PSDIndex 20-Kapuldex 15-20 10⁻⁴ 01 contratio 10⁻⁵ 01 10⁻⁴.01 conut ratio 10⁻⁵ 01 PSDIndex 12 ratio 10⁰ 10 10 10 Similarity<0.82 10^{-6} 10⁻⁶ でcut済み 10⁻¹ 0<mark>↓</mark>0 10⁻⁷ 10⁻⁷ 4000 2000 3000 1000 2000 3000 2000 3000 1000 1000 PulseHeight(sum) PulseHeight(sum) PulseHeight(sum)



CHIBA UNIVERSITY

卒業研究発表会





NINJAKA

Similarityのcut条件による取得率の変化

Crabの取得率(*ɛ* _{Crab}) 指定した範囲の赤色のイベント数 赤色の全イベント数

BGDの取得率(*ɛ* bgd) BGDデータのカット後のイベント数 BGDデータの全イベント数

Figure of merit(性能指数)の定義

Figure of merit : FOM= $\frac{\mathcal{E} \operatorname{Crab}}{\sqrt{\mathcal{E} \operatorname{BGD}}}$

1. Similarityの上限を動かす(右のグラフ)

Similarity<0.74のとき、

- FOMの最大値: 2.25
- 2. Similarityの上限とPSDの下限を動かす

Similarity<0.73, 1<PSDIndexのとき、

FOMの最大値: 2.29









NINJAKA

PSDIndexのcut条件による取得率の変化

PSDIndexはcutなし,Similarity<0.73でcut済み



・今回求めたFOMが最大をとるcut条件は

1<PSDIndex<赤線, Similarity < 0.73のcut条件で FOM=2.66(ε crab=84.5%, ε BGD=10.1%)

現在のcut条件のFOMは 5<PSDIndex<20,Similarity < 0.4のcut条件で FOM=1.90(ε crab=55.8%, ε BGD=8.6%)











PSDIndexのcut条件による取得率の変化

PSDIndexはcutなし,Similarity<0.73でcut済み



・今回求めたFOMが最大をとるcut条件は

1<PSDIndex<赤線, Similarity < 0.73のcut条件で FOM=2.66(ε crab=84.5%, ε BGD=10.1%)

・ 現在の Cut 条件の FOM は 5<PSDIndex<20,Similarity < 0.4のcut条件で FOM=1.90(ε crab=55.8%, ε BGD=8.6%)



※青の点線:現在採用されているカット条件 5 < PSDIndex < 20









・軌道上において、X線信号が電気ノイズの影響を受け、X線信号の取得率が地上試験の 90%から55%に低下した。

・Figure of meritの最大値を求めて、新たにカット条件を決めた。 1<PSDIndex<赤線(前のページ),Similarity < 0.73のcut条件で



・今回求めた新しいCut条件を用いて、かに星雲の周期解析を行う。

- FOMの最大値は、2.66 (*ε* crab=84.5%, *ε* BGD=10.1%)







Appendix







電気ノイズ: Similarityでcut



2種類の電気ノイズ





使用するノイズデータ (実測)

今回はGMC1のみのアップデートを考える

・使用データ (2024/2/1 Test 8.8) : Waveform120240201-131157.root (<u>PDF</u>)

•ソフトウェアトリガー (50 Hz) で取得したベースライン波形 201イベント分

軌道上で実測したノイズ波形の例



.20240201-131157.root (<u>PDF</u>) ベースライン波形 201イベント分



シミュレータへの実装方法

- 基本方針: イベントごとにノイズ波形をX線信号波形に足すことで電気ノイズを実装する
- Test 8.8 で取得した201イベント分の波形に対して乱数を振って使用するイベントを決定
- サンプルを使用
- トリガー機能を実装していないため)



• 内側、外側電極それぞれについて、ベースラインの値 (~1000 ch) を引いた後、電子数から ADC 値の変換係数 (レポート) で割り、X線信号波形に足す。平均値シミュレータにはイベントトリガー機能を実装していないため、波形は余裕を見て 実測の116サンプルより長い200 サンプル作成している。84サンプル分足りないため、117-200サンプルは前半の0–83

修正前後の Similarity, PSDIndex 分布の比較 (入射X線は Crab)



- ・それぞれ横軸は Sum の波高値
 - 300 ch ~ 6 keV
- 軌道上の電気ノイズ実装後の方が Similarity, PSDIndex ともにより 広がった分布
- 特に similarity の分布の違いが顕 著で、修正後は similarity 0.2 以上 にも分布している
- X線イベントの取得率 (PHA > 70ch)
 - Similarity < 0.4 => 75%
 - 5 < PSDIndex < 20 => 87%
 - AND => 65%





イベント弁別のためのパラメータ

- 前のイベントとの時刻差 (DeltaTime)
 - 単位: 1/2¹⁶ 秒 = 15.3 us
 - •注:イベントの時刻付与精度は1/2¹⁴ 秒 = 61.0 us
- Sum 波形の立ち上がり時間 (PSDIndex)
 - ・ 立ち上がり部分を三角形で近似 (PSDIndex = 2 x S x H)
 - 単位:40 ns
- Inner, outer 波形の相似度 (Similarity)
 - ピアソンの相関係数 = 分散cov[X,Y]/標準偏差(X) x 標準偏差(Y) $\frac{1}{114}\sum_{i=2}^{115} \left(f_{in}[i] - \overline{f_{in}}\right) \left(f_{out}[i] - \overline{f_{out}}\right)$ $\sqrt{\frac{1}{114}\sum_{i=2}^{115} \left(f_{in}[i] - \overline{f_{in}}\right)^2} \sqrt{\frac{1}{114}\sum_{i=2}^{115} \left(f_{out}[i] - \overline{f_{out}}\right)^2}$
- ピークの時刻差 (DeltaPeak)
 - Ch2 O ピーク Ch1 O ピーク
 - ・単位:サンプル





X線 vs. 荷電粒子イベント: 立ち上がり時間











イベント弁別のためのパラメータ

- 前のイベントとの時刻差 (DeltaTime)
 - 単位: 1/2¹⁶ 秒 = 15.3 us
 - •注:イベントの時刻付与精度は1/2¹⁴ 秒 = 61.0 us
- Sum 波形の立ち上がり時間 (PSDIndex)
 - ・ 立ち上がり部分を三角形で近似 (PSDIndex = 2 x S x H)
 - 単位:40 ns
- Inner, outer 波形の相似度 (Similarity)
 - ピアソンの相関係数 = 分散cov[X,Y]/標準偏差(X) x 標準偏差(Y) $\frac{1}{114}\sum_{i=2}^{115} \left(f_{in}[i] - \overline{f_{in}}\right) \left(f_{out}[i] - \overline{f_{out}}\right)$ $\sqrt{\frac{1}{114}\sum_{i=2}^{115} \left(f_{in}[i] - \overline{f_{in}}\right)^2} \sqrt{\frac{1}{114}\sum_{i=2}^{115} \left(f_{out}[i] - \overline{f_{out}}\right)^2}$
- ピークの時刻差 (DeltaPeak)
 - Ch2 O ピーク Ch1 O ピーク
 - ・単位:サンプル







返息

S N

問告

ち

17

今回用いた2種類のデータ ◆(Crab+BGD)データ

X線信号:かに星雲(中性子星、X線天文での標準光源) イベント数:3.254983×106個

観測期間:4日間

各々イベント数で割り規格化(1イベントの波形が持つ確率を導出)し、(Crab+BGD)データ+BGDデータをして比をとる。 Crablイベントの波形が持つ確率がBGD1イベントの波形が持つ確率より大きいグリットでは、比は1より大きくなる。 1よりグリット(赤色の部分)のみCrabからくる信号あるグリットと仮定した。→Crabのみの取得率を導出できる。 仮定が成り立つためには、比が1より小さい部分でCrab1イベントの波形が持つ確率が十分小さいことが必要。



※青の点線:現在採用されているカット条件 5 < PSDIndex < 20

◆BGDデータ

検出器の向き:X線源がほとんどない暗い方向 イベント数:4.514519×10⁶個 観測期間:11日間



NINJACH



PSDIndexの上限を青色曲線でcutする方法に変更する場合に、BGDの取得率は減少した。また 「立ち上がり時間 vs 相関係数の比」の赤色領域のイベント数の変化が十分小さく、Crabの取得率 がほぼ変わらないと仮定して、今回求めたFOMの最大値は

1<PSDIndex<青色曲線,Similarity < 0.73のcut条件で 2.66(ε crab=84.5%, ε BGD=10.1%)</p> 現在のcut条件のFOMは 5<PSDIndex<20, Similarity < 0.4のcut条件で 1.90(εcrab=55.8%, εBGD=8.6%)

