

完全空乏型CCDのピクセル応答関数の測定

国立天文台JASMINE検討室 小林行泰

超小型位置天文衛星のデータ解析で利用するために、完全空乏型CCDのピクセル応答関数 (PRF) の測定を行った。完全空乏型CCDについて、光源の波長やCCDの動作温度などの物理条件を変化させてPRFを測定し、PRFを形成に影響を与える物理パラメータを決定した。得られた物理パラメータを用いることで、Nano-JASMINE衛星の観測で想定される条件下でのPRFを決定し、観測されるCCD出力を推測することが可能となった。測定に用いたXYZ-stageの精度検証についても言及する。



図1 Nano-JASMINE衛星 フライトモデルの外観 サイズはおおよそ50cmx50cmx50cm、重量はおおよそ35kgである。

1. Nano-JASMINE衛星の概要と現状

Nano-JASMINEは国立天文台が東京大学の宇宙工学科の協力を得て、進めている位置天文衛星である。口径5cmの総アルミ金属製望遠鏡に、検出器として、すばるが浜松ホトニクスとHyper Suprime Camのために開発した完全空乏型CCD搭載して、宇宙から全天の約20万個の星の位置天文観測を行う。衛星はウクライナのCyclone-4 ロケットを用いて、ブラジルのアルカンタラ宇宙センターから今年冬季にも打ち上げられる予定であったが、様々な理由により、実現の見通しがたっていない。Nano-JASMINEは50cm立方35kgという小型ながら宇宙からの天体観測ということで明るい星に対しては3ミリ秒角 (mas) の精度での星位置の決定を目指す。1ピクセルはおおよそ1.8秒角に設定されているので、これは、1/600ピクセルもの高い精度での位置決定をすることになる。ちなみに星像のサイズは2秒程度である。入射する星像の光の分布からCCDの出力を決定するのはピクセル応答関数であり、これを求めることは観測データから星像位置を決定するために極めて重要となる。

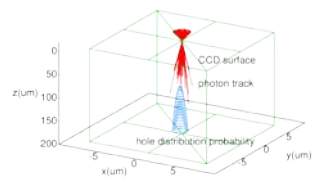


図2 物理シミュレーションの模式図。Fを持って入射した光は吸収係数で決まる確率分布を持ってSi内部に侵入し、電子、孔子ペアを生成する。孔子はバイアス電圧により蓄積部に誘導されるがその速度が易動度で決まり、拡散係数で決まる速度で電場と垂直方向に移動していくことになる。

2. ピクセル応答関数

ひとつのピクセルに注目して、ある座標(x, y)に入射した光が、注目したピクセルの出力となる確率を座標の関数としたものがピクセル応答関数であり、ピクセルの量子効率とは異なることを注意したい。あるピクセルの上の入射した光がそのピクセルの出力とならないことは、多数の要因が存在し、これらは、CCDの動作温度は光の波長、望遠鏡のF比などにも、影響される。主な効果として、電荷の拡散効果、これに関連して電荷の易動度、光の吸収係数などがあげられるし、また、最近ではbrighter-flatter効果なども発見されたりもしている。

3. 測定と測定結果

ピクセル応答関数は簡単には、微小な光像をつくり、これをCCDピクセルの上を移動させ、どのような出力ができるかを測定することで求められる。温度や光の波長、バイアス電圧などを変えてピクセル応答関数を測定し、これから物理パラメータを求めることにより、想定されるあらゆる条件下でのピクセル応答関数を決定することができる。以下の図のように測定できた。

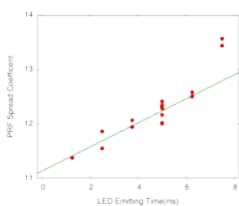


図3

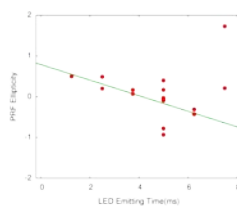


図4

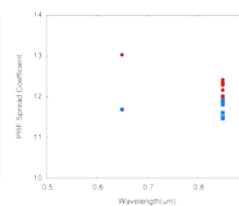


図5

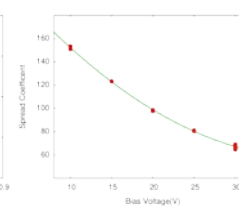


図6

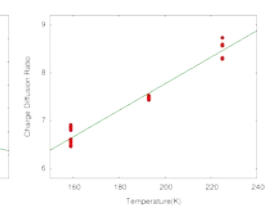


図7

図3 LEDの発光時間を変えて測定した。蓄積される電荷の量によってPRFが変化する、いわゆる

brighter-fatter 効果である。右端の点はwellが一杯に近いための影響によると思われる。

図4 LEDの発光時間を変えるとPRFのx-y非対称性が見えてくる。

図5 波長による差は吸収係数だけの差である。

図6 バイアス電圧を変化されると蓄積部に到達する時間が変化するので電荷の拡がりが増える。図はモデルPRFの分散係数と比較した。実線は物理的に予想されるモデルを示し、測定とモデルは良く一致する。

図7 動作を温度を変えて測定した。温度により、吸収係数や電荷拡散係数や易動度が変化するが、温度と電荷分散係数/易動度の比の関係が求められた。

4. XYZ-stageについて

さて、測定に用いたXYZ-stageであるが、カタログ値は精度数nmと他の類似機種に比較すると3桁高い精度を示す。この精度を検証したいといろいろ試みたが、まだ成功していない。nmオーダーで安定したシステムが構築できず、大きなドリフトが存在してしまう。どなたかアドバイスをもらえるとありがたいのだが。以下2つの方法で位置精度の検定を行った。

1) マイケルソン干渉計

図8のようなマイケル型干渉計をセットアップしてステージの精度測定を試みた。図9にシステム外観を示す。2つの鏡のうち一つにはピエゾ素子を貼り付け常時スキャンさせることで、干渉縞を常にモニターできる。また2つ目の鏡はXYステージの上に置き、これにより、XYステージの動きがモニターできる。図10はX,Yを交互にスキャンして位置をプロットしたもので、Y方向のスキャン時は光路差は変化しないので、一定の値を示すことになるはずである

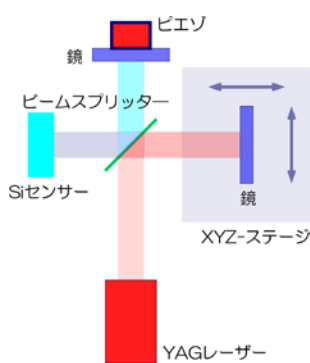


図8

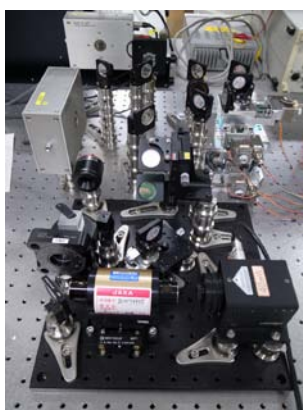


図9

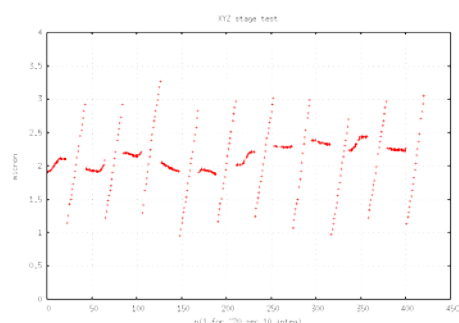


図10

図8 マイケルソン型干渉計を用いた位置検定システムの模式図

図9 システムの外観 青色に見えるデュワーには下向きにCCDが設置され液体窒素で冷却、動作温度はヒータと温度コントローラーを用いて制御する。下部チェンバーにはxyzステージが収められている。

図10 x,y交互にスキャンして光路差を測定した。ドリフトが顕著にみられる。

2) CCDのpixelを利用して校正

一回のPRFの測定には、5000枚の画像をおよそ20時間かけて撮影する。図11に測定点を示す。四角のわくが1ピクセルを示し、多数の点が微小光像1250点の配置位置である。測定ではラスタースキャンではなく、全体を50回にわけて一様に測定して行く方法で行い、この間50回のピクセルを対象にした位置キャリブレーションを行い補正する。この時の補正値を頻度分布として示したのが図12であり、これから分散を求めると、X方向

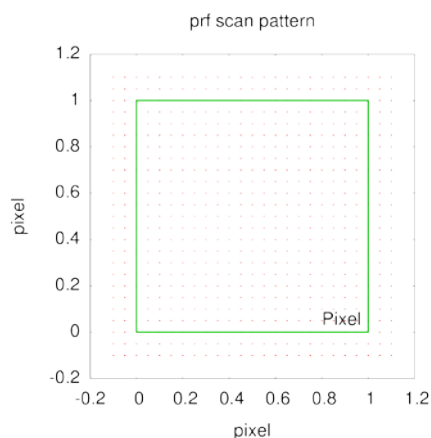


図11 測定位置を示す。四角が1ピクセルを示し多数の点で測定点を示す。

6.6/2 nm Y方向 18.4/2 nmとなった。PRFの測定としては十分な精度が得られたが、校正の値を積分すると図 1 3 となる。これがシステム全体の位置誤差を表しており、大きなドリフトの存在が示され、相変わらず、XYステージの精度の検証にはならない。全体でマイクロオーダーのドリフトが存在する。これも、ステージ以外の部分に大部分が起因すると推測される。

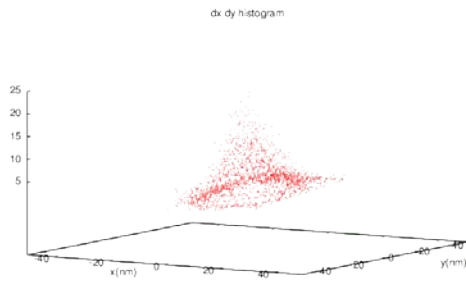


図 1 2 補正值のヒストグラム

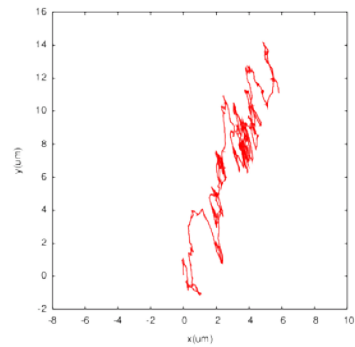


図 1 3 補正值を積分すると、誤差の絶対値になるが。