

電荷蓄積型検出回路を用いた フーリエ分光器の高感度化

Sensitization of Fourier spectrometer by use of
charge integration amplifier

秋葉 誠、廣本 宣久

Makoto Akiba, Norihisa Hiromoto

郵政省通信総合研究所

Communications Research Laboratory

Abstract

We have improved a detection system for Fourier spectrometer by means of charge integrating amplifier (CIA). The read out noise of the detection system only is about 4 electrons for an integration time 1sec. The noise equivalent power at wavelength $2\mu\text{m}$ with Fourier spectrometer is $7.7 \times 10^{-15} \text{W/sec}^{1/2}/\text{cm}^{-1}$ and that with the whole teleccpe sysetem is $3.8 \times 10^{-15} \text{W/sec}^{1/2}/\text{cm}^{-1}$.

1. はじめに

我々は、通信総合研究所 1. 5 m 望遠鏡観測機器の一つとして B O M E M 社製フーリエ分光器 D A 2. 26 を購入しその整備・改良を進めてきた。フーリエ分光器は、従来感度が低いと考えられてきたので、特に高波長分解能を要求される明るい天体にしか適用されなかった。しかしフーリエ分光器は、原理的には特に感度が低いと言うわけではなく、波長分解能の選択性や幅広い観測波長帯など他の分光器にはないいくつかの利点がある。さらに分散系の分光器とは違って一つの検出器で波長分解ができるので 2 次元素子を使えば空間 2 次元の情報と同時に取ることも可能である。こうしたフーリエ分光器の可能性を引き出すために、我々は電荷蓄積型検出回路を用いてフーリエ分光器の高感度化を行ってきた。2 次元素子は、基本的に電荷蓄積型検出方式を使っているため、これはまた将来の 2 次元素子化に備えた予備的な実験ともなっている。

2. 電荷蓄積型検出回路

従来のトランスインピーダンスアンプ方式 (T I A) による検出回路は、オペアンプの帰還抵抗によってフォトカレントを電圧に変えている。従って出力電圧は帰還抵抗に比例するので、感度を上げるためにはできるだけ大きな抵抗を使わなければならない。T I A では、この帰還抵抗に起因するジョンソンノイズが回路のノイズを支配し、S/N を上げるための原理的な障害になっていた。また帰還抵抗をあまり大きくすると回路の浮遊容量と結合してオペアンプの速度が落ちてしまい、比較的速いサンプリングを必要とするフーリエ分光器では不利な要因となっている。

一方電荷蓄積型検出回路 (C I A) は、フォトカレントを容量で電圧に変え、その電圧を F E T で読み取る方式なので、ジョンソンノイズは検出回路内部では発生しない。C I A のノイズは、結局電圧読み出し F E T の入力換算ノイズで決っているが、この値は現在のところ数 $\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ であり天体観測で使われる高抵抗 $10^{11} \Omega$ のジョンソンノイズ $\sim 40 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ と比べてはるかに小さい。

3. 電荷蓄積型検出回路のフーリエ分光器への応用とその問題点

C I A をフーリエ分光器に応用するにはいくつかの問題点がある。その一つはサンプリング周波

数に反比例して実質的に感度が下がるということである。容量Cの持つインピーダンスは $1/\omega C$ であるからフォトカレントを電圧に変換する際にサンプリング周波数fに対して必ず $1/2\pi f$ だけ信号電圧が下がるのである。しかしTIAの場合のジョンソンノイズとFETの入力換算ノイズは、4桁程の差があり入力容量が100pF(InSb検出器の容量)としても、 ~ 200 Hz(BOMEM DA 2.26の2 μ m帯での最小サンプリング周波数)、10pF(PINフォトダイオードの容量)だとすると2kHzのサンプリングでTIAとS/Nとして等価となる。TIAではこのほかに高周波でオペアンプの速度が遅くなることと電圧性入力換算ノイズの寄与も付け加わるので実際には入力容量が100pFでサンプリングが200HzだとするとCIAのほうが数倍S/Nはよくなる。

いずれにせよサンプリング周波数を下げればそれに比例してS/Nはあがるが、別の問題もまた発生する。CIAは、電荷を蓄積するわけであるが幾らでも蓄積できるわけではない。FETのゲート・ソース電圧とドレイン電流間の線形性を保てるゲート電圧や、検出器両端にかかる電圧による検出器容量の変化などによって、蓄積できる電圧範囲が限定されるのである。フーリエ分光器の場合サンプリング周波数を下げると、同じ波長分解能を得るためにはその分だけ測定時間が長くなる。例えば、サンプリング周波数を200Hzとして波長分解能を5000とすれば測定時間は、25秒かかることになるが、これは検出器の暗電流を考えると問題になる時間である。この問題を解決するためには、検出器を十分冷却して暗電流を減らせばよい。現在のところ可視光用のシリコンPINフォトダイオードでは、この程度の測定時間は液体窒素温度(77°K)で達成できるが、InSbでは、個体窒素温度(~ 60 °K)程度以下に冷却しなければならない。

4. まとめ

ゲイン付きのFET読み出し回路を用いて入力換算ノイズ $4\text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$ を達成した。これを使ったフーリエ分光器の検出限界は、口径1mm ϕ 、容量100pFのInSb検出器を使った場合、測定波長2.2 μ mで $7.7 \times 10^{-15}\text{ W}/\text{cm}^{-1}\text{ sec}^{1/2}$ である。また個体窒素温度(~ 53 °K)まで冷却すれば 1 cm^{-1} を下回る程度の波数分解能が得られる。これは帰還抵抗 $10^{11}\Omega$ のTIAを使った場合に比べて3倍程高いS/Nである。また容量10pFのシリコンPINフォトダイオードの場合、測定波長0.5 μ mで $3.1 \times 10^{-15}\text{ W}/\text{cm}^{-1}\text{ sec}^{1/2}$ となり、これは帰還抵抗 $10^{11}\Omega$ のTIAと比較して20倍よい値である。

現在のところS/Nを上げる上で最も障害となっているのは、サンプリング周波数が下げられないということである。これはフーリエ分光器の可動鏡の速さを余り遅くできないことに起因している。BOMEM DA 2.26の場合なにが問題で可動鏡の速さを遅くしていないのかまだ原因はわからないが、遅くする方向で検討中である。また電荷蓄積型回路読み出しFETのノイズについてもまだ下げることが可能であり、現在新たな回路を試作しテストをしている。

天体観測の場合ノイズの原因として観測機器が発生する以外にも大気の放射によるフォトンノイズがある。このノイズがどれほどの値になるかは、その日の状態や観測する視野などによる。これまでの観測での典型的な値を考えると視野 $\sim 20''\phi$ で大気のフォトンノイズとフーリエ分光器のノイズは同程度になり、これ以上広い視野の観測では、現在のフーリエ分光器で十分な観測が可能である。

参考文献

H. Murakami, M. Akiba and M. Noda.: J. J. A. P., 1988, 27, L1973.