

アレイアンテナの雑音温度校正 Noise Calibration for an array antenna

○川口則幸（国立天文台名誉教授）（Noriyuki Kawaguchi(NAOJ)）

概要(Abstract)

アレイアンテナは多数のアレイ素子で構成され、各素子アンテナで受信した信号を合成して高感度（高利得）を得るものである。アレイアンテナの雑音温度校正を従来の液体窒素校正で行うことには大きな困難が生じる。そこで、液体窒素を用いない新しい校正法を提案する。この方法は大気中の水蒸気量を計測するラジオメータへの応用を目的に開発されたものだが、アレイアンテナの校正にも特に有効である。

1. 水蒸気ラジオメータの液体窒素校正

図1及び図2に水蒸気ラジオメータを運用している上海天文台とタイ天文台での液体窒素校正の様子を示す。液体窒素の校正作業は大変で、校正頻度も年に1回程度にとどまっている。



図1 上海天文台での液体窒素校正

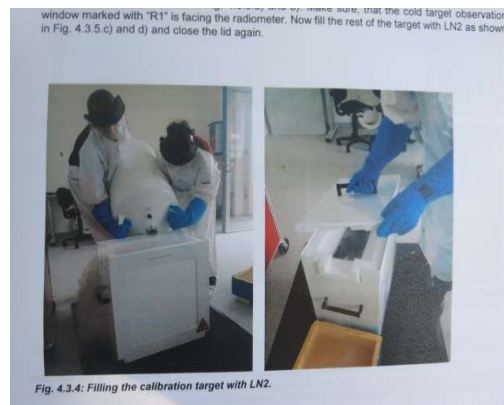


図2 タイ天文台での液体窒素校正

2. 現状のアレイアンテナの校正



図3 フェーズドアレイフィード



図4 フェーズドアレイフィードの液体窒素校正

現在、世界の電波天文観測分野ではアレイアンテナの導入が積極的に進められている。特にオーストラリアでは SKA のパイロットプロジェクトとして「ASCAP」システムを整備し観測を開始している。このシステムでは、パラボラアンテナの一次焦点面にフェーズドアレイフィードを取り付け、マルチビームの受信を可能にしている（図 3）。このアレイフィードは直径が 1.2 m もあり、水蒸気ラジオメータの液体窒素校正のように簡単に行えない。クレーンを動員して行う必要がある（図 4）。

Roshi_2015

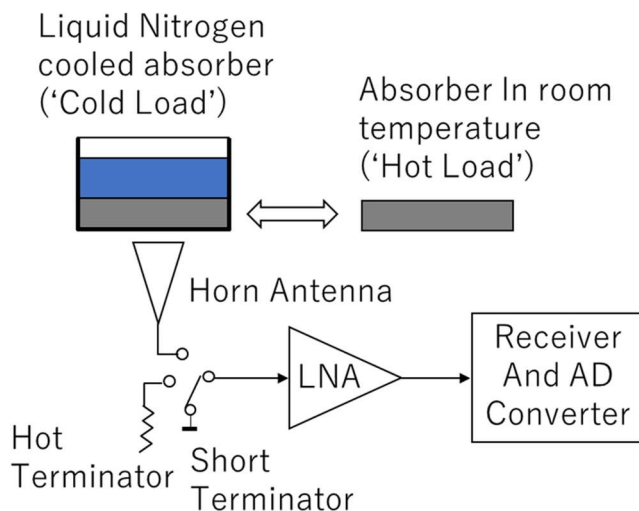


図 5 GB100mに搭載されるフェーズドアレイフィード

また、米国のグリーンバンク 100 m アンテナにもフェーズドアレイフィードが搭載された（図 5）。また、SKA の将来計画ではアパチャーアレイの建設案も検討されている。この計画では、250 のアレイ素子を直径 56 m に配置する。このような大型のアレイでは、もはや従来方式の液体窒素校正を行うことは不可能である。

3. 新しい校正法の提案

将来の大型アレイアンテナにも応用可能な新しい校正方法（特許申請済み）。従来の方法では、



ホーンアンテナの前面に液体窒素で 80 K に冷却された無反射吸収体（Cold）と常温の吸収体（Hot）を交互に置き、その電力比を計測することで受信機雑音温度の校正を行ってきた。その受信電力比は

$$Y = \frac{T_{cold} + T_{rx}}{T_{hot} + T_{rx}}$$

と書け、Y の計測から T_{cold} , T_{hot} を既知として受信機雑音温度 T_{rx} を求める。

この液体窒素法で T_{rx} が校正されると天空の雑音温度 T_{sky} が次式から求められる。

$$Y_{hs} = \frac{T_{hot} + T_r}{T_{sky} + T_r}$$

図 6 従来の校正法と新しい校正法

Y_{hs} は受信機雑音を含む常温吸収体とスカイの雑音電力比である。システム雑音温度はスカイ雑音温度と受信機雑音温度の合計で、電波望遠鏡の感度を決定する重要なパラメータである。システム雑音温度だけであれば、ノイズダイオードを用いた雑音注入法など簡便な方法があるが、この方法ではスカイ雑音と受信機雑音の分離が行えず、システム雑音の変化がスカイ雑音の変化か受信機雑音の変化かを区別することはできない。

新しい校正方法は、図 6 に示すように受信機の入力部にスイッチを設け、アンテナ、無反射終端器、完全反射終端を切り替えるものである。無反射終端器の雑音温度を T_{hot} 、スカイ雑音温度を T_{sky} 、受信機雑音温度を T_r 、完全反射体の雑音温度を T_s とすると Hot と完全反射体の受信電力比 Y_{hs} は

$$Y_{hs} = \frac{T_{hot} + T_r}{T_s + T_r}$$

と書け、 $T_s = kT_r$ とすると $T_r = \frac{T_{hot}}{(k+1)Y_{hs}-1}$ と Y_{hs} の計測結果から受信機雑音温度の計測が可能になる。ここで、 k は半導体素子のパラメータに依存する値（図 7）で、フォワード雑音とリバース雑音の比で、事前に校正しておく必要はあるがほぼ定数であるとみなせる（図 7）。

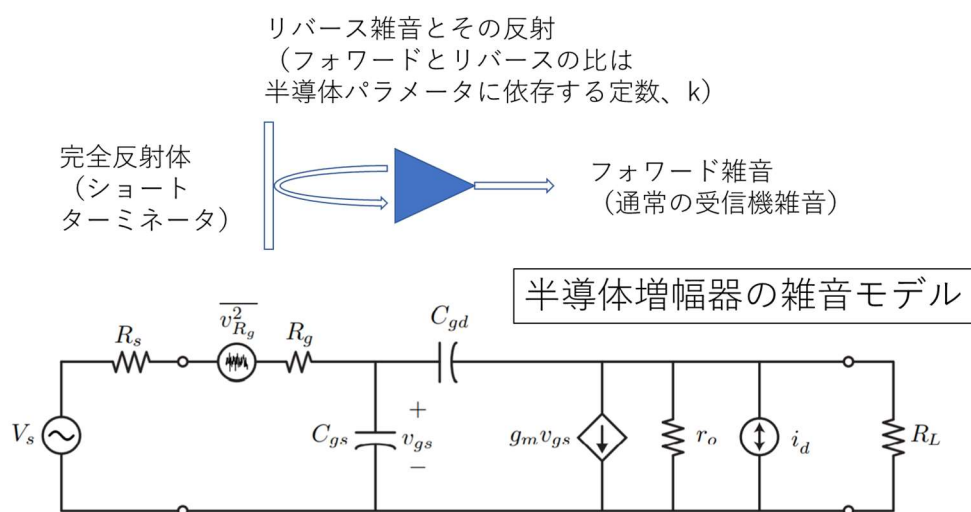


図 7 半導体の雑音パラメータとフォワード/リバース比 k

この方法の確からしさを検証するために、スカイ雑音として液体窒素で冷却した無反射吸収体と常温の吸収体の雑音温度の計測を行った。その結果を図 8、図 9 に示す。図に示す 10 回の試行結果では正しく吸収体の環境温度を反映しており、本新校正法が正しいことを示している。同様の計測を 10 日間連続で試験したところ、長時間安定度についても検証された。

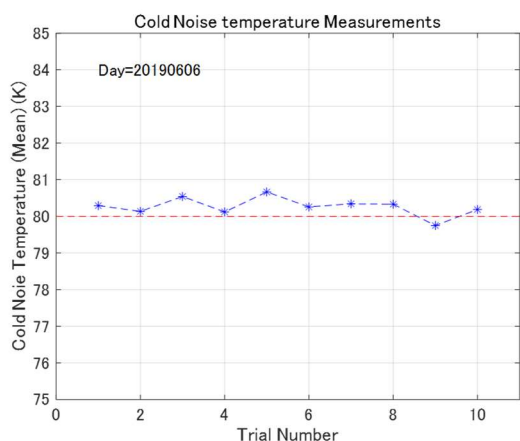


図 8 冷却アブソーバーの雑音温度計測結果

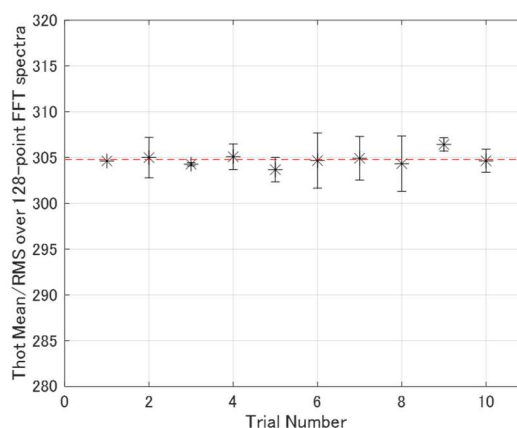


図 9 常温アブソーバーの雑音温度計測結果

4. 火山噴火予知とアレイ型ラジオメータ

2014 年 9 月に開催された第 34 回技術シンポジウム@上松において、近くの御岳山が爆発し 56 名が犠牲になった（図 10）。

Disaster in Ontake in 2014

第 34 回技術シンポ@上松(2014_9)



図 10 御嶽山の爆発

前兆現象はほとんどなく、水蒸気爆発を伴い突然噴火した。火山研究によると水蒸気量が噴火直前に急速に減少することが報告されている。また、2018 年 1 月 23 日 10 時 02 分頃に白根火山が爆発した。爆発個所は当初予定していない場所で噴火が起きた。気象庁報告では「有史以降初めて本白根山で噴火が発生した。近年の噴火活動はすべて水蒸気爆発である」としている。第 39 回技術シンポにて報告した水蒸気ラジオメータをアレイ化することによって、目には見えない火山の水蒸気噴出状況を常時監視することが可能になれば（図 11）、「どこで」「いつ」水蒸気爆発が起きそうかの予知研究に役立てることができる。しかし、ラジオメータでは受信電力を輝度温度に換算する必要があり、ここで提案する新校正法は特に有効であると思われる。

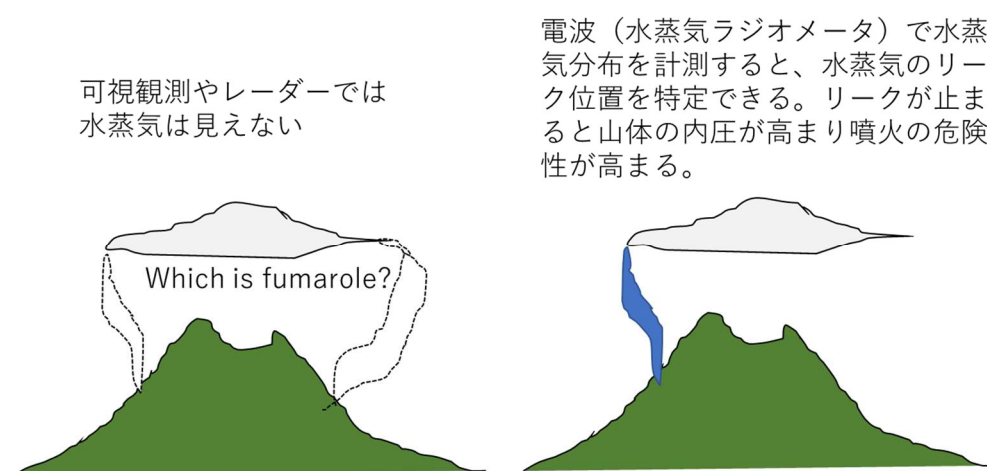


図 11 アレイ型水蒸気ラジオメータによる火山上空の水蒸気分布の計測

5. おわりに

本研究会の実行委員会の各位に感謝いたします。リモート開催でしたが、有意義な情報交換と研究交流が行えました。