

1 目的

簡易電波望遠鏡を用いて太陽電波を観測し、その結果から太陽の表面温度と大気の電波透過率を算出する。またパラボラアンテナの感度特性及び受信システムの性能評価を行い電波利用技術の基礎を習得する。

2 実験原理・背景

2.1 宇宙電波と太陽電波

宇宙電波源には主に熱的電波源と非熱的電波源がある。熱的電波は大きな運動エネルギーをもった自由電子が陽子に接近したときの急制動による制動放射であり、プラズマから発せられる。一方で非熱的電波は磁場の周りを荷電粒子が円運動することによるシンクロトロン放射である。また熱的放射は定常的であるのに対し非熱的放射は爆発的なものである。

特に太陽は地球に最も近接した電波天体であり、輻射によって $3.85 \times 10^{26} \text{W}$ ものエネルギーを放射し、地球の大気表面に到達する単位面積あたりのエネルギー（太陽定数）は 1.37kW m^{-2} になる。[1] そのエネルギー源は中心核での水素核融合反応である。太陽からの熱的放射は可視光領域では $T = 5800 \text{K}$ の光球から、 10GHz 以上の領域では $T = 7000 \sim 10000 \text{K}$ の彩層から、 1GHz 以下の領域では $T \sim 10^6 \text{K}$ のコロナからの放射が支配的である。またフレアなどの爆発現象に伴い非熱的放射を行うこともあり、周波数は数 100kHz から数 10GHz に渡る。

2.2 熱放射と輝度温度

光線に垂直な単位面積を単位時間あたりに通過する単位立体角、単位周波数あたりのエネルギーを輻射強度 I_ν と呼ぶ。輻射強度は自由空間で光線に沿って一定になる。濃密かつ輻射と熱平衡状態にある黒体放射のスペクトルは

$$I_\nu = B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.1)$$

と表される。ここで $B_\nu(T)$ は Planck 分布である。ここで $h \sim 10^{-34}$, $k \sim 10^{-23}$, $\nu \sim 10^9$, $T \sim 10^3$ 程度とすると $h\nu/kT \sim 10^{-5} \ll 1$ なので 1 次まで展開すると

$$\begin{aligned} B_\nu(T) &\simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{1 + h\nu/kT - 1} \\ &= \frac{h\nu^2 k}{c^2} T \end{aligned} \quad (2.2)$$

となる。これは Rayleigh-Jeans 近似と呼ばれる。以上から

$$T_B = \frac{c^2}{2\nu^2 k} I_\nu \quad (2.3)$$

となる。 T_B は輝度温度であり, Rayleigh-Jeans 近似のもとでは黒体の温度 T に一致する。

2.3 輻射輸送方程式

光線が物質に入射すると吸収, 放射によってその輻射強度が変化する。物質が放射のみを行う場合を考える。単位時間あたりに単位体積の物質が放射する単位立体角, 単位周波数あたりのエネルギーを放射係数 j_ν とすると, 輻射強度の変化量 dI_ν は

$$dI_\nu = j_\nu ds \quad (2.4)$$

となる。ここで ds は物質の厚さである。また物質が吸収のみを行う場合を考える。輻射強度の変化量 dI_ν は I_ν に比例し, その比例係数を α_ν とすると

$$dI_\nu = -\alpha_\nu I_\nu ds \quad (2.5)$$

となる。以上から放射と吸収が同時に存在する場合を考えると

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{j_\nu}{\alpha_\nu} - I_\nu \quad (2.6)$$

ここで光学的厚み $\tau_\nu = \int_0^L \alpha_\nu ds$, 源泉関数 $S_\nu = j_\nu / \alpha_\nu$ を用いると

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = S_\nu - I_\nu \quad (2.7)$$

となり, これを輻射輸送方程式と呼ぶ。この解は物質に入射した光線の輻射強度 $I_\nu(0)$ を用いて以下のようになる。

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.8)$$

これは入射した輻射強度 $I_\nu(0)$ は光学的厚みに従い減衰し, また放射による寄与は光学的厚みに応じて源泉関数に近づくことを表している。すなわち $\tau_\nu \rightarrow \infty$ の極限においては $I_\nu = S_\nu$ となる。また熱平衡状態においては (2.1) より $I_\nu = B_\nu(T)$ であるので, $\tau_\nu \rightarrow \infty$ かつ熱平衡状態においては

$$S_\nu = B_\nu(T) \quad (2.9)$$

となり, これを Kirchhoff の法則と呼ぶ。これを用いて (2.8) を書き換えると

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.10)$$

さらに (2.3) 式から入射光の輝度温度を $T_B(0)$, 物質の温度を T とすると

$$T_B = T_B(0)e^{-\tau_\nu} + T(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.11)$$

となる。

3 実験装置

3.1 装置の構成

電波望遠鏡は受信部, IF 信号処理系, 検波器, DC 増幅器, A/D 変換器, 測定用計算機からなる.

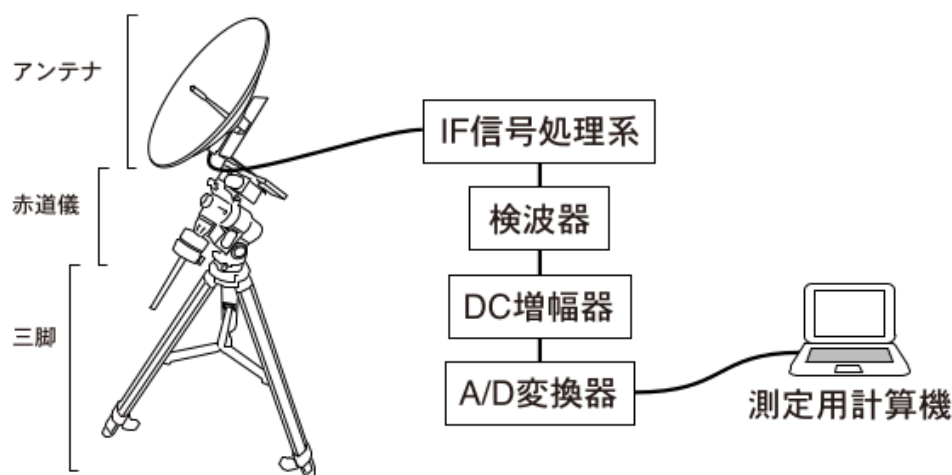


図 1 実験装置のブロック図 (実験テキストより引用)

3.1.1 受信部

受信部はアンテナ, コンバーター, 赤道儀, 三脚からなる.

アンテナは BS 放送受信用の TDK BCS-45DHV を用いている. コンバーターはアンテナと一体になっており, 11.70-12.75GHz 帯の受信信号とオシレーターからの 10.678GHz 信号を加算合成し, LPF に通すことで 1022-2072MHz の中間周波数信号を生成する. このコンバーターには 54dB 利得があり, 電源は IF 信号処理系から同軸ケーブルで供給される. 室内機においてはパラボラアンテナは取り外され, 集光部とコンバーターのみで運用する.

赤道儀は Vixen GP2-399000 を用いている. 極軸は天の北極方向に合わせる必要があり, 今回は慶應義塾大学の緯度である北緯 35.5559° に $\pm 0.5^{\circ}$ の範囲で設定する.

3.1.2 IF 信号処理系

IF 信号処理系は主に信号増幅器から構成される. 信号増幅器は一般的に BS・CS 信号のブースターとして用いられるマスプロ電工 BCB20LS を用いている. このブースターは伝送周波数帯域 1000-2150MHz において 18dB 以上の利得が保証されている. また +15V は同軸ケーブルで供給され, 電源にはマスプロ電工 BPS5B を用いている.

3.1.3 検波器

検波器は交流の入力信号の包絡線を取り出し直流に変化する素子である。今回は性能が補償された検波器として Keysight 8472B Low-Barrier Schottky Diode Detector と Herotek DZR124AA Zero-Bias Schottky Diode Detector を用いる。それぞれの入力周波数範囲は DC-18GHz, 10-12.4GHz であり、入力電力に比例した負電流を出力する。

3.1.4 DC 増幅器

前段の検波器の出力電流から得られる電圧出力は数十-数百 mV だが、後段の ADC の測定レンジ 0-5mV であることから更に増幅する必要がある。検波器の出力は負電流であるので、反転増幅器を通すことで測定に適した正の電圧を得ることができる。ここで増幅倍率は $(27k \times 51k)/(27k + 51k)/1k = 17.7$ 倍となる。

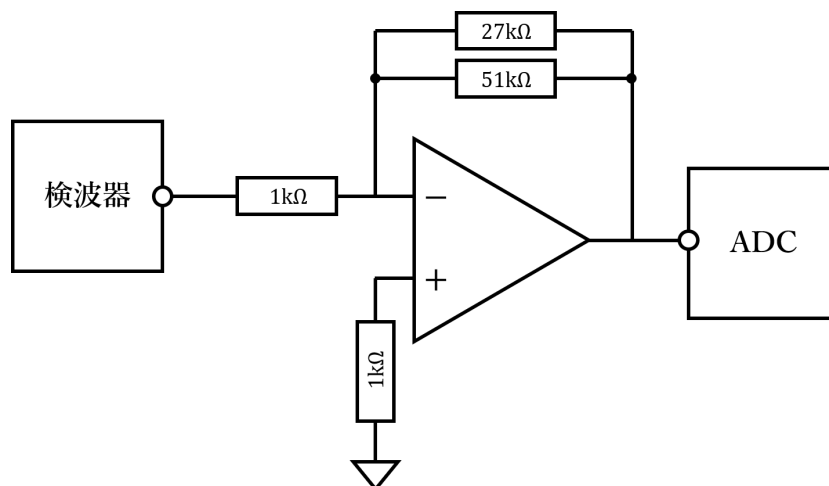


図 2 反転増幅器

3.1.5 AD 変換器, 測定用計算機

AD 変換器として Arduino Uno (AVR ATmega328P) 内蔵の ADC を用いる。これは測定レンジ 0-5V, 分解能 4.89mV である。AD 変換器で測定された電圧値は測定用計算機である Apple MacBook Air(室外機), Apple iMac(室内機) を用いて記録される。データの記録は Processing IDE で開発された mizutama ソフトウェアによって行われる。ADC のサンプルレートは 100Hz であり、これを 1s の時間間隔で積分したものを記録する。

3.2 予備実験

予備実験として室内機を用いてお湯の温度変化を電波望遠鏡を用いて測定した。

3.2.1 実験方法

アルミ缶に熱湯を入れ温度計を用いて初期温度を測定した。次に室内機の集光部をお湯に浸し、DC増幅器の出力電圧を記録した。

3.2.2 実験結果

図3に測定結果を示す。集光部への入力電力と検波器の出力電圧に完全な線形性を仮定すると、お湯の温度が低下するにしたがって黒体放射の輻射強度が低下し、信号電圧も低下すると考えられる。図3から実際に温度の低下に伴って信号電圧が低下していることがわかる。

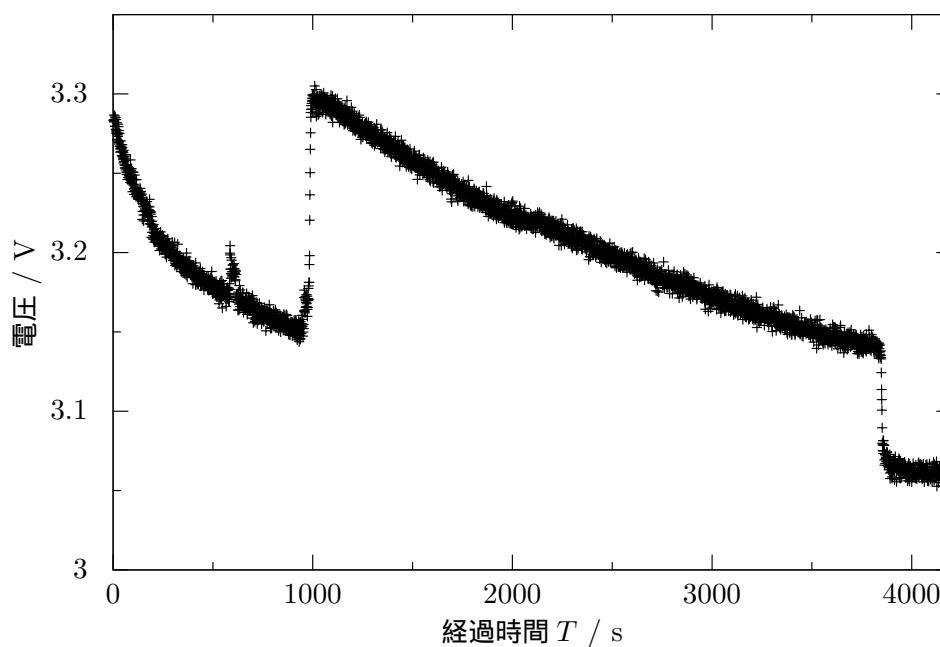


図3 お湯の温度変化に伴う信号電圧の変化

4 性能評価

4.1 受信機雑音温度

4.1.1 原理

2.3節で示したように、輻射強度は温度の次元を持った輝度温度で表されたので、望遠鏡の受信した電力を温度の次元で表示することを考える。ここで

$$T_A = \frac{W_\nu}{k} \left[\frac{\text{J s}^{-1} \text{Hz}^{-1}}{\text{J K}^{-1}} \right] \quad (4.1)$$

はアンテナ温度と呼ばれ、温度の次元を持つ。ただし W_ν は周波数 ν の電波の単位周波数あたりの受信電力である。これはある受信電力に相当する熱雑音を発生させるために必要な温度といえる。

受信した微弱な信号はコンバーターから ADC までの信号処理系全体で発生する雑音に埋もれるため、受信機の感度はその雑音によって制限される。これらの雑音のアンテナ温度をまとめて受信機雑音温度 T_{RX} で表す。ここで受信機を高温 T_{hot} 、低温 T_{cold} の黒体で覆ったとき、受信機出力電圧は

$$V_{hot} = a(T_{hot} + T_{RX}) \quad (4.2)$$

$$V_{cold} = a(T_{cold} + T_{RX}) \quad (4.3)$$

と表される。ここで a は受信機の利得による比例定数である。上の 2 式と $Y =: V_{hot}/V_{cold}$ を用いて T_{RX} を表すと

$$T_{RX} = \frac{T_{hot} - YT_{cold}}{Y - 1} \quad (4.4)$$

となる。

4.1.2 方法

この実験では高温物体として室温の水、低温物体として液体窒素を用いた。まず電波吸収体で覆ったデュワー瓶に室温の水を入れ、その温度を測定した。次に室内機の集光部をデュワー瓶の水に浸し V_{hot} を測定した。続いて上と同様のデュワー瓶に液体窒素を入れ、同様の手順で V_{cold} を測定した。

4.1.3 結果

図 4 に測定結果を示す。図 4 の網掛け (青) 部は T_{hot} 、網掛け (赤) 部は T_{cold} での測定である。それぞれの経過時間は $t = 0-780$, $t = 950-1230$ である。この範囲の値を平均すると $V_{hot} = 3.10\text{V}$, $V_{cold} = 2.02\text{V}$ となった。また $T_{hot} = 298.15\text{K}$, $T_{cold} = 77.0\text{K}$ であった。以上から T_{RX} は

$$T_{RX} = 3.37 \times 10^2 \text{K} \quad (4.5)$$

となる。

4.2 Allan 分散

4.2.1 原理

参考文献

- [1] 国立天文台. 理科年表プレミアム. <http://www.rikanenpyo.jp.kras1.lib.keio.ac.jp/member/?module=Member&action=Login>. (Accessed on 04/30/2021).

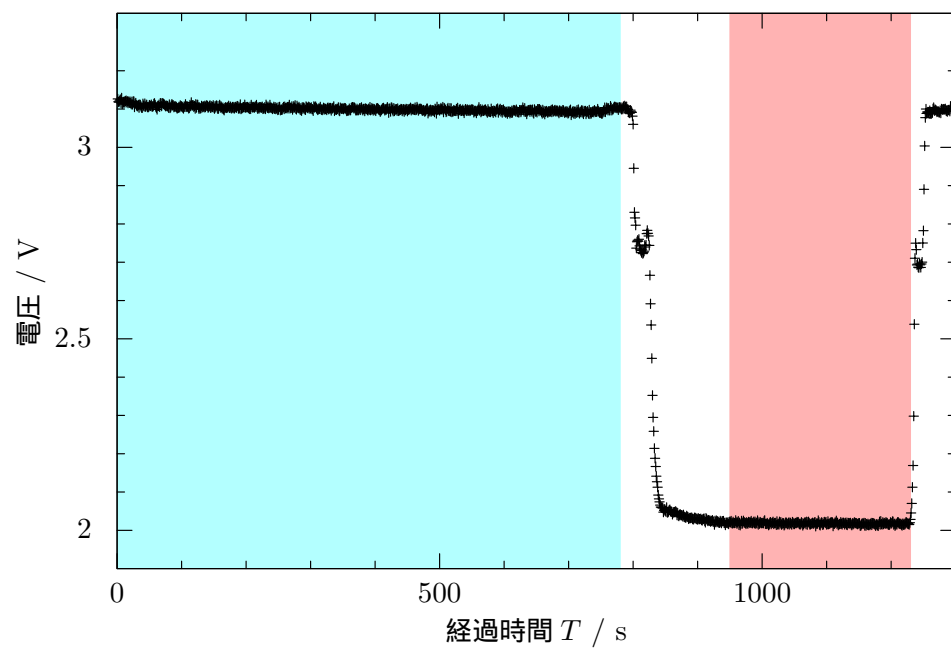


図 4 T_{hot} と T_{cold} の測定