Fortgeschrittenenpraktikum

Versuch 36

Extraterrestische Mikrowellen

Durchgeführt am 16. Mai 2001

Praktikantengruppe 51

Annemarie Fuchs	2038176
Stefanie Wagner	2035252
Matthias Becker	2054412

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Der Praktikumsversuch vermittelt einen Einblick in die Radioastronomie und Hochfrequenztechnik. Mit einer Parabolantenne haben wir den Durchgang der Sonne und der Milchstraße gemessen, sowie die Variation der Antennentemperatur in Abhängigkeit von der Antennenelevation.

2 Schematische Beschreibung der Apparatur

Der Empfang eines Signals der Parabolantenne wird ermöglicht durch einen Rundhohlleiter im Brennpunkt des Parabolspiegels mit einem Dipol der Länge $\lambda/4$, der sich im Abstand $\lambda/4$ vor der Rückwand des Hohlleiters befindet. Die Dipolantenne ist mit einem Schwingkreis (Bandpassfilter) induktiv gekoppelt. Damit möglichst wenig vom Signal verloren geht, ist noch in der Außenanlage der Parabolantenne ein Messverstärker angeschlossen. Da bei hochfrequenten Signalen durch den Skineffekt immer mit grossen Verlusten zu rechnen ist, wird das Signal mit einem Frequenzumsetzer auf niedrige Frequenzen umgesetzt.

3 Vorbereitungen

3.1 Azimut und Höhe des Meteosat

Um Azimut und Höhe des Meteosat zu berechnen, führen wir Kugelkoordinaten ein

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \sin\vartheta\cos\varphi \\ \sin\vartheta\sin\varphi \\ \cos\vartheta \end{pmatrix}$$

mit $\vartheta = 90°$-Breite und $\varphi =$ Länge erhält man für Garching:

$$\vec{G} = r_{\mathrm{E}} \begin{pmatrix} \sin(90° - 48,2°)\cos 11,6° \\ \sin(90° - 48,2°)\sin 11,6° \\ \cos(90° - 48,2°) \end{pmatrix} = r_{\mathrm{E}} \begin{pmatrix} 0,6529 \\ 0,1340 \\ 0,7455 \end{pmatrix}$$

Da die Horizontebene senkrecht zu $\vec{G}$ ist, ist der Normalenvektor der Horizontebene gegeben durch:

$$\vec{n}_{\mathrm{H}} = \frac{\vec{G}}{|\vec{G}|} = \begin{pmatrix} 0,6529 \\ 0,1340 \\ 0,7455 \end{pmatrix}$$

Der Abstand des Satelliten vom Erdmittelpunkt ist gegeben durch

$$m_\mathrm{s}\omega^2 r = \frac{Gm_\mathrm{E}m_\mathrm{s}}{r^2}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{Gm_\mathrm{E}}{\omega^2}} = 42200 \ \mathrm{km}$$

Die Himmelsmeridianebene steht parallel zur Nord-Süd-Achse ($\vec{e_z}$). Daher gilt für den Normalenvektor der Himmelsmeridianebene:

$$\vec{n}_\mathrm{HME} = \frac{\vec{e}_z \times \vec{n}_\mathrm{H}}{|\vec{e}_z \times \vec{n}_\mathrm{H}|} = 1,500 \begin{pmatrix} -0,1340 \\ 0,6529 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Der Großkreis, der durch den Zenit und den Satelliten geht, liegt in einer Ebene, die den Verbindungsvektor von Garching und Satellit enthält und außerdem senkrecht auf der Horizontebene steht (ZS-Ebene). Damit gilt für deren Normalenvektor:

$$\vec{n}_\mathrm{ZS} = \frac{\vec{S} \times \vec{n_\mathrm{H}}}{|\vec{S} \times \vec{n_\mathrm{H}}|} = 1,320 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,7455 \\ 0,1340 \end{pmatrix}$$

Der Azimut ist der Winkel zwischen der ZS-Ebene und der Himmelsmeridianebene

$$\cos A = \frac{\vec{n}_\mathrm{ZS} \cdot \vec{n}_\mathrm{HME}}{|\vec{n}_\mathrm{ZS} \cdot \vec{n}_\mathrm{HME}|} = 0,9639$$

$$A = 15,4^\circ$$

Die Höhe H ist der Winkel zwischen der Horizontalebene und dem Verbindungsvektor zwischen Garching und Satellit. Daher erhält man:

$$\cos(90^\circ - H) = \frac{\vec{n}_\mathrm{H}(\vec{S} - \vec{G})}{|\vec{n}_\mathrm{H}(\vec{S} - \vec{G})|} = 0,5525$$

$$H = 90^\circ - \arccos 0,5525 = 33,5^\circ$$

3.2 Höhe und Zeitpunkt des Sonnendurchgangs vor der Antenne

Um Zeitpunkt und Höhe des Sonnendurgangs zu berechnen, lesen wir Rektaszension α und Deklination δ aus der Tabelle ab: $\alpha = 3^\mathrm{h}31^\mathrm{m} \quad \delta = 19,0^\circ$. Der Azimut A ist der gleiche wie in Aufgabe 1: $A = 15,4^\circ$. Quadriert man die Formeln

$$\begin{aligned} \sin z \sin A &= \cos\delta \sin t \\ \sin z \cos A &= -\cos\varphi \sin\delta + \sin\varphi \cos\delta \cos t \end{aligned}$$

ergibt sich nach Umformung eine in $\cos t$ quadratische Formel

$$(1+\tan^2 A \sin^2 \varphi) \cos^2 t - (2 \tan \delta \sin \varphi \tan^2 A) \cos t + (\tan^2 \delta \cos^2 \varphi \tan^2 A - 1) = 0$$

Man erhält dadurch einen Stundenwinkel von

$$t = 7,60^\circ \mathrel{\hat{=}} 0^{\mathrm{h}}30^{\mathrm{m}} \quad \text{und} \quad t = 165,07^\circ \mathrel{\hat{=}} 11^{\mathrm{h}}0^{\mathrm{m}}$$

Addiert man dazu die Rektaszension, erhält man den Zeitpunkt des Sonnendurchgangs

$$\vartheta = 4^{\mathrm{h}}1^{\mathrm{m}} \quad \text{und} \quad \vartheta = 14^{\mathrm{h}}31^{\mathrm{m}}$$

Der erste Zeitpunkt liegt in der Nacht, also ist die richtige Lösung 14:31 Uhr. Für die Höhe erhalten wir $z = 66^\circ$.

4 Auswertung

4.1 Thermisches Rauschen eines Verstärkers

Mit einer Heiß-Kalt-Messung bestimmten wir das thermische Rauschen eines Verstärkers. Wir haben für den Widerstand, der gleich dem des Verstärkers ist, bei Zimmertemperatur von 293 K eine Leistung von $9,2\ \mu$W gemessen und bei 78 K eine Leistung von $4,3\ \mu$W. Nach Nyquist gilt

$$P = k_{\mathrm{B}} B T$$

mit der Leistung P, der Boltzmannkonstante k_{B} und Temperatur T. Mit den Messwerten erhalten wir

$$\frac{9,2\ \mu\mathrm{W}}{4,3\ \mu\mathrm{W}} = \frac{k_B B(293\ \mathrm{K} + T_{\mathrm{E}})}{k_{\mathrm{B}} B(78\ \mathrm{K} + T_{\mathrm{E}})}$$

wobei wir das Rauschen des Verstärkers durch seine Eigentemperatur T_{E} berücksichtigen. Diese berechnet sich zu T_{E}=111 K.

4.2 Spannung am Antennenausgang

Zuerst haben wir mit einem Generator ein Referenzsignal erzeugt. Aus dem Schaltbild ergab sich insgesamt 90,2 dB. Über die Formel

$$90,2\ \mathrm{dB} = 20 \log \frac{1}{U_{\mathrm{G}}}$$

erhält man $U_{\mathrm{G}} = 31\ \mu$V. Danach wurde ein gleiches Signal über die Antenne laufen gelassen. Für dieses Signal gilt die Dämpfung -8,5 dB und die Verstärkung 40,7 dB. Somit ergibt sich mit vorherigem Ergebnis:

$$32,2\ \mathrm{dB} = 20 \log \frac{U_{\mathrm{G}}}{U_{\mathrm{A}}}$$

$$U_{\mathrm{A}} = 0,76\ \mu\mathrm{V}$$

Die Leistung lässt sich durch

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(0,76\ \mu\mathrm{V})^2}{50\ \Omega} = 1,2 \cdot 10^{-14}\ \mathrm{W}$$

berechnen. Mit der effektiven Fläche der Antenne:

$$A_{\mathrm{eff}} = (0,85\ \mathrm{m})^2 \pi \cdot 0,55 = 1,32\ \mathrm{m}^2$$

erhält man eine Leistung pro Quadratmeter von $0,91 \cdot 10^{-14}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$. Nimmt man als Abstrahlfläche des Satelliten ein Quadrat mit dem Erddurchmesser, erhält man als Abstrahlleistung des Satelliten $P_{\mathrm{Sat}} = 1,49\ \mathrm{W}$.

4.3 Fluss der Sonne

Um den Fluss der Sonne zu berechnen, mussten wir zuerst die Temperatur der Sonne bestimmen (siehe Abb. 2). Dazu benutzten wir die Formel für die Dämpfung D[dB]:

$$D = 10 \log \frac{141\ \mathrm{K} + 36\ \mathrm{K} + T_{\mathrm{S}}}{141\ \mathrm{K} + 36\ \mathrm{K}}$$

Die Temperaturen 141 K und 36 K kommen durch apparatives Rauschen bzw. durch den kalten Himmel (siehe auch nächste Aufgabe) zustande. Mit der gemessenen Dämpfung 6,13 dB ergibt sich eine Temperatur von 549 K. Daher berechnet sich der Fluss zu:

$$S = \frac{k_{\mathrm{B}} T}{A_{\mathrm{eff}}} = 5,74 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{Wm}^{-2}\ \mathrm{Hz}^{-1}$$

Da wir mit einer polarisierten Antenne eine unpolarisierte Quelle gemessen haben, verdoppelt sich unser Fluss zu $1,15 \cdot 10^{-22}\ \mathrm{Wm}^{-2}\ \mathrm{Hz}^{-1}$.

4.4 Antennentemperatur

Wir veränderten die Antennenelevation von 60° bis −15°. Aus der Zunahme des Signals berechnen wir die Temperatur, die die Antenne sieht. Als Referenz nehmen wir den Erdboden, den wir als schwarzen Strahler betrachten, dessen Temperatur T_{Boden} wir mittels eines Thermometers zu 289 K gemessen haben. Damit können wir die Temperatur T_{kH} des "kalten Himmels" mit folgener Formel bestimmen

$$D = 10 \log \frac{141\ \mathrm{K} + T_{\mathrm{Boden}}}{141\ \mathrm{K} + T_{\mathrm{kH}}}$$

wobei wir 3,85 dB für die Dämpfung D ablesen, woraus sich T_{kH}=36 K ergeben. Wir nehmen nun diesen Wert als Referenz und berechnen damit die Antennentemperatur

$$T = (141 + T_{\mathrm{kH}}) \cdot 10^{D/10} - 141 \ \ \mathrm{K}$$

Berechnete Werte finden sich in folgender Tabelle.

Winkel	Dämpfung	Temperatur
Boden	3,9 dB	289 K
0°	3,6 dB	265 K
10°	3,3 dB	237 K
20°	2,2 dB	153 K
30°	0,3 dB	49 K
40°	0,2 dB	44 K
50°	0,1 dB	40 K
60°	0 dB	36 K

Tabelle 1: Antennentemperatur

4.5 Fluss der Milchstraße

Um den Fluss der Milchstraße, deren Durchang um etwa fünf Uhr morgens in Bild 1 zu sehen ist, zu bestimmen, gehen wir genauso wie bei der Berechnung des Flusses der Sonne vor. Mit der gemessenen Dämpfung von 0,06 dB ergibt sich eine Temperatur von 27 K. Somit berechnet sich der Fluss zu

$$S = 3,2 \cdot 10^{-22} \ \ \mathrm{Wm}^{-2} \ \ \mathrm{Hz}^{-1}$$

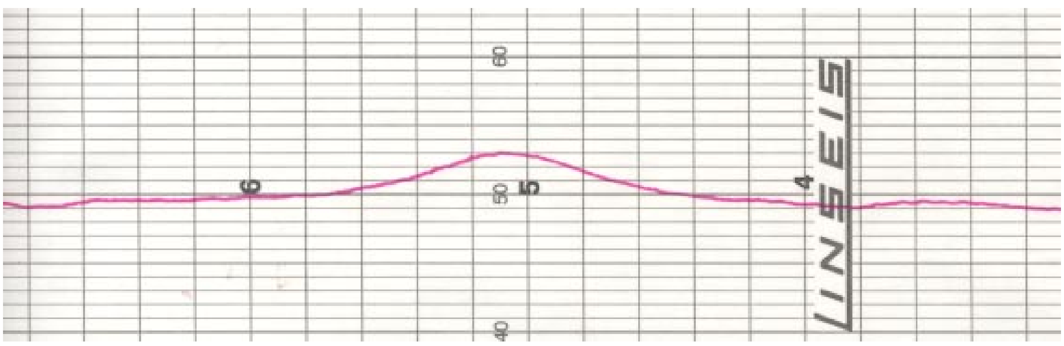

Abbildung 1: Milchstraße

4.6 Öffnungswinkel des Teleskops

Aus der Kurve des Sonnengangs können wir auch den Öffnungswinkel der Parabolantenne bestimmen. Dazu berechnen wir zuerst die Dämpfung bei der halben Sonnenleistung ($T = 275$ K):

$$D = 10 \log \frac{141\ \text{K} + 36\ \text{K} + 275\ \text{K}}{141\ \text{K} + 36\ \text{K}} = 4,1\ \text{dB}$$

Bei diesem Wert lesen wir die Breite des Sonnendurchgangs mit 26,4 min ab. Der Öffnungswinkel beträgt somit

$$\Theta = \frac{26,4}{24 \cdot 60} \cdot 360° = 6,6°$$

4.7 Strahlungstemperatur der Sonne

Um die tatsächliche Strahlungstemperatur der Sonne zu berechnen, muss man berücksichtigen, dass die Sonne nur eine Bruchteil des gesamten Öffnungswinkels der Antennen beleuchtet. Die Sonne nimmt einen Winkel von einem halben Grad ein. Wir müssen also die Sonnentemperatur mit dem Verhältnis

$$\frac{6,6^2}{0,5^2} = 174$$

multiplizieren und erhalten etwa 96000 K. Diese Temperatur ist offensichtlich ein Vielfaches der bekannten 6000 K Oberflächentemperatur. Eine Erklärung für diesen Unterschied ist, dass die Sonne zusätzlich zu der Schwarzkörperstrahlung noch Synchrotronstrahlung und Strahlung aus Atomübergängen emittiert.

Literatur

[1] Hagn, Extraterrestrische Mikrowellen

[2] Stöcker, Taschenbuch der Physik

[3] Brennberger, Gschrey, Schmidtner, Extraterrestrische Mikrowellen

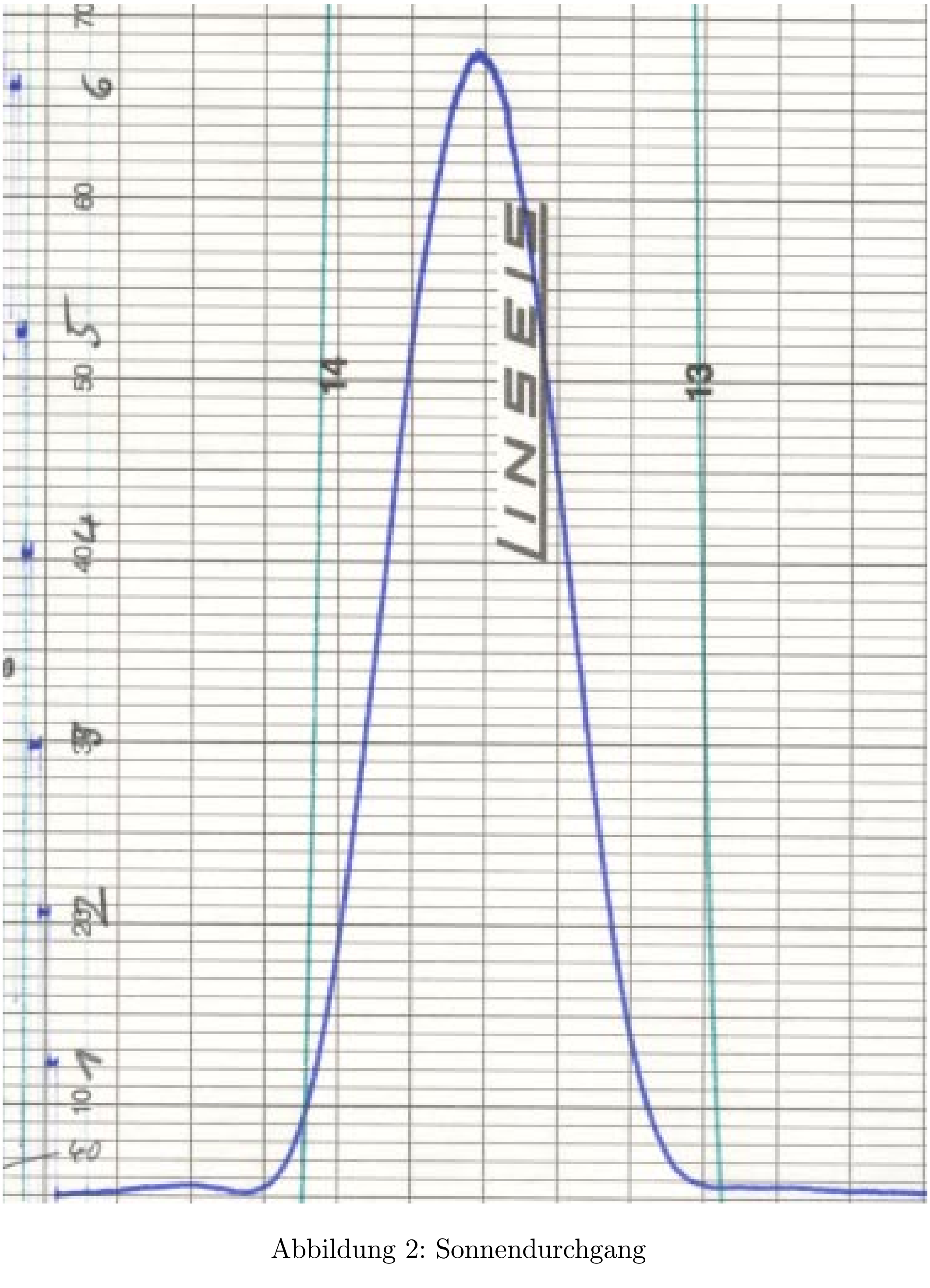

Abbildung 2: Sonnendurchgang