

Fortgeschrittenenpraktikum:
Ausarbeitung - Versuch 36
„Extraterrestrische Mikrowellen“
Durchgeführt am 4. Dezember 2002

7. Februar 2003

Gruppe 17

Michael Wack 2234088

Christoph Moder 2234849

Sebastian Mühlbauer 2218723

1 Einleitung

Der Versuch „extraterrestrische Mikrowellen“ bietet Studenten einen Einblick in die Radioastronomie und die Hochfrequenztechnik. Mit einer 1,75 m-Parabolantenne messen wir den Fluss der Sonne, der Milchstraße und, da unser Versuch im Winter stattfindet, des Orionnebels (ist im Sommer nachts unter dem Horizont und tagsüber wegen der Radiostrahlung der Sonne sowie den daraus resultierenden Reflexionen nicht messbar). Auch das Signal von Meteosat wird empfangen und ausgewertet. Sehr interessant an diesem Versuch ist dabei die Einführung in die Hochfrequenztechnik, mit ihren Besonderheiten und Tücken - denn diese Dinge sind entscheidend für den Messaufbau, werden jedoch sonst im Studium nirgends vermittelt.

Die Parabolantenne ist fest auf einen Azimut von ca. 15° eingestellt, die Antennenelevation ist variabel. Das Signal wird vom Brennpunkt der Antenne über einen Hohlleiter zu einem Dipol geleitet, dort in ein Koaxialkabel gespeist und direkt unterhalb des Antennenspiegels in einem Vorverstärker verstärkt, um Verluste durch lange Kabelwege zu minimieren. An den Messaufbau wird das Signal durch induktive Kopplung übertragen, um Schäden an der Messelektronik durch elektrostatische Aufladung oder Blitzschlag zu vermeiden. Mit einem Frequenzumsetzer wird das Signal auf eine niedrigere Frequenz umgesetzt (um den Skineneffekt zu minimieren) und dann den verschiedenen Messgeräten zugeleitet.

2 Azimut und Höhe von Meteosat

Meteosat befindet sich auf einer geostationären Umlaufbahn über dem Nullmeridian. Geostationär bedeutet automatisch, dass der Satellit über dem Äquator stehen muss, ansonsten wäre seine geographische Breite nicht fest - er würde zwischen Nord- und Südhalbkugel hin- und her pendeln, weil seine Bahn wegen der Erdanziehung immer über einem Großkreis auf der Erde liegen muss.

Für eine Satellitenbahn muss die Gravitation gleich der Zentripetalkraft sein sowie $t = 24\text{h}$, d.h. für den Bahnradius ergibt sich:

$$F_z = m_S \cdot \frac{v^2}{r} = m_S \cdot 4\pi^2 \frac{r}{t^2}$$
$$F_g = G \cdot \frac{m_E \cdot m_S}{r^2}$$
$$r = \sqrt[3]{\frac{G \cdot m_E \cdot t^2}{4\pi^2}} = 4,176 \cdot 10^4 \text{ km}$$

Die Berechnung von Azimut und Höhe des Satellits geht am elegantesten in Kugelkoordinaten (bei allem anderen verrechnet man sich, es werden einfach zu viele Dreiecke ;-), der Erdmittelpunkt ist der Ursprung des Koordinatensystems:

$$\vec{n}_{\text{Garching}} = r_E \cdot \begin{pmatrix} \sin \vartheta \cdot \cos \phi \\ \sin \vartheta \cdot \sin \phi \\ \cos \vartheta \end{pmatrix}$$

mit $\vartheta = 90^\circ - 48,2^\circ$ und $\phi = 11,6^\circ \Rightarrow$ es ergibt sich für den Ortsvektor von Garching bzw. den Normalenvektor der Garchinger Horizontebene:

$$\vec{n}_H = \frac{\vec{n}_{\text{Garching}}}{|\vec{n}_{\text{Garching}}|} = \begin{pmatrix} 0,6529 \\ 0,1340 \\ 0,7455 \end{pmatrix}$$

Die Ebene des Garchinger Himmelsmeridians enthält die Erdachse (Richtung \vec{e}_z) und den Garchinger Ortsvektor, d.h. ihr Normalenvektor ist das Kreuzprodukt dieser beiden Vektoren:

$$\vec{n}_{\text{Meridian}} = \frac{\vec{n}_{\text{Garching}} \times \vec{e}_z}{|\vec{n}_{\text{Garching}} \times \vec{e}_z|} = 1,5 \cdot \begin{pmatrix} -0,134 \\ 0,059 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Der Vektor Garching-Meteosat \vec{s} liegt in der Ebene, die durch Meteosat, Garching und den Erdmittelpunkt definiert ist. Diese Ebene steht senkrecht auf der Garchinger Horizontebene, weil sie den Ortsvektor von Garching enthält, und dieser ist der Normalenvektor \vec{n}_H der Horizontebene. Der Normalenvektor \vec{n}_{GM} dieser Ebene kann also als Kreuzprodukt aus dem Vektor Garching-Meteosat \vec{s} und dem Garchinger Ortsvektor \vec{n}_H berechnet werden:

$$\vec{n}_{GM} = \frac{\vec{s} \times \vec{n}_H}{|\vec{s} \times \vec{n}_H|} = 1,32 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -0,7455 \\ 0,1340 \end{pmatrix}$$

Der Azimut ist der Winkel zwischen den Ebenen bzw. Normalenvektoren $\vec{n}_{\text{Meridian}}$ und \vec{n}_{GM} und errechnet sich mit der Formel $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \gamma$ zu $15,4^\circ$. Die Höhe von Meteosat ist der Winkel zwischen der Garchinger Horizontebene (ausgedrückt durch \vec{n}_H) und dem Vektor Garching-Meteosat \vec{s} , es errechnet sich analog $33,5^\circ$.

3 Höhe und Zeitpunkt des Sonnendurchgangs vor der Antenne

Zeitpunkt des Sonnendurchgangs in Garching: Die mitteleuropäische Zeit bezieht sich auf den 15. Längengrad; Garching liegt auf $11,6^\circ$, d.h. der Sonnendurchgang erfolgt $\frac{15^\circ - 11,6^\circ}{360^\circ} \cdot 24 \text{ h} = 13,6 \text{ min}$ später.

Zeitpunkt des Sonnendurchgangs vor der Antenne: Die Antenne ist auf Meteosat ausgerichtet, sie hat einen Azimut von $15,4^\circ$. Entsprechend erfolgt der Sonnendurchgang erst, wenn sich die Erde um diesen Betrag weiter gedreht hat, also $\frac{15,4^\circ}{360^\circ} \cdot 24 \text{ h} = 61,6 \text{ min}$ nach der Kulmination in Garching. Der Sonnendurchgang vor der Antenne erfolgt also um 13 : 15 : 12 Uhr MEZ.

Höhe des Sonnendurchgangs vor der Antenne: Die Sonne erreicht am Versuchstag (4. Dezember) eine Maximalhöhe von $17,75^\circ$; weil die Vertikalbewegung der Sonne eine Sinusbahn beschreibt, beträgt die Höhe vor der Antenne, die um den Azimut-Winkel gegenüber der Südrichtung gedreht ist: $h = \cos(15,4^\circ) \cdot 17,75^\circ = 17,11^\circ$.

4 Meteosat: Bestimmung der Spannung am Ausgang der Antenne

Die Antenne wird auf die Höhe von Meteosat ausgerichtet und die Frequenz passend eingestellt. Die Signalstärke wird gemessen, indem man zu einer bekannten Spannung aus dem Generator die Dämpfung so einstellt, dass der Zeigerausschlag am Messgerät genauso groß wie beim Signal von Meteosat ist. Da die verschiedenen Dämpfungen und Verluste des Meßstrangs bekannt sind, kann man damit das auf das Eingangssignal von Meteosat zurückrechnen.

Dämpfung vom Generator bis zum Frequenzumsetzer (variable Dämpfung eingestellt auf $-46,5 \text{ dB}$):

$$D_{\text{Generator}} = (-46,5) \text{ dB} + (-48,2) \text{ dB} + (-0,5) \text{ dB} = -95,2 \text{ dB}$$

Dämpfung von der Antenne bis zum Frequenzumsetzer:

$$D_{\text{Antenne}} = -0,1 \text{ dB} - 0,2 \text{ dB} + 18,2 \text{ dB} + 17,5 \text{ dB} - 3,8 \text{ dB} - 3,1 \text{ dB} - 1,3 \text{ dB} = 27,2 \text{ dB}$$

Gesamtdämpfung vom Generator bis zur Antenne:

$$D = D_{\text{Generator}} - D_{\text{Antenne}} = -122,4 \text{ dB}$$

=> Leistung an der Antenne, aus der Generatorleistung:

$$-122,4 \text{ dB} = 10 \cdot \log \frac{P_{\text{Antenne}}}{P_{\text{Generator}}}$$

$$P_{\text{Antenne}} = 10^{-12,24} \cdot P_{\text{Generator}} = 12 \cdot 10^{-12} \text{ mW} = 12 \text{ fW}$$

Mit einem Wellenwiderstand von $Z = 50 \Omega$ ergibt sich eine Spannung von:

$$U = \sqrt{P \cdot Z} = 0,77 \mu\text{V}$$

Die von der Antenne empfangene Leistung ist, wie berechnet, 12 fW; die effektive Fläche der Antenne beträgt $1,32 \text{ m}^2$, und die vom Satelliten ausgeleuchtete Fläche ist in erster Näherung $(14000 \text{ km})^2 = 196 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$, so ergibt sich die vom Satelliten abgestrahlte Leistung zu:

$$12 \text{ fW} \cdot \frac{196 \cdot 10^{12}}{1,32} = 1,78 \text{ W}$$

5 Antennentemperatur und Fluss der Sonne

Während der Mittagspause läuft die Sonne vor der Antenne vorbei, das Signal wird vom x-t-Schreiber festgehalten. Anschließend werden beim Verstärker nacheinander die verschiedenen Verstärkungsstufen (1 dB, 2 dB und 3 dB) eingeschaltet und somit das Signal des kalten Himmels (d.h. gleiche Antennenelevation, nach dem Sonnendurchgang) mit diesen Verstärkungen aufgezeichnet. Damit erhält man eine Eichung relativ zum kalten Himmel bei 19° Antennenelevation. Die absolute Temperatur bei 19° Elevation kann man durch die zweite Eichung ermitteln, bei der die Antenne in 10° -Schritten vom warmen Boden (Elevation -15°) bis auf den kalten Himmel bei 50° Elevation gerichtet wird. Nun wird die Bodentemperatur mit einem Thermometer gemessen, und man kann alle Werte zurückrechnen.

Die Eigenrauschtemperatur der Antenne setzt man mit 64 K an; sie wird jedes Jahr durch den Betreuer mittels einer Heiß-Kalt-Messung (heiß: Lufttemperatur der Umgebung; kalt: flüssiger Stickstoff) neu bestimmt. Die Verluste in den Kabeln der Außenanlage betragen $-0,5 \text{ dB}$.

Eigenrauschtemperatur der Antenne: 64 K \Rightarrow Rauschfaktor:

$$F = 10 \cdot \log \frac{290 + 64}{290} = 0,866 \text{ dB}$$

Verlust durch Rundhohlleiter und Antennenkabel ($= 0,5 \text{ dB}$):

$$F = 0,866 \text{ dB} + 0,5 \text{ dB} = 1,366 \text{ dB}$$

Rauschtemperatur:

$$T = 107 \text{ K}$$

Bodentemperatur (mit dem Thermometer gemessen): $9,8^\circ \text{C} = 283 \text{ K}$; laut Eichkurve im Diagramm entspricht das (linear interpoliert) ein Verhältnis von 4,6 dB zur Himmelstemperatur (bei 50°), d.h. für die Himmelstemperatur ergibt sich:

$$4,6 \text{ dB} = 10 \cdot \log \frac{283 \text{ K} + 107 \text{ K}}{107 \text{ K} + T_{\text{Himmel}}}$$

$$\Rightarrow T_{\text{Himmel}} = \frac{283 \text{ K} + 107 \text{ K}}{10^{0,46}} - 107 \text{ K} = 28,2 \text{ K}$$

Bei einem Antennenwinkel von 19° (d.h. mehr warme Atmosphäre) hat lautet das Verhältnis zum kalten Himmel 1,7 dB, d.h. es ergibt sich analog eine Temperatur von:

$$T = \frac{28,2 \text{ K} + 107 \text{ K}}{10^{-0,17}} - 107 \text{ K} = 93 \text{ K}$$

Die Sonne geht am 4. Dezember, an dem wir unser Praktikum gemacht haben, in einer Höhe von 19° vor der Antenne vorbei, und das Verhältnis zum Himmel bei 19° beträgt 2,7 dB, so ergibt sich für die Antennentemperatur:

$$T_A = (107 \text{ K} + 93 \text{ K}) \cdot 10^{0,27} - (107 \text{ K} + 93 \text{ K}) = 172 \text{ K}$$

Aus dem Plot ergibt sich eine Halbwertsbreite von ungefähr 30 min, was einem Sonnendurchmesser von $7,5^\circ$ entspricht. Aber der Sonnendurchmesser ist in Wirklichkeit $0,5^\circ$, d.h. nur $\frac{1}{225}$ der Fläche \Rightarrow die Temperatur ist in Wirklichkeit 225-mal so groß, also $39 \cdot 10^3 \text{ K}$. Die Diskrepanz zur wahren Oberflächentemperatur der Sonne (ca. 5000 K) erklärt sich dadurch, dass man im Radiobereich die Sonne nicht mehr als schwarzen Körper ansehen kann. Die Radiostrahlung entsteht v.a. durch Elektronen, die in Magnetfeldern beschleunigt werden und somit Synchrotronstrahlung aussenden.

Der Fluss der Sonne ist dann:

$$S = \frac{k_B \cdot T_A}{1,32 \text{ m}^2} = 1,80 \cdot 10^{-21} \frac{\text{J}}{\text{m}^2} = 1,80 \cdot 10^5 \text{ Jy}$$

Da wir mit einer polarisierten Antenne messen, die Sonnenstrahlung aber unpolarisiert ist, ist der tatsächliche Wert doppelt so hoch:

$$S = 3,60 \cdot 10^5 \text{ Jy}$$

6 Messung der Antennentemperatur aus Differenztemperatur Boden-Himmel

Bei einer Antennenelevation von 50° wurden verschiedene Verstärkungen aufgezeichnet und diese als Eichung für die Messungen bei anderen Antennenelevationen verwendet. Durch lineare Interpolation wurden damit die relativen Signalstärken bei anderen Antennenneigungen errechnet, und mit der per Thermometer gemessenen Bodentemperatur von $9,8^\circ\text{C} = 283 \text{ K}$ und der Eigenrauschtemperatur der Antenne von 107 K kann man mit folgender Formel die Rauschtemperatur der anderen Neigungswinkel errechnen:

$$F_{\text{Boden}} - F = 10 \cdot \log \frac{107 \text{ K} + 283 \text{ K}}{107 \text{ K} + T}$$

Antennenelevation	Stärke gegenüber 50° Elevation	Temperatur
50°	0 dB	25 K
40°	0,1 dB	29,1 K
30°	0,25 dB	32,9 K
20°	1,4 dB	75,4 K
10°	3,7 dB	202 K
0°	4,3 dB	248,6 K
Boden	4,7 dB	283 K (gemessen)

7 Fluss von Orion-Nebel und Milchstraße

Auf dem Diagramm: 1 dB = 200 mV, der Anstieg der Kurve beim Orionnebel beträgt 3 mV $\Rightarrow F = 0,017 \text{ dB}$, bei der galaktischen Ebene beträgt der Anstieg 27 mV $\Rightarrow F = 0,054 \text{ dB}$. Die Antenne befand sich bei der Messung auf einer Elevation von $33,5^\circ$, das entspricht 31,5 K.

$$F = 10 \cdot \log \frac{107 \text{ K} + 31,5 \text{ K} + T}{107 \text{ K} + 31,5 \text{ K}}$$

Es ergibt sich (wie bei der Sonne sind die Werte wegen der Antennenpolarisation verdoppelt):

- Orion: $T = 0,20 \text{ K} \Rightarrow$ Fluss: $S = 4,2 \cdot 10^{-19} \text{ Jy}$
- Galaktische Ebene: $T = 1,73 \text{ K} \Rightarrow$ Fluss $S = 3,6 \cdot 10^{-18} \text{ Jy}$

8 Öffnungswinkel der Antenne

Der Peak des Sonnendurchgangs beträgt 2,7 dB; der halben Sonnentemperatur von $T = \frac{172\text{K}}{2} = 86\text{K}$ entspricht 1,66 dB. Die Halbwertsbreite des Sonnendurchgangs beträgt laut Plot 27 min, was einen Öffnungswinkel der Antenne von $360^\circ \cdot \frac{27\text{min}}{24 \cdot 60\text{min}} = 6,5^\circ$ ergibt.

9 Messdiagramme

Ausschnitte aus den Diagrammen der Messapparatur:





