

中部工業大学における太陽電波の観測

貴 田 桂 介*, 今 井 弘*, 糸 見 義 雄*

Observation of Solar Radio Wave at Chubu Institute of Technology

Keisuke KIDA*, Hiroshi IMAI*, and Yoshio ITOMI*

(Received September 1, 1970)

This paper describes the principal instrument for measuring the solar radiation at 8-millimeter wavelength and some effects of the various conditions on the solar radiation.

The basic circuits of the two radiometric system at 6 GHz and 37.5 GHz are identical, but the receiving antenna at 37.5 GHz is a 1200 mm precision cassegrain type antenna, of which the half-power beamwidth is about 30 minutes of arc and the gain 50.9 dB.

The argon discharge noise source coupled to the radiometer is used as a calibration standard. For the reduction of the system noise temperature, the balanced GaAs Schottky barrier diode mixer is used, and the total receiver noise figure is less than 13 dB, the radiometer front end is housed in a weather-tight box located directly behind the antenna.

1. まえがき

中部工業大学において、6 GHz 太陽電波の連続観測を1969年5月より行なってきたが、このたび、ミリ波帯の観測装置を設置し、1970年7月より、37.5GHz太陽電波の連続観測を開始した。これらの6 GHz, 37.5GHzの太陽電波観測は、太陽活動期国際観測年(I A S Y) 1969~1971, に協力している。

準ミリ波、ミリ波は大気中の酸素、水蒸気などによって、吸収を受ける。酸素による吸収は、60 GHz ($\lambda=5$ mm), 120GHz($\lambda=2.5$ mm)の付近で起り、また、水蒸気による吸収は、22GHz ($\lambda=13.5$ mm), 180GHz ($\lambda=1.6$ mm) 付近で起る¹⁾。これらの周波数領域の電波は、大気ガスによって定常的に大きい減衰を受けるので、衛星通信の利用には不利である。さらに、ミリ波は、降水、雲などの浮遊水滴によって、吸収、散乱されて大きい減衰を受けるが、大気ガスの定常的な減衰をのぞいて、ミリ波の伝搬特性に最も大きい影響を与える要因は、雨である。最近、10GHz 以上の準ミリ波、ミリ波の衛星通信への利用が考えられており、太陽を信号源として、高仰角伝搬路における降雨による電波の伝搬特性を知る必要が生じてきた。

ミリ波太陽電波観測装置の概要は、すでに発表した、

6 GHz 太陽電波観測装置²⁾と基本的には同じで、ディック変調を用いたスーパーヘテロダイン受信方式を採用し、右回り、左回り円偏波成分の和、差の2つの成分を取り、37.5GHz太陽電波の強度、偏波を連続的に観測できるようにになっている。6 GHzの装置と大きく異なる点は、アンテナに一次給電系の損失を小さくできる、カセグレンアンテナを用いたこと、校正用標準雑音源に放電管を用いたこと、および、受信周波数変換回路には、小型、低雑音化をはかるためGaAsショットキバリアダイオードを用いた、バランスドミキサを採用したことである。

本論文では、特に以上の6 GHz観測装置と異なる点を中心にして述べ、さらに、37.5GHzにおける、2, 3の観測例について、検討を加えた。

2. 観測装置

2-1 カセグレンアンテナ

方形導波管 TE_{10} モードの伝送損失は、周波数の増加と共に増大するから、一次放射給電導波管にある長さを必要とするフロントフィードのパラボラアンテナは、準ミリ波以上の周波数では不利である。たとえば、WR J -6(40×20mm), WR J -320(7.11×3.56mm)の6 GHz, 37.5GHzにおける伝送損失 L_w は、それぞれ $L_w=0.0415$

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering.)

dB/m, 0.521dB/m で, $(1-L_w) T_w$ より熱損失を求めて見ると, 各値に対して, $T_w=290^\circ\text{K}$ として, 1m当り, 2.64°K , 32.8°K になる。カセグレンアンテナは, 一次放射給電導波管の長さが原理的には零になり, 受信機とアンテナを直結できるから, 給電系による熱損失が少なくなり, パラボラアンテナより, かなり, 低雑音化できる。また, 副反射鏡周辺からの溢出電力が天空に向くので, 大地からの熱雑音を受けることが少なく, 背景雑音温度を小さくできる利点がある。カセグレンアンテナは, 一次放射器からの放射電力を副反射鏡に集中させるから, 副反射鏡直径を小さくすると, そこからの溢出電力が増加し, 一方, 溢出電力を少なくするために, 副反射鏡直径を大きくすると, それによるブロッキングが増加する。普通, カセグレンアンテナの副反射鏡直径は, 波長の十数倍の大きさを必要とするから, 大口径, 高利得のアンテナでないと意味はない。たとえば, 周波数 6 GHzで, アンテナ直径1200mmの場合には, 副反射鏡が大きくなりすぎて不適当であるが, 周波数37.5GHzの場合には, 10波長で80mmであるから, アンテナ直径を1200mmとして, 上記の条件を満足する副反射鏡を用いることができる。このような理由から, 37.5GHz太陽電波観測装置には, カセグレンアンテナを用いることにした。図-1に37.5GHz, 6 GHzのアンテナを示しておく。

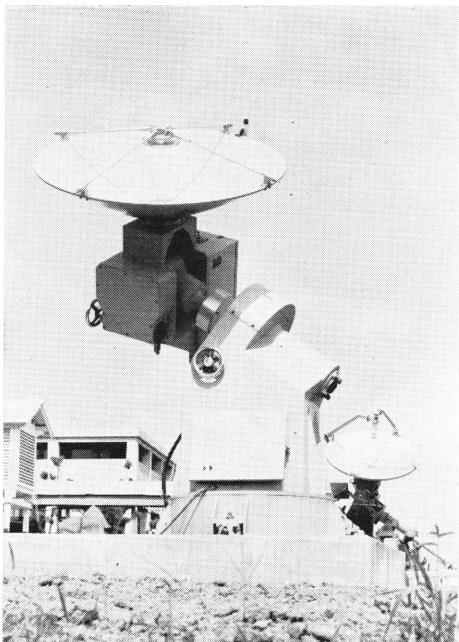


Fig. 1 View of a cassegrain antenna at 37.5 GHz and a paraboloidal antenna at 6 GHz.

カセグレンアンテナは, 回転放物面の主反射鏡, 回転双曲面の副反射鏡, および, 円錐ホーンの一次放射器よりなっている。図-2にその断面図を示したが, 副反射鏡の双曲線の2つの焦点(F , F')のうち, 一つは, 一次放射器の励振点にあり, 他の一つは, パラボラの焦点と一致している。

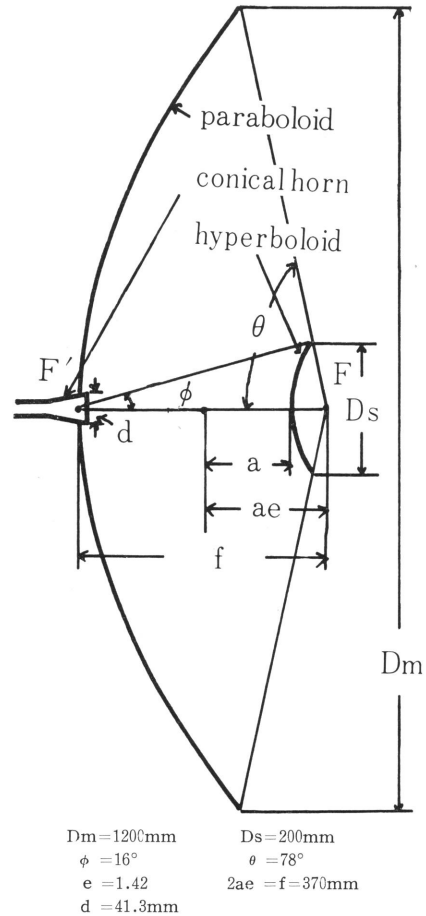


Fig. 2 Geometry of a cassegrain antenna.

主反射鏡は直径1200mmのアルミニウム鋳物で, 面精度は, $\lambda/16$ 以下, すなわち, 波長 8 mmで, 0.5 mm以下にしてある。このアンテナでは, 主反射鏡周辺部からの溢出による大地からのふく射電力の影響をできるだけ避けるために, 開口角は 78° と深くしてある。副反射鏡は, 直径200mm, 離心率1.42の真鍮製回転双曲面で, 主反射鏡の前面に焦点を共有して取付けてある。副反射鏡はエネルギーの集中するところであるから, さらに, 面精度を良くして, $\lambda/40$ 以下, すなわち, 0.2 mm以下にしてある。一次放射器の円錐ホーンの開口角は 16° で, その開口部はマイカ板にて, 気密構造にしてあるが, こ

の部分はエネルギーが集中するので、雨滴による影響を避けることはできない。

カセグレンアンテナの利得は、パラボラアンテナと同様にして、

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \quad (1)$$

によって求められる。ここで、 D ：アンテナ直径、 λ ：波長、 η ：開口能率である。この(1)式の開口能率は(2)式によって表わされる。³⁾

$$\eta = \eta_{ss} \eta_{sm} \eta_{bs} \eta_{bt} \eta_r \eta_i \quad (2)$$

ここで、 η_{ss} 、 η_{sm} は副反射鏡、主反射鏡からの溢出電力による能率、 η_r は鏡面の凹凸による能率、 η_{bs} 、 η_{bt} は副反射鏡、支持柱のブロッキングによる能率で、また、 η_i は照度分布による能率である。いま、副反射鏡直径 D_s と主反射鏡直径 D_m の比は、 $D_s/D_m=1/6$ であるから、 η_{bs} η_{sm} η_i を求めてみると、0.893となる。このアンテナの面精度は、 $\lambda/16$ 以下にとつてあるから、 η_r は0.735で、 η_{ss} 、 η_{st} をそれぞれ0.9、0.95にとると、開口能率 η は56.1%になり、利得 G は、50.9dBになる。

このカセグレンアンテナの指向性を、太陽を信号源として、測定してみると、 H 面の -3 dB幅は $31.2'$ となり、 E 面のそれは、 $29.5'$ になる。ただし、この値は、後述する中間周波前置増幅器と主増幅器の間に挿入された減衰器による校正值である。

2-2 高周波部

伝送損失の大きい給電用導波管をできるだけ短かくして、給電系の熱雑音を低くするために、高周波部はアンテナ背部に直接取付けてあり、70 MHz の中間周波部以

後は室内に設置されている。図-3に示したように、 $60 \pm 0.8^\circ\text{C}$ の恒温槽に入った標準ダミー (VSWR 1.1以下) によるディック変調を行なっており、基本的には、6 GHz観測装置と同じなので、次の相異点、受信周波数変換回路 (ミキサー回路)、校正用雑音放電管について、以下述べる。

ミリ波太陽雑音電波を直接増幅することは、入力信号レベルと増幅器の内部雑音レベルの関係で、技術的、経済的に困難である。受信機の内部雑音、給電回路の伝送損失による雑音によって、装置の最低検出温度差が定まるから、受信機の内部雑音をできる限り低く抑える必要がある。

初段に周波数変換回路を用いた受信機の雑音指数は、受信周波数変換回路の雑音指数ではばその値が定まり

$$NF = L_c(N_{if} + N_r - 1) \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

で与えられる。

ここで、 L_c ：周波数変換器の変換損失、 N_{if} ：初段中間周波増幅器の雑音指数、 N_r ：受信変換回路全体の雑音比で、おもにミキサーダイオードの雑音と、局部発振器から入る雑音によって定まり、通常、1に近い値である。初段にミキサー回路を用いたスーパーヘテロダイン受信方式では、受信機はミキサーによって、その特性が決定されると言っても過言ではない。局部発振器からの雑音はミキサー回路を平衡型にすれば低減できるので、雑音指数を支配するのは L_c であると言える。それゆえ、低雑音受信機を実現するには、低変換損失のダイオードを用いなければならない。ダイオードには、 Ge 、 Si 、

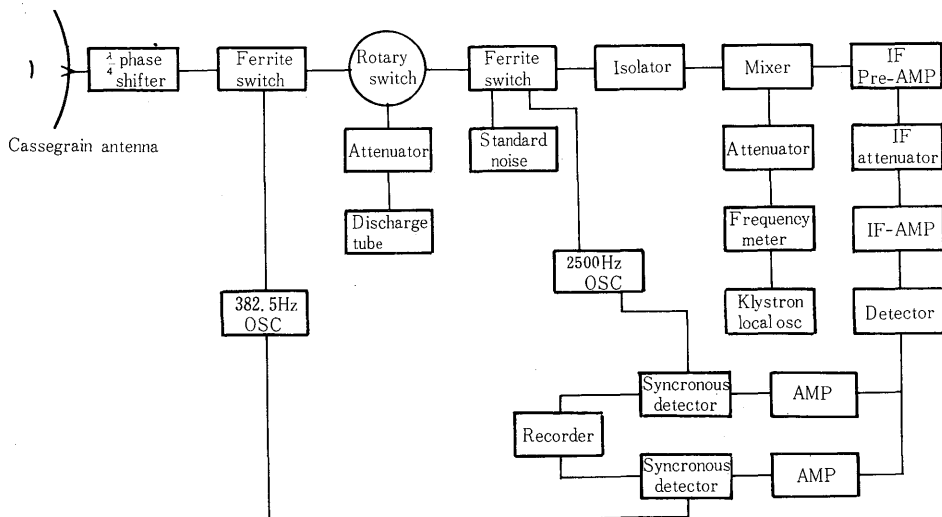


Fig. 3 Block diagram of a 37.5 GHz radio telescope.

GaAs, などが使用されているが, GaAsショットキーバリアダイオードが最も性能が優れているので, 本装置では, これを平衡型にした回路を採用している。GaAsショットキーバリアダイオードは, 局発電力が, Ge, Siダイオードに比較して, 余計必要なので, 順方向にバイアスをかけた状態で使用している。ミキサの雑音指数は局発電力, バイアス電圧によって, その値が変化するので, 最良の値になるように調節する必要がある。本装置のミキサでは, 2個のダイオードに, 0.32V, 1.05mA, 0.4V, 0.52mA, のバイアス電圧, ミキサ電流を設定した場合が雑音指数が最良の状態になり, このときの受信機の雑音指数は 13dB 以下になる。なお, 局発用のクライストロンには低電圧型の KH-95を用いている。

本装置のアンテナ直径に対しては, アンテナ等価温度は 2000~3000°K と推定されるので, 校正用雑音源として雑音放電管を使用することにした。6GHz 観測装置のように, 無反射終端を常温で校正雑音源とする方式では, 太陽雑音電波のアンテナ等価温度との温度差が大きくなって, 測定誤差が大きくなる。誤差を小さくするためには, 校正用雑音源の等価温度と太陽雑音のアンテナ等価温度が接近するように設定すればよい。以上のような理由で, われわれは, 校正用雑音源として, 放電管を用いることにした。放電管からの雑音は, プラズマ中の電子の平均運動エネルギーに依存する。いま, 電子の質量を m , 2乗平均速度を $\bar{u}^2$ とすれば, 電子温度 T_{el} は,

$$\frac{1}{2} m \bar{u}^2 = \frac{3}{2} k T_{el} \quad (4)$$

によって与えられる。ここで, k : ボルツマン定数。ガス放電管の雑音温度 T_{eq} は, 正確には一致しないが, ほぼ, この電子温度に等しい。⁴⁾

本装置に使用した雑音放電管は, アルゴンガスを 10 mmHg 封入した熱陰極放電管で, 校正雑音レベルは, アノード電流を 53mA 流した状態で, 14dB である。信号雑音と校正用標準雑音との切換は, モータによる 3 開口のロータリー切換器によって屋内より遠隔操作を行なっている。この切換による誤差を小さくするためにチョークフランジを用いてあり, 切換時間は 0.1 秒である。

2-3 中間周波部, 同期検波部および記録部

70MHz の中間周波に変換された後の回路構成も, 図-3 に示された通りであるが, 雑音指数 2.8dB, 利得 28dB, 帯域幅 20MHz の前置増幅器と利得が 93dB で, 帯域幅 20MHz の主増幅器の間に, 可変抵抗減衰器を設けて, 信号雑音の校正が行なえるようにしてある。この装置の同期検波器の時定数は, 0.1, 1, 10秒の 3 通りである。

左施円偏波, 右施円偏波の和および差, すなわち, 太陽電波の強度および偏波の記録はチャート幅 250 mm, フルスケール 200mV のレンジで, 150mm/h のチャート速度で行なっている。

終りに, この受信機の特性を表-1 にまとめておく。

受信周波数	37.5±0.1GHz
総合雑音指数	13dB
中間周波数	70MHz
中間周波帯域幅	20MHz
ディッケ変調周波数	2500Hz
時定数	0.1, 1, 10秒
標準雑音温度	333±0.8°K

Table 1 Electrical performance of a 37.5 GHz Dicke type superheterodyne receiver.

3. 観測結果

筆者らは, 従来の 6GHz 太陽電波の観測に加えて, 1970年 7月より, 37.5GHz においても, 太陽電波の連続観測を開始した。観測データの不足から, なんら, 確定的なことは言えないが, 2, 3 特徴的な事柄について述べる。

波長 5 cm (6GHz) の太陽電波においては, 7月中頃より 8月中頃にかけて, 数回相当大きいアウトバーストが記録されているが, 波長 8 mm (37.5GHz) においては, アウトバーストは, 全く記録されず, 大気中の浮遊物の影響をのぞけば, 非常に安定した状態を示していた。

図-4 は, 気温 36.5°C, 湿度 52%, 快晴時の観測例である。このミリ波太陽電波雑音温度の校正は, 前述の校正雑音レベル 14dB の放電管を使用しているが, これを用いた標準雑音源に接続した校正用抵抗減衰器によって, 放電管出力を 8dB 減衰させ, それを基準雑音レベルとしている。すなわち, -8dB の放電管出力を 0dB として, 後は前述のラジオメータの可変抵抗減衰器による校正を行なっている。

ミリ波太陽電波は, 非常に安定した電波源であるが, 大気ガス, 雲, 降水などによって影響を受ける。図-5 は 7, 8 月の観測結果で, この場合, 雨による影響はとりのぞいてある。7月 20日頃までは, 梅雨の雨雲によって, 1dB から 2.3dB の減衰を生じているが, 7月下旬から, 8月中旬にかけては, 晴天の日が多く, 太陽電波の変動は, ほぼ, 1dB 以内におさまっている。これらの変動は, 大気中の浮遊物, 特に, 雨雲, 水蒸気によるものと考えられる。

ミリ波の減衰に最も大きい影響を与える要因は、降水のうち、特に、雨である。図-6は、7月30日の雨の影響を示す観測例で、10時45分頃から降り始めて約30分間に0.5mmの雨量の場合である。この程度の雨量においても、大きい減衰を生じ、最高、11.2 dBの減衰量を示している。

一方、図-7は、6 GHzのアンテナを仰角 65° の天空に向けたときの空の雑音温度の増加分と雨量の関係を示している。図-7-aは、10分間の平均値で示したもので、図-7-bは、その時の実測値である。これらの図のように15分間に6 mmもの雨が集中的に降る場合には、アンテナ雑音温度の 53°K の増加を示すが、1 mm/10min程度の雨量の場合には、その増加分は、約

10°K 以下にとどまっている。

次に、図-8は、10分間の雨量とミリ波の減衰量の関係を示している。測定点が少なく、確定的なことを述べることはできないが、雨量の少ない間は、雨量と共に、ミリ波は急激に減衰し、1 mm/10minの雨量で10dB以上の減衰量を示している。1 mm/10min以上の雨量では、その減衰量の変化は、ゆるやかになり、雨量の増加と共に、減衰量は飽和する傾向を示している。

このように、ミリ波はセンチ波に比べて、雨による影響は非常に顕著である。なお、雨量の測定は、口径20 cmの1回転倒量0.5mmの転倒榊型雨量計を用いて行なった。

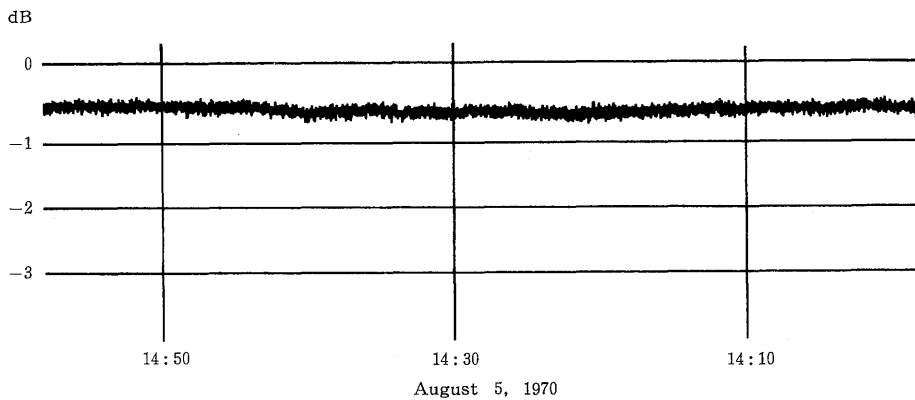


Fig. 4 Sample record of a solar radiation at 37.5 GHz.

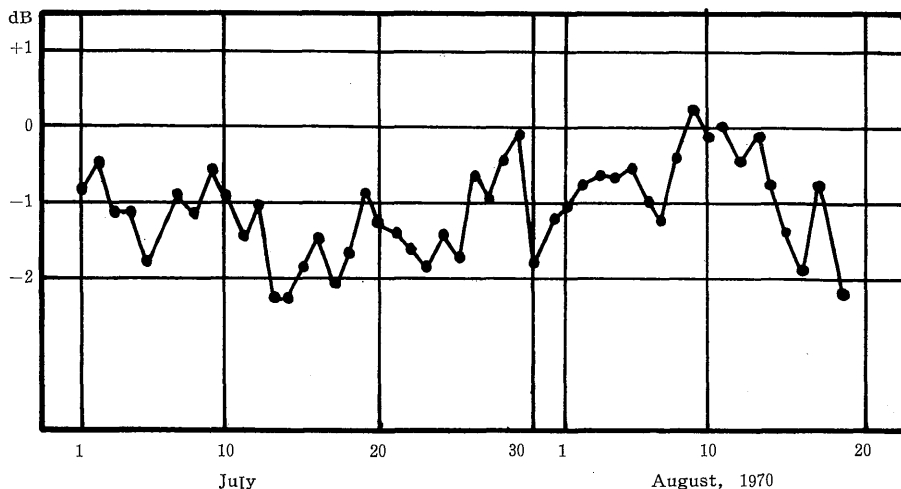


Fig. 5 Variation of a solar radiation at 37.5 GHz.

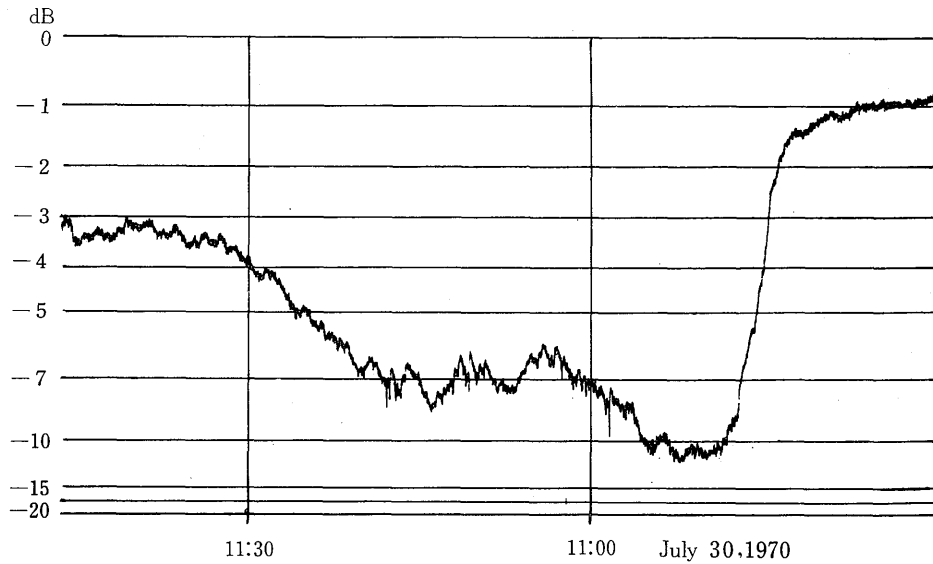


Fig. 6 The effect of a rainfall on a solar radiation at 37.5 GHz.

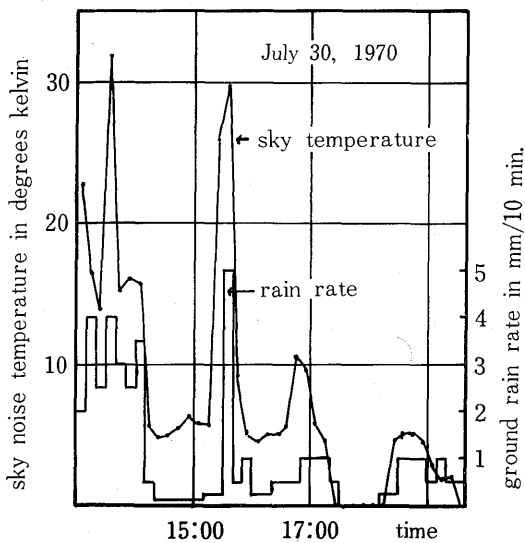


Fig. 7-a Sky noise temperature at 6 GHz observed during a rainfall.

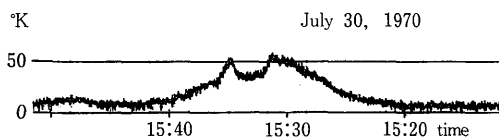


Fig. 7-b Sky noise temperature at 6 GHz observed during a rainfall.

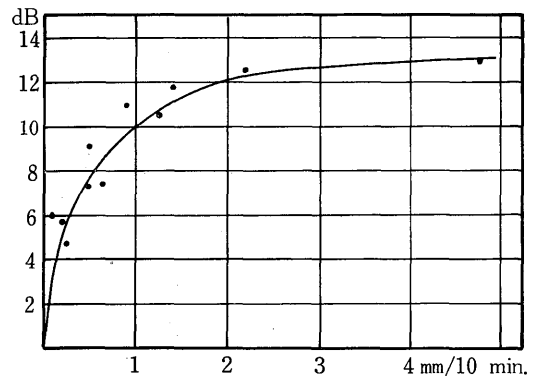


Fig. 8 Attenuation at 37.5 GHz in decibels vs. ground rain rate.

4. 結 言

ミリ波太陽電波観測装置において、アンテナには、原理的に、給電系の長さを零にできるカセグレンアンテナを用いて、給電系による熱雑音を低く抑え、また、受信機の周波数変換回路には、GaAs ショットキーバリアダイオードを用いたバランスドミキサーを採用して、低雑音化をはかり、装置全体の雑音温度をできるだけ低く抑えた。

太陽雑音電波の校正は、放電管の雑音温度を正確に知ることが困難なために、14 dB の雑音レベルの放電管を校正標準として、ラジオメータに内蔵した可変抵抗減衰器によって行なっている。

観測データが少なく、詳細な検討を加えることはできなかったが、8 mm波においては、雨雲では1～2 dB の減衰量を示すが、雨に対しては、0.1mm/10min の雨量でも、6 dB 以上の減衰量を示すことがあり、大気中の浮遊物、特に、雨による影響は、雨量の少ない場合においても非常に顕著であった。

最後に、日頃ご指導下さる、金原淳主任教授、江口博之教授、また、雨量観測に協力して下さいった太田健次助手に感謝いたします。さらに、観測に協力下さっている

三ツ口武雄、木下みつえ、武知英明技術員の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) E.E. Altshuler, V.J. Falcane, and K.N. Wulfsburg
Atmospheric Effects on the Propagation at Millimeter Wavelengths IEEE Spectrum, Vol. 5 p83 1968—7
- (2) 江口、貴田、今井、6 GHz 太陽電波観測装置
中部工大紀要 第5巻 p49 1969—12
- (3) 喜連川隆ほか、宇宙通信カセグレンアンテナの最適設計
信学会アンテナ研資 昭41—01—19
- (4) K. W. Olson, Measured Noise Temperature Versus Theoretical Electron Temperature for Gas Discharge Noise Source IEEE Trans MTT-16 p640 1968—9