

太陽バースト観測用 80GHz 強度計

関口英昭・中島 弘・篠原徳之
川島 進・塩見靖彦

The 80 GHz Radiometer for Solar Burst Observations

by

H. Sekiguchi, H. Nakajima, N. Shinohara, S. Kawashima,
and Y. Shiomi

(昭和 59 年 6 月 28 日受理)

1. ま え が き

今回新たに完成した 80 GHz (波長 3.75 mm) 太陽電波強度計は、共通の赤道儀架台に据えつけた 2 つの小口径アンテナの受信電波を干渉させ静かな太陽成分を打ち消すことによって地球大気の影響を大幅に軽減し、微弱なバーストの検出を可能にした。すなわち、アンテナ間隔を静かな太陽の Visibility がほぼゼロとなるように設定することによって、大気吸収によるレベルのゆらぎの原因となる成分を打ち消すことに成功した。バーストの最小検出感度は、 ~ 15 太陽フラックス単位 (solar flux unit = 10^{-22} Watt m^{-2} Hz $^{-1}$, 以下 sfu と略す) で、この値は、ほぼ受信機自体の最小検出感度と同じである。強度計は、昭和 59 年 2 月よりルーチン観測に入った。

太陽フレアの電波スペクトルをミリ波領域において精度良く決めることは、フレアで加速される高エネルギー電子の分布を知る有力な手がかりとなる。学問的重要性がきわめて高いにもかかわらず、ミリ波帯における太陽バーストの観測はこれまでほとんど行われていない。その理由はミリ波領域では大気吸収によるゆらぎが障害となって通常の方法ではバーストの検出がきわめて困難だからである。すなわち、小口径のアンテナで太陽全体をモニターする場合を考えてみると、静かな太陽の電波フラックスは 80 GHz では約 10^4 sfu であるので、大気によるゆらぎを 10% とすると 1000 sfu 以下のバーストの検出はきわめ

て困難となる。一方ミリ波領域で 1000 sfu より強いバーストが起こる確率はごくまれであるから小口径アンテナを用いた観測でバーストのスペクトルを決めることは、例外的に強いバーストを除いて不可能に近い。これに対して口径の大きいアンテナで太陽面上の視野を限定して観測する方法があるが、この場合にはアンテナの指向性内に入る静かな太陽成分が少なくなるので、それに比例してゆらぎの量も少なくなる利点はあるが、バーストを記録する確率も視野にほぼ比例して小さくなるという欠点がある。

小口径アンテナで太陽全面を監視する場合も、大口径アンテナで太陽面の一部分を監視する場合も、ミリ波帯においてバーストを観測することは容易ではない。事実これまでに行われたミリ波帯の太陽バーストの観測例を調べてみると上記の事情が裏付けられる。英国の Slough 太陽電波観測所の Croom 等による 71 GHz の観測では比較的大きなアンテナ (1 m ϕ) を用いているが、ビーム幅が 0.5° になるように、アンテナフィードをデザインして、太陽全面が監視できるように工夫している¹⁾。出力のゆらぎは雲のない状態の良い日でも ~350 sfu であった。そのため、1967 年 7 月から 2 年半観測を行ったがわずか 7 個のバーストを記録したにとどまった²⁾。我々が 17 GHz 帯で行っている観測を調べてみると 300 sfu 以上のバーストの数は 1980 年に 25 個、1981 年に 38 個あったが、高い周波数でフラックスが減少することを考えると、Croom 等の結果は当然である。最近では 1981 年からスイスの Bern 大学で 92.5 GHz で偏波計が稼動しているが、ここでも 1.4 m ϕ の比較的大きなアンテナを用いて観測をおこなっている³⁾。

このような事情をふまえて、われわれは太陽全面を監視しつつ、かつ大気のゆらぎを打ち消すことによって弱いバーストを検出する方法が可能かどうかを検討してきた。その結果ミリ波領域における最も有効な観測方法として採用したのが、次の方式である。すなわち、2 のつアンテナの出力を干渉させることによって静かな太陽の成分をほぼ完全に打ち消し、電波源の大きさが小さいバーストに対してだけ感度をもたせる、という方法である。1 つの赤道儀架台に載せた 2 つのアンテナの間隔を適当に選ぶことによって、静かな太陽成分を 1/100 以下に押えることが可能であり、実測の結果も ~15 sfu 程度である。本稿では、装置の設計思想、特徴、受信機系の較正について論じ、最後に初期の観測結果について報告する。

2. 設計思想

短センチ波帯からミリ波帯においては、大気吸収の変動が激しく、かつ静かな太陽の放

射する定常的電波のフラックスが大きいので、レベルのフラツキによってバーストの検出が困難となる。この問題を解決する方法としては、つぎの3つの方法が考えられる。

a) アンテナの口径を大きくして太陽の一部を観測する方法

アンテナの視野を小さくして太陽の一部分だけを観測すると、静かな太陽成分も視野の広さに比例して小さくなる。したがって、大気吸収の変動によるフラツキの量もそれに比例して小さくなる。たとえば視野が4'角(アンテナ径で3.2 m)の場合には、フラツキの量は $\sim 1/60$ ($\sim (4'/32')^2$)に減少する。

b) 大気による吸収量を大気からの放射で補う方法

太陽が温度 T_s の雲によって一様に覆われる場合を考える。アンテナの指向性は太陽に比べて充分大きいとすると、観測されるアンテナ温度 T_A は

$$\begin{aligned} T_A &= T_{qs}e^{-\tau} + T_c(1 - e^{-\tau}) \\ &= (T_{qs} - T_c)e^{-\tau} + T_c \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

ここに T_{qs} は大気による吸収がない場合の静かな太陽成分のアンテナ温度、 τ は視野内の雲の光学的厚さである。大気の透過度を η とおくと $\eta = e^{-\tau}$ だから η の変化 $\Delta\eta$ による T_A の変化量 ΔT_A は

$$\Delta T_A = (T_{qs} - T_c)\Delta\eta \quad (2)$$

となる。フラツキ ΔT_A を小さくするためには

$$T_{qs} \doteq T_c$$

となるよう、アンテナの口径を選べばよい。

c) 適当に離れた2つの小口径アンテナの出力を干渉させ、静かな太陽に対して感度をなくす方法

以上の3つの方法である。

野辺山太陽電波観測所の35 GHz 偏波計は(b)の方法を採用したが、これについては別の論文で報告する⁴⁾。80 GHz 強度計は、(c)の方法を採用した。以下(c)の方法について詳述する。

図1は17 GHz 干渉計で実測した静かな太陽の Visibility 関数、すなわち輝度分布の空間周波数に対するフーリエ変換を示す。ここで横軸は空間周波数(アンテナ間隔)を表す。図からわかるように、静かな太陽のフーリエ成分はいくつかの空間周波数で0となる。もし、2つのアンテナの間隔を適当に離して静かな太陽に対して感度がなくなるようにすれ

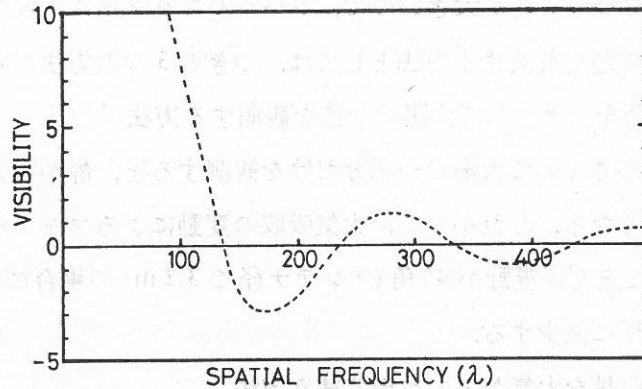


図1 野辺山の 17 GHz 干渉計で観測した静かな太陽の Visibility 関数, 静かな太陽のフーリエ成分はいくつかの空間周波数でゼロを横切る所がある

ば, 大気によるゆらぎをほとんどなくすることが期待できる. 一方, 低い空間周波数では, バーストは太陽全面に比べれば充分小さな領域から発生すると考えられるから, これに対しては2つのアンテナの相関出力はほとんど損なわれることがない. その結果, 大気によるゆらぎの原因となる静かな太陽成分は打ち消され, バーストだけを検出することが可能となるのである. 実際には, 2つのアンテナの間隔を波長の ~ 330 倍とし, 静かな太陽の出力が最小となるよう微調を行った.

2つのアンテナをそれぞれ独立の架台で駆動すると, 太陽からみたアンテナ間隔は太陽の時角とともに変化し, 静かな太陽の感度をゼロに保つことができない. この難点を解消するには, 2つのアンテナを共通の赤道儀架台にのせることが本質的に重要である. また, 両アンテナの出力を相関器で取り出すことで, 太陽面のどこで起こったバーストに対しても検出可能とすることが重要なポイントである.

以上は太陽全体が一様な雲に覆われたという理想的な場合についての考察である. 現実には太陽面の一部だけが厚い雲に覆われるということも起こりうる. この場合には 図 1 の Visibility 曲線の形が変化することとなり, したがって静かな太陽成分が完全に相殺されずに残ることとなる. 雲が動けば当然出力に変動が出てしまう.

この変動の大きさを評価する. 簡単の為, 図 2-1 のような長方形をした太陽の一次元輝度分布を想定する (実際にはこれは半円型であるが, オーダー・エスティメイトには充分である). すると Visibility 関数 $F(l)$ は

$$F(l) = F_0 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot l \cdot \theta_0)}{\pi \cdot l \cdot \theta_0} \quad (3)$$

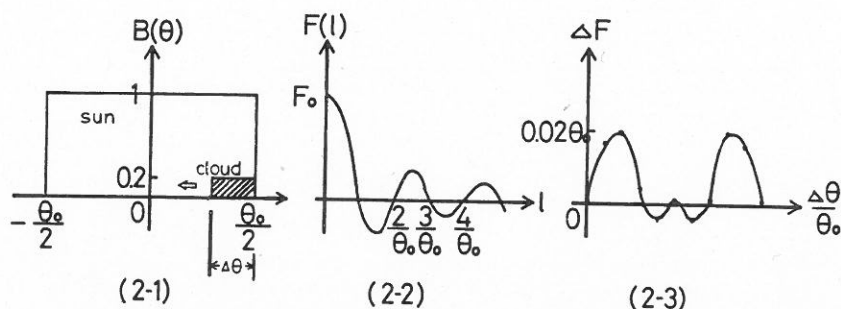


図2 雲が太陽の一部にかかった場合のフラツキの評価。(2-1)は計算に使った太陽輝度分布及び雲のモデル, (2-2)は雲のない場合の Visibility 関数, (2-3)は雲のサイズを引数とした $l=3/\theta_0$ での Visibility の変化の様子を示す

となる。ここで F_0, l, θ_0 はそれぞれ太陽全体のフラックス, 空間周波数, 太陽直径であり, F_0 には大気吸収の平均分は含めてあるとする。 $F(l)$ の形を図 2-2 に示した。図 1 との比較より, 我々のアンテナ間隔は $l=3/\theta_0$ としたことに相当する。さて, 図 2-1 に斜線で示したような厚い雲 (中心位置 θ_0 , 大きさ $\Delta\theta$, 雲による透過度の変化 $\Delta\eta$) が進入してきたとすると, Visibility 関数 $F(l)$ の変化 $\Delta F(l)$ は,

$$\Delta F(l) = -\Delta\eta \cdot (\Delta\theta/\theta_0) \cdot F_0 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot l \cdot \Delta\theta)}{\pi \cdot l \cdot \Delta\theta} \exp(-i2\pi l P_l) \quad (4)$$

となる。 $l=3/\theta_0$ とした時の Visibility の変化量がこれから評価できる。(4)式右辺の最後の項は 1 のオーダーであるので無視し, $\Delta\eta=0.2$ の場合の $\Delta F(3/\theta_0)$ の値を, 雲の大きさ $(\Delta\theta/\theta_0)$ を引数として図 2-3 に示した。 $\Delta\eta=0.2$ はほとんどの雲での妥当な数字である。図 2-3 より

$$|\Delta F| \leq 0.02 \times F_0 \quad (5)$$

が結論される。 $F_0 \sim 10^4$ sfu であるので, 雲の通過によるフラツキは, $\Delta F \sim 200$ sfu ということで, 干渉計方式を採用しない場合の $\Delta F = \Delta\eta (\Delta\theta/\theta_0) F_0 \sim 2000$ sfu と比べると約 1 桁程度小さくなっている。これは $\Delta\theta$ が大きくなっていった場合, 干渉計方式としたことが雲の吸収の増大をうまく押えるからである。

実際には以上で論じたような『厚い雲』によるフラツキは予想よりも小さめであった。一部だけが厚い雲に覆われ, 他は雲がないなどという状態はきわめて稀にしか起こらないからである。

また, ミリ波になると水蒸気による吸収が問題となるが, 周波数との関係を調べてみると, 80 GHz 近辺は吸収が少なくなっていて⁶⁾, 観測には適した周波数といえる。なお参考

表1 野辺山で実測した 90 GHz での大気の透過度

季節	天 頂 角	
	0°	20°
冬	0.92	0.73
夏	0.70	0.40

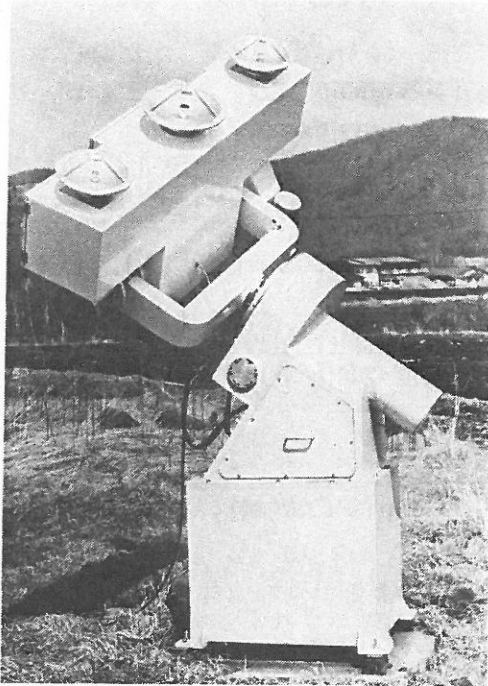


図3 赤道儀式 80 GHz 強度計アンテナ. 3個並んでいるパラボラアンテナのうち左右2個の直径25 cm アンテナが 80 GHz 用, 中央の直径 30 cm のアンテナは 35GHz 波偏計用である. 3個のアンテナは共通の赤道儀架台にマウントされている. 左右の 80 GHz 用アンテナは $330 \pm 15\lambda$ の間でアンテナ間隔を調整できる

のため, ミリ波帯 (90 GHz) での野辺山における透過度 (η) の実測値 (宇宙電波観測所による) を表1に示す.

3. アンテナ及び受信機系

アンテナ系は, 図3に示す赤道儀式架台の上に置いた左右2つのカセグレン・アンテナからなっている. 実際には中央に 35 GHz 偏波計のアンテナも載せ, 同一架台上にアンテナが3つ並ぶ形となっている.

3.1. カセグレン・アンテナと円錐ホーン

太陽全面を常にモニターするために, 主鏡の直径を 250 mm (ビーム幅 $\sim 65'$) とし, 焦点距離は 100 mm の放物面とした. 副鏡, およびホーンの諸元は図4に示す通りであり, ホーンは最短のものを設計した^{7),8)}. アンテナ間隔は $330 \pm 15\lambda$ の間で調整できるように

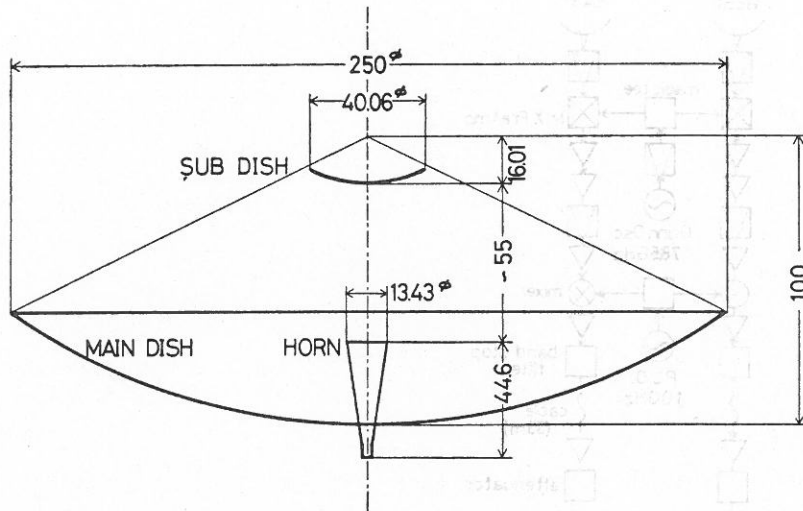


図4 主鏡, 副鏡, ホーンの諸元

なっていて結局 330 λ にセットした。アンテナ駆動は極軸, 赤緯軸とも全自動化され, 翌日のパラメータを前日にセットすればよいシステムとなっている。

3.2. 受信機系

受信機系のブロック図を図5に示す。図中のケーブル(33 m)より前がフロントエンド部でこの部分は温度コントロールされたプリアンプ・ボックス内に納められている。図3のアンテナのすぐ後部の赤緯軸腕上の箱がプリアンプ・ボックスである。副鏡で反射された電波はホーンに集められ, バンド・パス・フィルタを通過した後ミキサプリアンプにて第1 IF に変換される。このミキサプリアンプには米国 ALPHA 社の TRG MODEL E9600-13 を用いた (NF=5.2 db, 利得=24.6 db)。第1 IF は周波数 1.5 GHz, バンド幅 400 MHz である。さらに2段目のミキサで第1 IF は第2 IF (500 \pm 200 MHz) に変換されて, 室内の受信機バックエンド部へ送られる。

バックエンド部では2つのアンテナからの信号は, 結局は COS, SIN の両コリレータにて干渉出力となる。ただし, 出力の校正(詳細は次節で述べる)その他の目的で, 以下のような複雑な回路構成となっている。

i) 最初の分配器(divider)で, 両アンテナからの信号は, 各々3分配される。ひとつはモニタ用メータにつながり, フロント・エンド部の働きに異常があるか否かを確認できるようにになっている。あとの2つは, 次のダイオード・スイッチで切り換えられるもので, コリレータの2入力の各々がどちらのアンテナに接続されるかがここで決められる。

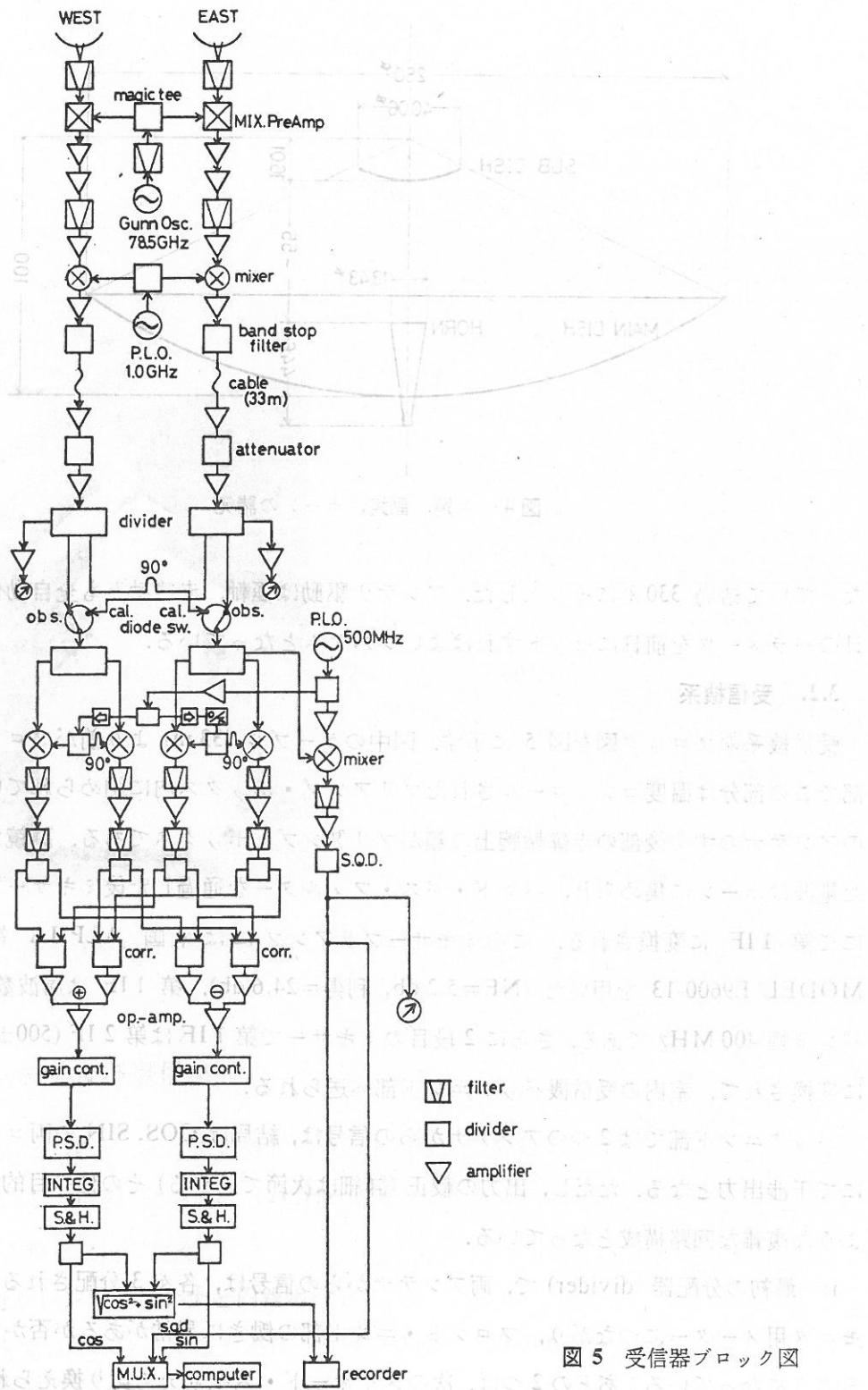


図5 受信器ブロック図

ii) ダイオード・スイッチは通常は図の obs. 側にたおされており、図の左側に WEST 側アンテナ、右側には EAST 側アンテナがつながっている。キャリブレーション (校正) 時には、まず右側のダイオード・スイッチが cal. 側につながり、2 系統の双方に WEST 側アンテナからの信号が入ることとなる。この時は、右側系統への入力には 90° の位相が余分に入っているため、後述の SIN コリレータに出力が得られることとなる。つづいて双方のダイオード・スイッチが逆にたおされ、EAST 側アンテナに双方につながり、COS コリレータに出力が得られる。

iii) その次の分配器では、右側だけ 3 分配となっていて、うちひとつが二乗検波器 (SQD) 用のものである。

iv) 2 つの分配器からの 4 つの信号は、3 番目のミキサーで第 3 IF (0~200 MHz) に変換される。このミキサーはいわゆるダブル・サイドバンド・ミキサーであって、アッパーおよびローワーの両サイドバンドからの信号を S/N 比を損うことなく使用するために、COS コリレータおよび SIN コリレータは各々 2 個ずつが用意されている。ここで左右のそれぞれ 2 台のミキサーの右側のものには、ローカル信号が位相を 90° ずらして供給されている。こうして、その下の 4 台のコリレータには、左側の 2 台に同位相の入力 (したがって COS コリレータ)、右側の 2 台に 90° ずれた入力 (したがって SIN コリレータ) が入ることとなる。

v) COS, SIN の両コリレータ出力は、位相検波 (PSD, 第 3 ローカルの片側に入っている $0/\pi$ 切り換え器と同期して働く)、積分器 (Integrator), サンプル・アンド・ホールド (S & H) を経て、SQD 出力とともに、計算機へと送られ、磁気テープに記録される。また $(\text{SIN}^2 + \text{COS}^2)^{1/2}$ を取り出すモジュールを経て、SQD 出力と共にレコーダーへ送られ、実時間のモニターも可能となるようにしてある。

なお、この受信機の最小検出感度は、受信機雑音温度が約 3000 K であるので、積分時間 0.3 秒の場合、約 15 sfu である。ここで最小検出感度は、フラツキの rms の 5 倍で定義した。

3.3. バーストのフラックス値の評価

バーストのフラックス値は、静かな太陽の Flux density を仮定して、バースト成分とバーストの前後の静かな太陽成分との観測比から求める。これまでに 51 GHz および 91 GHz 近辺での静かな太陽の観測データ⁹⁾ が報告されているので、それらの観測値から内挿して 80 GHz の値を求める。その結果 80 GHz の静かな太陽のフラックス値は

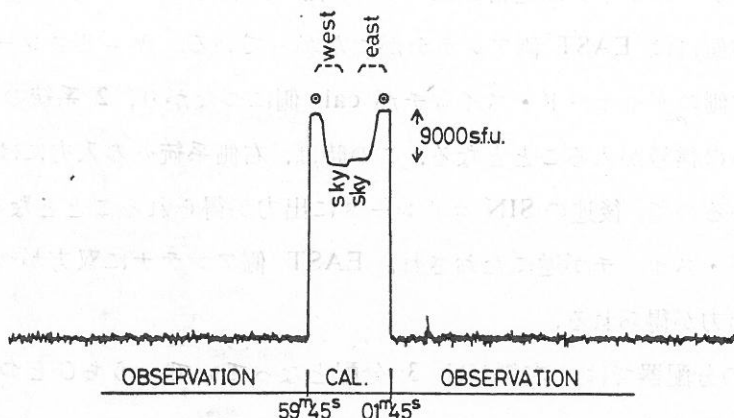


図 6 較正の方法. 毎正時に自動的に行われる較正の様子 ($(\text{SIN}^2 + \text{COS}^2)^{1/2}$ の出力) を示す. 観測時の利得は較正時の利得の 125 倍である. 同時に二乗検波出力も得られており, これもバーストのフラックスの値の評価に使われる

$$F_Q = 9700 \text{ sfu}$$

となる. 我々が作ったアンテナは太陽のリムでの感度が太陽中心に比べ, 約 15% 落ちているので, その分の補正をいれると

$$F_Q' = 9000 \text{ sfu}$$

となる.

受信機の較正は毎正時に約 120 秒間行う. すなわち図 6 の較正時の前半の 60 秒間は West 側アンテナ系の入力だけが, 後半の 60 秒間は East 側アンテナ系の入力だけがすべてのコリレーターおよび二乗検波器に入るようにダイオード・スイッチを切り換える. そして較正時の途中でアンテナを太陽から外して Sky の値を取り込む. Sky の途中でアンテナを切り替えるので West 側, East 側両アンテナの Sky 値および太陽の値が取り込まれることになる. 出力の Sky の時の値は受信器雑音と地球大気の放射の和であり, 太陽を向けた時はそれに静かな太陽のフラックス値が加わる. であるから出力の Sky 時と太陽を向けた時の値の差は静かな太陽のフラックス値に相当する.

以上のデータを用いてコリレーター出力からバーストのフラックス値を評価するわけであるが, これに用いられる式は,

$$R_W = G_{SQD} \cdot G_W \cdot F_Q' \quad (7-1)$$

$$R_E = G_{SQD} \cdot G_E \cdot F_Q' \quad (7-2)$$

$$C_0 = G_C \cdot G_E \cdot F_Q' \quad (7-3)$$

$$S_0 = G_S \cdot G_W \cdot F_Q' \quad (7-4)$$

である。ここで

G_W, G_E : WEST 側, EAST 側各々のプリアンプ系の利得

G_C, G_S : COS, SIN 両コリレーターの利得

G_{SQD} : 二乗検波器の利得

R_W, R_E : 二乗検波器の 2 つの出力 (静かな太陽と sky との差)

C_0, S_0 : COS, SIN 両コリレーターの出力 (静かな太陽と sky との差)

である。他方, バースト観測時には

$$C = G_C \cdot (G_W G_E)^{1/2} \cdot F_B \cdot \cos \phi \quad (7-5)$$

$$S = G_S \cdot (G_W G_E)^{1/2} \cdot F_B \cdot \sin \phi \quad (7-6)$$

となる。ここで

F_B : バーストのフラックス値

ϕ : バーストの位置で決まる干渉 2 信号の位相差

C, S : バーストによる COS, SIN 両コリレーターの出力

である。式 (7-5) および (7-6) より

$$F_B = \frac{1}{(G_W G_E)^{1/2}} [(C/G_C)^2 + (S/G_S)^2]^{1/2} \quad (7-7)$$

となる。式 (7-1) と (7-2) より (G_W/G_E) の比がわかり, さらに式 (7-3), (7-4) より (G_C/G_S) の比がわかる。途中を省略するが, 結果として

$$F_B = \frac{F_Q'}{(C_0 S_0)^{1/2}} \cdot (C^2/\alpha\beta + \alpha\beta \cdot S^2)^{1/2} \quad (7-8)$$

となる。ここで

$$\alpha = R_W/R_E (= G_W/G_E), \quad \beta = C_0/S_0 (= G_C G_E/G_S G_W) \quad (7-9)$$

は観測量である。したがって

$$\alpha \cdot \beta = G_C/G_S \quad (7-10)$$

は, COS, SIN 両コリレーターの利得の比ということとなる。

実際には, 校正時のコリレーター出力は, 東西どちらか片方のアンテナ信号が入るので完全にコヒーレンスがあり, 大きくなりすぎる。そのため校正時には, コリレーター出力は観測時に比べて, 出力を 1/125 としてある。これを考慮して, 式 (7-8), (7-9) より, バーストのフラックス値を求めることとなる。

4. 初期の観測結果

雲の影響を防ぐために 2 アンテナ干渉計を採用したが、その効果を示すのが図 7 である。厚い雲の日のデータであるが、1 アンテナの二乗検波出力のフラツキ (~3000 sfu) に比べて $(\sin^2 + \cos^2)^{1/2}$ の出力のフラツキははるかに小さく、40 sfu 以内におさまっている。

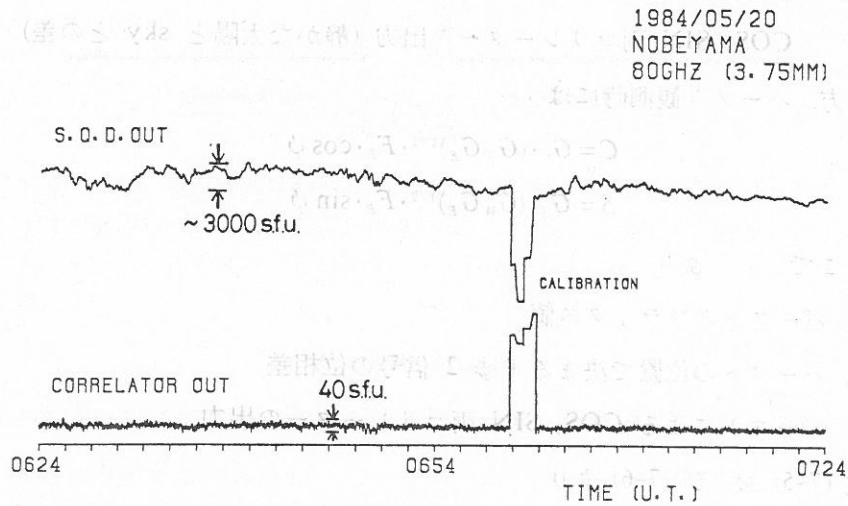


図 7 厚い雲の日の受信機出力の様子。上が二乗検波出力、下がコリレーター出力である

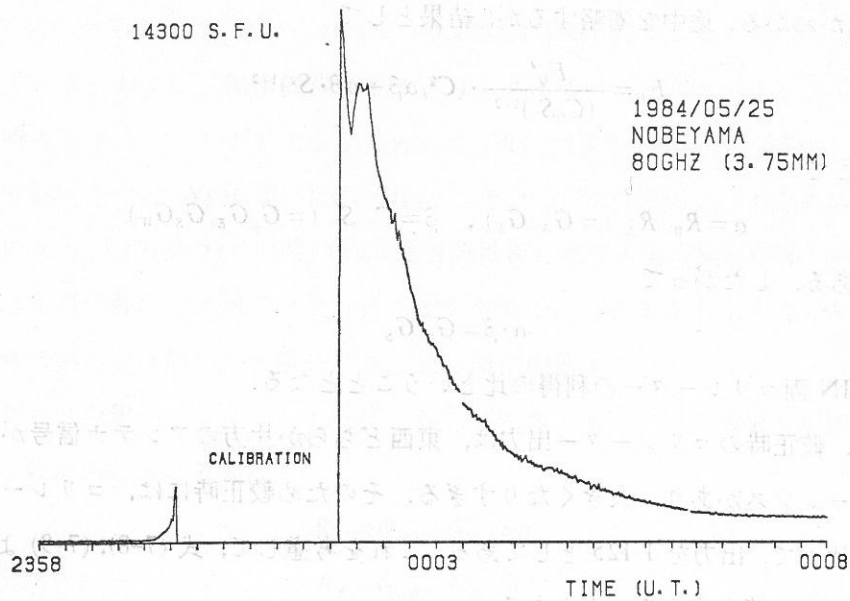


図 8 1984 年 4 月 25 日の今までに受信できた最大のバースト

太陽バースト観測用 80 GHz 強度計

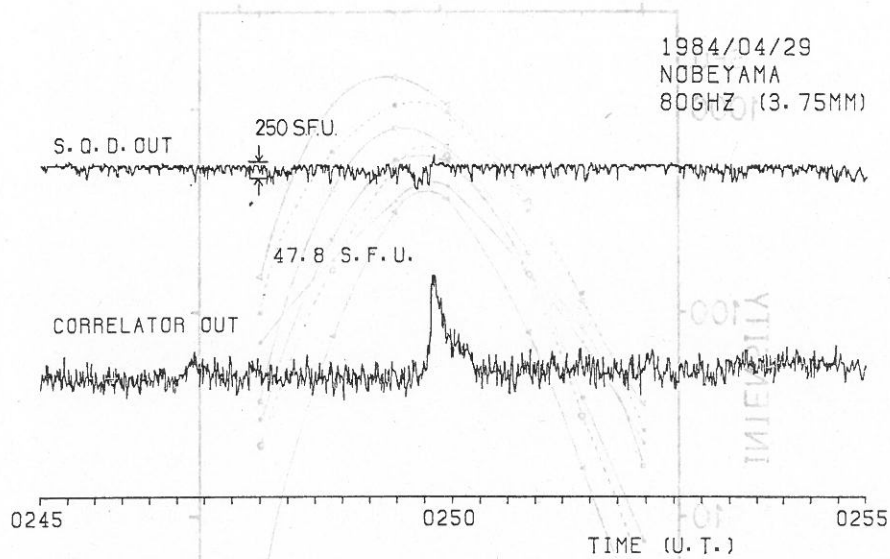


図 9 1984 年 4 月 29 日 02 時 49 分 40 秒からのバースト. East 側アンテナの二乗検波出力 (上) とコリレーター出力 (下)

1984 年 2 月 から 5 月中旬までの間に 18 個のバーストが観測されている. 最大のものとしては, ピーク値が較正時間内に入ってしまう, 観測モードになった時点で 14,300 sfu のバーストがある (図 8). 一方, バーストとして識別された最小のものは, 20 sfu であった. 1984 年 4 月 29 日 02 時 49 分 40 秒 (世界時) の小さなバーストは, コリレーター出力では, 良い S/N 比でピークフラックスが 47.8 sfu と観測された (図 9). コリレーター出力の Peak-to-Peak のフラツキは ~ 15 sfu であり, それは受信器雑音から計算した最小検出感度と同等である. このフラツキの値は Croom 等が 70 GHz で雲のない状態の良い日で 370 sfu, 通常の天候だと 750 \sim 1500 sfu であると報告している²⁾のに比べると一桁以上優れている. 実際, East アンテナ系に接続された SQD 出力では, バーストがフラツキに埋もれてしまい見ることができない. 干渉計の優れた感度を示す例である.

1984 年 4 月 22 日 22 時 50 分からのバーストとそのスペクトルを図 10 に示す. 名古屋大学空電研の 10 GHz 以下のデータと併せると, マイクロ波バーストのスペクトルが完璧に定まることがわかる.

5. ま と め

80 GHz 太陽電波強度計は, 共通の赤道儀架台に据えつけた 2 アンテナによる干渉計方式で静かな太陽成分を打ち消すことによって地球大気の影響を大幅に軽減することに成功

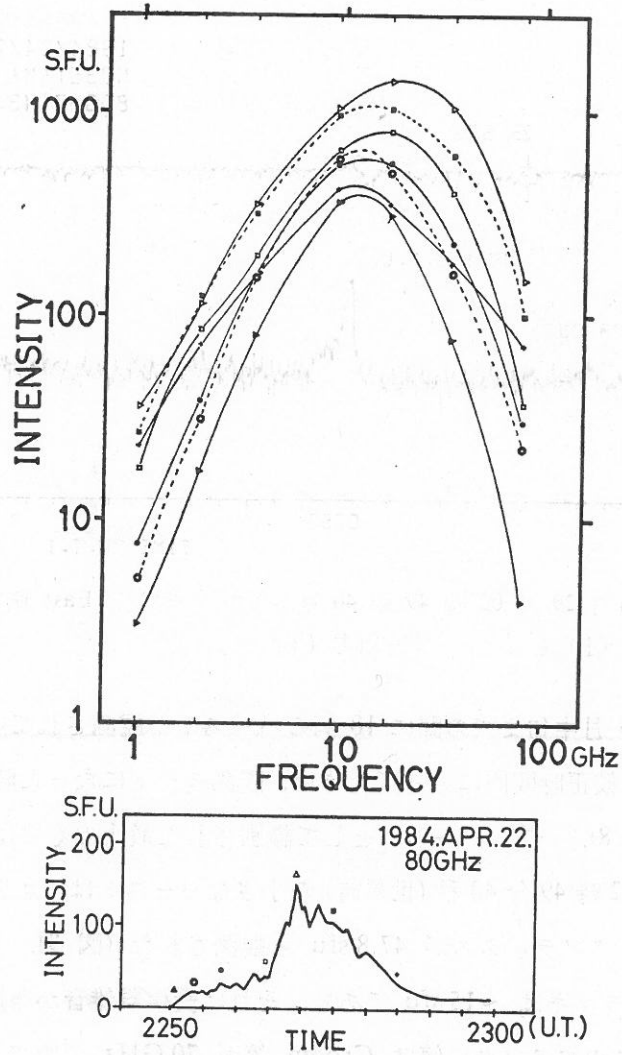


図10 1984年4月22日22時50分からのバースト(下)とそのスペクトル(上).
 1.0, 2.0, 3.75, 9.4 GHzのデータは名古屋大学空電研究所のデータを使用した
 (柴崎清登氏の好意による). 17, 35 GHzのデータは野辺山太陽電波観測所のデ
 ータである. バーストのプロファイルの上に示した記号は, スペクトルでの記号
 と対応させてある

し, 微弱なバーストの検出をミリ波帯で初めて可能とした. システムは所期のもくろみ通り順調に働いている. 最近の粒子加速等の研究では電波での他周波との比較にとどまらず, 衛星で観測される X 線や γ 線とも比較検討する必要に迫られることが多い. 80 GHz で ~15 sfu 以上のバーストの情報が得られることになり, 野辺山太陽電波観測所の 17 GHz 偏波計, 本台報に報告されている 35 GHz 偏波計, および, 1, 0, 2.0, 3.75, 9.4 GHz で働い

太陽バースト観測用 80 GHz 強度計

ている名古屋大学空電研究所の偏波計群のデータとあわせると、国内でミリ波のスペクトルをほぼ完璧に決定することが可能となった。これは、いままでは地球大気の影響が大きく、例外的に大きなバーストのスペクトルしか知られていないターンオーバー周波数より上の周波数域でのスペクトルの傾きが得られるということである。今後多くのバーストの観測が得られれば、今まで知られていない Impulsive バーストや GRF バースト、さらに post-burst increase のスペクトルが得られることが期待できる。

おわりに、本装置の設計および調整の各段階で助言をしていただいた甲斐敬造教授、小杉健郎助手、およびダイオード・スイッチの製作を援助してくれた沢 正樹技官に改めて感謝の意を表する次第である。

なお、80 GHz 強度計および 35 GHz 偏波計は文部省科学研究費補助金・特定研究(課題番号 57103004)により製作された。

参 考 文 献

- 1) Croom, D. L., Powell, R. J., and Harris, L. J.: 1970, 'Slough Solar Radio Observatory', *Solar Phys.*, **14**, 238-244.
- 2) Croom, D. L., Powell, R. J., and Harris, L. J.: 1970, '71GHz (4.2 mm) Solar Radio Bursts in the Period July 1967 to December 1969', *Solar Phys.*, **15**, 414-432.
- 3) Magun, A., Fuhrer, M., Kaempfer, N., Staehli, W., Schoechlin, W., and Wiehl, H.: 1981, 'Facilities and Instrumentation for Solar Research at Berne', Division of Solar Observations, Report, No. 46, University of Bern.
- 4) 沢 正樹, 関口英昭, 中島 弘: 1984, '太陽バースト観測用 35GHz 偏波計', 東京天文台報, **20**, 342-351.
- 5) Kuseski, R. A., Swanson, P. N.: 1976, 'The Solar Brightness Temperature at Millimeter Wavelengths', *Solar Phys.*, **48**, 41-48.
- 6) Waters, J. W.: 1976, 'Absorption and Emission by Atmospheric Gases', in M. L. Meeks (ed.), *Methods of Experimental Physics*, Vol. 12-part B (Academic Press, New York), p. 142.
- 7) 蛭子井 貴, 片木孝至: 1980, 'ビームモードで展開した円錐ホーンの放射電界', 昭和 55 年度電子通信学会総合全国大会 予稿集.
- 8) Kogelnik, H. and Li, T.: 1966, 'Laser Beams and Resonators', *Applied Optics*, **5**, 1550.