

静止気象衛星回線における太陽雑音妨害について

Solar Noise Interference with GMS Down Link

福井 徹郎・前田 光喜

Tetsuro Fukui, Mitsuyoshi Maeda

When GMS is situated between the sun and the earth, the antenna of the earth station receives a strong solar noise and the carrier to noise ratio becomes worse.

This phenomena, which is called the sun interference, occur at the time of the vernal equinox and the autumnal equinox. No technical improvement has been made in the efficiency of the satellites and the earth stations to avoid this interference. At present, the satellite operations are stopped during this period for the purpose of coping with the interference.

In this paper, the results of the investigation of the sun interference are described.

1. はじめに

静止気象衛星 (GMS) と気象衛星通信所 (CDAS) との通信回線は、1977年7月のGMS 打上げ以来、非常に安定した状態を保っている。宇宙通信回線は、外部から種々の影響を受けるが、これは自然現象によるものと、人工雑音によるものに大別でき、GMS 回線も同様に、これらの影響を受けている。直接回線に影響を与える自然現象としては、太陽活動の影響を受けて発生する電離圏の異常現象であるシンチレーションと、太陽自身の放射する電磁波によるものがある。この電磁波は、あらゆる周波数帯にわたって放射され、ランダム雑音として、しばしば通信回線に妨害を与える。

静止衛星が太陽と地球局の間に位置する場合には、地球局のアンテナに、太陽の放射する強い雑音が受信され、衛星回線の搬送波電力対雑音電力比 (C/N) が悪化する太陽妨害といわれる現象が起る。これは、春分および秋分の頃に1日数分で数日間続く。また太陽フレアによって、太陽の放射する電磁波が爆発的に増加した場合に、太陽の位置によっては、この電磁波が受信され、C/N が劣化する現象がある。本論文では、春分および秋分期の現象については、その発生時刻の予測方法と、実測結果を、また太陽フレアに伴う現象については、1979年2月16日の現象に関する観測結果と、考察を記す。

2. 春分期および秋分期の太陽妨害

春秋分期における太陽妨害は、CDAS の18mφカセグレンアンテナの位置、GMS の位置、太陽の見かけ上

の大きさおよび、CDAS のアンテナパターンを与えれば、妨害の発生日時、期間等が予測できる。

CDAS のアンテナから、GMS をみたときの方位、仰角をそれぞれ、AZsat, ELsat. とし、太陽をみたときの方位、仰角をそれぞれ、AZsun, ELsun とすると、次の式が成りたつ。

$$AZ_{sat} = \frac{\cos \varphi_s \cdot \sin (\lambda_s - \lambda_e)}{\sin \varphi_s \cdot \cos \varphi_e - \cos \varphi_s \cdot \sin \varphi_e \cdot \cos (\lambda_s - \lambda_e)} \quad \dots (1)$$

または

$$= \sin^{-1} \frac{\cos \varphi_s \cdot \sin (\lambda_s - \lambda_e)}{\sin \phi} \quad (1)'$$

$$EL_{sat} = \sin^{-1}$$

$$\left\{ \frac{A}{\sqrt{A^2 + R^2 \tan^2 \phi + 2AR \tan \phi \sin \phi}} \cos \phi \right\} \quad (2)$$

または

$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\sin \phi} \left(\cos \phi - \frac{R}{R+H} \right) \right\} \quad (2)'$$

$$AZ_{sun} = \tan^{-1}$$

$$\frac{\cos \delta \cdot \sin (\alpha - \lambda_e - \theta_G)}{\sin \delta \cdot \cos \varphi_e - \cos \delta \cdot \sin \varphi_e \cdot \cos (\alpha - \lambda_e - \theta_G)} \quad (3)$$

$$EL_{sun} = \sin^{-1}$$

$$\left\{ \sin \varphi_e \cdot \sin \delta + \cos \varphi_e \cdot \cos \delta \cdot \cos (\alpha - \lambda_e - \theta_G) \right\} \quad (4)$$

なお、 ϕ, A, θ_G はそれぞれ次式から求められる。

$$\phi = \cos^{-1} \{ \sin \varphi_s \cdot \sin \varphi_o + \cos \varphi_s \cdot \cos \varphi_o \cdot \cos (\lambda_s - \lambda_o) \} \dots (5)$$

$$A = H + R \left(1 - \frac{1}{\cos \phi} \right) \dots (6)$$

$$\theta_G = \theta_{G_0} + \frac{366.24}{365.24} \cdot t_{UT} \dots (7)$$

ただし

- λ_o : CDAS の経度
- λ_s : GMS の経度
- R: 地球の半径
- δ : 太陽の視赤緯

α : 太陽の視赤経

φ_o : CDAS の緯度

φ_s : GMS の緯度

H: GMS の地表からの高度

θ_G : グリニッジ視恒星時

θ_{G_0} : 該当日の世界 0 時におけるグリニッジ視恒星時

t_{UT} : 世界時

また, Fig. 1 に地心座標 (Geocentric Coordinates) によってそれぞれの関係を示す。ここで, GMS は, 常にアンテナの中心に位置していると仮定して, アンテナ中心から太陽までの距離を θ° とすると,

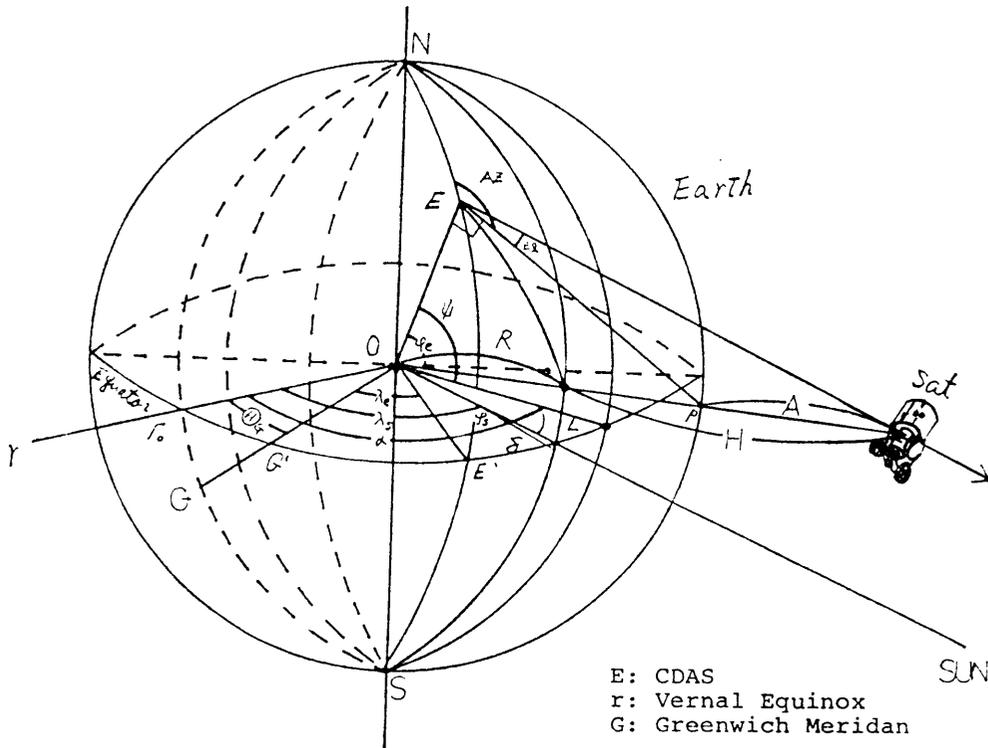


Fig. 1 Geocentric Coordinates

$$\theta^\circ = \{ (AZ_{sat} - AZ_{sun})^2 \cdot \cos EL_{sat} + (EL_{sat} - EL_{sun})^2 \}^{1/2} \dots (8)$$

と表わせる。

以上の式に, AZ_{sat} , EL_{sat} としては, 三点測距により得られる軌道予測に基く値, AZ_{sun} , EL_{sun} としては, 理科年表より得られる値を入れて, アンテナ中心と, 太陽の位置を求めると Fig. 2 の関係が得られる。つまり, CDAS のアンテナは, 衛星を自動追尾しているので, 円の中心 (アンテナの中心) に GMS があって, 太陽は図に示す軌跡を描いて, アンテナビームの中

を通過していくことになる。GMS 打上げ前に行なった, 太陽の追尾実験および, GMS 打上げ後の機能確認試験の結果, $\theta^\circ < 1.5$ の範囲で, 雑音妨害を受けることがわかっているので, これをもとに, 妨害を受ける日時と, 期間が求められる。

3. 雑音強度の測定

第 2 項により得られた雑音妨害を受ける時刻 (期間) は, GMS の運用スケジュールからは, 可視赤外放射計 (VISSR) 回線による画像取得およびテレメトリ回線による衛星データを取得する時刻に相当する。ここでは,

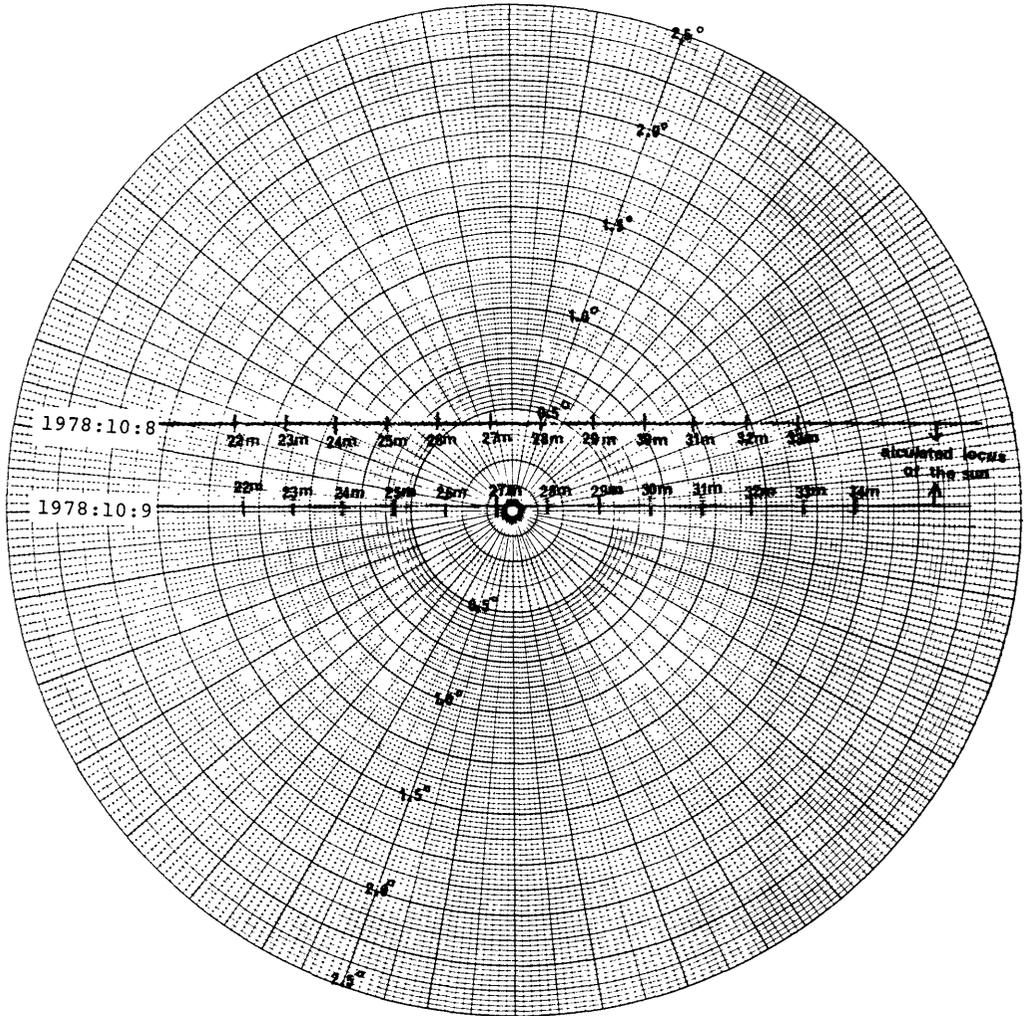


Fig. 2 Calculated Locus of the Sun —Circle shows the angle from the center of the CDAS antenna

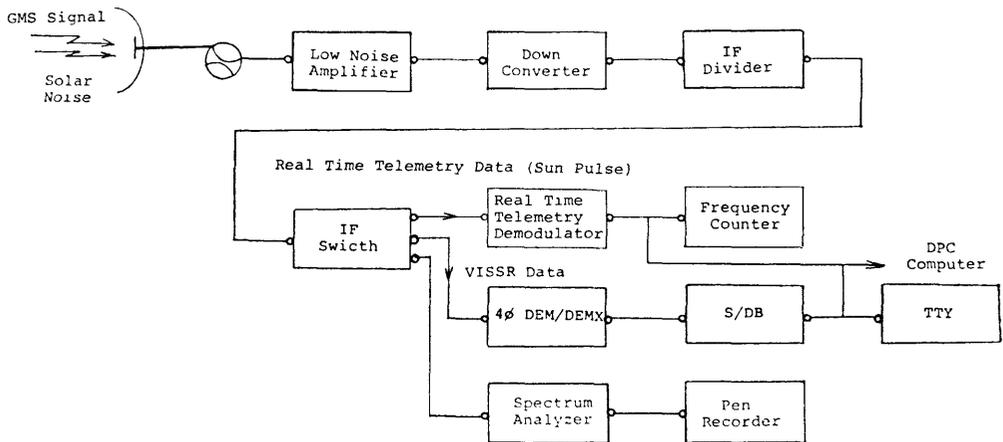


Fig. 3 Block Diagram of Solar Noise Effect Measurement System

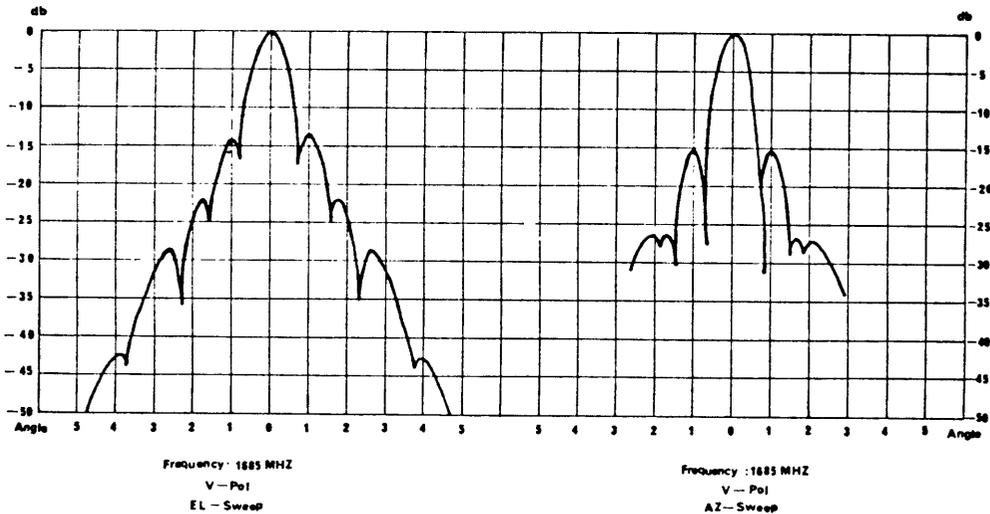


Fig. 4 Antenna Pattern of CDAS

Table 1 Characteristic of CDAS 18m Antenna.

Receiving	
Frequency	1666 MHz~1698 MHz
Antenna Gain	More than 47.5 db
Noise temperature	Less than 35°K
VSWR	Less than 1.3
Side lobe Level	Less than -14 db
Beam Width	0.66 deg

この2回線に対する雑音の影響の測定方法および測定結果について述べる。実際に測定を行った時の系統図を Fig. 3 に示し、主要機器の諸元、使用測定器、雑音の影響の測定方法を以下に示す。

3-1 主要機器の諸元

空中線系装置 (Antenna) および低雑音増幅装置 (Low Noise Amplifire) の性能が雑音測定の精度に関係するが、Table 1 は、Antenna の電氣的諸元、Table 2 は低雑音増巾器の特性、Fig. 4 に Antenna Pattern Fig. 5 に Antenna 雑音温度特性を示す。その他、Fig. 3 に示す機器は、周波数変換装置 (Down Converter)、中間周波分配装置 (IF Divider)、中間周波切替装置 (IF Switch)、実時間テレメトリ装置 (Real Time Telemetry demo-

dulator)、4相多重復調装置 (4φ Demodulator Demultiplexer)、シンクロナイザ・データバッファ装置 (Synchronizer and Data Buffer) 等がある。

3-2 使用測定器

雑音測定に使用した測定器は、スペクトラムアナライザ (YHP 855A)、周波数計 (竹田理研 TR-5104)、ペンレコーダー (YEW 3047) である。

3-3 VISSR 回線の測定

GMS の可視 (4チャンネル)、赤外 (1チャンネル) の各検出器で検出された信号は、14 Mbps の速度で、かつ、可視 6 bit、赤外 8 bit の信号にデジタル化され、84 MHz の IF に 4φ 差動位相変調をかけた後、送信周波数 1681.6 MHz で地上に伝送される。この画像信号は、GMS が 1 スピンする間に、VISSR が地球方向を向く間 (約 30 ms) だけ送出される。CDAS では、この VISSR 信号を、18 mφ アンテナで受信し、低雑音増幅器で増幅した後、周波数変換装置により 70 MHz に変換して、4相多重復調装置に送る。ここでベースバンド信号に復調後、ビット同期、フレーム同期をとって、S/DB に送り出す。S/DB では、GMS から、テレメトリ回線で伝送されるサンパルスを用いて、GMS のスピンの同期をとりながら、4相多重復調装置より、データを取り込む。このデータは、S/DB 内で伝送速度の変換等を行なって、次の処理系に送出されるが、この過程で信号の信頼度を知るために、誤り率の測定を行なって出力している。従って、この誤り率の変化を測定すれば、VISSR 回線への外来雑音の影響の概要を知ることができる。こ

の場合、GMS および地上機器の動作が正常であることが確認できてしかも雑音の変化傾向から、外来雑音として太陽雑音のみを考えて良いことが分れば、誤り率の変化と太陽雑音の影響を対応させることができる。ここで述べる測定では、上記の確認を行なったうえで、VISSR 回線に対する太陽雑音の影響を調査した。

3-4 Telemetry 回線の測定

GMS から送出されるテレメトリデータには、サンパルス、アースパルス等の姿勢センサ関係のリアルタイム、テレメトリデータとハウスキープデータ関係のPCM テレメトリデータとがあるが、ここでは回線上最もノイズマージンの少ない高精度サンパルスのデータについて測定した。測定の方法は、テレメトリ復調器出力の高精度サンパルスのくり返し周期（スピン周期）を、周波数計で監視しておき、この周期が乱れはじめる時をS/Nの劣化したときとしてその時刻を記録し、また、回復する時刻を記録する。この間に別に取得した雑音の変化傾向のデータと比較して、この高精度サンパルス回線に対する雑音の影響を調べる。

3-5 太陽雑音のレベル

太陽雑音の変化傾向を知るためには、アンテナをGMS 方向に向けた場合、宇宙雑音等のバックグラウンド雑音のレベルを知っておく必要がある。このために、電波天文観測用の周波数帯を利用する。GMS では、電波天文観測を保護するために、1657 MHz~1673 MHz 帯の電波が発射されないように、特別なフィルターを使用している。Fig. 6にGMS のスペクトラムおよび電波天文フィルターの効果を示す。この領域のGMS から発射されている電波は、オーストラリアのパークス天文台の電波天文観測システムでも検知し得ないレベルである。

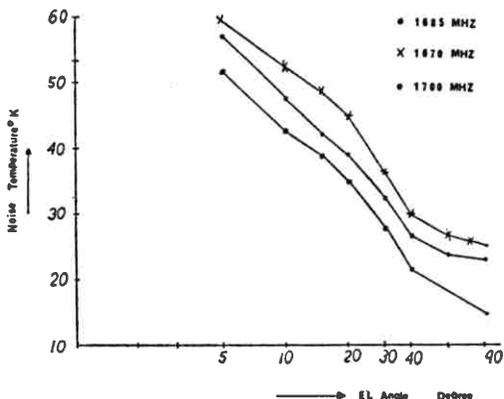


Fig. 5 Antenna Noise Temperature of CDAS

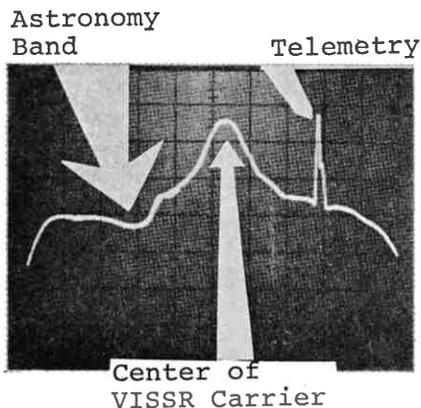


Fig. 6 Spectrum of GMS

Spectrum Analyzer

Bandwidth 300 KHZ Scan Width 5 MHZ
Scan Time 2 SEC Video Filter 100 KHZ
Log Lef Level 10 DBM

従って、受信系においては、GMS 以外の宇宙空間からの雑音と、受信系自身の雑音だけが存在していると考えてさしつかえないので、この領域の雑音レベルを平常時のバックグラウンド雑音レベルと仮定する。

この場合、雑音電力は次のように表わせる。

$$P_N = K \cdot T_s \quad (9)$$

$$T_s = T_a + (L_F - 1)T_0 + L_F \cdot T_R \quad (10)$$

ただし、

P_N : 天文バンドの雑音電力

K : ボルツマン定数

T_s : システム雑音 (空間雑音温度+アンテナ雑音温度+低雑音増幅装置雑音温度)

T_a : アンテナに入る雑音の等価雑音温度

L_F : フィーダの損失

T_0 : フィーダー温度 (常温)

T_R : 低雑音増幅装置以降の雑音の等価雑音温度

通常の状態では、 $T_s \approx 100^\circ\text{K}$ (空間雑音 20°K と仮定)

となり、この場合、 $P_N = -179 \text{ dbm}$

で、スペクトラムアナライザで測定される雑音レベルにほぼ一致する。このレベルを基準とすれば、太陽雑音による雑音の増加分を知ることができる。

4. 測定結果と解析

太陽雑音による妨害の測定は、GMS の打上げ以来、何回か実施されたが、ここでは、1978年10月の測定結果について記す。測定期間は、10月6日~11日で、8、9日は実際に VISSR 画像を取得しながら測定し、他の日は、雑音強度を測定した。

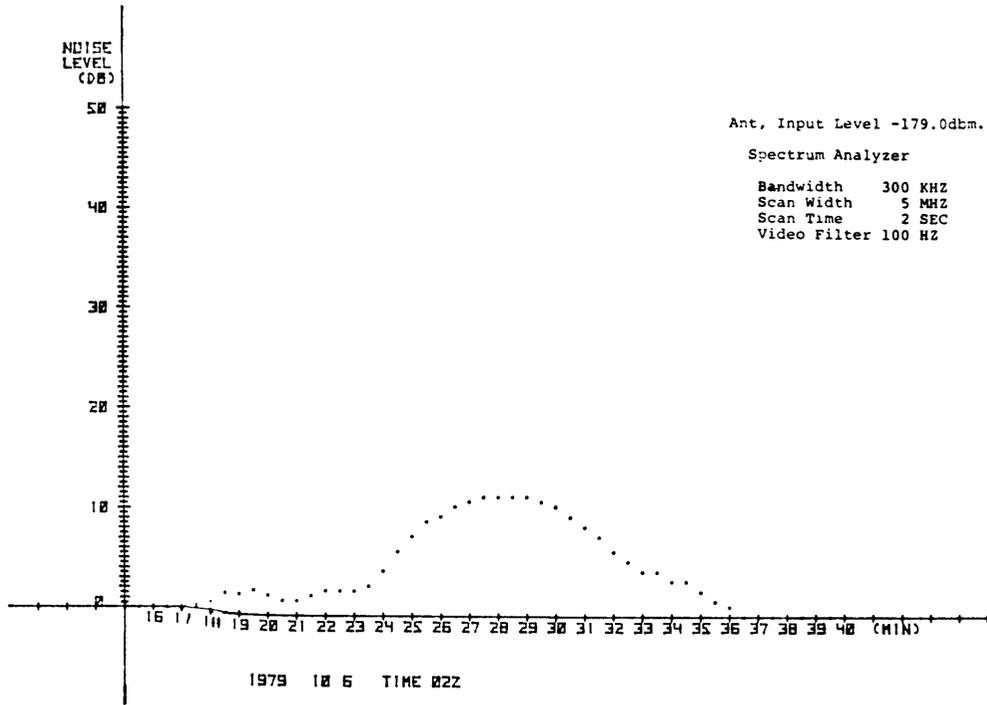


Fig. 7 One Result of the Solar Noise Observation

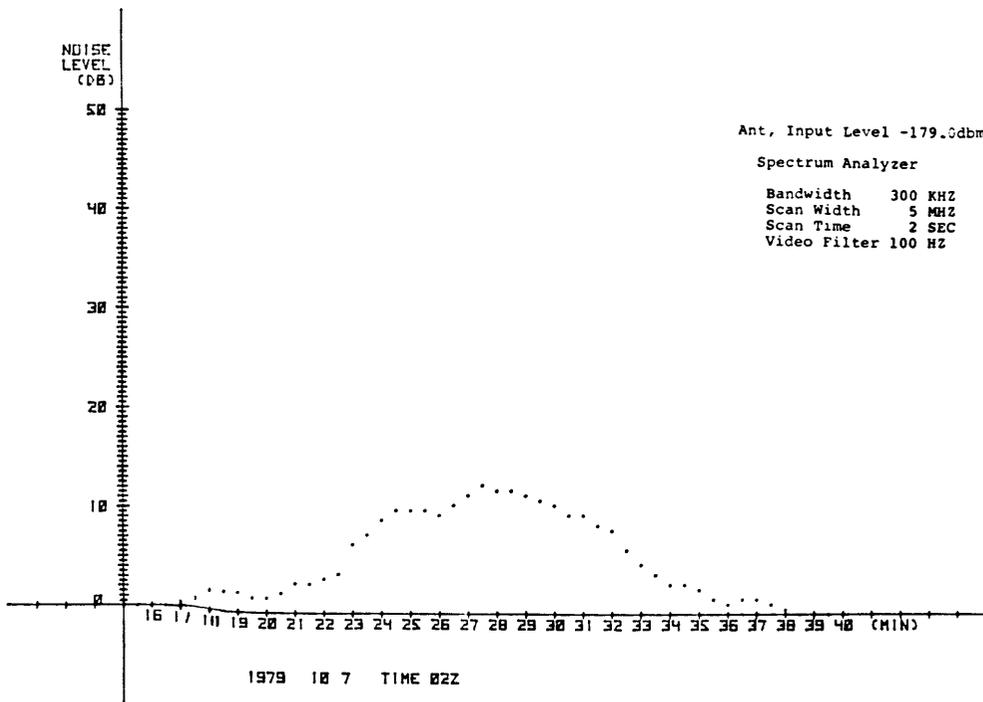


Fig. 8 One Result of the Solar Noise Observation

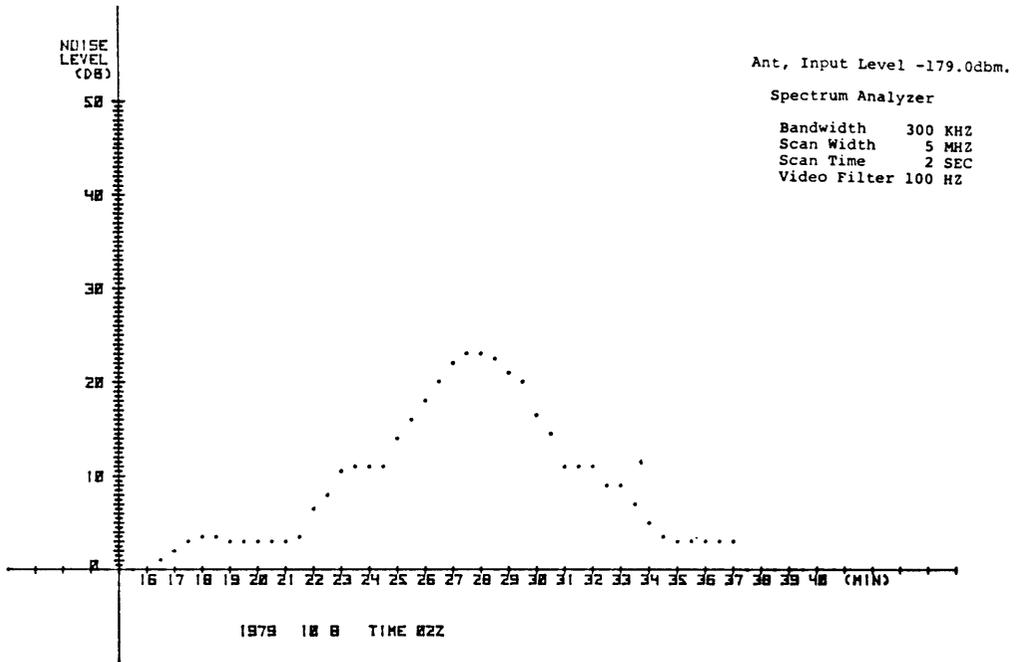


Fig. 9 One Result of the Solar Noise Observation

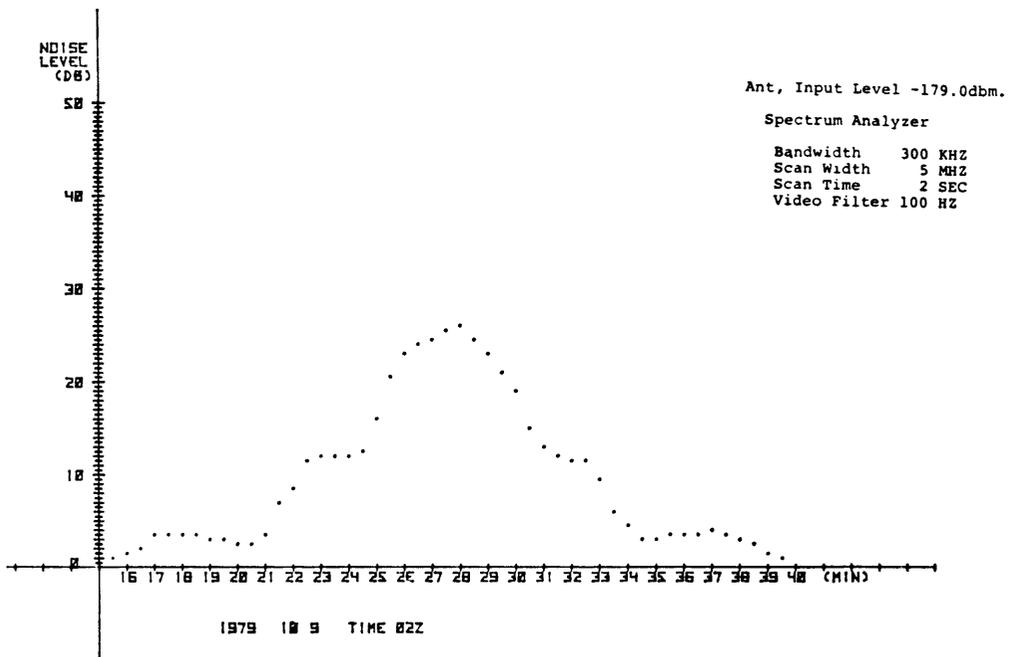


Fig. 10 One Result of the Solar Noise Observation

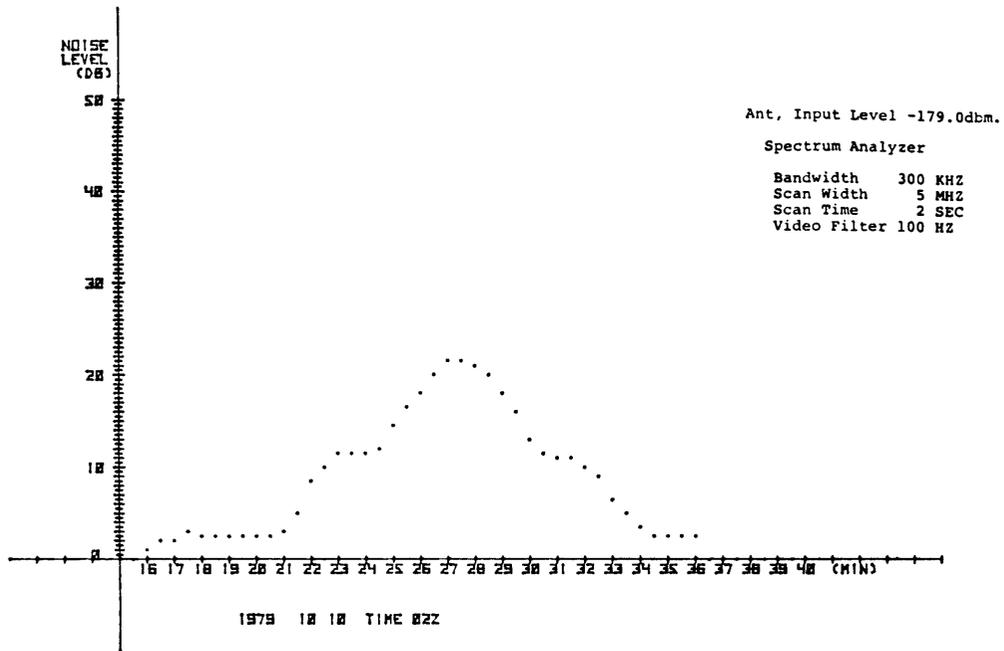


Fig. 11 One Result of the Solar Noise Observation

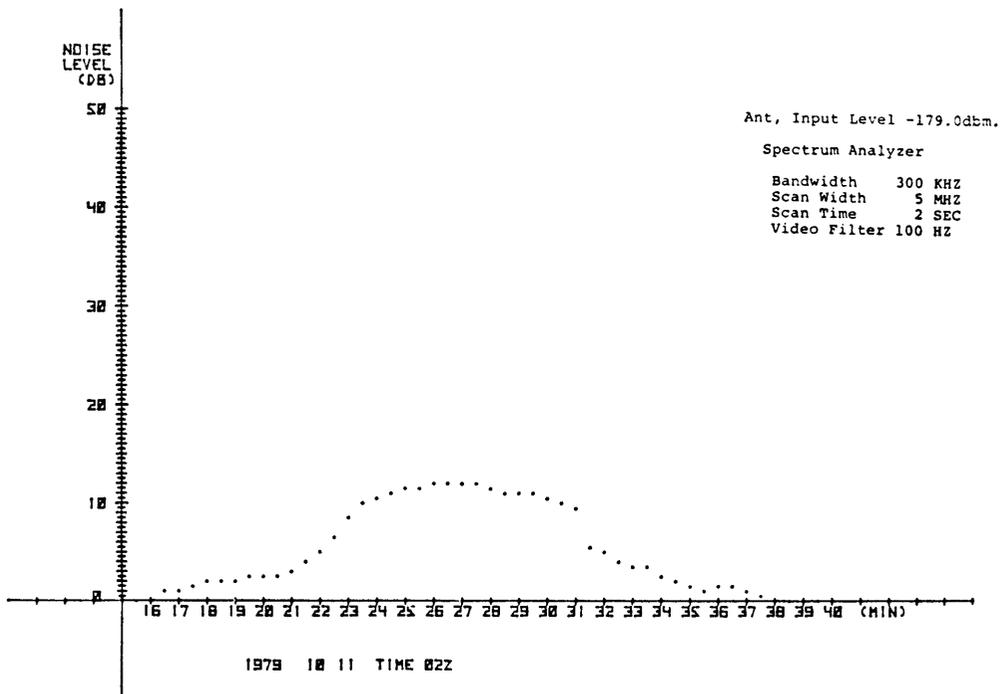


Fig. 12 One Result of the Solar Noise Observation

Table 2 Characteristic of Low Noise Amplifier.

Center Frequency	1982.5 MHz
Bandwidth	More than 40 MHz
Noise Temperature	Less than 45 K
Gain	More than 40 db
Stability	±0,5 db/week
In-band Gain Variation	Less than 1 db

4-1 測定結果

10月8, 9日に測定した VISSR, Telemetry 回線へ

の雑音の影響は, Table 3 および Fig. 7~12 に示す。

ここで,

SWE: SYNC word error とは VISSR 1 Scan 中に衛星から送信される同期ワードの誤まった数

BER: Bit error rate とは 1 Scan (1 Scan は 6688 マイナーフレームシンク (MFS) で構成され, 各 MFS の同期コードは 8 Bit である) 中の同期ワードのみを比較して誤りビットを検出し, その数を 1 Scan の全 Bit の誤り率に換算したものである。S/DB では 100 Scan の誤り率を TTY に出力する。

Bit/Frame Sync Loss: S/N が劣化して, ビット同期, フレーム同期がなくなった事を示す。

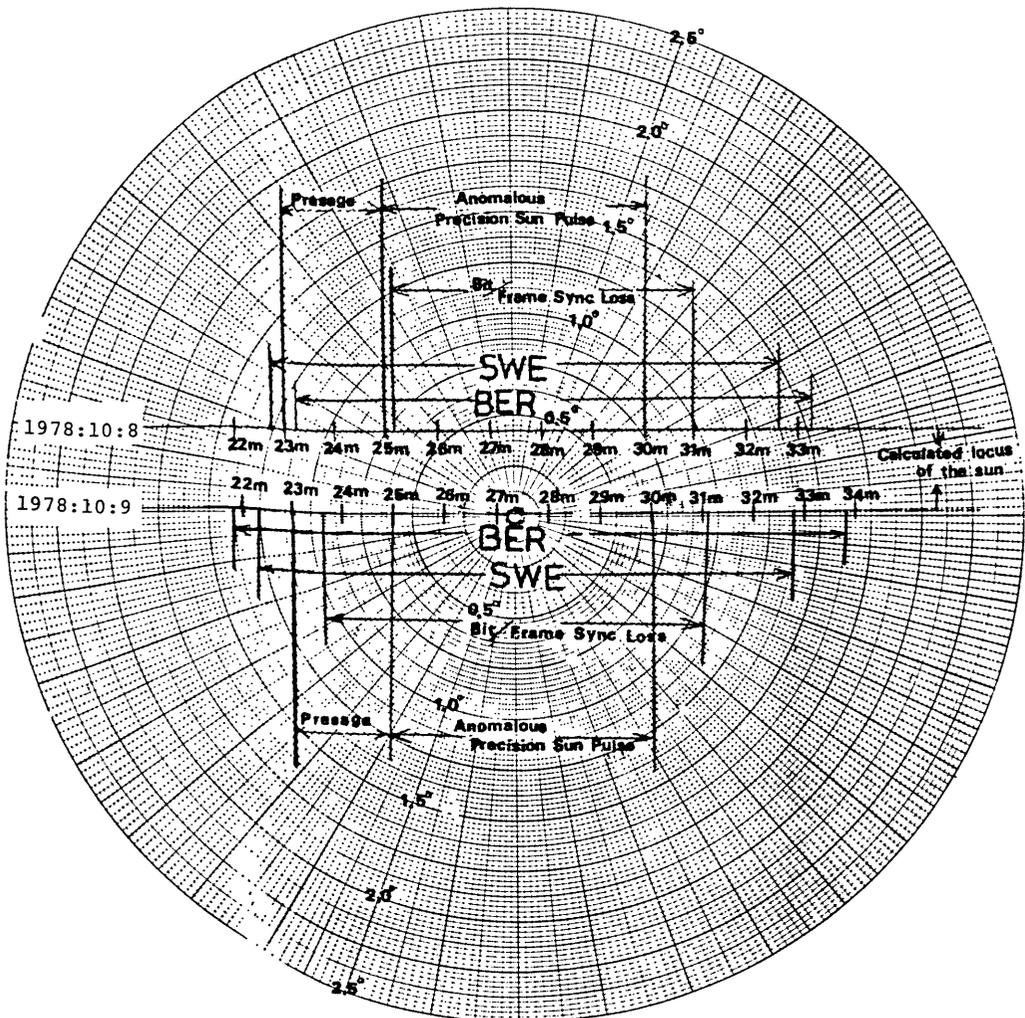


Fig. 13 Calculated Locus of the Sun and the Results of Observations.

-Circle shows the angle from the center of the CDAS Antenna.

Table 3. Solar Interference with VISSR and TLM Link

Item	Time	8/10/78(Z)	9/10/78(Z)
Beginning of the SWE		02 : 22 : 47	02 : 22 : 08
End of the SWE		02 : 32 : 40	02 : 32 : 51
Beginning the increase of BER		02 : 22 : 40—10 : 23 : 40	02 : 21 : 23—02 : 22 : 23
Return to the nominal BER		02 : 32 : 42—02 : 33 : 40	02 : 33 : 23—02 : 34 : 23
Loss of Bit/Frame Sync		02 : 25 : 01—02 : 31 : 10	02 : 23 : 28—02 : 31 : 03
Anomalous Precision Sun Pulse		02 : 25—02 : 30	02 : 25—02 : 30

Table 4. Characteristics of VISSR Link

Satellite link	GMS-CDAS
Frequency (MHz)	1681.6
Type of Moduration	PCM-4 ϕ PSK
E. I. R. P. (dbm)	59.9
Tx Off-beam Center (degree)	6.5
Tx Off-beam Center Loss (db)	-1.4
Free Space Loss (db)	-188.3
Rx Off-beam Center (degree)	0.1
Rx Off-beam Center Loss (db)	-0.6
Rx Input Power Level (dbm)	-130.4
Rx System Noise Temp G/T (db/ $^{\circ}$ K)	29.3
Rx C/T (db/ $^{\circ}$ K \cdot Hz)	-101.1
Boltzman's Constant (dbm/ $^{\circ}$ K)	-198.6
C/N ₀ (db/Hz)	97.5
Total C/N ₀ (db/Hz)	97.5
Required C/N ₀ (db/Hz)	88.5
Margin (db)	9

4-2 VISSR 回線のスレッシュヨルドマージン

現在まで何回となく VISSR 回線の BER の測定は実施されたが、BER が規格値 10^{-6} を維持できなくなるのは C/N₀ が 9 dB 劣化したときである。実際に VISSR 回線に太陽雑音が混入した場合は 1978 年 10 月 8 日、9 日を例にとると、Fig. 13, Table 3 に示すように太陽が CDAS カセグレンアンテナビーム幅 $1.5^{\circ} \sim 1.0^{\circ}$ 以内に入射すると BER が 10^{-6} を維持できなくなる。その時の Noise 成分は Fig. 9, Fig. 10 に示すように 9 dB 以上である。次に太陽がビーム幅 0.75° 以内に入射すると BER は測定不能になり、Bit/Frame Sync Look も同期がとれなくなる。以上のことから春秋分期において太陽がアンテナビーム 1.5° 以内に入射すると、VISSR 回

線に障害を受けることがわかる。また、第 2 項の(8)式で妨害期間を算出するとほぼ 5 日間となる。

4-3 TELEMETRY 回線のスレッシュヨルドマージン
REAL TIME TELEMETRY 回線の高精度サンパルスは Fig. 8, Fig. 9, Fig. 13 Table 3 から太陽がアンテナビーム幅 1.0° 以内に入射した時に高精度サンパルスは時々みだれ、ビーム幅 $\pm 0.65^{\circ}$ 以内に太陽が入射すると高精度サンパルスは受信できない。また、妨害期間は 3 日間である。

4-4 1.7 GHz における太陽の輝度温度

1.7 GHz 付近における太陽の輝度温度は、太陽の活動状況によっても異なるが、CDAS カセグレンアンテナによる測定値から $1 \sim 1.3 \times 10^5$ K であった。

5. 1979年2月16日の現象

1979年2月16日0140 z 頃に太陽面で大規模なフレアーが発生した。この活動領域は、1568 (N15 E48) であった。このフレアーの影響が地球に到達する0230 z 頃たまたま VISSR 観測を行っていたため、一時画像取得が不能となったが、その経過を以下に記す。

5-1 妨害雑音の変化

(1) 02 : 30 z GMS を VISSR 取得モードとし、画像信号の伝送を開始したが、4 ϕ DEM/DEM \times で、フレーム同期がかからず、信号の検出が不能。アンテナでの受信々号をスペクトラムアナライザで観測したところ、雑音レベルが通常より 13~16 db 増加 (受信帯域全域) しており、この状態が 5 分間継続した。

(2) 02 : 36 z 4 ϕ DEM/DEM \times のフレーム同期がかり始め、画像の取得は可能となったが、雑音レベルはスレッシュヨルド付近の 8~10 db あり、BER は大きい値を示す。

(3) 0240 z (1)と同様の現象となり、5～6分継続。

(4) 0246 z 4φ DEM/DEMx のフレーム同期がとれはじめ、画像も正常にもどったが、雑音レベルは依然4～5db多い。この状態が03z項まで継続し、その後、この雑音はなくなった。

5-2 太陽放射エネルギーの大きさ

上記の現象の際に、CDASのアンテナで受信された雑音電力をもとに、太陽から放射された、1.7GHz帯のエネルギーを試算すると以下ようになる。

CDASカセグレンアンテナの実効開口面積Ae, アンテナ出力Pとすれば、1.7GHzにおける太陽フラックスはS次のよになる。

$$P = \frac{1}{2} A_e \cdot S \quad [w/Hz] \quad (11)$$

$$S = \frac{2P}{A_e} \quad [w/m^2Hz] \quad (12)$$

ただしアンテナ効率を1/2と仮定した。受信点においてΩなる立体角を張る雑音源の輝度bとフラックス密度Sとの関係は次のようになる。

$$S = \int \int \rho b d\Omega \quad (13)$$

一方、温度T_b [°K]なる完全黒体の輝度はRayleigh-Jeansの近似的により

$$b = \frac{2KT_b}{\lambda^2} \quad [w/m^2 \cdot Hz \cdot sterad] \quad (14)$$

ただし、Kはボルツマン定数、λは波長である。したがって、T_bなる完全黒体が張る立体角をΩとし、Ω以外の領域の温度は0°Kとすると

$$S = \frac{2KT_b}{\lambda^2} \Omega \quad [w/m^2 \cdot Hz] \quad (15)$$

この時刻の太陽の位置を第2項により求めると、CDASのアンテナ中心からθ=9°はなれた位置となる。一方、θ=9°におけるCDASカセグレンアンテナ放射パターンを示したFig.4からアンテナ利得は求められないが、CDASカセグレンアンテナの口径は18m、受信波長18cmであるので、D/λ=100となる。したがって、CCIR勧告の基準放射パターンを満足しているものとすれば、サイドローブ利得は次式にて求めることができる。

$$32 - 25 \log_{10} \theta = G_{side} \quad (16)$$

$$G_{side} = 8.14 \text{ db}$$

G_{side}=8.14 dbからθ=9°における、実効開口面積Aeは、

$$A_e = \lambda^2 \cdot G_{side} / 4\pi \quad (17)$$

$$A_e = 1.6 \times 10^{-2} \quad [m^2] \quad (18)$$

となる。ここで5-1(1)で示すスペクトラムアナライザで観測された雑音の最大値は、アンテナ入力値に換算すると、-163dbmに相当する。この値と、(18), (12)式を用いると、S=7.5×10⁻¹⁸ [W/m²Hz]を得る。

太陽放射エネルギーを表わす場合には、一般にSolar flux Unit (s. f. u)を単位として表わし、1 s. f. u.=10⁻²² w/m²Hzである。したがって、2月16日に観測された1.7GHz帯の太陽雑音の最大放射エネルギーは、7.5×10⁴ s. f. uとなる。

一方、この時間帯の、名古屋大学空電研究所での2GHz帯の太陽電波観測では、7×10⁴～10⁵ s. f. u.が観測されており、ほぼ一致する。静穏時の1.7GHzにおける太陽放射エネルギーは、50 s. f. u.程度であり、この日の太陽フレアによるエネルギーがいかに大きなものであったかがうかがわれる。

6. まとめ

電波を放射している天体は数が多く月、惑星、電波星等がある。これ等は、すでに述べたようにGMS-CDAS間の通信回線に妨害は与えない。したがって、GMS回線に妨害を与える天体は太陽だけであり、それも、例外的な規模のフレアを除けば、春分および秋分時期に、太陽がアンテナの方向に入る場合にのみ、観測に支障をきたす。前述のように、GMSの運用スケジュールでは、VISSR観測の時間に、この現象が発生する。GMSでは、この妨害期間中には、観測スケジュールを変更して、回線を使用しないことにしている。他の各種静止衛星においても、この障害を避けるために、特に機器を改善するような対策はとらず、運用方法で妨害を避けている。

1979年2月16日の現象は、その規模からいって、非常にまれな現象で、最近では、1972年のAugust Eventといわれているものがあり、このときも、10⁴～10⁵s.f.u.の放射があった。

この調査は、太陽の雑音妨害が、どの程度の規模で起り、それが、GMSの通信回線にどんな影響を与えるかを明らかにする目的で実施し、その結果を実際の運用面

にも反映することができた。

最後に、この調査を行うにあたり、いろいろ助言していただいた、電波研究所 山下不二夫主任研究官、データを提供して下さった名古屋大学空電研究所、軌道計算に助言していただいた石垣島気象台 宮沢 勇技官（元衛星センター）および、観測を手伝っていただいた気象衛星通信所の方々に感謝いたします。

Reference

- (1) 気象衛星センター技術報告（特号号 I — 2）（GMS システム総合報告」I 機器解説編その 2
- (2) 国際通信の研究 No. 57, 糸原志津夫, 他
- (3) 電波天文学 畑中武夫著
- (4) 衛星通信工学 宮 憲一著
- (5) 理科年表 1978年版, 1979年版。