

GMS 衛星回線で発生するシンチレーションについて

Scintillation observed on the GMS communication link

富田 浩*
Hiroshi Tomita

Abstract

The GMS communication link has been affected by ionospheric scintillations which have often caused the degradation of the characteristics of the received signals. The observed scintillations on the GMS communication link and the aspects of the ionospheric scintillations will be reviewed in this paper.

1. はじめに

衛星通信に用いられる電波は、その伝搬距離と波長に依存する自由空間損失のほか、地球を取巻く対流圏及び電離圏を通過することによって種々の影響を受ける。

この影響は、使用周波数帯により異なり、短波等の数100MHz以下の低い周波数帯では、宇宙雑音(銀河雑音等)及び電離層で生じる減衰の影響が顕著である。また、10GHz以上の高い周波数では大気ガス(CO₂、O₂等)や降雨などによる減衰及びこれらの媒質で発生する熱雑音などの影響が増加する。

Fig.1に示すように、銀河雑音(Galactic noise)及び大気による熱雑音(Thermal noise from the atmosphere)等の影響が比較的少ない300MHzから10GHzの周波数領域が“電波の窓(Radio Window)”と呼ばれている。

実際の衛星通信では、この周波数領域にある1GHz~10GHz帯が最も多く使用されており、静止気象衛星(GMS、GOES、METEOSAT等)も、この“電波の窓”と呼ばれる周波数帯の中で気象衛星業務に割り当てられている1.6GHz~2GHz帯の電波を使用して通信を行っている。

Fig.2に示すように、1.6GHz~2GHz帯の電波は、降雨による影響はほとんど受けないので安定した衛星回線を構成できる。しかし、この周波数帯の電波を使用するGMS衛星回線にもシンチレーション(Scintillation)と呼ばれる現象が発生し、GMSの運用に影響を与える。本稿では、GMS回線で観測されたシンチレ

ーションについてその現象及び現在までに報告されている発生メカニズム等について述べる。

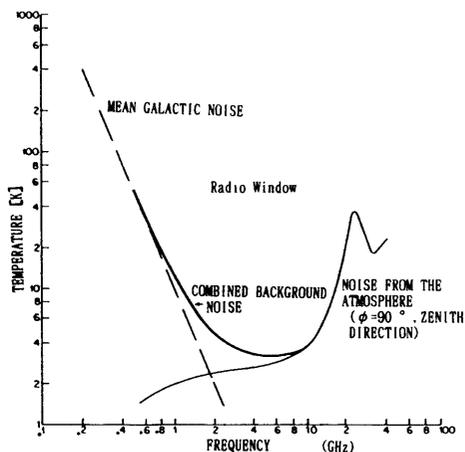


Fig.1 Combined background noise for space communications receiver

* 気象衛星センター施設管理課

2. シンチレーション

2.1 シンチレーションとは

シンチレーションとは、本来、地球大気が不均一なことにより星の明るさが“またたく”ことを言う。電波伝搬上のシンチレーションとは、電波が大気中や電子密度の不規則な電離層を通過する際に振幅（強度）や位相及び偏波面が短周期で変動する現象をいう。

衛星通信で生じるシンチレーションには、対流圏に起因するものと電離圏に起因するものがあり、前者を対流圏シンチレーション (Tropospheric Scintillation)、後者を電離圏シンチレーション (Ionospheric Scintillation) と呼んでいる。

対流圏シンチレーションの発生原因としては、主として大気の屈折率構造による電波の収束・発散効果によるものが考えられ、地上局のアンテナの仰角が低く対流圏の伝搬が長くなる場合や積乱雲がアンテナビーム方向を横切るときなどに発生する。

電離圏シンチレーションの発生原因としては、急激な時間変化を伴う電子密度の不規則構造が何らかの影響で電離圏高度に出現するため、そこを通過する衛星電波の振幅や位相が乱れることによるもので、Fig.3に示すように、衛星回線で使用している周波数の電波に対しては、透明と考えられている電離層の電子密度が乱れることにより発生する(電離圏の覚乱と呼ぶ)。これは、電離層 F 層高度の電子密度の不規則構造(スプレッド F)に起源をもつものと、E 層高度の電子密度の不規則構造(スポラジック E)に起源をもつものがある。

シンチレーションの大きさ(衛星電波への影響の大きさ)は、電波の周波数を f とすると、 $f^{-1.5} \sim f^{-2}$ に依存して変化することが経験的に分かっている。したがって、周波数 (f) が高いほどシンチレーションは小さいことになる。

また、高い周波数まで激しいシンチレーションが発生するには、電離圏に大きな振幅を持つ短波長の不規則構造が存在しなければならない。

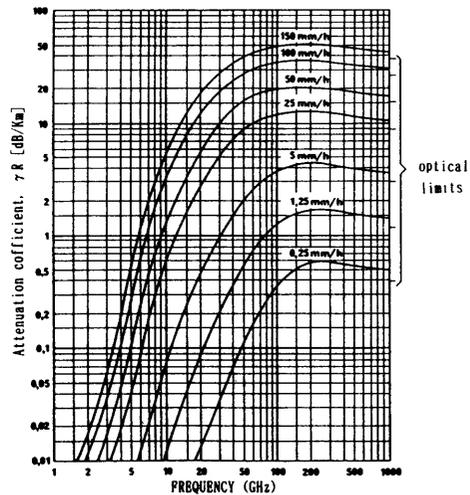


Fig.2 Attenuation coefficient due to rain

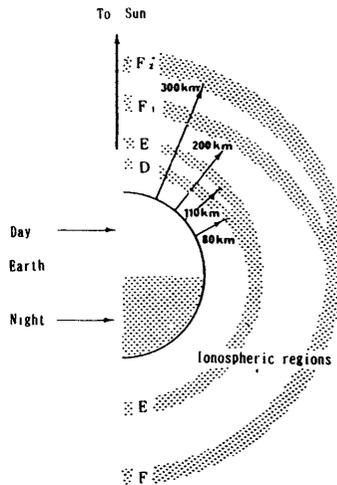


Fig.3 Ionospheric regions as a function of height above the Earth's surface

2. 2 太陽活動とシンチレーション

太陽活動とシンチレーションの発生原因となる電離圏攪乱とは、密接な関係がある。

まず、地球の磁気圏は、太陽風と地球磁気との相互作用により Fig.4に示すような形となっている。

磁気圏の最も外側の領域は、太陽風の圧力と地球磁気がつり合って磁気圏境界 (Magnetopause) を作っている。

太陽側の前面には、バウ・ショック (Bow Shock) と呼ばれるショックフロントが形成されており、太陽と反対側の夜の部分では、地磁気は吹き流された形の磁気圏尾部 (Magnetotail) が形成されている。

磁気圏尾部では、逆向きの磁場が接近しているので中心部では磁場が非常に弱くなっており、これを磁気中性面 (Neutral sheet) と呼んでいる。この中性面の近くでは、磁場が弱いので外側の磁場の圧力とバランスをとるため、中性面付近では比較的密度が高いプラズマが存在する。これをプラズマシート (Plasma sheet) と呼んでいる。磁気圏内側の磁力線の閉じている領域では、比較的高いエネルギー粒子が磁力線に捕捉されており、これを放射線帯と呼び、さらに、内側

の領域ではエネルギーの低いプラズマで満たされており、これをプラズマ圏と呼んでいる。電離層もこのプラズマ圏に含まれる。

また、この図では、静止軌道はプラズマシートとプラズマ圏の間に位置するが、地磁気活動によってはプラズマシート、あるいは昼間側ではマグネトシート (Magnetosheath) 内に入ることもある。

電離圏シンチレーションを発生させる電離圏攪乱の誘因は、主に太陽の高速プラズマ流であり、このプラズマ流の生成には、太陽面上の太陽フレア、コロナホール及びフィラメント消失現象等がある。

太陽フレアとは、太陽面上に発達した黒点群が現れ、そこで磁場構造が複雑になると“何か”が引き金となって爆発的なエネルギーの放出が起こる現象を言う。この“何か”については、電磁気的原因であると考えられている。このフレアは、フレア領域近くの電子を急激に加速させ、ガンマ線、X線等の電磁波を放出し、さらに、フレアに伴ってマイクロ波から短波帯に及ぶ電波 (太陽電波バーストと呼ばれている) 及び高速のプラズマ流を放出する。太陽は、通常、常に太陽風というかたちで高速のプラズマ流を放出しているが、太陽フレアが発生するとこのフレアに伴う高速のプラ

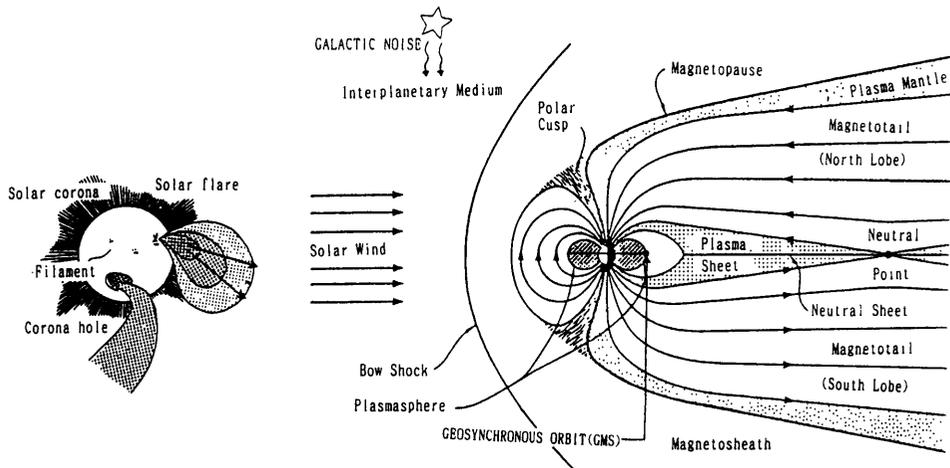


Fig.4 Magnetospheric of Earth

ズマ流が太陽風の高速プラズマ流に加えられ、衝撃波となって地球に到達する。

コロナホールとは、人工衛星スカイラブで発見されたもので、これは文字どおり太陽のコロナ領域にいた穴で、そこは周囲よりも温度が低く、磁場が惑星空間に向け開いた構造をしている。

フィラメント消失現象とは、その名のとおり太陽面上に現れる細長い構造の活動領域が突然消え去ることを言う。フィラメントは、同時に複数個存在するのが普通である。

ここで、太陽フレアを例に電離圏シンチレーションの発生過程を追うと、太陽フレアの発生に伴う高速プラズマ流が発生から2～3日で地球に取り巻く磁気圏の前面に到達する。この時が磁気嵐の始まりである。

最近の研究によれば、この高速プラズマ流の到達だけでは必ずしも磁気嵐の原因とはならず、これに加えて高速プラズマ中の磁場が南向きの成分を持つことが必要であると考えられている。この高速プラズマ流の衝撃（圧力）により、地球磁気圏は急激に圧縮され、その結果、磁気圏の大きさが小さくなると同時に、この内部の磁場も圧縮されるために地球表面の磁場の強度が急に大きくなる。この衝撃波が磁気圏を通過してしまうまでの数時間は、磁気圏は圧縮されたままに維持されるので、表面磁場の強度は強められたままである。この磁場の強められた期間が過ぎると、今度は磁場の強さが急激に減少しはじめる。

また、高エネルギーのプラズマは、磁気圏後方のプラズマシートから侵入する。その後、この高エネルギープラズマは、磁力線に沿って地球磁気圏内部へ流入する。このエネルギーの一部は放射線帯の励起に、一部は極域の超高層大気に流入し、オーロラ、極磁気じょう乱、超高層大気の加熱、電離圏の攪乱といった一連の地球嵐現象を起こす。電離圏の攪乱は先に述べた様に地上の磁場の変動（地磁気嵐）を伴って、電離層の電子密度変化をもたらす、電離圏シンチレーションを発生させる。したがって、電離圏シンチレーションを発生させる電離圏攪乱の源は、太陽活動にあると言える。ただし、電離圏攪乱の規模は、地磁気嵐の規模と必ずしも相関はなく、規模の小さい地磁気嵐であっても、大シンチレーションが発生することがあり、大シンチレーションは、概して太陽活動が盛んな時期に起こりやすい。

大シンチレーションが発生した場合、衛星の運用では、通信回線のビットエラーレートの増大等の回線品

質劣化、自動追尾アンテナのロックオフ等の重大な影響を受ける。

2. 3 シンチレーションの発生地域

電離圏シンチレーションの発生地域は、地磁気緯度と時刻とに最も強く依存することが認められている。Fig.5に示すのは、太陽活動が比較的強い年の平均的なシンチレーションの発生状況を地球の夜半球について示したものである。これを見ると磁気赤道及び南北の高緯度地域で強いシンチレーションの発生及び頻度が高くなっている。

中緯度地域のシンチレーションは、上記の磁気赤道地域及び高緯度地域のシンチレーションに比較して弱いとされているが、GMS回線で使用するGHz帯にまで影響を及ぼすシンチレーションが発生することもある。

Fig.6に示す磁気赤道では電離圏プラズマは不安定になりやすく、磁気赤道を挟む南北それぞれ20°ないし30°の地域で真夜中から日没側にかけての時間帯を中心として強いシンチレーションが発生する。一般に、赤道地域のシンチレーションは、春秋分時に最大となる。

高緯度地域においても強いシンチレーションが発生するが、これは、地球磁界の俯角が大きくなるために荷電粒子が磁力線に沿って降下し、電離圏が乱されるためと考えられている。

中緯度地域においても時おり強いシンチレーションが発生するが、その発生メカニズムは、非常に複雑であり、現在その解明が進められている。

2. 3 SEM とシンチレーション

2. 3. 1 SEM について

太陽活動の動きを知る目安として、GMSには、宇宙環境モニタ（SEM: Space Environment Monitor）と呼ばれるFig.7に示すようなエネルギー帯の検出器が搭載されており、フレア活動等に伴う荷電粒子の変動を克明に知ることができる。

磁気圏が静穏な時はFig.7のうちのELとP1チャンネルのみが日変化し、他の検出器の出力がほぼゼロである。すなわち、ELとP1チャンネルは、フレアのない静かな時でも、かなりの高レベルのカウント数が連続して観測され、このレベルが季節により変動したり、消えたりする現象がある。このレベルカウントは、

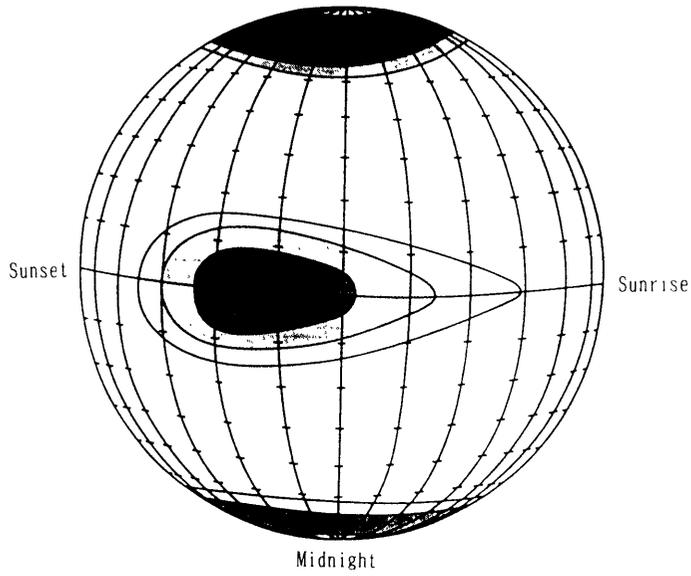


Fig.5 Night-time picture of scintillation occurrence The density of hatching is proportional to the occurrence of deep fading

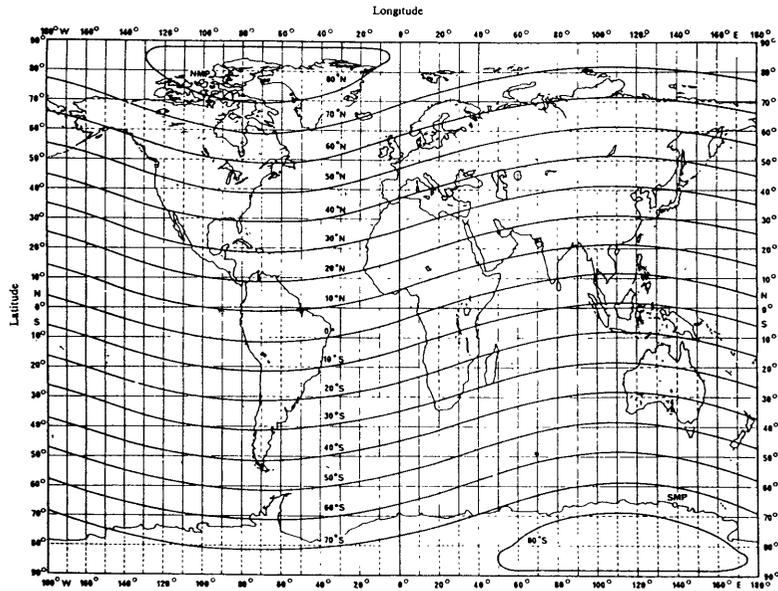


Fig.6 Geomagnetic latitudes

衛星が食に入ったら直ちに消え、食明けと共に回復する点から、太陽光により何らかの影響を受け絶えず変動していると考えられている。このため、フレア活動等に伴い荷電粒子が到来してもその判別が難しい。太陽フレアの発生により荷電粒子が到達すると、主としてELとP1チャンネル以外の粒子フラックスが上昇する。ELとP1チャンネルも増加するが、先に述べた様にその判別が難しい。

また、米国の静止気象衛星(GOES)には、宇宙環境モニタとして、磁力計、X線センサ、高エネルギー粒子センサが搭載されており、それぞれ衛星近傍の磁界の方向とその強度、太陽X線及び高エネルギー粒子(アルファ、プロトン、電子)の測定を行っている。

2. 3. 2 SEM とシンチレーション

Fig.8に1989年10月のGMS-3 (140°E)/SEM データを示す。

この月のSEM データを見ると、19日13UT からSEM 検出器すべてのフラックスが急激に増加している。地磁気嵐は、20日09:17UT から始まり、柿岡の水平成分の最大地磁気変動量 $\Delta H=307\text{nT}$ であった。埼玉県鳩山町にある気象衛星通信所(CDAS: N35°58'16", E139°19'9")ではFig.9に示すように、SEM データの粒子フラックスの上昇から2日後の21日10:08UT~10:47UT、12:18UT~14:28UT、15:18UT~16:02UTに断続的な大きなシンチレーションを観測している。

このシンチレーションの最大振幅は、10:48UT に28.1dBp-p (テレメトリ回線)を観測している。このシンチレーションによってVISSR 画像のライン抜けが

PARTICLE TYPE	CHANNEL NAME	ENERGY RANGE (MeV)
ELECTRON	EL	> 2
PROTON	P1	0.8 ~ 4
	P2	4 ~ 8
	P3	8 ~ 16
	P4	16 ~ 30
	P5	30 ~ 68
	P6	68 ~ 100
ALPHA	A1	8 ~ 66
	A2	32 ~ 66
	A3	64 ~ 120
	A4	120 ~ 240
	A5	270 ~ 370

Fig.7 Energy range of SEM (GMS-3)

発生している。この時期、ETS-V (155°E)の2.2GHz帯を受信している宇宙開発事業団(NASDA)勝浦追跡管制所(千葉県)の受信レベルにも、10:02UT~15:25UTに強いシンチレーションを観測しており、その最大振幅:40.0dBp-pを観測している。

また、北海道においても、21日の11時40分~12時15分JST及び14時10分~14時30分JSTにオーロラを観測されている。

3. GMS-CDAS 回線上のシンチレーションについて

3. 1 1978年~1989年間にGMS 回線で観測されたシンチレーション

GMSの1号は、1977年7月14日に打ち上げられ、現在1989年9月6日に打ち上げられたGMS-4号が東経140度で現用衛星として運用されている。このGMSシリーズの静止気象衛星は、Fig.10に示すようにCDASへ1.6GHz帯の電波でテレメトリ信号を送信しており、また雲画像データ等の気象データ(VISSR、S-VISSR及びWEFAX等)の中継(CDASから2GHz帯の電波を衛星に向け送信し、衛星で1.6GHz帯に変換して地上に送信している。)も行っている。

CDASでは、この1.6GHz帯のテレメトリ信号

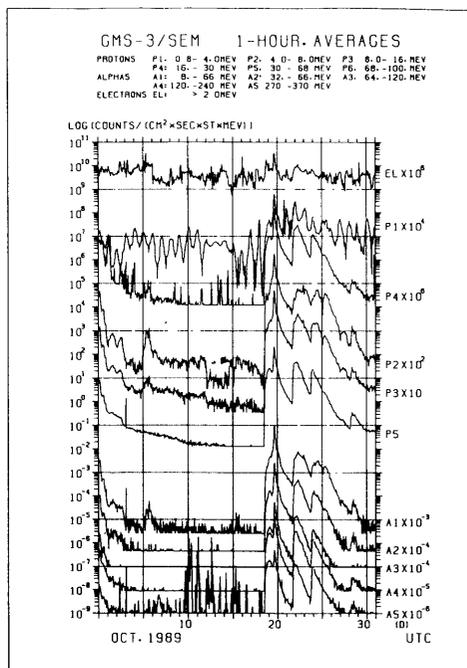


Fig.8 Observed particles which were monitored by GMS-3's SEM during 31 to 1 October, 1989

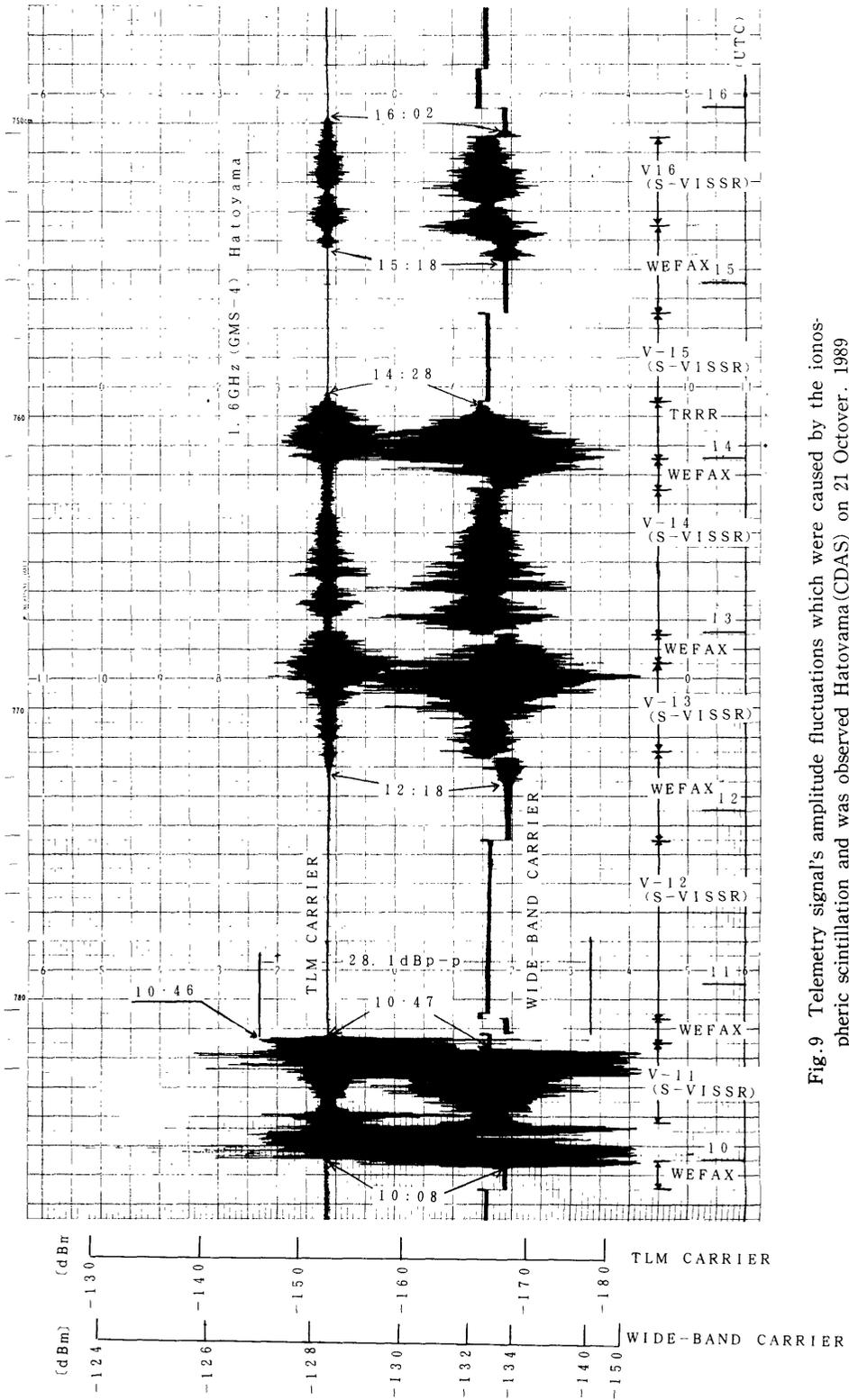


Fig.9 Telemetry signal's amplitude fluctuations which were caused by the ionospheric scintillation and was observed Hatoyama(CDAS) on 21 October, 1989

(TLM Carrier) と同じく 1.6GHz 帯の気象データ中継信号 (Wide-Band Carrier) の受信レベルをペンレコーダに記録している。

Fig. 11は、1978年～1989年間の太陽の黒点数の推移及び GMS → CDAS 間のテレメトリ回線においてシンチレーションの振幅が 1.0dBp-p 以上観測されたシンチレーションの回数及び GMS の運用障害 (画像のライン抜け、アンテナの自動追尾不能等) となった大シンチレーションについて “*” にて示した。

この “*” で示す大シンチレーションの発生は、平均すると一年に一回程度発生しており、太陽活動の極大期及びその極大期から下降する時期に多く観測されている。

さらに、上記の観測されたシンチレーションの回数 (シンチレーションの振幅が 1.0dBp-p 以上のもの) を月別毎にまとめると、Fig. 12に示すような季節的变化を示し、6月を中心に夏季の5～8月にシンチレーションが多く、冬季においてはさほどではない。

この夏季に多くなる原因としては、積乱雲や空電等の対流圏シンチレーションと電離圏が静穏でも (すなわち、地磁気嵐などによる電離圏攪乱がなくても) 夏季の夜間に長時間にわたってスプレッド F が、また夏季の日中にはスプラジック E が頻発する。このスプレッド F やスプラジック E によりシンチレーションが発生すると考えられる。しかし、GMS の運用に影響を及ぼすほどの大シンチレーションではない。この理由は、電離圏に大きな振幅を持つ短波長の不規則構造が発生せず、あっても小さいものであるからと考えられる。

3. 2 大シンチレーションの時間毎の発生状況

大シンチレーションの発生時間帯は、Fig. 13に示すように日没後の夕方領域から朝にかけて観測されており、そのピークは真夜中前後から明け方にかけてであり、赤道地域の発生時間帯とはやや異なる。

4. 1988年11月30日の大シンチレーションについて

4. 1 発生状況及びその原因

CDAS では、1988年11月30日真夜中から明け方にかけて GMS-3 回線において 1.6GHz 帯電波に電離圏攪乱に伴う強い電離圏シンチレーションを観測した。

この時の地磁気嵐はさほど大きくなかったが、顕著な電離圏攪乱現象 (スプレッド F の発生) が観測されている。したがって、この電離圏攪乱現象に伴って

GMS-3 回線上に強い電離圏シンチレーションが発生したと考えられる。他の衛星、ETS-2の136MHz BSの12GHz CSの20GHzの各電波でも強い電離圏シンチレーションが確認されている。

この電離圏の攪乱を伴った地磁気嵐は、当時の太陽活動状況の調査・研究によれば、11月27日あるいは27日から28日かけて消失した3つのフィラメント消失現象のなかで米宇宙環境センターの指適した太陽南極冠域のフィラメント消失もしくは、北半球の小規模なフィラメント消失のいずれかが原因であると推測される。

また、この時期の SEM (GMS-3) データには、あまり変動が見られず、フレア粒子が地球近傍に飛来した形跡はない。これは、この期間が低調なフレア活動で

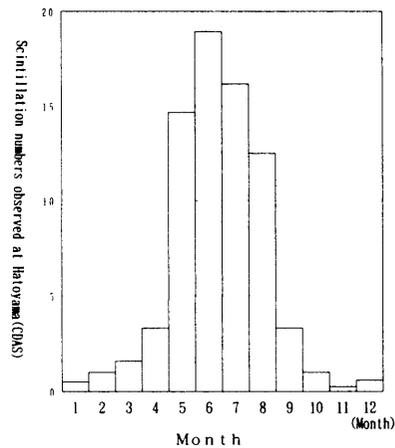


Fig. 12 The monthly mean scintillation numbers observed at Hatoyama (CDAS), from 1978 to 1989

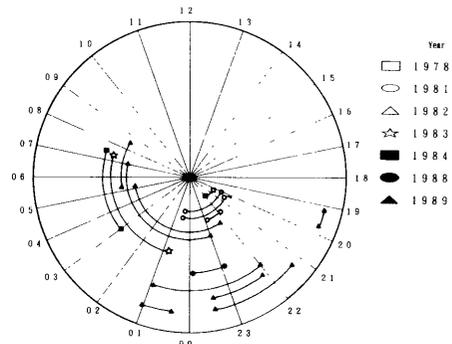


Fig. 13 The scintillations distribution map (local time)

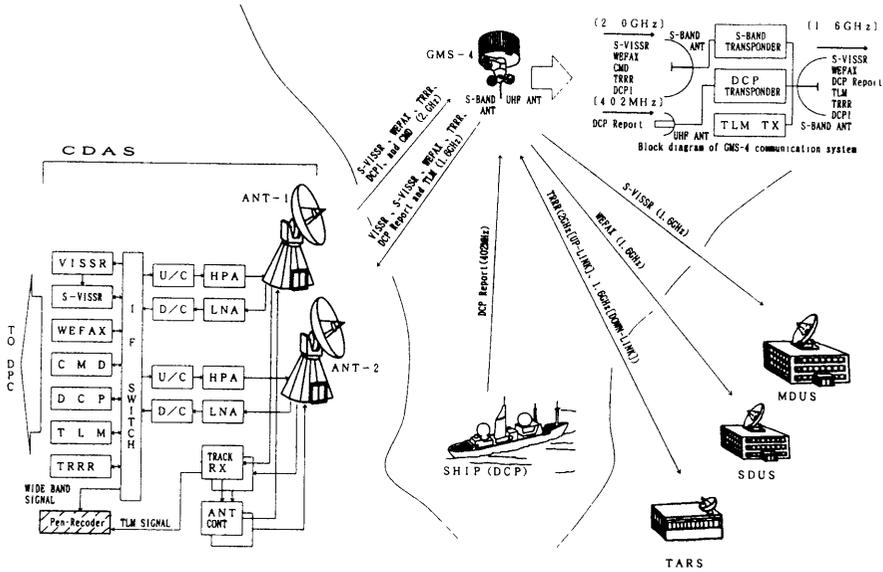


Fig.10 Outline of GMS communication system

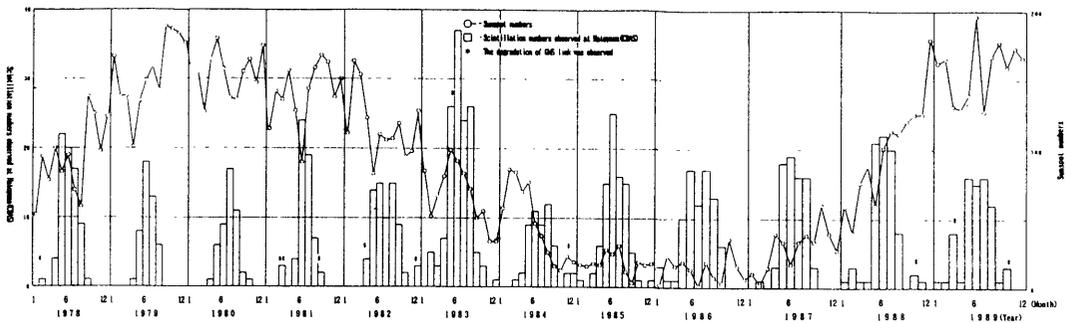


Fig.11 The relation between the sunspot numbers and Hatayama (CDAS) during 1978 to 1989

あったことを示している。

4. 2 シンチレーションの発生経過

Fig. 14に1988年11月30日から12月1日にかけて発生した地磁気嵐の変動(柿岡及び鹿屋)及び各電離層観測所の電離層F層臨界周波数(foF2)の変動と、GMS-3の1.6GHz帯のシンチレーションの様子及びETS-2の136MHz帯、BS-2の12GHz帯及びCS-3の20GHz帯シンチレーションの様子を示す。

また、各衛星の電波の伝搬通路をFig. 15に示す。各衛星の位置はGMS-3: 140°E、ETS-2: 130°E、CS-3 a: 132°E及びBS-2b: 110°Eである。

このシンチレーションの発生過程を追うと、まず地磁気(H-component)において17時00分JSTに地磁気嵐(SSC: Storm Sudden Commencement)が発生した。この地磁気嵐の水平成分の最大地磁気変動量は、柿岡: $\Delta H = 170\text{nT}$ 、鹿屋: $\Delta H = 197\text{nT}$ であった。その後、約3時間後に山川のETS-2の136MHz帯電波にシンチレーションが発生し、ほぼ同時に山川のBS-2及びCS-3の各衛星のGHz帯電波にシンチレーションが発生している。この時点では、鳩山のGMS-3の1.6GHz帯ではシンチレーションは起きていない。同時刻の山川と国分寺の電離層F層臨界周波数を見ると、山川では同時刻に斜線で示す様にスプレッドFが発生し、鳩山に近い国分寺では同時刻にはスプレッドFの発生はない。したがって、この山川で観測された電離層F層高度の電子密度の不規則構造(スプレッドF)によりGMS-3以外の衛星回線にシンチレーションが発生したと考えられる。

GMS-3の1.6GHz帯では、12月1日の0時JST頃からシンチレーションが発生し、明け方の05時JST頃まで観測されている。同時刻の国分寺の電離層F層臨界周波数には、やはりスプレッドFが発生しており、この国分寺で観測された電離層F層高度の電子密度の不規則構造(スプレッドF)によりGMS-3回線にシンチレーションが発生したと考えられる。

また、ETS-2の136MHz帯には、地磁気回復時間帯の23時20分JST頃から翌朝の2時10分JSTにかけて再び大きなシンチレーションが発生しているが、この同時時間帯にはBS-2及びCS-3のGHz帯のシンチレーションは発生していない。これは、GHz帯にまでシンチレーションを起こすような電離層の不規則構造が発生せず、136MHz帯に影響を与える電離層不規則構造が発生したと考えられる(再び山川の電離層F層臨界

周波数に、スプレッドFが発生している)。さらに、136MHzの後半(先に述べた、23時20分~翌朝の2時20分)は、前半(19時40分~22時00分)に比軽して振幅の周期が遅く、前半と後半とは異なる電離層不規則構造によるシンチレーションであると考えられる。

GMS-3の運用では、本シンチレーションによりVISSR観測で約150ラインの画像抜けが発生している。

各電波のシンチレーションの最大振幅は、以下の通りである。

- (1) ETS-2 (136MHz)
: 20dBp-p
- (2) GMS-3 (1.6GHz)
: 7.5dBp-p
- (3) BS-2 (12GHz)
: 2.5dBp-p
- (4) CS-3 (20GHz)
: 2.5dBp-p

シンチレーションの周波数依存性は、先に述べたように $f^{-1.5} \sim f^{-2}$ と言われているが上記の136MHzから20GHz帯のシンチレーションの大きさは、このような周波数依存性を示していない。この理由は、Fig. 15に示したように各電波の伝搬通路がそれぞれ異なるためシンチレーションの原因となる電離層電子密度の不規則構造が異なり、各シンチレーションの大きさについても異なるためと考えられる。

5. まとめ

静止気象衛星で使用している1.6GHz~2GHz帯の電波は、先に述べたように宇宙雑音や降雨による減衰がほとんどなく、非常に安定しているが、シンチレーションが発生するとGMSを運用する上で衛星が追尾不能になったり、画像が劣化するなどの影響をごくたまに受ける。

現在、太陽活動は、その極大期から下降の傾向を示しており、GHz帯電波にも影響を及ぼす大シンチレーションの発生確率が高い時期となっている。

GHz帯での大シンチレーションは、以下の条件が重なった時に発生率が高いと考えられている。

- (1) 太陽活動が活発になった時。
- (2) 地磁気嵐と共に発生し、その地磁気嵐の最も発達した時から回復に向かう期間が日本の日没に一致した時。
- (3) 真夜中前後に集中する。

GMS回線では、上記項目を照らし合わせて考える

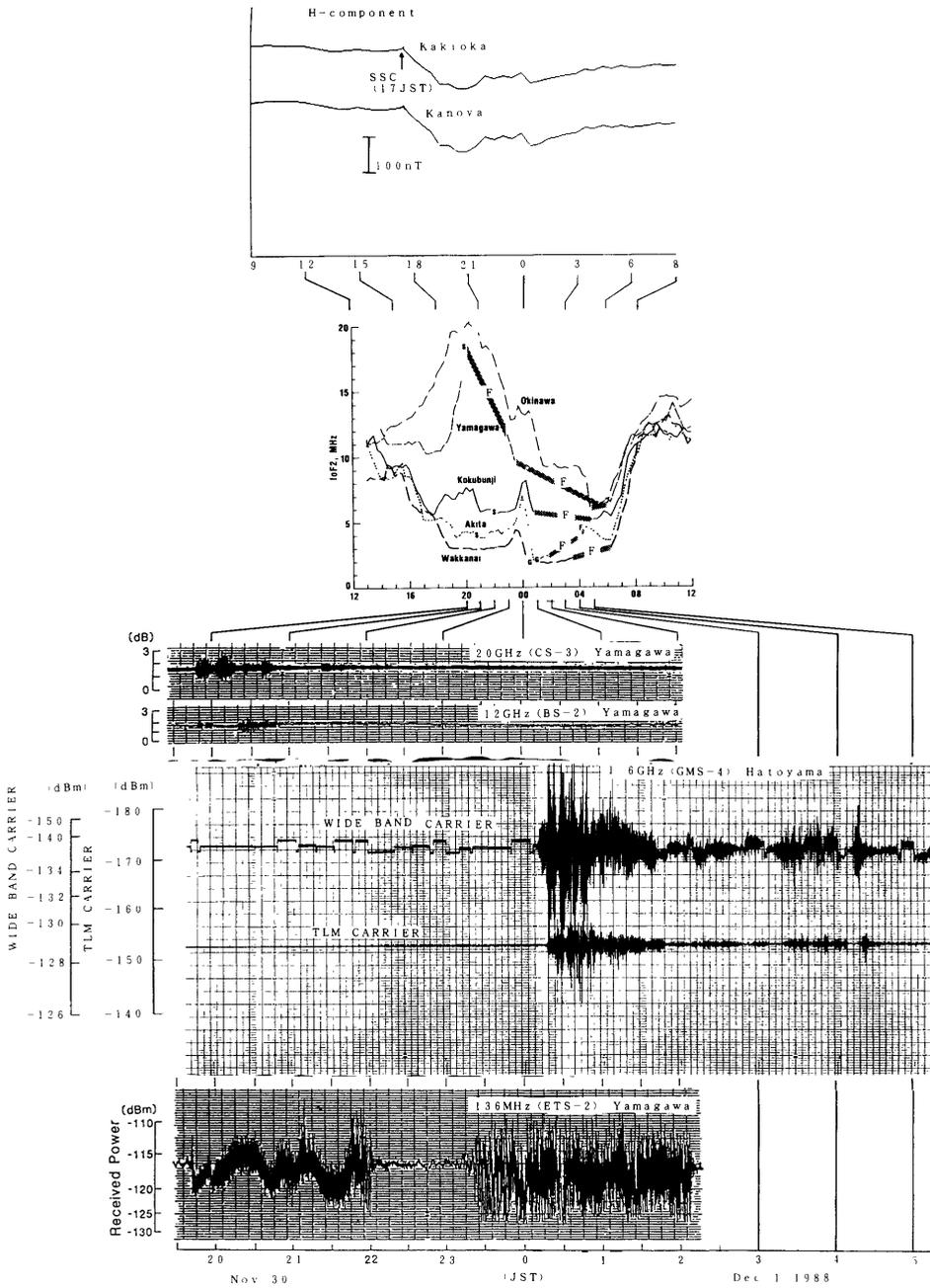


Fig.14 The relation of the ionospheric scintillations(GMS-4. CS-3. BS-2. ETS-2). critical frequency(f_0F_2) and the magnetic field

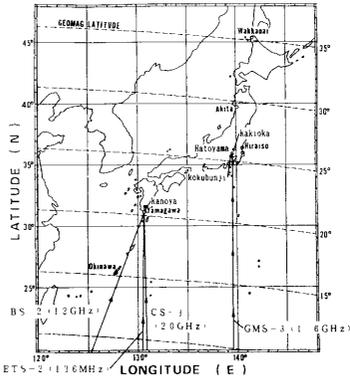


Fig.15 Receiving positions of several Japanese and Geostationary Satellite

- (1) Fig.11に示したように、大シンチレーションは太陽活動が活発な時期及びその下降期に多くなる。また、太陽フレア等の太陽活動が活発になった時に発生している。
- (2) GMS回線でも大シンチレーションが発生した場合、地磁気嵐を伴っている。
- (3) Fig.13に示すように、夜に発生し、真夜中前後を中心として大シンチレーションが多い。

GMSの運用に影響を及ぼす大シンチレーションの予測は、現在、平磯から発表される太陽地球環境予報を基にしている。

これに、他のGHz帯の静止衛星を運用している機関とシンチレーション情報を常に迅速に交換すれば、GMSの運用に影響を与える大シンチレーション予測の精度を向上できるのではないかと考える。

謝 辞

本報告では、通信総合研究所季報で報告されている多くのデータ等を引用させていただき、各筆者の方々に感謝の意を表す。

また、本報告をまとめるにあたり、適切な御指導いただいた柿岡地磁気観測所の門倉研究官、気象衛星センター福井情報伝送部長及び桜井施設管理課長及び資料の整理をしていただいた気象衛星通信所及び施設管理課関係官に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 富田二三彦：“2. 太陽活動状況”通信総合研究所 VOL. 36特9 1990
- (2) 田中高史：“6. 磁気圏擾乱と電離圏擾乱の関係”通信総合研究所 VOL. 36 特9 1990
- (3) 丸山 隆、岡本 智：“7. 電離圏シンチレシ

ョンの発生と東向き電場の役割”通信総合研究所 VOL. 36 特9 1990

- (4) 丸山 隆：“8. 中緯度電離圏のE×B不安定”通信総合研究所 VOL. 36 特9 1990
- (5) 西牟田一三、上敷領昭五、満留博人、皆越尚紀、小川忠彦：“9. VHF-20GHz帯の電離圏シンチレーション”通信総合研究所 VOL. 36 特9 1990
- (6) 小川忠彦：“14. まとめ”通信総合研究所 VOL. 36 特9 1990
- (7) 山田松一：“伝搬研究の動向”通信総合研究所 VOL. 33 特5 1987
- (8) 佐川永一：“内部磁気圏のプラズマと衛星帯電”通信総合研究所 VOL. 35 特7 1989
- (9) 福井徹郎、松尾正利：“電離層シンチレーションがGMS回線に及ぼす影響”気象衛星センター技術報告 第4号 1981
- (10) 上田真也、松尾正利、佐藤勝志、桃井保清、阿部伝家、井出和夫、橘薫：“静止気象衛星(GMS)回線に影響を及ぼす電離層シンチレーション”気象衛星センター技術報告 第7号 1983
- (11) 気象衛星センター編：“GMSシステム更新総合報告(1989年版) I 通信機器編”気象衛星センター技術報告 特別号(1989)
- (12) 理化学研究所宇宙線研究室：SEM研究会報告 1979年12月
- (13) 理化学研究所宇宙線研究室：SEM研究会報告(2) 1980年9月
- (14) 理化学研究所宇宙線研究室：SEM研究会報告(3) 1981年12月
- (15) 理化学研究所宇宙線研究室：SEM研究会報告(4) 1983年10月
- (16) 気象衛星センター編：MONTHLY REPORT OF METEOROLOGICAL SATELLITE CENTER” 1978年～1989年
- (17) 国立天文台編：理科年表 平成2年63冊
- (18) 横井 寛：“電波伝搬の諸問題”衛星通信技術(編集)電子通信学会(S56)
- (19) 電波予報警報将来計画検討会：“電波研究所における電波予報警報の研究と業務の展望”電波時報 No. 3 1981.
- (20) S. ミットン編、現代天文百科”岩波書店
- (21) 濱田一輝、詳解ウルシグラム・コード通信総合研究所(監修)CQ出版社
- (22) CCIR: IONOSPHERIC EFFECTS UPON

EARTH-SPACE PROPAGATION” Rep 263-6
VOL. 6 1986

- ②③ CCIR: “PREDICTION OF SKY WAVE FIELD
STRENGTH BETWEEN 150 AND 1600 KHz
- ②④ Richard F. Filipow-sky, Eugen i. Muehi-Dorf:
Space Communications systems.