

衛星通信回線における受信信号レベルの変動について

若菜 弘充* 大森 慎吾*

(平成元年11月20日受理)

SIGNAL VARIATION IN SATELLITE COMMUNICATION LINKS

By

Hiromitsu WAKANA and Shingo OHMORI

A large variation of received signal from the ETS-V satellite was observed on November 30, 1989. This paper clears the reason of its phenomena by analysing items step by step, which can be the causes of the signal variation. The analysis shows that the effects of the signal variation can be clearly divided to the effects caused by the satellite communication system including the satellite itself and scintillations in ionosphere. The cause of signal variation was proved to be scintillations by the analysis.

1. はじめに

郵政省通信総合研究所では、技術試験衛星5型(ETS-V)を用いて陸海空にわたる総合的な移動体衛星通信実験(ETS-V/EMSS)を行っている⁽¹⁾。鹿島宇宙通信センターに設置されている海岸/航空地球局(以下基地局と呼ぶ)では、この実験のために基地局でのモニターを目的としてETS-V衛星を経由した1,500 MHz帯及び5 GHz帯の信号の受信電力を測定している。

1988年11月30日の深夜に行ったETS-V/EMSS航空機実験⁽²⁾のための準備中に測定された上記受信信号レベルにはきわめて大きな変動が観測された。この異常な受信信号レベルの変動の原因は、衛星の不具合の可能性、シンチレーションによる伝搬路の変動などが考えられるが、本論文ではこの変動の原因を明らかにする。

本論文ではETS-V衛星通信回線における受信信号のレベル変動の原因について検討を行ったが、本論文の手法は一般の衛星通信回線においても有効である。

2. 異常レベル信号の受信

1988年11月30日、ETS-V/EMSS計画の一環として航空衛星通信実験が行われた。鹿島宇宙通信センターでは、この航空実験のために11月30日夜半より準備を行い、基地局より6 GHz帯(Cバンド)の変調信号1波と無変調信号1波を衛星に向け送信していた。

この信号は、衛星で1.5 GHz帯(Lバンド)に周波数変換され、航空機で受信されるとともに、基地局でモニターされた。

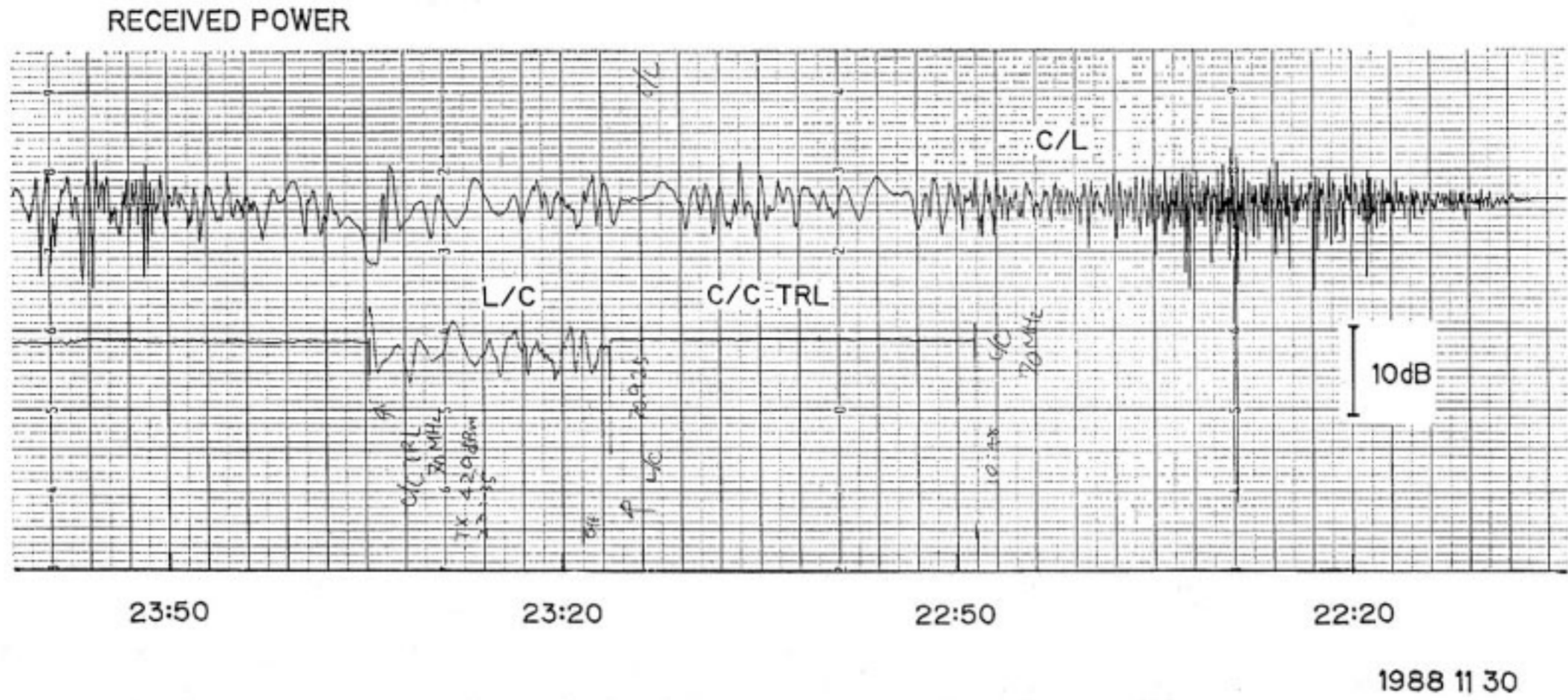
第1図に実験中に測定された受信電力を示す。上と下に2本の観測信号レベル変動の記録が示されているが、観測されたのは上の信号である。通常測定される受信信号レベルの変動は無視できる程度で、第1図に示したような例では直線となって記録される。第1図の下の信号レベルは、後に述べるように、レベル変動の原因を究明するために示したものであるが、上に示した測定と並行して同じ時刻に測定記録された結果である。ただし、記録装置の関係で両者お互いに半目盛りずれて記録されている。

3. レベル変動の原因解析

3.1 鹿島における観測

第2図に実験システムの構成図を示す。第1図に示された受信信号は、基地局のフィーダリンク用のCバンドアンテナから送信された6 GHz帯の無変調信号波(CW)が、ETS-Vの搭載中継器を経由して、1.5 GHz帯に周波数変換されて基地局のLバンドアンテナで受信されたものである。したがって、衛星からの受信信号変動の原因となる主たる要因は次に挙げる項目が考えられる。ただし、(1)は、異常が観測された時の実験系には含まれないが、原因を究明する実験系においては検討項目となるため挙げてある。

* 鹿島宇宙通信センター 第二宇宙通信研究室



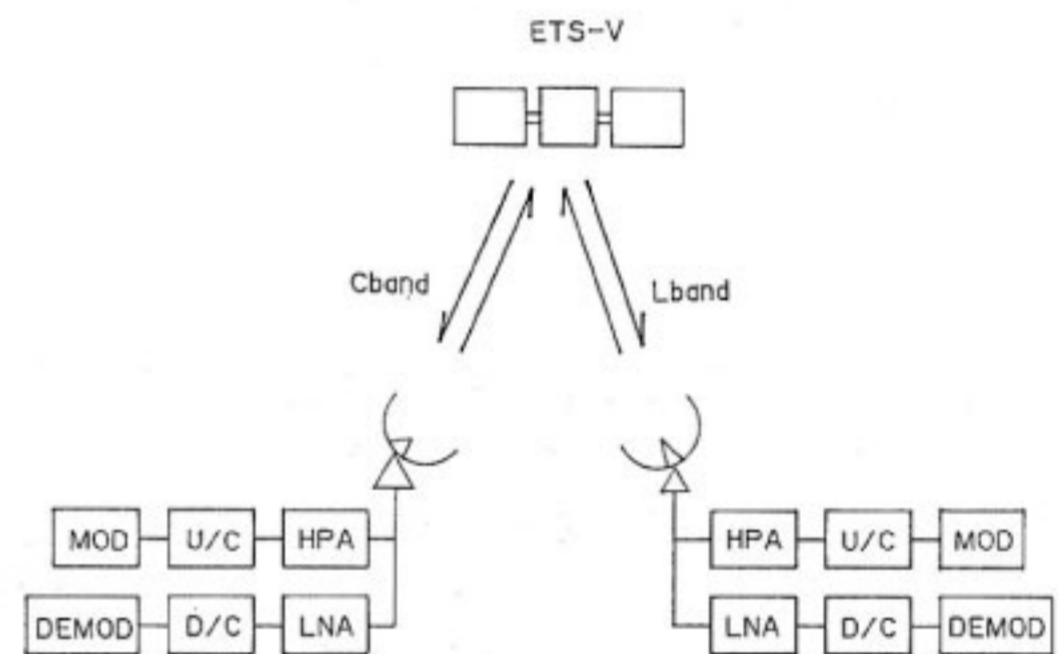
第1図 海岸/航空地球局（鹿島宇宙通信センター）で受信された ETS-V 衛星からの信号

- (1) Lバンド送信系（基地局）
- (2) Cバンド送信系（基地局）
- (3) Cバンドアンテナ部（基地局）
- (4) Cバンド伝搬路
- (5) ETS-V の次勢，アンテナ部
- (6) ETS-V 搭載中継器
- (7) Lバンド伝搬路
- (8) Lバンドアンテナ部（基地局）
- (9) Lバンド受信系（基地局）
- (10) Cバンド受信系（基地局）
- (11) 測定器

上記の各要因について、それが原因か否かの検討を行った。なお、この日は全国的に晴れており、雨の影響による信号のレベル変動は考慮する必要は無い。

第1図において、下側に記録されている観測のなかで C/C TRL と示されている部分は、基地局の Cバンド高電力増幅器 (HPA) の出力を衛星を介さずに基地局内で周波数変換して Cバンド低雑音増幅器 (LNA) へ入力し、中間周波数 (IF) 帯において電力の測定を行ったものである。この図で明かなように、測定したレベルは一定で変動は無い。すなわち、上記(2)、(10)の項目は変動の原因でないことがわかる。また測定器にも故障のないことを確認したので(11)の項目も原因ではない。

同図において、L/C と表示されている測定結果は、基地局より Lバンド系で ETS-V に送信し、これを Cバンドで受信したものである。これは第1図上部に示した C/L 回線の測定結果と同様の変動をしていることがわかる。両者の信号は、衛星の中継器において両信号は別々の信号経路を通る⁽³⁾ことから、項目(6)が原因となる可

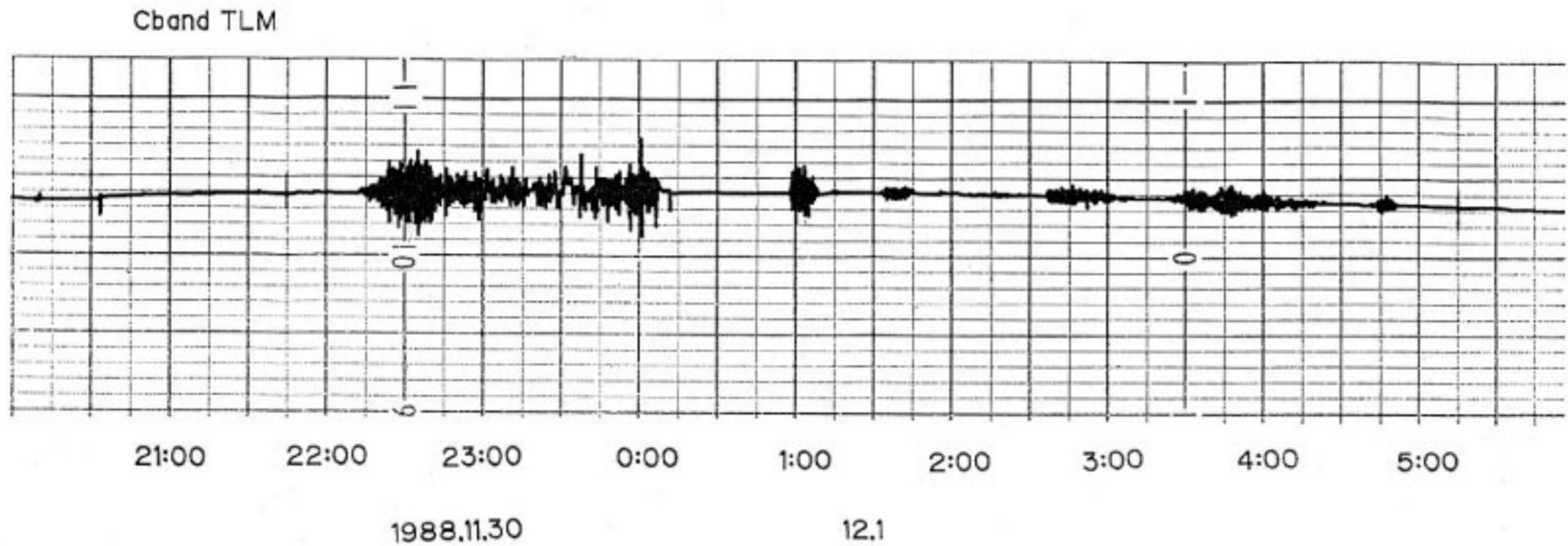


第2図 実験システムの構成図

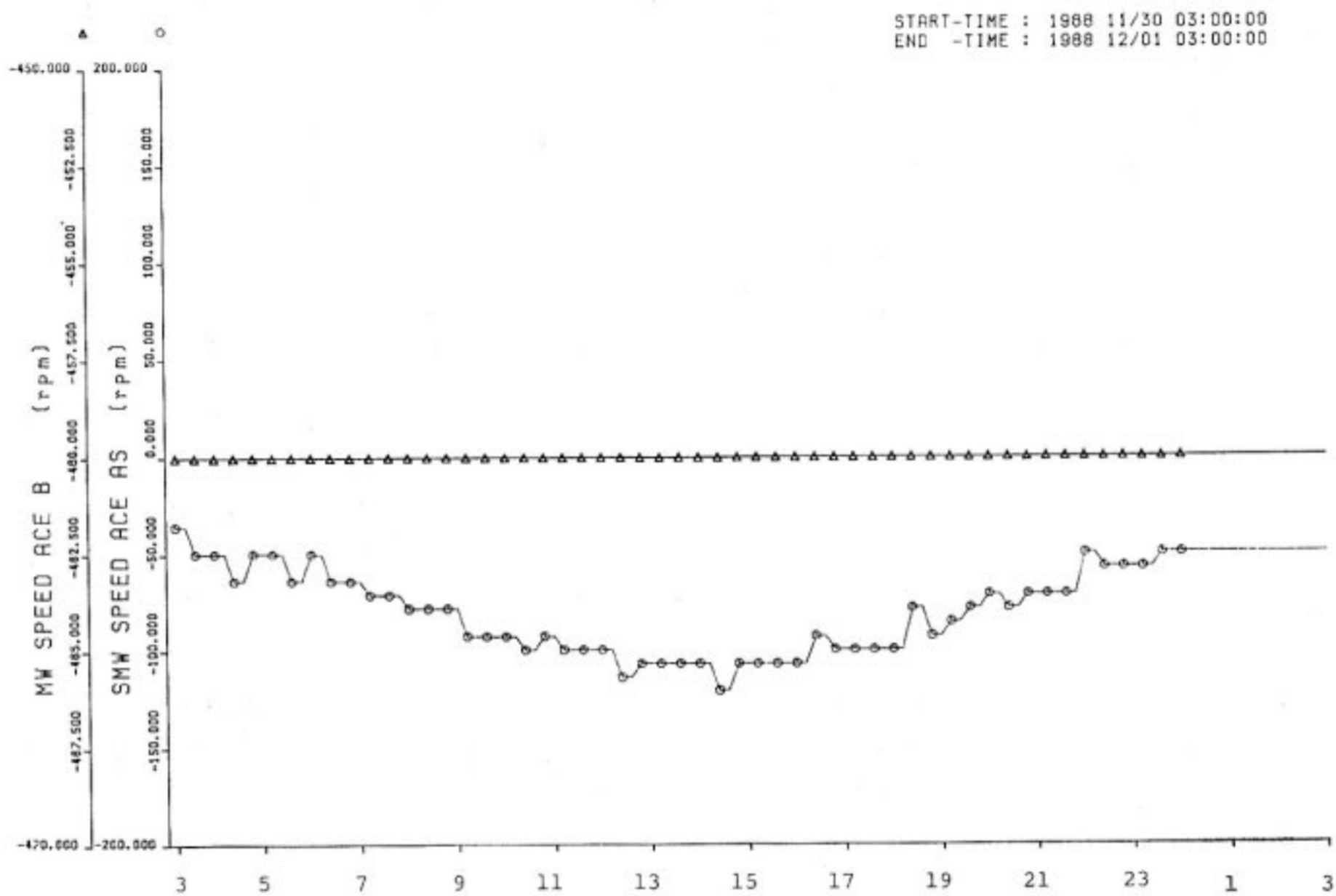
能性はきわめて低いと考えられる。

第3図に ETS-V からのテレメトリ信号 (Cバンド) を基地局で受信した際のレベルを示す。ここにも同様の変動が認められたため、基地局の Cバンドアンテナ (項目3) に原因がある可能性も考えられる。L/C 回線を使った測定時に、ETS-V の中継器の Cバンド送信電力のテレメトリ値を調べたところ、ここにも同様の変動が認められた。このテレメトリ値は、基地局から送信された Lバンド信号が衛星中継器で Cバンドに周波数変換されて送信される時の電力値を示すものである。したがって、この信号は基地局の Cバンドアンテナを通過するものの⁽⁴⁾、テレメトリ値そのものは変動項目(2)(3)とは無関係である。

つぎに、項目(5)の ETS-V の姿勢変動について検討する。衛星、地球及び月の位置関係から、12月1日より衛星の地球センサに対して月が干渉を与え、衛星の姿勢制御に影響を与えることが予想された。第4図に ETS-V



第3図 ETS-V衛星テレメトリ信号の受信レベル



第4図 ETS-V衛星の姿勢制御用モメンタムホイール(MW)及びスモールモメンタムホイール(SMW)の回転数の時間変化

の姿勢制御を行っているモメンタムホイール (MW) 及びスモールモメンタムホイール (SMW) の回転数の変化を示す。図中で殆ど変動していないデータが MW, 変動しているデータが SMW の回転数を示す。このデータは衛星からのテレメトリ信号に含まれている。MW 及び SMW は、それぞれ衛星の姿勢を制御するためにピッチ軸、ヨー軸まわりの制御トルクを発生させる働きをする。横軸は時刻、縦軸は MW, SMW の回転数を示す。図からわかるように、衛星の姿勢制御中に大きな姿勢の変化は生じていない。SMW のほうは変化しているが、この程度の変化は正常状態での姿勢保持のために必要な変化である。また、衛星搭載Lバンドアンテナの北ビーム中心は北太平洋にあり、その利得は約 26dB であ

る。基地局 (鹿島) 方向での利得は約 24 dB であるので、衛星姿勢変動による基地局方向の衛星アンテナ利得の増加は、最大でも 2 dB 程度であることがアンテナ放射パターンの実測値からわかっている⁽⁴⁾。第1図に示したレベルの増加はそれより大きい。したがって、項目(5)が原因となる可能性も無いと言える。

基地局Lバンド送受信系については本実験終了後の基地局内のL/Lトランスレータ折り返し実験にて信号レベルに異常がないことを確認しており、項目(1)(9)は否定された。

これらの検討の結果、レベル変動の原因として項目(1)(9)のLバンド送受信系、(3)の基地局Cバンドアンテナ、(8)の基地局Lバンドアンテナ、(6)の搭載中継器および(4)

表1 表 レベル変動の要因項目及び検証実験項目

原因と 考えられる 箇所	観測された現象 及び 原因究明実験の 項目	現象	原因究明の実験, データ						原因究明 実験結果 による可 否	総合して の可否	
			C/L 衛星系	C/C トランス レータ折 返し	L/L トランス レータ折 返し	L/C 衛星経由 で	Cバンド テレメ受 信強度	衛 星 CHPA 出力値			衛星姿勢 制御値
			変動あり	なし	なし	あり	あり	あり			なし
基地局 送信系	1	Lバンド送信系	—	—	×	○	—	○	—	×	×
	2	Cバンド送信系	○	×	—	—	—	—	—	×	×
	3	Cバンドアンテナ (送受)	○	—	—	○	○	—	—	○	×
伝搬路	4	Cバンド伝搬路	○	—	—	○	○	信号値に は無関係	制御値に は無関係	○	○
衛 星	5	衛星姿勢, アンテナ	○	—	—	○	○	○	×	×	×
	6	搭載中継器	○	—	—	△	—	△	—	○	×
伝搬路	7	Lバンド伝搬路	○	—	—	○	—	○	—	○	○
基地局 受信系	8	Lバンドアンテナ (送受)	○	—	—	○	—	○	—	○	×
	9	Lバンド受信系	○	—	×	—	—	—	—	×	×
	10	Cバンド受信系	—	×	—	○	○	—	—	×	×
測定系	11	測定系	○	×	×	○	—	—	—	×	×

○…因原の可能性あり △…原因の可能性が極めて低 ×…い原因の可能性なし —…原因の可否の判断ができない
(信号が通過していない)

(7)の伝搬路の影響が残された。

項目(3)(8)の基地局アンテナのうち、(3)のCバンドアンテナのみが原因ならば衛星中継器のCバンド高電力増幅器出力値には変動が生じないはずである。(8)のLバンドアンテナについても同様のことが言え、Lバンドアンテナのみが原因であればCバンドテレメトリデータの信号強度に変動はないはずである。さらに、観測された信号のレベル変動は通常のレベルより高くなったり低くなったりする振動的な変動である。しかし、アンテナが振動することは考えられない、かりに振動したとしてもアンテナは利得最大方向が衛星方向を指向しているため通常レベルより高くなるような信号は観測され得ない。従って、アンテナに原因がある可能性は考えられないので(3)(8)の可能性は否定される。

項目(6)の搭載中継器の可能性については、すでに述べたように原因となる可能性は極めて低いと言える。さらに検討を加えると、両信号の共通経路としてはダイプレクサのみがあるが、この機器は受動素子からのみ構成されており信号に振動的変動を与える可能性はない。電源系も両信号に共通であるが電源電圧の異常を示すテレメトリ値は観測されていない。従って、中継器が原因となる可能性は否定できる。

結局項目(4)(7)の伝搬路のみが可能性として残された。

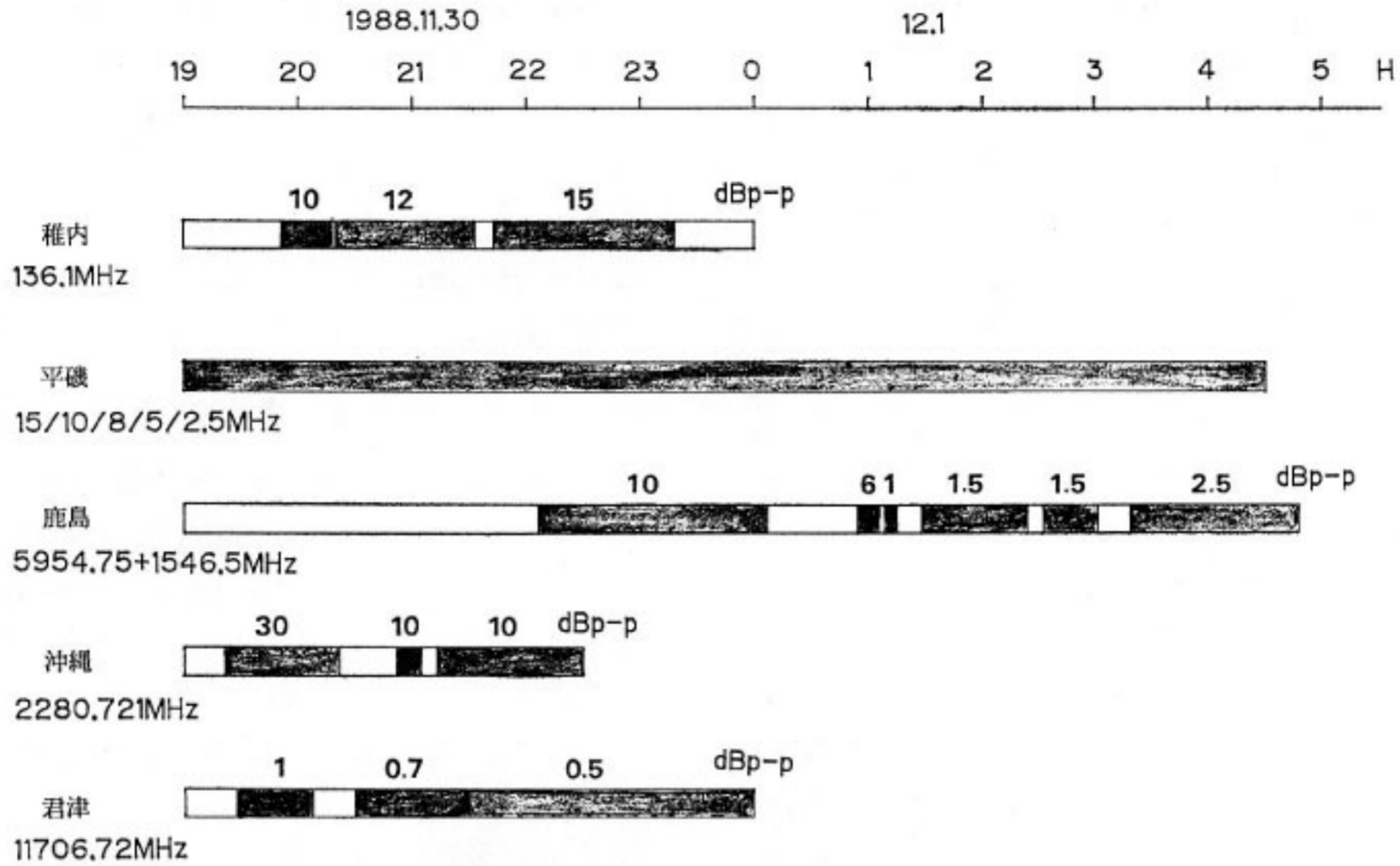
以上の結果をまとめたものを第1表に示す。横の行は

観測された信号レベル変動の原因と考えられる項目を示す。縦の列は、観測された現象およびその原因究明のため行った実験、その他のデータである。実験の結果、信号レベル変動の原因の可能性のある項目には○印を、可能性がきわめて低い項目には△印を、可能性の無い項目には×印を付した。実験において信号が通過しないため判定不可能な項目には—印を付した。観測された異常な信号レベル変動の原因は伝搬路にあるとの結論であるが、この結論により伝搬路に生じたシンチレーションが原因となり衛星からの受信信号に異常な変動が観測されたことを矛盾なく合理的に説明できる。

3.2 各地での観測結果

前節で検討したように、第1図に示した受信信号のレベル変動の原因がシンチレーションであるとする、この現象は世界的規模の広い範囲で観測されるはずである。第5図に通信総合研究所稚内観測所、同平磯宇宙環境センター、同鹿島宇宙通信センター、沖縄(宇宙開発事業団)、君津衛星管制センター(通信・放送衛星機構)で観測されたシンチレーションの発生時間帯、変動レベル(図中の数字は変動のpeak-to-peakレベルを示す)、測定周波数を示す。平磯宇宙環境センターのデータは日本標準電波周波数(JJY)のドップラーシフトを測定したもので、その変動の大きい時間帯を示している。

各地でのシンチレーションの開始時間は少しずつ異なる



第5図 日本各地におけるシンチレーション観測結果

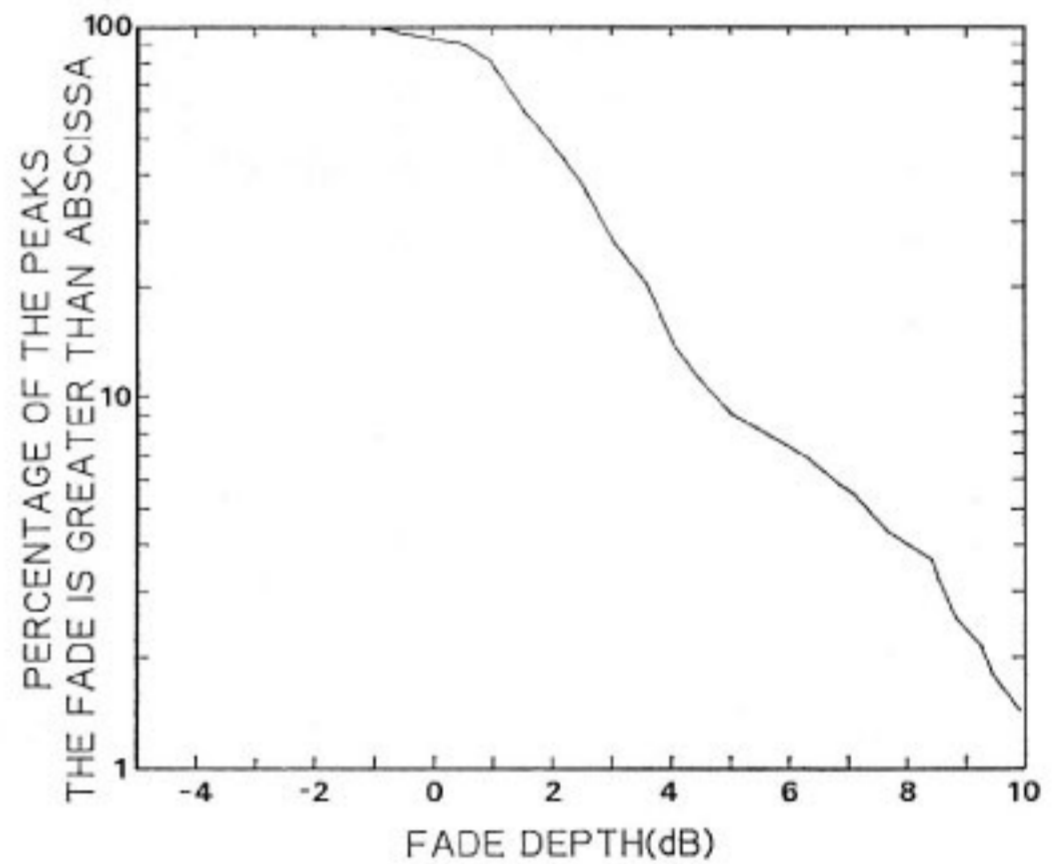
るが、これはシンチレーション特有の現象であり、一連の変動は大規模な電離圏擾乱によるもので⁽⁵⁾、12 GHz 帯 (Ku バンド) にまで影響を与えるほどの大シンチレーションであったことが理解できる。

これで今回のレベル変動の原因は、伝搬路上でのシンチレーションであると結論できる。

4. 通信への影響

このシンチレーション中大きなものが発生した時間帯は、航空機実験が開始される前であったため、デジタル通信回線におけるビット誤り率 (BER) 特性など、通信信号へ与える影響を直接測定するにはいたらなかった。またレベル変動もチャートレコーダに記録されたのみで、詳細なデータ解析を行うには不適當であった。そこで不十分ではあるが、第1図に示したチャートレコーダに記録された信号を読み取り、その極小値をもって評価した。

第6図にはこの極小値の累積分布を示す。対象となる測定時間は11月30日の22時5分から12月1日の0時5分である。横軸はフェージングの深さ (Fade Depth) で、シンチレーションのない状態での受信レベルからの減衰量を示す。縦軸は横軸に示したレベルよりフェージングが大きい確率を示している。図から、今回のシンチレーションでは Fade Depth のレベルが 4.8 dB を越える確率は約 10% であることがわかる。陸上移動体 (自動車)、航空機及び船舶などのいわゆる移動体を対象とした衛星通信システムでは一般に、回線品質 (C/N₀) に十分な余裕 (マージン) がなく、通常 3—4 dB 程度と考



第6図 ETS-V 衛星からの受信信号レベル変動の極小値の累積分布

えられている。大型の船舶を対象としたインマルサットシステムにおいても回線マージンは約 4 dB である。従って、今回の異常とも言える大きなシンチレーションであれば移動体衛星通信に顕著な影響を与えると言えることができる。

しかし、今回のような大きなシンチレーションはきわめて稀な現象であり、年間の発生時間率はきわめて低い。移動体衛星通信を含め、衛星通信の立場からすると回線が正常でサービス可能な時間の割合 (時間率) が非常に重要である。固定衛星通信の場合この時間率はサービスや使用周波数に依存するが、一般的に 99.9%—99.99% 程度⁽⁶⁾ である。移動体衛星通信、特に陸上移動衛星通信の場合にはまだ実用サービスが行われていな

いこともあり明確な時間率は示されていないが伝搬条件の悪い都市部等では99%程度と考えられる。従って、数年に1度あるかないかの今回の大シンチレーションによる影響は、以上の観点から移動体衛星通信にとって特に配慮すべき問題ではないと言える。

5. ま と め

1988年11月30日夜半から12月1日の早朝にかけて、衛星通信回線の受信信号に異常なレベル変動が記録された。解析の結果、このレベル変動の原因は衛星及び基地局を含む衛星回線にあるのではなく、伝搬路上に生じたシンチレーションであることがわかった。日本のいくつかの地点、いくつかの周波数で観測されたデータをみると、大規模な電離圏のじょう乱が発生したものと考えられるが、シンチレーションそのものの原因について述べることは本論文の目的ではない。参考文献(6)を参照されたい。

衛星通信において信号レベルの変動が観測された場合、その原因が対流圏や電磁圏の影響によるものか、地上施設を含めた衛星系によるものかを検討しなければならない。逆に、衛星を電波源としたシンチレーションの観測解析では、そのレベル変動が衛星系に起因するものでないかどうかを十分に検討する必要がある。この点から、本論文で示したレベル変動原因の解析手法はいずれの分野においても有益である。

今後は、シンチレーションの影響にも配慮しつつ移動体衛星通信実験を進めていきたいと考えている。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重なデータを提供して頂

いた丸山稚内電波観測所長、菊池平磯宇宙環境センター通信障害予報研究室長、宇宙開発事業団常松氏、通信・放送衛星機構大川氏、鹿島宇宙通信センター笠井研究官（現在関西支所）、佐藤係長（現在電波部）に感謝いたします。また鹿島宇宙通信センター第二宇宙通信研究室の方々をはじめ、ETS-V/EMSS グループの皆様にご感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 近藤喜美夫, 大森慎吾, 星野尾一明, 山田重夫, “技術試験衛星V型と移動体衛星通信実験”, 電子情報通信学会誌, Vol. 71, No. 12, pp. 1288-1298, 1988.
- (2) 長谷良裕, 若菜弘充, 平良真一, 大森慎吾, “ETS-V衛星を用いた航空衛星通信実験”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-BII, No. 7, pp. 276-284, July 1989.
- (3) 近藤喜美夫, 浜本直和, 石出明, 星野尾一明, 山田重夫, 二川憲夫, 玉井保男, “ETS-V搭載移動体通信実験用トランスポンダの設計と特性”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-BII, No. 7, pp. 343-350, July 1989.
- (4) “技術試験衛星 V 型を用いた移動体衛星通信実験システム”, 電波季, 34, 特 6, March 1988.
- (5) 丸山隆, 皆越尚紀, 田中高史, 小川忠彦, 西牟田一三, “63年11月30日発生の電磁圏大じょう乱”, 第77回通信総研研発予稿, 平成元年11月15日.
- (6) Handbook on Satellite Communications (Fixed-Satellite Service), CCIR International Radio Consultative Committee, Geneva, 1985.

