

7. その他の地球局装置

7.1 通信放送技術衛星 伝搬実験局

大内 智晴* 齋藤 春夫*
(1996年11月14日受理)

7. OTHER EARTH EQUIPMENT FOR THE COMETS EXPERIMENTS

7.1 DEVELOPMENT OF THE COMETS PROPAGATION EXPERIMENT SYSTEM

By

Chiharu OHUCHI and Haruo SAITOH

Research and experiment on radio wave propagation between satellite and the earth have a long history. At first, sun-trackers and radiometers were used in the measurements. After the launch of ETS-II in 1977, measurements have been made using radio waves from a satellite. Also, from communication satellite and broadcasting satellite experiments, measurements of the up-link have also been accomplished by obtaining the received signal power at the satellite from telemetry data. Although many results on radio wave propagation in geostationary satellite path have been obtained in this way, we have entered the age of practical use of the Ka band and the millimeter-wave band, and if we re-examine communication systems for those bands, we see that the materials on, for example, the diversity effect at very short distances and short-term variations such as rain attenuation, are insufficient.

Concerning rain attenuation, it is necessary to find a way to improve the circuit mobility as much as possible. For that purpose, fine measurements of the temporal and spatial changes in rain attenuation are required. We are studying measurement systems for obtaining the radio wave propagation data that will serve as basic data for the development of future satellite communications, such as multimedia satellite communication and personal satellite communication.

[キーワード] 電波伝搬, Kaバンド, 通信放送技術衛星.
Propagation, Ka band, COMETS.

1. はじめに

衛星回線の電波伝搬については、古くから研究および実験が行われてきた。初期にはサントラッカやラジオメータを用いた測定が行われ、1977年のETS-II打上げ以降は衛星からの電波を使用する測定が行われた⁽¹⁾。また

CS, BS 実験からは、衛星の受信信号電力をテレメトリデータから求めることで、アップリンクについても測定実験が行われた^(2,3)。このように、静止衛星回線の電波伝搬については多くの成果が得られている。Ka帯やミリ波帯を本格的に使用する時代になり、降雨減衰の大きなこれら周波数帯を使用するための、回線稼働率を可能な限り向上させる方策が必要になってきた。しかしそのためには、例えばごく近距離でのダイバシティ効果や

* 宇宙通信部 衛星通信研究室

降雨減衰の短時間変動などの資料が不足している。そこで降雨減衰の時間的、空間的振舞いについての測定を始め、大容量マルチメディア衛星通信やパーソナル衛星通信など、将来の衛星通信のための基礎資料となる電波伝搬データを測定するシステムについて検討する。

2. 実験の目的

第1表は通信放送技術衛星 (COMETS) で使用する周波数の一覧である。3種類の通信ミッションを搭載し、さらにテレメトリコマンドやレンジングに Ka バンドを使用するなど、多くの周波数が1つの衛星内で使われる。従ってこれらの通信波を利用した様々な周波数における電波伝搬実験が考えられるが、ここでは今後多くの利用が見込まれる Ka 帯を用いた実験の検討を行う。

COMETS 実験における Ka 帯電波伝搬実験の目的は、前述の如くこれまであまり測定されていない、降雨減衰の細かい変動や近距離ダイバシティ効果の測定を行うことである。これらの測定を通じ、従来降雨減衰が多く使われるものにならないとされてきた Ka 帯やミリ波帯での移

動体/パーソナル衛星通信、衛星放送システムの実現を目指す。

3. 降雨減衰量の予測

降雨とそれに伴う電波の減衰については多くの理論解析や実験結果が報告されており、日本全国の降雨減衰マージンが求められている^(4,5)。第2表は、昭和62年度の電気通信技術審議会答申に基づく Ka 帯 (21GHz 帯) における降雨減衰量の計算結果である。このように COMETS で使用する 21GHz 帯では、多くの地域で年間の 0.1% の時間、降雨により 9 dB 以上減衰する。年間の 0.1% は 8.8 時間に相当し、衛星回線のシステム設計で回線の不稼働率として使用している値である。第2表から最悪値は宮崎の 14dB であり、伝搬実験では少なくとも 15dB 以上の減衰を精度良く測定する必要があることがわかる。

4. 測定される信号の検討

第1図は、伝搬測定システムの構成を表す概念図であ

第1表 COMETS で使用する周波数 (サブシステム別)

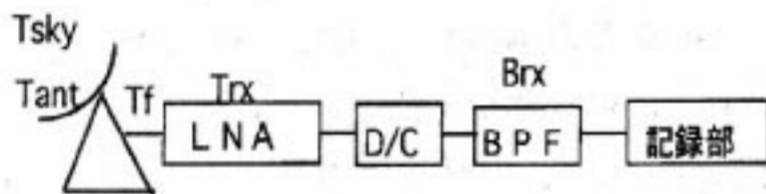
種別	周波数	偏波	送受の別	ビーム
テレメトリコマンド機器				
コマンド	2090.0 MHz	RHCP	受	定常状態で地球方向無指向性
レンジング アップリンク	2090.0 MHz	RHCP	受	定常状態で地球方向無指向性
レンジング アップリンク	29.305 GHz	RHCP	受	関東 (筑波)、南九州 (種子島)
コマンド	29.485 GHz	RHCP	受	関東 (筑波)
テレメトリ	2269.68 MHz	RHCP	送	定常状態で地球方向無指向性
レンジング ダウンリンク	2269.68 MHz	RHCP	送	定常状態で地球方向無指向性
レンジング ダウンリンク	20.105 GHz	LHCP	送	関東 (筑波)、南九州 (種子島)
テレメトリ	20.165 GHz	LHCP	送	関東 (筑波)
衛星間通信機器				
SSA リターン	2200~2290 MHz	L or R HCP	受	可動ビーム
KSA リターン	25.525~26.425 GHz	L or R HCP	受	可動ビーム
SSA フォワード	2025~2110 MHz	L or R HCP	送	可動ビーム
KSA フォワード	23.190~23.460 GHz	L or R HCP	送	可動ビーム
フォワードビーコン	23.3875, 23.5400 GHz	L or R HCP	送	定常状態で地球方向に無指向性
衛星間通信用フィーダリンク				
KSA フォワードアップ	29.785 GHz	RHCP	受	関東 (筑波)
パイロット	29.960 GHz	RHCP	受	関東 (筑波)
SSA フォワードアップ	30.180 GHz	RHCP	受	関東 (筑波)
KSA リターンダウン	19.685 GHz	LHCP	送	関東 (筑波)
SSA リターンダウン	20.370 GHz	LHCP	送	関東 (筑波)
高度衛星放送機器				
アップリンク	27.3及び27.8 GHz	RHCP	受	関東、九州
ビーコン	28.6 GHz	RHCP	受	沖縄
ダウンリンク	20.7 GHz	RHCP	送	関東、九州
高度移動体衛星通信機器				
関東 Ka アップリンク	30.778 GHz	RHCP	受	関東
東海 Ka アップリンク	30.828 GHz	RHCP	受	東海
ミリ波 アップリンク	46.886 GHz	RHCP	受	関東
関東 Ka ダウンリンク	21.000 GHz	LHCP	送	関東
東海 Ka ダウンリンク	21.056 GHz	LHCP	送	東海
ミリ波 ダウンリンク	43.764 GHz	LHCP	送	関東

RHCP: 右旋円偏波 LHCP: 左旋円偏波

第2表 COMETS 回線の降雨減衰損失と大気吸収損失の推定

地球局位置	仰角(°)	降雨減衰量(dB)			大気吸収(dB)
		L(0.1%)	L(0.3%)	L(1%)	LA
稚内	33.87	4.58	2.34	0.92	0.62
札幌	36.17	4.37	2.48	1.14	0.59
秋田	39.98	7.22	3.79	1.56	0.54
仙台	41.08	6.29	3.47	1.52	0.53
新潟	42.19	6.77	3.54	1.45	0.52
宇都宮	42.62	9.04	4.82	2.02	0.51
水戸	43.00	8.35	4.44	1.86	0.51
前橋	43.62	7.87	4.15	1.71	0.50
長野	43.80	4.90	2.51	1.00	0.50
東京	44.00	9.01	4.53	1.76	0.50
横浜	44.23	10.00	5.37	2.28	0.50
名古屋	45.76	9.10	4.65	1.84	0.49
大阪	46.87	9.45	4.65	1.75	0.48
広島	48.25	9.57	5.21	2.26	0.47
福岡	49.65	10.89	5.32	1.98	0.46
大分	49.72	9.73	5.25	2.24	0.46
熊本	50.42	11.26	6.13	2.64	0.45
宮崎	51.18	14.02	7.76	3.43	0.45
鹿児島	51.76	13.47	7.41	3.25	0.44
那覇	58.48	12.29	6.72	2.92	0.41

昭和62年電技審答申の方式による推定



第1図 伝搬測定システムの構成

る。ここでは測定・記録されるデータと降雨による受信信号電力の減衰量の関係を整理する。

4.1 システム雑音温度の計算

システム雑音温度 (Tsys) は次式で表される。

$$T_{sys} = (T_{sky} + T_{ant})/L_f + T_f \cdot (1 - 1/L_f) + T_{rx} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

- T_{sky} : 天空雑音温度
- T_{ant} : アンテナ雑音温度
- L_f : 給電線の損失
- T_f : 給電部の平均温度 = アンテナの平均温度
- T_{rx} : 受信機雑音温度

である。また、

$$T_{sky} = (T_{atm} + T_f)/2 \cdot (1 - L_{rain}) \quad \dots\dots(2)$$

- T_{atm} : 上空大気温度
- L_{rain} : 降雨減衰の量
(晴天時は大気吸収損失を使う)

である。

これより、受信機入力換算の雑音電力密度 (N₀) は、

$$N_0 = T_{sys} \cdot \kappa \quad \dots\dots(3)$$

κ : Boltzmann const.

となる。

4.2 受信信号電力の計算

受信信号電力 (C) は、

$$C = (P_{sat} \cdot G_{ant}) / (L_{path} \cdot L_{rain} \cdot L_f) \quad \dots\dots(4)$$

P_{sat} : 衛星送信電力 EIRP

G_{ant} : 受信アンテナ利得

(偏波損失, 追尾損失を含む)

L_{path} : 自由空間損失

である。従って受信帯域幅を B_{rx} とすると、測定される受信機入力換算の電力 (C') は

$$C' = C + N_0 \cdot B_{rx} \quad \dots\dots(5)$$

となる。

(5)式の意味するところは、測定値には降雨減衰の量に反比例する受信信号電力と共に受信システムの雑音電力が含まれ、その雑音電力の大きさは降雨に伴い変化することである。従って、降雨減衰の増加と共に受信信号電力と降雨減衰の間の線形関係が崩れ、測定誤差が増大する。具体的に COMETS 回線について計算した結果を次に示す。なお以下の計算ではアンテナの直径 1 m、受信機の NF は 3 dB、アンテナの開口面効率 50%、アンテナから受信機までのフィード損失 1 dB と仮定している。

5. 測定チャンネルの検討

電波伝搬実験では、衛星または地上局での受信電力を連続して測定することで伝搬路の様子を解析するので、基本的には第1表のどのミッションの電波でも利用可能

である。アップリンクの伝搬路の様子を解析するためには、地上からの信号の衛星受信電力をテレメトリデータから読出す。ダウンリンクの伝搬路の様子を解析するためには、衛星からのビーコン信号や地上からの信号が衛星で折返されて来る信号等を測定する。以下にそれらの特徴を検討する。

5.1 高度衛星放送のダウンリンク信号

高度衛星放送ミッション（以下SBEと略す）はフィーダリンク、サービスリンクとも、関東甲信越地域をカバーするビームと、九州本島をカバーする2つのビームを有している。これらのビームは、同一周波数、同一偏波を使用しているため、どちらのサービスエリアでも同じ測定システムを用いて測定することができる。またSBEはAGC機能を持つ飽和増幅器を最終段に使用している。そのため衛星の送信電力はフィーダリンクの受信電力に関わらずほぼ一定になるという特徴を持っている。一方、SBEは将来の高品質衛星放送等の実験を行うのが目的であるため、帯域幅が120MHzと広い。放送実験中の地球局受信電力を記録して伝搬実験データとするためには、この広い帯域をすべて受信する必要がある。

第2図は(4)式及び(5)式から求めたSBEダウンリンク信号強度と降雨減衰の関係である。衛星の送信出力は200Wである。降雨による信号成分の減衰と、受信帯域幅が120MHz及び20MHzの場合の測定器の出力を示している。降雨減衰が大きくなると、雨による減衰と測定器の出力の間のリニアな関係が崩れることが分る。測定器の出力は、受信系の温度や利得、NFの変動により変化するため、このような領域では降雨減衰量を精度良

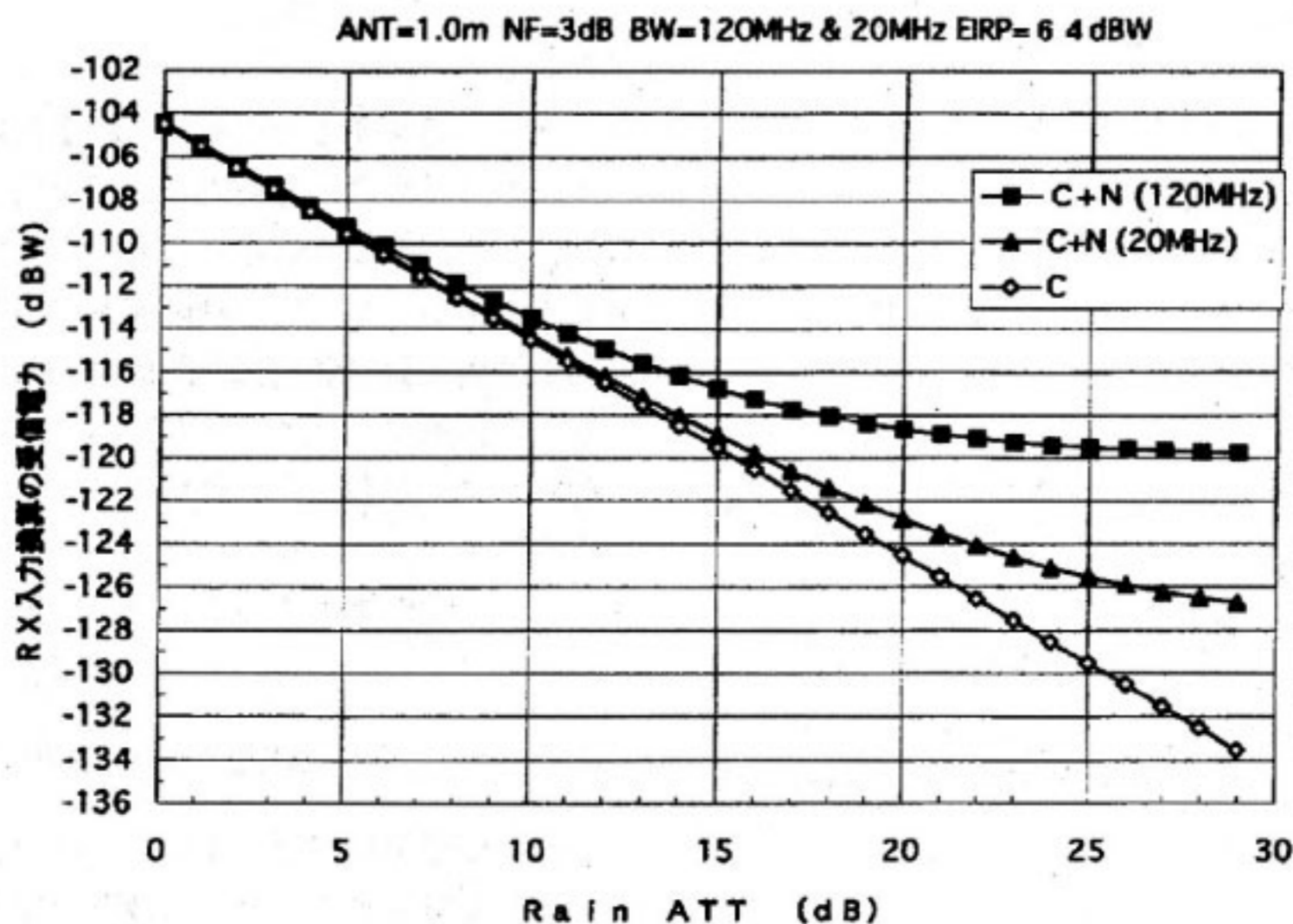
く測定することは出来ない。これより直径1mのアンテナを用いても、測定誤差を1dB以下にしようとする場合、帯域幅120MHzでは高々10dB程度の降雨減衰までしか測定できないことが分る。帯域幅20MHzの場合には15~20dB程度の減衰まで測定できる。

放送実験を行っていない時間帯に伝搬実験を行うものとし、送信信号の帯域幅を狭めてC/Nを良くすることも考えられる。しかし、他の通信との干渉をさけるために、衛星からの最大電力束密度は無線通信規則で制限されている。送信電力が大きいSBEでは、信号帯域幅を極端に狭めるとこの制限に抵触する可能性があるため注意が必要である。また前述の通りSBEの中継器は広帯域の飽和増幅器である。このためフィーダリンクのC/Nが十分に高くない場合には電力分配損失によりダウンリンクの信号電力が減少し、またフィーダリンクのC/Nと共に変動するという現象が起る事にも注意が必要である。

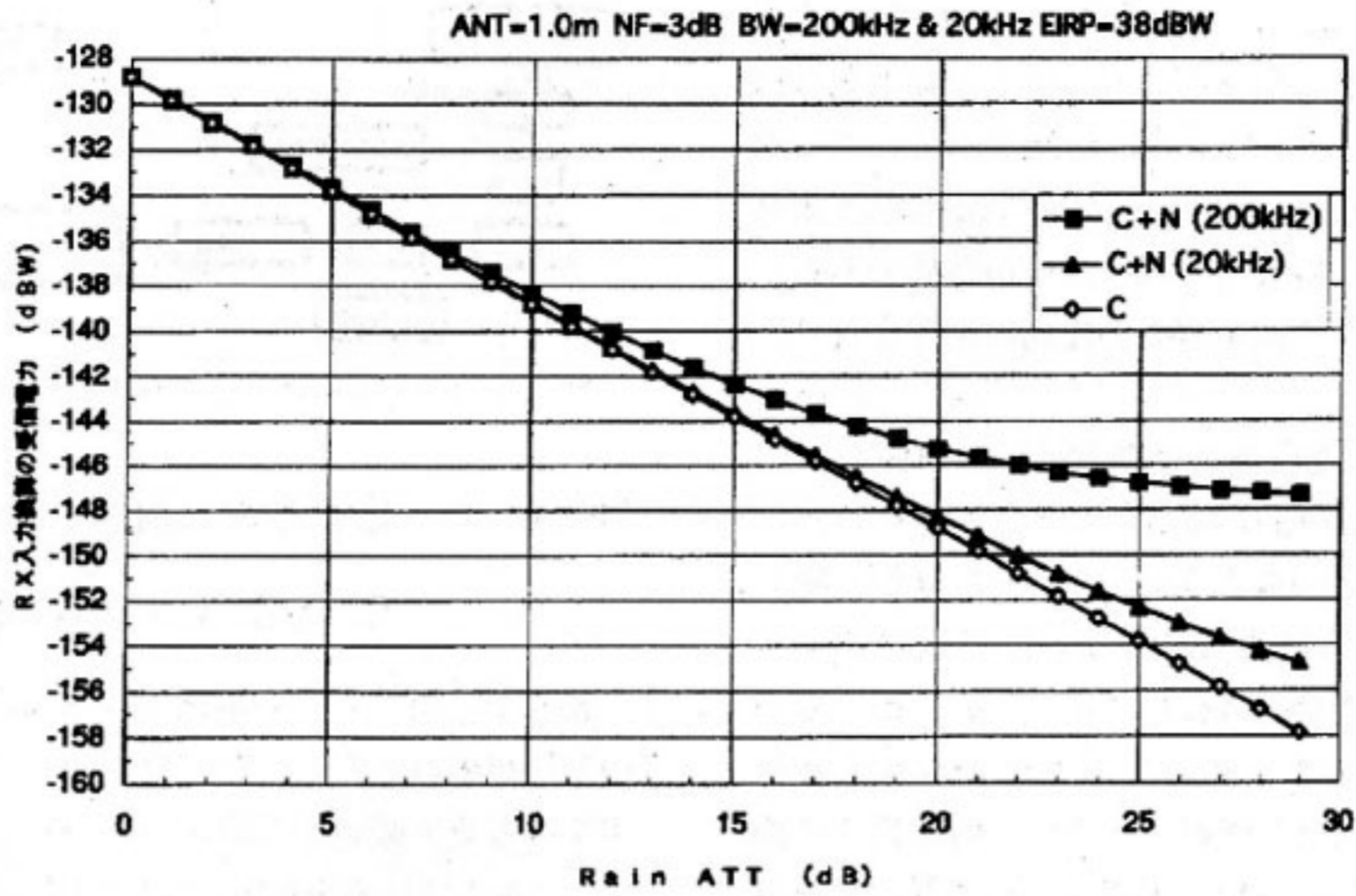
5.2 高度移動体衛星通信信号

高度移動体衛星通信(MCE)ミッションの信号を利用すると、関東と東海地方でKa帯の、また関東地方ではさらにミリ波帯の電波伝搬実験が行える。ビーム中心でのEIRPはKa帯が60dBW以上、ミリ波帯は63dBW以上あり、この全電力を使用できるならば小型の装置で伝搬実験が可能である。

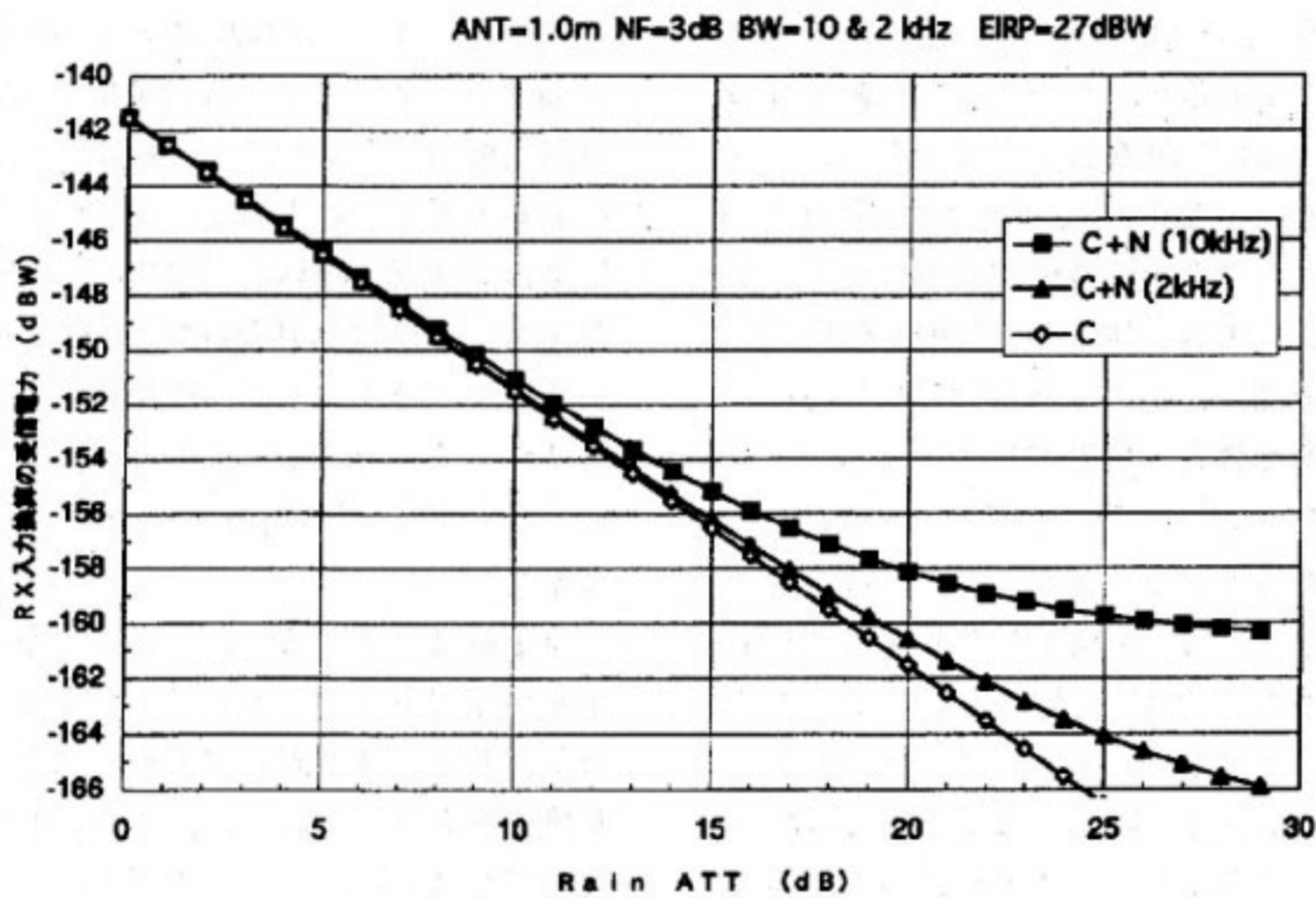
MCEにはAGC機能は無く、アップリンク信号の強度および衛星上でのゲイン調整次第で線形増幅器にも飽和増幅器にもすることが出来る。またMCEは終段増幅器を広帯域系、狭帯域系、再生中継器系の3種類の信号



第2図 降雨減衰とSBE受信電力の関係



第3図 降雨減衰とMCE受信電力の関係



第4図 降雨減衰とKFB受信電力の関係

で共用する方式をとっている。従ってどの信号を伝搬実験に使用するか、また同時に行われる実験が何かによって受信信号強度が変わることが考えられたため注意が必要である。

COMETSのMCEミッションには、IF中継とオンボード再生中継の2種類の中継方式がある。従ってダウンリンク信号中には、アップリンク信号が折り返されてきたIF中継の信号と、アップリンクの影響がない再生中継器からの信号とが含まれるため、それぞれの受信信号強度を測定してデータを処理することでアップリンクとダウンリンクの影響を分離して求めることが可能である。

第3図に、MCEミッション信号の受信強度と降雨減衰の関係を受信帯域幅が200kHz場合と20kHzの場合について示す。衛星の送信電力は0.1Wとした。MCEミッションの最大送信電力は20Wであるが、ここでは、衛星で折返されてくる地上からのパイロット信号を受信する場合を想定し、現実的な値を使用した。受信帯域を20kHzと狭帯域にすれば測定誤差1dB程度で20dB以上の降雨減衰を測定できることが分る。

5.3 衛星間通信用Kaバンドフォワードビーコン

衛星間通信では、地球観測衛星などのユーザ衛星がCOMETSを捕捉し、追尾を行うためにCOMETSから無変調のビーコンを送信する。このKaバンドフォー

ドビーコン (KFB) は、ビーム幅が $\pm 10^\circ$ 以上あるためビーム内にすっぽりと地球が入る。従って地上からは COMETS が見ればどこでも受信可能である。EIRP は 27dBW であり SBE や MCE 通信波に比べると非常に弱いが無変調であるので狭帯域の受信が可能である。またビーム幅が広いので衛星の姿勢変動の影響を受けにくいという特徴もある。

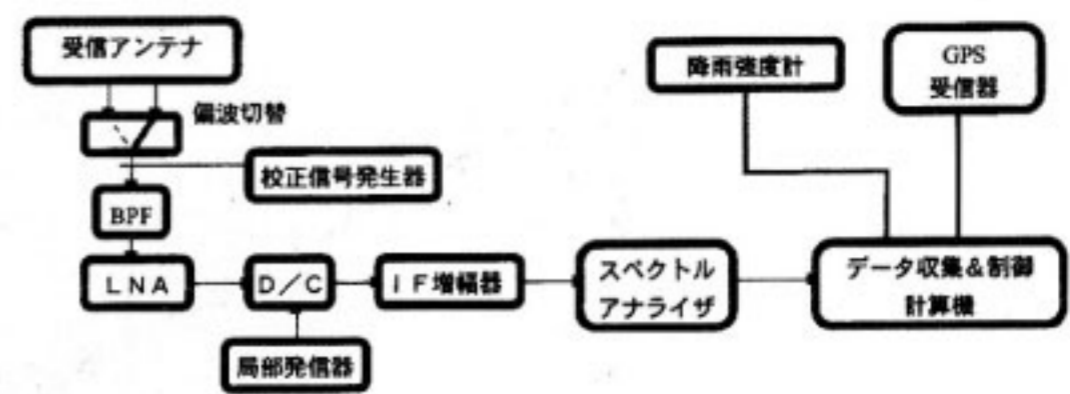
第 4 図に、KFB の受信電力と降雨減衰の関係を、受信帯域幅が 10kHz と 2 kHz の場合について計算した結果を示す。図から明らかなように、10dB を越える降雨減衰を誤差約 1 dB で測定するためには、1m のアンテナを使用してもなお受信帯域幅は 10kHz 以下と、きわめて狭帯域にして測定する必要がある。帯域幅 2 kHz ならば 20dB 以上の減衰を測定できるが、衛星並びに測定系の周波数安定度や周波数追尾等について詳細な検討が必要である。

5.4 測定チャンネルの選定

前節で検討したように、SBE には送信電力が一定で大きいというメリットがあるが、どのような実験が行われていても良いように測定帯域を広くするとダイナミックレンジが取れないという問題がある。また MCE はアップリンクの影響を受けたり衛星の送信電力をコマンドで切替えることもあり通信実験と無関係に伝搬実験を行うことは困難である。夜間など他に実験が行われていない時にパラメータを伝搬実験向きに設定して測定を行うという方法がよいと思われる。さらに SBE 及び MCE には、測定地域に限られるというデメリットがある。

一方 KFB は送信電力は弱いが無変調のキャリアであり、受信帯域を狭めることで測定範囲を広げることができる。測定地域が限定されないこともメリットである。しかし KFB は地上と衛星との通信には使われない周波数帯であるため、その結果をそのまま Ka 帯の衛星通信や衛星放送に当てはめることが出来ないことに注意する必要がある。

これらの検討結果を考慮すると、CRL 内に設置した主局・副局・可搬局では、伝搬実験のための信号を送信することや、衛星のテレメトリデータを解析することが既存の設備や実験装置で可能であるので、これらを利用して SBE ないし MCE の信号により測定を行うことにする。また SBE の簡易受信装置のように、既開発で固定した地点に置かれる受信装置についても、受信信号電力の測定と記録が可能であれば伝搬データとして利用する。その他の場所での測定には新たに実験装置を開発する必要がある。この場合には、東経 121° の静止衛星軌道が見える所なら何処でも実験が可能な、KFB を受信するのが良いと考えられる。また主局や副局では受信可



第 5 図 KFB を利用する COMETS 電波伝搬測定システム

能なすべての電波で同時に測定することも考えられる。

6. 測定システムの検討

検討の結果、多くの場所で伝搬測定を行うには KFB の受信が適当であることが分かった。ここでは KFB を利用する電波伝搬測定実験システムを考える。第 5 図に測定システムの概略を示す。なお SBE や MCE の電波を利用する場合も、アンテナ部を除いてほぼ同じ構成となる。

第 5 章で検討した通りアンテナの直径は 1 m である。この場合、ビーム半値幅は 0.9° ほどである。このビーム幅であれば、衛星の軌道制御が正常に行われている限り測定地点から見た COMETS の位置はほぼビーム内にあると考えられるので、設置時に指向方向を調整すれば追尾の必要は無い。KFB はコマンドにより偏波を RHCP, LHCP の何れにもすることができる。そのため受信アンテナはどちらの偏波も受信できるようにする必要があり、そこで、両偏波を同時に取出せる給電部を使用し、衛星の送信偏波に合わせて何れか一方を受信器に繋ぐことにする。

測定精度を上げるために、受信系のシステム雑音と給電系の損失を少なくすることが重要である。そのためには受信器をできる限りアンテナに近く設置する。周波数変換器も近接して取付け、NF の上昇を抑える必要がある。周波数変換後は 1 GHz 帯の IF 信号として実験室内の測定器までケーブルで送られる。この IF 帯ではおよそ 60dB の増幅を行う必要があり、温度による利得の変動に注意する必要がある。

測定はこの IF 信号の電力をスペクトルアナライザで読みとる。その際の周波数帯域幅で測定系のダイナミックレンジが決まる。KFB の受信電力測定と共に降雨の観測を行えば、降雨強度や降雨のタイプと降雨減衰の関係を調べることができる。そこで、雨量計を使用して降雨強度を同時に測定することにする。降雨減衰は雨の中を電波が横切る際に起こる現象であるから、降雨と減衰の関係を詳しく調べるためには伝搬経路に沿って降雨を観測するのが 1 つの方法であるが、COMETS 実験ではそこまでは考えずに、参考データとして受信アンテナの近くで測定することにする。測定と機器の制御は、小型

の計算機を使用して完全に自動化して行い、測定結果はデータファイルに記録する。定期的にデータファイルを持ち帰り解析を行う。

COMETS 伝搬実験ではダイバシティ効果の測定が重要な課題である。前述の通り測定は各測定地点で独立に行い、データはその場に貯めておく方式を取るため、各地点での測定時刻を正確に一致させる必要がある。正確な時計を使用することも考えられるが、校正や保守が煩雑である。そこでGPS受信器を使用し、GPSから得られる時刻信号や秒信号に同期して測定を行う。これらの信号はGPSの測位機能を利用して補正したものを使用する。これにより、離れた場所に設置した全ての測定器で同時に測定するシステムを構成できる。

KFBの受信を狭帯域で行うためには受信系の周波数精度並びに安定度を十分高める必要がある。具体的には周波数変換に使用する局部発信器の周波数精度と安定度が問題になる。ここでもGPSを利用して、セシウム発信器に匹敵する周波数精度を持つ局部発振器を作ることができる。同様にスペクトルアナライザなどの測定器の基準周波数源とすることもできる。これにより受信信号周波数変動の大きな要因が取り除かれ、狭帯域測定が可能になると考えられる。なお衛星の送信周波数も、衛星内の温度変化などが原因で日周変化や経年変化するが、これらはゆっくりとした変動であり、測定プログラムで対処可能である。

伝搬測定システムは、長期間にわたり受信信号強度を測定するため、測定系の利得やNFが安定であることが重要である。しかし、周囲温度の変化に伴う変動や経年変化などは避けられず、測定範囲や精度の劣化を引き起す。遠隔地で長期間無人で測定するためには測定系の校正が重要である。基準の信号や雑音を加えての校正を自動的に行えれば良いが、今度は校正系の精度や経年変化などが問題になる。適当な校正方式を検討中である。

7. ま と め

COMETSでの伝搬実験について、測定系に求められ



大内 智晴
Chiharu OHUCHI
宇宙通信部 衛星通信研究室
衛星通信, 衛星放送
E-Mail: ohuchi@crl.go.jp



齋藤 春夫
Haruo SAITOH
宇宙通信部 衛星通信研究室
衛星通信
E-Mail: saito@crl.go.jp

る性能について検討を行った。まず測定される受信信号強度と伝搬路上での減衰(降雨減衰)との関係を求め、次にCOMETSのSBE, MCEミッションについて測定可能な降雨減衰量を求めた。また同様にKFBを利用した測定の可能性を検討した。

伝搬実験にはどのミッションの電波でも使用可能であるが、長期間にわたり継続して測定する目的にはKFBが、台風など特別な条件での非常に大きな減衰を測定する場合には、SBEないしMCEを使用して狭帯域の測定を行うことが目的に合致していると考えられる。

COMETS実験の開始と同時に伝搬実験が行えるよう実験システムの整備を進め、今後ますます利用が進むKa帯並びにミリ波帯衛星通信のための基礎データを得る予定である。

参 考 文 献

- (1) ETS-II Propagation Experiments: IEEE Trans. on AES, vol. AES-16, No. 5, pp. 549-603 Sep. 1980.
- (2) K. Kosaka et al.: Japan's CS (Sakura) Communications Satellite Experiments Part VI, Experiments on Measures Against Rain Attenuation: IEEE Trans. on AES, vol. AES-22, No. 3 May 1986.
- (3) Y. Suzuki et al.: TDMA site diversity switching experiments with Japanese CS; IEEE J. on SAC, vol. SAC-1, No. 4, pp. 674-680 Sep. 1983.
- (4) 森田和夫: 衛星通信回線における最悪月および最悪年の降雨減衰分布の推定; 研実報, vol. 28, No. 2, p. 267 1997.
- (5) M. Fujita et al.: Seasonal variation of attenuation statistics in millimeterwave Earth-Satellite link due to Bright-Band height; Elect. Lett. vol. 15, No. 20, p. 654 1979.