

3-2 降雨減衰補償実験報告

浅井敏男 高橋 卓 片山典彦

Ka 帯 (マイクロ波帯域のひとつ。27 ~ 40 GHz) での衛星通信は、従来使用されていた衛星通信周波数資源ひっ迫の緩和に加え、広帯域、高速の通信を実現する手段として重要である。一方 Ka 帯での降雨減衰は C/Ku 帯等に比べ大きいいため、降雨時の回線稼働率を上げるためには降雨減衰補償が必須となる。WINDS 衛星を使用した Ka 帯での降雨減衰補償実験により、その有効性を検証したので報告する。

あわせて、Ka 帯での降雨減衰特性測定で得られた、降雨減衰量と降雨量及び降雨減衰量と降雨減衰の変化速度の相関も報告する。

1 まえがき

WINDS 搭載ベースバンド交換部 (ABS) を使用した再生交換中継回線 [1] での Ka 帯降雨減衰補償実験を行い、その有用性が検証されたのでその実験結果を報告する。

また、Ka 帯の WINDS 再生交換中継用 TDMA リフレックスバースト (RB) 信号及び WINDS 網情報信号残留キャリアの降雨減衰特性を測定し、降雨減衰量と降雨量の相関、降雨減衰量と降雨減衰の変化速度の相関データを得ることができたので併せて報告する [2]。

WINDS 再生交換中継のアップリンクは 1.5 M/6 M/24 M/51 M モード TDMA で、ダウンリンクは 155 M モード TDMA である [1]。衛星ビームは固定マルチビーム (MBA) と電子走査ビーム (APAA) の両方を使用した実験を行った。再生交換中継では衛星中継器で復調/交換/変調処理を行っているため、アップリンクとダウンリンク衛星回線設計

を独立して扱うことができ、降雨減衰補償もアップリンクとダウンリンクを分けて行える。

地球局は、MBA では 1 m アンテナ可搬局、1.2 m アンテナ VSAT、2.4 m アンテナ VSAT、APAA では、1.8 m アンテナ VSAT、2.4 m アンテナ VSAT を使用した。また 4.8 m アンテナ鹿島大型地球局を使用した MBA 及び APAA での再生交換中継実験も行った。地球局送信終段増幅器は、40 W SSPA、75 W TWTA、250 W TWTA である。

再生交換中継の降雨減衰補償量は地球局アンテナサイズ、送信終段増幅器出力電力により異なるが、ここでは MBA は 1.2 m アンテナ / 40 W SSPA VSAT、APAA は 2.4 m アンテナ / 250 W TWTA VSAT での結果を基準として報告する。もちろん、地球局アンテナサイズ及び送信終段増幅器出力電力が大きくなれば、その特性に比例して降雨減衰補償量は増加する。

また、本報告の MBA 実験は鹿島に設置した地球局及び関東ビーム使用しているため、WINDS 衛星諸元



図 1 再生交換中継降雨減衰補償実験の屋外装置

は関東ビーム中心よりアップリンク衛星の性能指数 (G/T) で約 3.5 dB、ダウンリンク実効放射電力 (EIRP) で約 1.5 dB 低い値となっている。APAA での実験ではビーム中心を鹿島に設定しているので衛星諸元の劣化は無い。

図 1 は MBA 実験用 1.2 m VSAT と 1 m 可搬局間及び APAA 実験用 2.4 m VSAT と大型地球局間の再生交換中継降雨減衰補償実験の屋外装置である。

2 アップリンク降雨減衰補償

アップリンク降雨減衰補償は地球局送信終段増幅器出力電力を制御する方法 (Uplink Power Control (UPC) と、アップリンクの伝送モードを変えることにより送信地球局所要 EIRP を制御する方法がある。

2.1 アップリンクパワーコントロール (UPC) による降雨減衰補償

UPC は衛星通信で広く用いられている降雨減衰補償方法で、基準信号として衛星のビーコン信号、親局／基準局等から送信する Pilot 信号を使用する方式が良く知られている。

WINDS 再生交換中継の降雨減衰補償は、衛星から定電力で発射される再生交換中継 TDMA リファレンスバーストを UPC の基準信号としている。再生交換地球局屋内ユニット (IDU) は受信リファレンスバースト信号強度とガードタイムの雑音強度との比より受信 C/No を測定し、あらかじめ設定した Downlink C/No limit との差 C/No margin を計算する。この C/No margin が晴天時の C/No margin より減少した場合、IDU は送信出力電力を上げて降雨減衰補償を行う [1]。IDU には UPC 動作設定パラメータとして THR rain fade (K1 /K2)、Coefficient (K1)、Coefficient (K2) がある。Coefficient (K1)、Coefficient (K2) は C/No margin 減に対し送信電力を増加する際の係数である。これは、受信の 18 GHz 帯の C/No 減少に対しての 28 GHz 帯送信電力増加の比を設定する。また THR rain fade (K1 /K2) にはこの係数を切り替える動作点である。例えば THR rain fade (K1 /K2)=5、K1 =1、K2 =2 と設定すれば C/No margin が 5 dB まで減少するまで、送信電力を C/No margin 減と同じ値で増やし、その後の C/No margin 減少には送信電力を C/No margin 減の 2 倍で増やす。この動作原理を図 2 に示す。

もちろん、IDU 送信出力電力を上げて VSAT EIRP はそれに比例して増加するのではなく、VSAT 終段電力増幅器の入出力特性及び飽和出力電力で抑えられる。

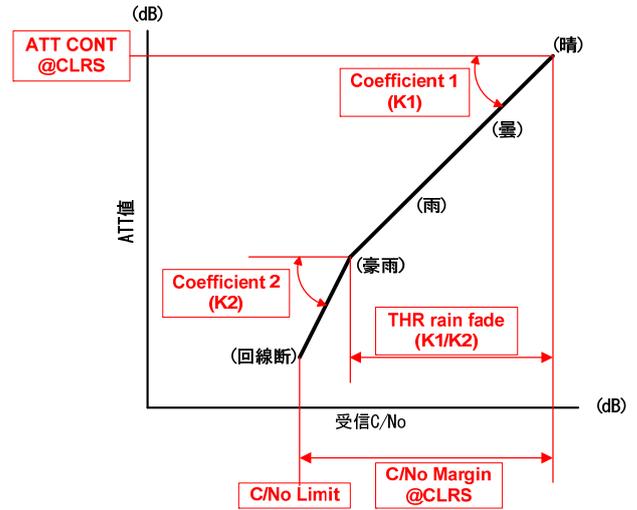


図 2 WINDS 再生系 IDU 降雨補償動作原理

UPC 動作確認試験は、紙に電波吸収体のカーボン (墨汁) を塗布した遮蔽板をアンテナホーンに付けることで降雨減衰を模擬して実施した。減衰量は塗布する墨汁の濃度により細かく制御可能である。この方法では、送受両方の電波吸収が起こるため、アップリンク／ダウンリンク両方の降雨減衰が同時に模擬できる。また、遮蔽板により受信システム雑音も増加するので、ダウンリンク降雨マージンの減少を実際の降雨時と同様に模擬できる。ただ、遮蔽板による減衰は非常に短い距離で電波を吸収するため、受信帯域 (18 GHz 帯) と送信帯域 (28 GHz 帯) の減衰量がほぼ等しくなる。この点は実際の降雨による減衰と異なる。

図 3 に 1.2 m VSAT ホーンに遮蔽板を付けた状況及び遮蔽板を示す。

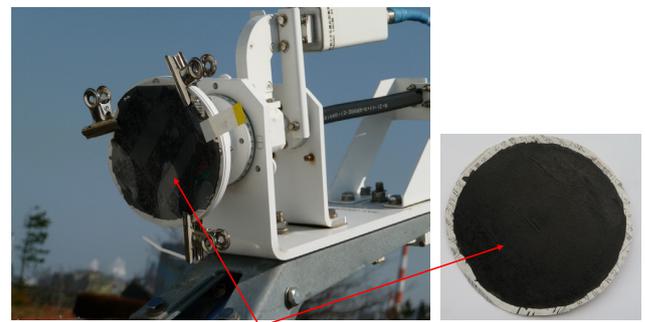


図 3 1.2 m VSAT ホーンに遮蔽板を付けた状態

1.2 m アンテナ / 40 W SSPA VSAT での UPC 動作確認試験結果を図 4、5 に示す。

図 4 に 6 M モードでの UPC 動作検証を示す。このときの IDU 設定は下記のとおりである。

C/No limit = 93 dB

C/No margin @CLRS = 23 dB

(C/No margin @CLRS の値は直接設定できないが、ATT CONT@CLRS を 29 dB と設定すると、この値は地球局からの衛星回線確立要求の 1.5 M モード信号での値であるので、6 M モード伝送の場合は 6 M と 1.5 M の比の 6 dB 分が自動調整され 23 dB となる)

THR rain fade (K1 /K2) = 7

Coefficient (K1) = 0

Coefficient (K2) = 1

Estimated EIRP (e/w UPC) と Estimated EIRP (w/o UPC) は UPC 有り及び無し の 1.2 m VSAT の推定 EIRP である。推定 EIRP を求める際のアップリンク減衰量はダウンリンクリファレンスバースト信号レベル低下分と同等とした。Packet Loss (e/w UPC) と Packet Loss (w/o UPC) は UPC 有り及び無し の 1.2 m VSAT から対向局へデータを送出した際のパケットロスを示す。両者を比べると受信 C/No が C/No limit 93 dB と C/No margin @CLRS 23 dB の和 116 dB から 7 dB 減少するまでは UPC は動作せず (Estimated EIRP (e/w UPC) と Estimated EIRP (w/o UPC) が一致)、それ以上 C/No が減少すると UPC 有りの場合は IDU 送信出力電力が上がりアップリンク降雨減衰を補償していることがわかる。一方 UPC 無しの場合は C/No が減少しても IDU 送信出力電力は一定であるので、結果として C/No 減少に応じて推定 EIRP が下がり、Packet Loss (w/o UPC) で示すとおり、C/No が 105 dB 近傍以下ではパケットロスが発生する。HPA Output Power (e/w UPC) と HPA Output Power (w/o UPC) は、UPC 有り及び無し の 1.2 m VSAT HPA 出力電力を示す。C/No 109 dB 以下になると UPC 有りの場合は C/No 低下に従って HPA 出力電力が増加し、UPC が正常に動作していることがわかる。

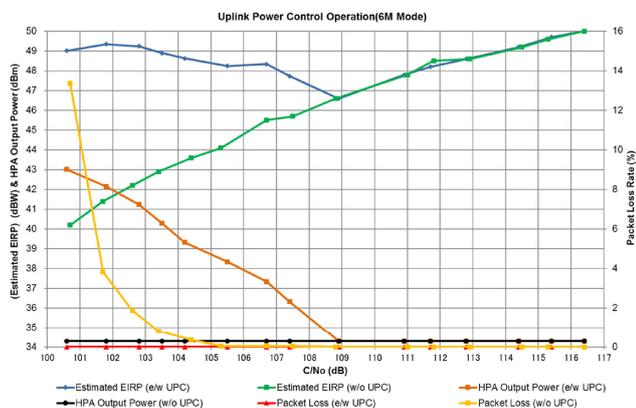


図4 UPC 動作検証 (6M モード)

同じ設定での 51 M モードの動作を図 5 に示す。

51 M モードでは UPC 有りでも C/No が 104 dB 以下になると、40 W SSPA が飽和となり VSAT EIRP は増加しなくなる。したがって、C/No 104 dB 以下では UPC 有りでも Estimated EIRP (e/w UPC) に示す推定 EIRP が下がり、C/No 101 dB 近辺からは UPC 有りでもパケットロスが観測され始めている。

図 4、5 で示すように UPC が設計通り良く機能していることが検証できた。

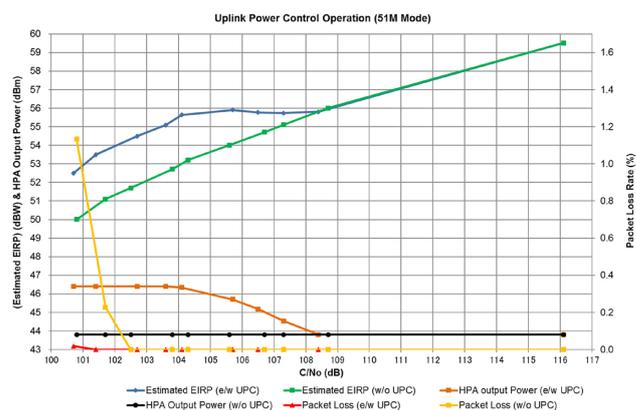


図5 UPC 動作検証 (51 M モード)

推定 EIRP のアップリンク電力減衰量をダウンリンクリファレンスバースト受信信号レベル低下分と同等としたことの妥当性を検証するため、遮蔽板で VSAT EIRP 低下を模擬したときと、遮蔽板無しで IDU 出力電力を変えて VSAT EIRP を低下させたときのそれぞれのパケットロス測定結果を図 6 に示す。

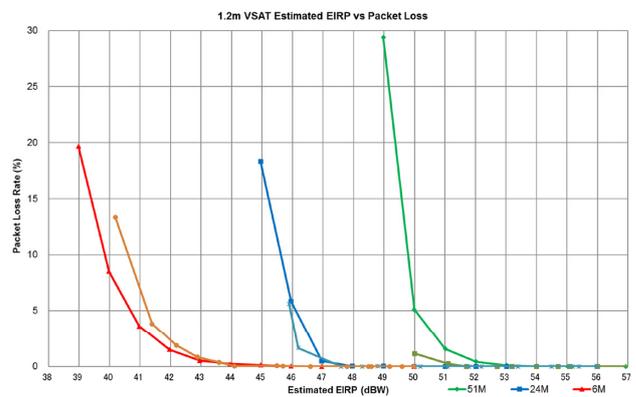


図6 遮蔽板によるアップリンク減衰量の妥当性の検証

図 6 で 51 M/24 M/6 M は IDU 出力電力を変えて VSAT EIRP を低下させたとき、51 M-P/24 M-P/6 M-P は遮蔽板で VSAT EIRP 低下を模擬したと

きである。各伝送モードでの両者の推定 EIRP とパケットロスの相関がほぼ一致しており、上記推定が妥当であることが検証できた。

なお、この実験時の IDU UPC 動作パラメータは遮蔽板による受信周波数帯域と送信周波数帯域の減衰量がほぼ同じであるために用いた実験用の値である。実際にはアップリンク降雨減衰量はダウンリンク降雨減衰量のおおよそ倍であるので、THR rain fade (K1 / K2)、Coefficient (K1)、Coefficient (K2) はそれを勘案して決める必要がある。

2.2 アップリンク伝送モード変更による降雨減衰補償

WINDS 再生交換中継のアップリンク伝送モードは 1.5 M/6 M/24 M/51 M TDMA があり、それぞれの衛星上での所要 C/No は 2007 年 6 月の WINDS 回線設計最終設計審査 (CDR) 資料によると 73.6 /79.7 /85.7 /88.7 dB/Hz である。例えば、晴天時に 51 M モード TDMA を使用していた場合、降雨時に伝送モードを下げることにより、利用可能伝送速度／伝送量は低下しても通信は継続できる。この方法による降雨減衰補償量は理論上では 88.7-73.6 =15.1 dB である。

図 7 に 1.2 m VSAT を使用して関東 MBA で測定した地球局推定 EIRP 対パケットロスを示す。地球局推定 EIRP は地球局レベルダイヤグラムより換算した値である。

測定結果は 51 M モードで若干復調器性能が悪く、早めにパケットロスが発生する。一方 1.5 M モードでは若干復調器の感度が良いように見える。結果は、理論値 15.1 dB とは 1 dB 位の誤差がある。

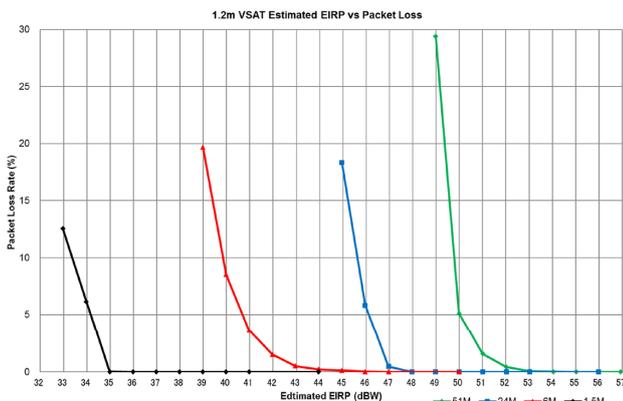


図 7 地球局推定 EIRP 対パケットロス (MBA)

1.2 m VSAT の地球局推定 EIRP の妥当性を 1 m 可搬 VSAT の地球局推定 EIRP と比較することにより検証した。検証結果を図 8 に示す。各伝送モードでのパケットロスと 1.2 m VSAT/1 m 可搬局の推定 EIRP

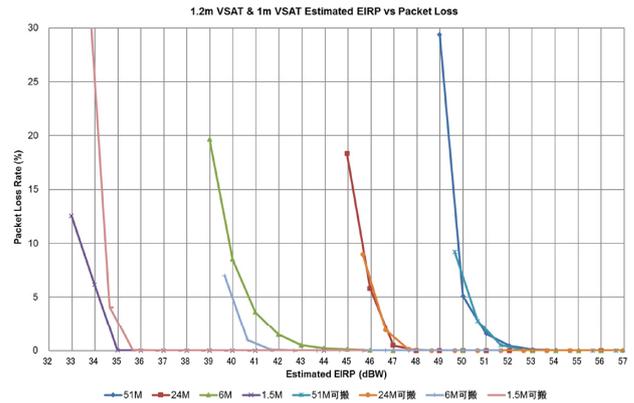


図 8 1.2 m VSAT/1 m 可搬 VSAT 推定 EIRP 対パケットロス (MBA)

がほぼ一致していることから、地球局 EIRP の推定が妥当であることがわかる。

MBA 関東 1 ビームのみ使用、かつダウンリンク衛星出力電力 280 W 時の 1.2 m VSAT の標準レベルダイヤグラム及び回線設計例を図 9 及び表 1 に示す。

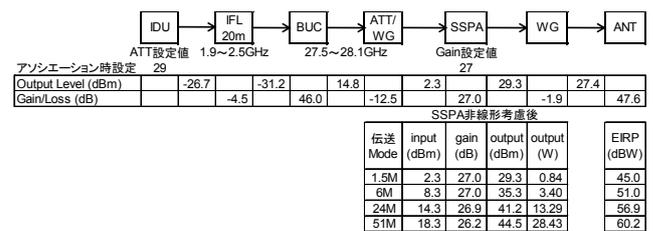


図 9 1.2 m VSAT 標準レベルダイヤグラム (MBA)

表 1 回線設計例 (晴天時、MBA 関東 1 ビーム)

		MBA 関東 1 ビーム					備考
		1.5M	6M	24M	51M	155M	
上り回線周波数	GHz	28.05	28.05	28.05	28.05		
地球局送信							
送信機出力	W	0.85	3.39	13.18	28.18		
	dBm	29.3	35.3	41.2	44.5		
給電損失	dB	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9		
アンテナ利得	dB	47.6	47.6	47.6	47.6		1.2m ANT
EIRP	dBW	45.0	51.0	56.9	60.2		
指向誤差損失	dB	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5		
伝播損失							
自由空間損失	dB	-212.7	-212.7	-212.7	-212.7		
大気吸収損失	dB	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3		
降雨減衰	dB	0.0	0.0	0.0	0.0		
衛星							
G/T	dB/K	20.3	20.3	20.3	20.3		
上り回線C/No	dB	80.4	86.4	92.3	95.6		
送信機出力	W					280.0	
給電損失	dB					-1.0	
アンテナ利得	dB					49.1	
EIRP	dBW					72.6	
下り回線周波数	GHz					18.25	
伝播損失							
自由空間損失	dB					-208.9	
大気吸収損失	dB					-0.2	
降雨減衰(注)	dB					0.0	
地球局受信							
指向誤差損失	dB					-0.5	
G/T	dB/K					23.1	1.2m ANT
下り回線C/No	dB					114.7	
変調速度	Mbps	2.3125	9.25	37	74.0	203.5	
シンボルレート	Msps	1.15625	4.625	18.5	37.0	101.75	
ユーザデータ速度	Mbps	1.536	6.144	24	51.8	155.52	
所要C/No	dB	73.6	79.7	85.7	88.7	93.9	
C/Nマージン	dB	6.8	6.7	6.6	6.9	20.8	

MBAと同様に、図10に2.4 m VSATを使用してAPAAで測定した地球局推定EIRP対パケットロスを示す。地球局推定EIRPは地球局レベルダイヤグラムより換算した値である。

上記APAAの地球局推定EIRP対パケットロス特性と図7 MBAの特性を比較すると、地球局推定EIRPが約11 dBシフトしてほぼ同一の特性となっていることがわかる。地球局推定EIRP約11 dBシフトはAPAAとMBAの衛星G/T差である。WINDS搭載ベースバンド交換部(ABS)の復調部はAPAAとMBAは共用ゆえ上記結果が得られるのは当然である。

アップリンク降雨減衰補償のまとめとして、UPC及び伝送モード変更による方法の両方共ほぼ理論とおり動作することが検証できた。また、両者を併せたアップリンク降雨減衰補償量はMBAでは、VSAT最大EIRP 61.7 dBWと図7に示す1.5 Mモードでのパケットロス発生直前の35 dBWとの差26.7 dBとなることがわかった。APAAではアンテナサイズ及びHPA飽和出力電力が大きい2.4 m VSATの最大EIRP 77.2 dBWと1.5 MモードMBA 35 dBWから約11 dBシフトの約46 dBWとの差約31.2 dBである。

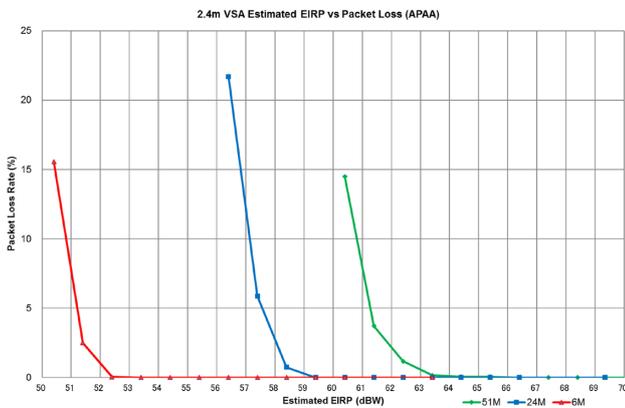


図10 地球局推定EIRP対パケットロス (APAA)

は送信スポットビームの数により変わる。例えば、関東ビーム1ビームでは表1に示すとおり鹿島で72.6 dBWで、晴天時の1.2 m VSAT受信でのC/Noマージンは20.8 dBである。MBAスポットビーム数は提供サービスエリア数により変わるが最大は8である。単純に8ビームに同じ電力を割り当てると晴天時の1.2 m VSAT受信でのマージンは11.3 dBとなる。

一例として8ビーム運用で1エリアのみ豪雨で余剰衛星電力のすべてをここに集中、他のエリアは6 dBの降雨マージンで済む程度の天候状況の場合のダウンリンク回線設計を表2に示す。

表2 ダウンリンク降雨減衰補償時の回線設計例

再生交換中継Downlink	晴天エリア	豪雨エリア
衛星送信		
送信機出力	W	10.0
給電損失	dB	-1.0
アンテナ利得	dBi	49.1
EIRP	dBW	58.1
伝搬損失		
自由空間損失	dB	-208.9
大気吸収損失	dB	-0.2
降雨減衰	dB	0.0
地球局受信		
指向誤差損失	dB	-0.5
G/T	dB/K	23.1
下り回線C/No	dB	100.2
変調速度	Mbps	203.5
シンボルレート	Msps	101.75
ユーザデータ速度	Mbps	155.52
所要C/No	dB	93.9
C/Noマージン	dB	6.3

実際には各エリアの衛星アンテナ利得等も変わり、すべてのVSATが1.2 m以上のアンテナサイズでも

3 ダウンリンク降雨減衰補償

WINDS再生交換中継ダウンリンク信号伝送モードは155 M一種類である。WINDSは国内外8つの地域へ同時に固定通信回線を提供するための8ポートのマルチポート増幅器(MPA)を搭載しており、それぞれのポート出力電力を合計出力電力280 W以内で変えることができる。基準局は各サービスエリア内のVSATから基準局へ定期的に送信されるリファレンスバーストC/Noマージン値を統計処理し、MPAの各出力ポート電力を余剰電力の範囲内で調整してダウンリンク降雨減衰補償を行う[3]。MBAの衛星EIRP

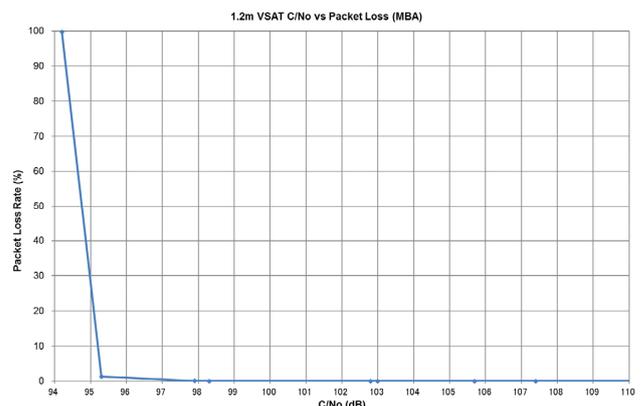


図11 受信C/No対パケットロス特性 (MBA)

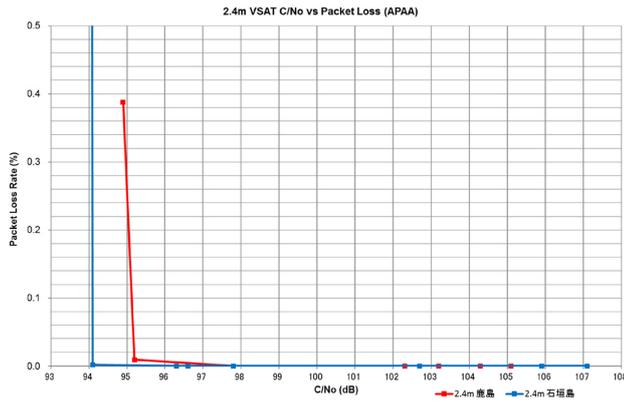


図 12 受信 C/No 対パケットロス特性 (APAA)

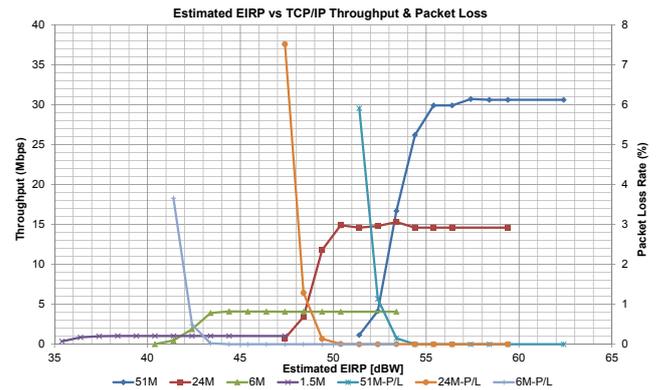


図 13 推定 EIRP 対スループット並びにパケットロス

ないため、表 2 のダウンリンク回線設計例は非常に単純化されたモデルであるが、約 19 dB の降雨減衰補償が豪雨エリアに適用できる。ただし、晴天エリア C/No マージン約 6 dB からは 13 dB の降雨補償である。

今回の試験ではダウンリンク所要 C/No 及び C/No マージンの検証を行った。アンテナホーンに遮蔽板を付けて受信 C/No を下げ、そのときのパケットロスを測定した。図 11 に関東 MBA/1.2 m VSAT で測定した鹿島での受信 C/No 対パケットロス特性を示す。

図 11 ではおよそ C/No 95 dB でパケットロスが急激に増加している。この値はダウンリンク所要 C/No 93.9 dB に比べ 1 dB 程であり、誤差範囲内と考えられる。

同様に APAA ダウンリンクの受信 C/No 対パケットロス特性を図 12 に示す。

図 12 に示すとおり、APAA でも MBA とほぼ同一の結果が得られた。

ユーザーに割り当てられるスロット数が少ない場合はそれに比例してスループットは低下する。降雨時に伝送モードを下げることにより降雨補償を行う場合は、表 3 に示す値に比例してアップリンク伝送速度/情報量が低下するので、アプリケーション側での制御も必要となる場合も生じる。

TCP/IP のスループットは再送制御があるので、伝送路の容量だけでなく、パケットサイズ、ウインドサイズ等により変わる。特に衛星通信のように遅延が大きな系では伝送可能な容量が大きく変わる。TCP/IP でウインドサイズを 6/24/51 M モードで 4 Kbytes ~ 4 Mbytes 間自動設定、1.5 M モードで 4 ~ 128 Kbytes 間自動設定とほぼ WINDS 再生交換中継回線で最大スループットが得られるように設定し iperf で測定した推定 EIRP 対スループット及びパケットロスを図 13 に示す。

TCP/IP スループットは衛星回線のパケットロスが発生すると急激に下がることがわかる。衛星伝送モードが 51 M モードでは 0.2 % 程度、24 M/6 M モードでも 1 ~ 2 % のパケットロスを超えると一段下の伝送モードに切り替え、パケットロス無しで運用する方が回線のスループットは上がる。したがって、TCP/IP での伝送サービスでは、パケットロスが発生する閾値を超える降雨減衰があった場合は直ちに低速伝送モードに切り替えた方が良いことがわかる。

4 スループット及び TCP/IP アップリンク伝送モード変更による降雨減衰補償

WINDS 各伝送モードでのスループット計算値及びネットワークスループットを測定するためのソフトウェア iperf により測定した UDP スループットを表 3 に示す。

表 3 アップリンク各伝送モードでの UDP スループット

伝送モード	1.5M	6M	24M	51M
No of Slot/Super frame	288	288	288	288
No of Data/Slot	2	8	30	60
Data volume incl. All"0" data (Byte)	223	223	223	223
Data volume excl. All"0" data (Byte)	212	212	212	212
Data volume excl. ATM header (Byte)	192	192	192	192
Data rate excl. ATM header (Mbps)	1.382	5.530	20.736	41.472
実測最大Throughput (Mbps)	1.27	5.1	19.1	38.2

注1: No of Slot が変わった場合のスループットは比例配分で計算すれば良い。

表 3 は 1 スーパーフレームで 288 トラフィックバーストスロットを使用した場合のスループットである。

5 降雨時の回線不稼働率

WINDS 再生交換中継方式での降雨減衰による回線不稼働率を、ITU-R P.618-8 モデルで計算した降雨減衰量に基づいて検討する。アップリンク降雨減衰量対回線不稼働率を表 4 に示す。表 4 には各都市の MBA ビーム中心位置からの距離より推定した衛星 G/T 及び各都市でのアップリンク推定降雨減衰補償可能量も併せて示す。各都市でのアップリンク推定降雨減衰補

償可能量は鹿島 1.2 m VSAT アップリンク降雨減衰補償量 26.7 dB を、鹿島での MBA 関東衛星推定 G/T 20.3 dB/K と各都市での衛星推定 G/T の差分だけ変えた値である。

アップリンクは北海道～東北北部では不稼働率 0.01 %、仙台～関東では不稼働率 0.03 %、中部～九州では不稼働率 0.05 %、沖縄では不稼働率 0.1 % である。

ダウンリンク降雨劣化量対回線不稼働率を表 5 に示す。ダウンリンク降雨劣化量は降雨減衰量と降雨によるシステム雑音増加による受信 G/T 劣化の和である。表 5 には各都市の MBA ビーム中心位置からの距離より推定した衛星最大 EIRP 及び各都市でのダウンリンク推定降雨マージンも併せて示す。各都市でのダウンリンク推定降雨マージンは鹿島での関東 MBA 1 ビームでの降雨マージン 20.8 dB を、鹿島での MBA 関東衛星推定最大 EIRP 72.6 dBW と各都市での衛星推定最大 EIRP の差分だけ変えた値である。

ダウンリンクは北海道～東北では不稼働率 0.01 %、関東～九州では不稼働率 0.03 %、沖縄では不稼働率 0.05 % である。

表 4 アップリンク降雨減衰量対回線不稼働率

Uplink rain attenuation (ITU-R P.618-8)										
Satellite : WINDS		143.0 degrees East								
Uplink frequency		28.05 GHz								
Uplink rain attenuation (dB)										
City/Area	MBA	Unavailability (% of an average year)						衛星推定 G/T (dB/K)	アップリンク推定降雨減衰補償可能量 (dB)	
		1	0.5	0.3	0.1	0.05	0.03			0.01
根室	北海道東	0.9	0.9	0.9	2.1	4.1	7.0	21.0	19.4	25.8
札幌	北海道西	0.8	0.8	0.8	1.9	3.7	6.4	19.5	23.1	29.5
盛岡	東北	0.8	0.8	0.8	1.8	3.9	7.1	26.2	23.0	29.4
仙台	東北	0.7	0.7	0.7	1.7	3.9	7.3	29.0	19.4	25.8
鹿嶋	関東	3.8	5.9	8.0	14.2	19.7	24.6	37.1	20.3	26.7
名古屋	中部	5.7	8.7	11.6	20.5	28.0	34.6	51.3	24.4	30.8
大阪	近畿	4.8	7.5	10.0	17.7	24.4	30.1	44.9	21.0	27.4
広島	中四国	4.7	7.2	9.7	17.2	23.7	29.3	43.7	23.2	29.6
熊本	九州	5.0	7.8	10.5	18.5	25.2	31.1	45.9	20.2	26.6
那覇	沖縄	7.0	11.5	15.6	26.8	35.7	43.2	61.1	22.9	29.3

表 5 ダウンリンク降雨劣化量対回線不稼働率

Required downlink rain margin										
Satellite : WINDS		143.0 degrees East								
Downlink frequency		18.25 GHz								
Downlink rain degradation (dB)										
City/Area	MBA	Unavailability (% of an average year)						衛星推定最大 EIRP (dBW)	ダウンリンク推定降雨マージン (dB)	
		1	0.5	0.3	0.1	0.05	0.03			0.01
根室	北海道東	0.5	0.5	0.5	1.6	3.2	5.2	13.3	70.3	18.5
札幌	北海道西	0.4	0.4	0.5	1.4	3.0	4.8	12.5	73.3	21.5
盛岡	東北	0.3	0.3	0.3	1.3	3.0	5.3	16.0	71.4	19.6
仙台	東北	0.3	0.3	0.3	1.3	3.0	5.5	17.5	69.9	18.1
鹿嶋	関東	2.7	4.2	5.5	9.1	12.1	14.6	21.4	72.6	20.8
名古屋	中部	3.9	5.9	7.6	12.3	16.3	19.7	28.5	72.2	20.4
大阪	近畿	3.5	5.2	6.7	11.0	14.5	17.5	25.4	72.6	20.8
広島	中四国	3.3	4.9	6.5	10.7	14.0	17.0	24.6	72.8	21.0
熊本	九州	3.5	5.3	6.9	11.3	14.8	17.9	25.8	72.1	20.3
那覇	沖縄	4.8	7.4	9.6	15.3	19.9	23.7	33.2	72.3	20.5

衛星推定最大 EIRP は MPA 出力電力 280W 時の値である。

6 降雨減衰特性測定

Ka 帯での降雨減衰を WINDS の再生通信系で使用される TDMA のリファレンスバースト (RB) レベル及び WINDS 網情報信号残留キャリアレベルで測定した。

図 14 にダウンリンク TDMA フレームフォーマットを示す。1 スーパーフレームは 16 の基本フレーム

から成り立っており、基本フレームは更に 20 のスロットで構成される [1][4]。

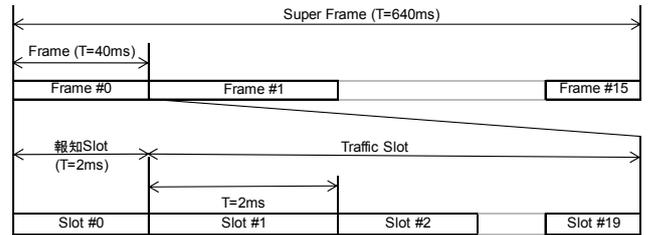


図 14 ダウンリンク TDMA フレームフォーマット

RB は各基本フレームの第 1 スロットに衛星で生成され送出されており、衛星出力電力が一定に保持されている。したがって、地球局で RB 受信レベルを測定することにより、衛星回線ダウンリンクの降雨減衰をアップリンクの影響を受けず測定できる。測定は、NICT 鹿島宇宙技術センター、NICT 本部 (小金井) 及び首都大学東京日野キャンパスで行った。関東ビームの RB 中心周波数は 17.7925 GHz である。

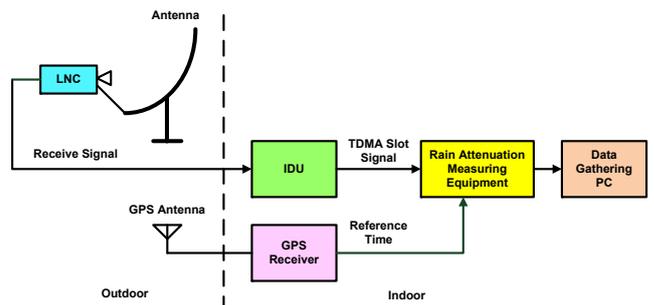


図 15 TDMA RB レベル測定装置

鹿島宇宙技術センターでは 1 分間降雨量測定も行っており、降雨減衰量と降雨量の相関も考察した。

鹿島宇宙技術センターでの測定例を図 16、17 に示

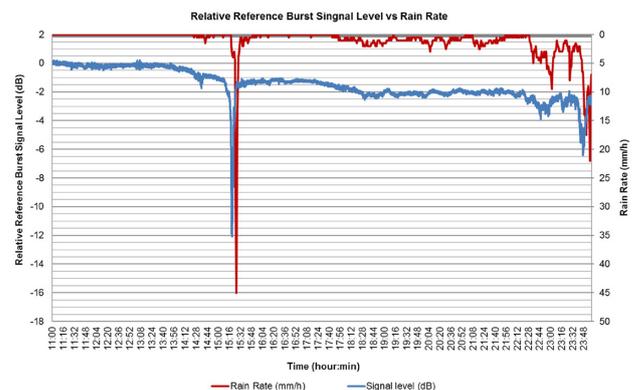


図 16 TDMA RB による降雨減衰測定例 (鹿島 2009/4/14)

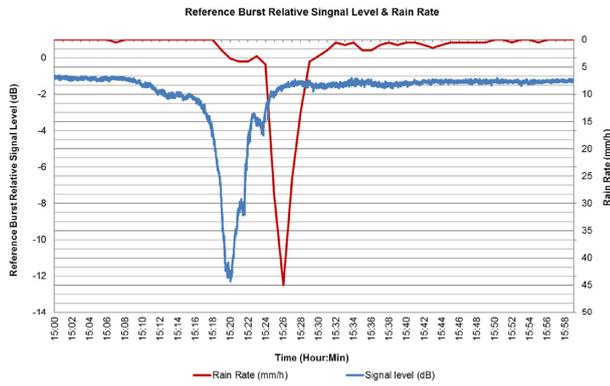


図 17 図 16 の 15 時部分時間拡大図

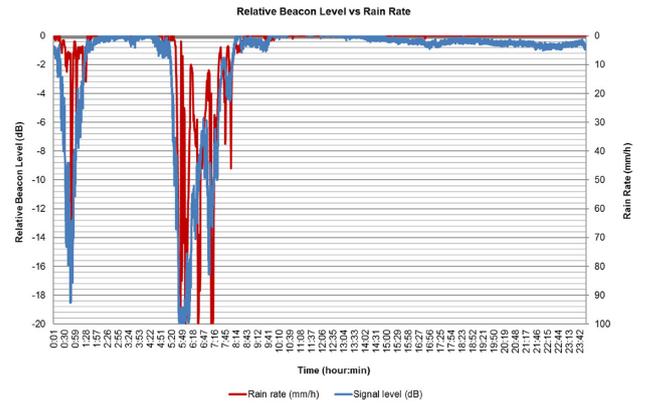


図 19 WINDS 網情報信号残留キャリアレベルによる降雨減衰測定例 (鹿島 2015/9/11)

す。このデータでは 15 時 11 分から 15 時 33 分の間に大きな減衰が見られる。図 17 はこの大きな減衰部分の時間的拡大である。これを見ると、降雨減衰量と降雨量の相関がよく取れていることがわかる。このときの風向はおおむね鹿島から WINDS を見た方向から吹いていたので、降雨減衰量と降雨量間の時間差は降雨減衰を引き起こす斜め伝搬路の雨雲が鹿島に到着するまでの遅延と思われる。また降雨減衰量最大傾斜は約 0.5 dB/秒である。

WINDS 網情報信号残留キャリアレベルによる降雨減衰はスペクトラムアナライザで 1 秒ごとの信号レベルを測定した。網情報信号残留キャリア周波数は 18.9 GHz である。測定は、NICT の鹿島宇宙技術センター、本部 (小金井) 及び沖縄電磁波技術センターで行った。

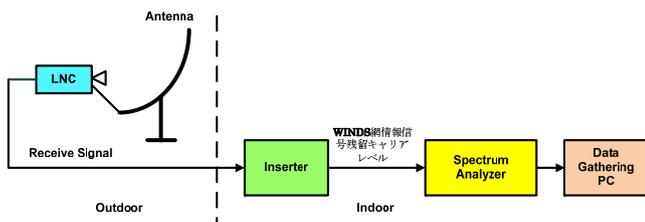


図 18 WINDS 網情報信号残留キャリアレベル測定装置

鹿島宇宙技術センターでの WINDS 網情報信号残留キャリアレベル測定結果の一例を 1 分計降雨量と併せて図 19 に示す。

2009 年から 2017 年の鹿島で取得した降雨減衰特性測定から降雨減衰量と降雨量の相関及び降雨減衰量と降雨減衰量変化速度の相関のまとめが図 20、21 である。

MBA での 1.2 m VSAT アップリンク降雨減衰補償量 26.7 dB 及び 28 GHz アップリンク周波数帯と 18 GHz ダウンリンク周波数帯との約 2 倍の降雨減衰量比を考慮すると、鹿島では約 50 mm/H の「激しい

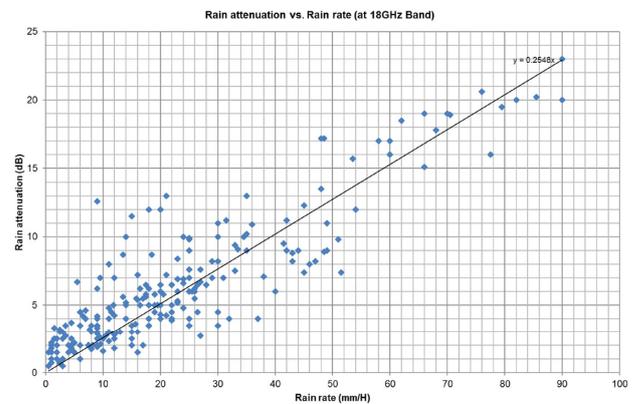


図 20 降雨減衰量対降雨量 (鹿島)

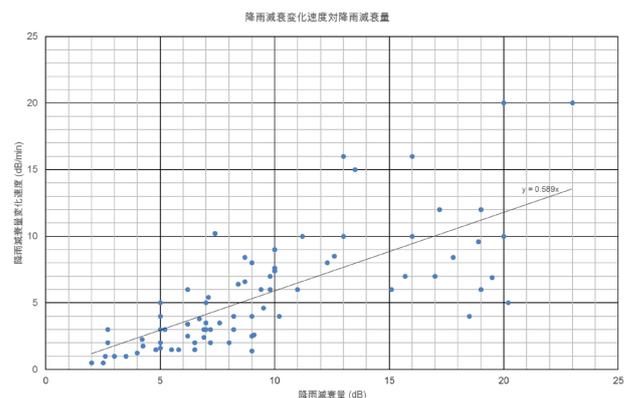


図 21 降雨減衰量変化速度対降雨減衰量 (鹿島)

雨」まで補償可能と思われる。

降雨時に回線設定諸元を変更し衛星回線を維持するための重要なパラメータの 1 つに制御応答速度がある。所要応答速度は回線マージン及び降雨時の減衰速度変化により決める必要がある。図 21 によると 25 dB の降雨減衰補償の制御はおおよそ 15 ~ 20 dB/min の降雨減衰変化速度に対応する必要がある。これは余裕を持って約 2 秒で 1 dB の降雨減衰補償制御が必要で

あることを示す。制御の方式にもよるが、対向局側の降雨に対処するためには少なくとも衛星パス1回分(片方向で約250～300 ms)以上の遅延も考慮する必要がある。

7 むすび

WINDS 再生系での降雨減衰補償実験結果を紹介し、Ka 帯での降雨減衰補償の有用性を検証した。併せて、Ka 帯降雨減衰特性測定の例及びその統計データを紹介した。これにより Ka 帯衛星通信での降雨による不稼働率低減のための通信方式切替アルゴリズム／衛星通信回線制御系応答速度を決める基礎データが収集できた。

【参考文献】

- 1 “3-2 通信システム,” “3-3 搭載再生交換機,” “3-4 マルチビームアンテナ,” “3-5 Ka 帯マルチポートアンブ,” “3-6 Ka 帯広域電子走査アンテナ,” “4-6 WINDS 再生中継交換回線用地球局の開発,” “5-1 再生交換中継回線用プロトコル,” “超高速インターネット衛星 (WINDS) 特集” 情報通信研究機構季報 vol. 53 no.4 2007 年 12 月
- 2 高橋 卓、西永 望、大川 真、川崎 和義、浅井 敏男, “Ka 帯における降雨減衰特性測定,” 電子情報通信ソサエティ大会 平成 21 年 9 月 18 日
- 3 Tomomi Suzuki, Toshio Higuchi, Shinichiro Takayama, Takafumi Horiuchi, Yuji Nakamura, and Masahiro Nakao, “Rain Fade Attenuation Compensation Function of WINDS Communication Systems,” 28th International Symposium on Space Technology and Science.
- 4 Toshio Asai, Ryutarō Suzuki, Takashi Takahashi, Mitsugu Ohkawa, and Akira Akaishi, “An Adaptive Satellite Communications System,” 28th International Symposium on Space Technology and Science.



片山典彦 (かたやま のりひこ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
研究員
博士(工学)
衛星通信、電波伝搬、ネットワーク



浅井敏男 (あさい としお)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
衛星通信システム



高橋 卓 (たかはし たかし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
副室長
衛星通信