

# 基地地球局評価実験

山本伸一 川崎和義

衛星通信実験及び衛星の電気的特性の測定のため、Ka帯フィーダリンク局及びS帯基準局を鹿島宇宙技術センターに設置した。地球局は、通信実験のために衛星に対し安定に信号を送受信する性能を有し、信号の電力及び周波数等を測定できる構成になっている。定期的に地球局の性能試験を実施し、構成する装置の電気的特性を把握し、経年変化等による特性の変化に対応した。実験期間中は実験に支障が出るような故障等の発生は無く、実験終了まで安定して動作した。

## 1 まえがき

技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)を用いた通信実験及び衛星の電気的特性等の測定のため、鹿島宇宙技術センター(茨城県鹿嶋市)にKa帯フィーダリンク局及びS帯基準局を設置した。

Ka帯フィーダリンク局はETS-Ⅷと地上間のフィーダリンクを形成し、様々な通信実験の中心的な役割を担っている。また、S帯基準局はETS-Ⅷと地上間のサービスリンクを形成し、パーソナル衛星通信実験の基準として用いている。

Ka帯フィーダリンク局は、搭載交換機を介した音声やデータ通信、パケット交換機を介した高速パケット通信の基地局として、さらにCDクラスの高品質な同報通信実験では移動体向けの信号を送出する地球局と

して実験に使用された。

ここでは、Ka帯フィーダリンク局及びS帯基準局の電気的特性について定期性能試験等の結果から評価を行う。また、Ka帯フィーダリンク局のアンテナ自動追尾機能及び自動周波数制御(AFC)機能について評価した結果を報告する。

## 2 地球局の構成

図1にKa帯フィーダリンク局、図2にS帯基準局の構成を示す。

Ka帯の実験に用いられる周波数帯はHigh-Band(送信:30.6356~30.63801GHz、受信:20.8328~20.8353GHz)とLow-Band(送信:30.5684~30.5709GHz、受信:20.7872~20.7897GHz)の2つの周波数帯域となって

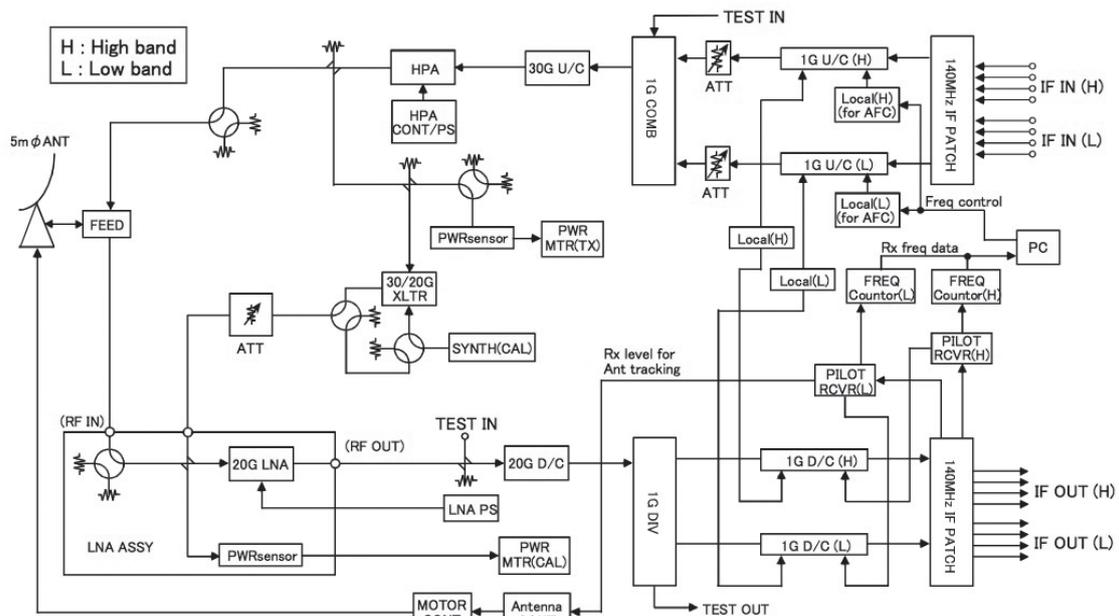


図1 Ka帯フィーダリンク局構成図

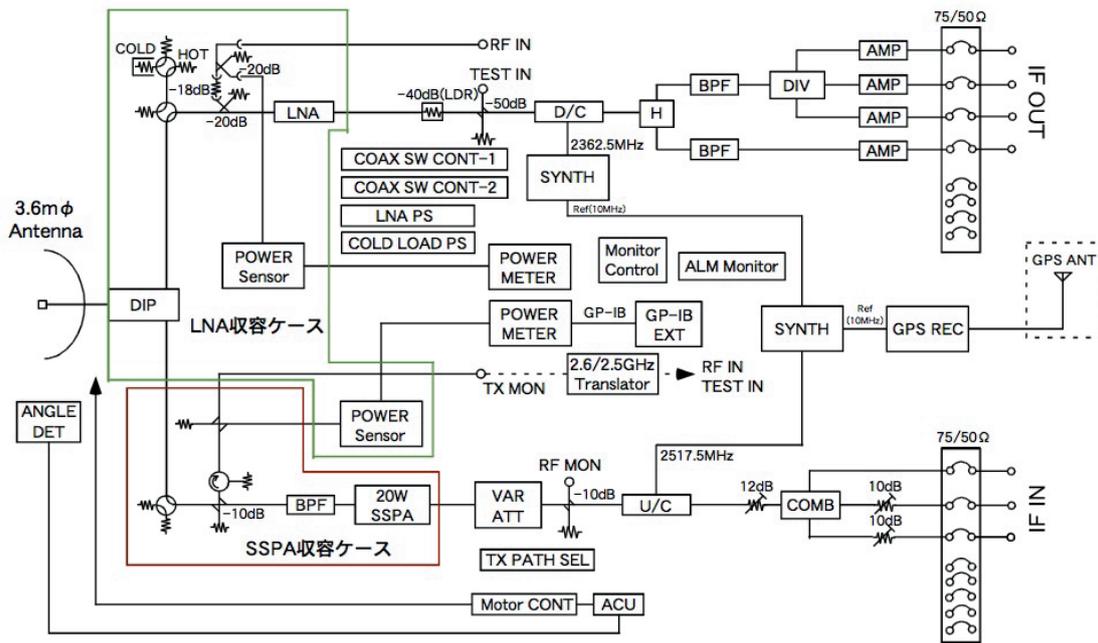


図2 S帯基局構成図

おり、構成図では High-Band を (H)、Low-Band を (L) と表している。

- HPA : 電力増幅器
- 20G LNA : 20GHz 帯低雑音増幅器
- 30G U/C : 30GHz 帯送信用周波数変換器 (アップコンバータ)
- 20G D/C : 20GHz 帯受信用周波数変換器 (ダウンコンバータ)
- 1G COMB.: 1GHz 帯信号合成器
- 1G DIV. : 1GHz 帯信号分配器
- 20W SSPA: 20W 固体電力増幅器
- LNA : 低雑音増幅器
- U/C : 送信用周波数変換器 (アップコンバータ)
- D/C : 受信用周波数変換器 (ダウンコンバータ)

それぞれの地球局を構成する主要な装置の諸元については、参考文献<sup>[12]</sup>に詳細に記載されているので、ここではアンテナ部の主要諸元のみ表1及び表2に示す。

### 3 評価結果

#### 3.1 Ka 帯フィーダリンク地球局

##### 3.1.1 送受信系レベルダイヤ

図3はKa帯フィーダリンク地球局の送受信系レベルダイヤである。レベルダイヤは設置時及び年1回行う性能試験時に取得した。設置時のレベルダイヤは設置作業後の地球局の電気的特性が正常であるか確認を行うために取得した。衛星打ち上げ後、実際に衛星に

信号を送受信してレベルダイヤを調整し、これを初期レベルダイヤとした。レベルダイヤは地球局を構成する各装置が正常に動作していること、衛星に対する送信及び受信信号レベルの測定値を評価するために用いる。

それぞれの測定値は地球局を構成する各装置の入出力端で測定した。ただし、アンテナの利得は製造時の検査結果の値を用いている。定期的に行った性能試験時にレベルダイヤに変動が見られたときは、初期レベルダイヤとなるように調整を行った。2011年の送信系レベルダイヤは、初期レベルダイヤに対して電力増幅器の出力が約4dB低くなっている。これは、現用の電力増幅器が2011年3月の大震災後に故障したことにより、予備機に交換したためである。通信実験では地球局の送信電力はパワーメータで測定した値を用いており、電力増幅器の利得の変更で実験に支障が無いことを確認している。受信系レベルダイヤは実験期間内で大きな変化は無かった。

Ka帯フィーダリンク局では送信信号の等価等方輻射電力 (Equivalent Isotropically Radiated Power: EIRP) 及び受信信号のアンテナ入力電力は図4によって求めた。

送信電力は、地球局のアンテナ系とのインターフェース点における信号の電力がパワーメータにより直読出来るように設定しており、EIRPはこのパワーメータで測定した値及びインターフェース点からの損失並びにアンテナ利得から計算で求めた。

衛星からの受信信号の電力は、図1の140MHz IF PATCHの出力端で測定した受信信号レベルから図3の受信系レベルダイヤを基にアンテナ入力電力を求め

表 1 Ka 帯フィーダリング局アンテナ部主要諸元

機械的性能		電気的性能		
項目	性能	性能		
		送信	受信	
アンテナ開口直径	5.0m (有効直径)	周波数帯域	30.56-30.68 GHz	20.78-20.84 GHz
アンテナ形式	カセグレン	偏波	右旋円偏波	左旋円偏波
マウント形式	AZ - EL	利得	62.1 dBi (給電部入力端)	59.1 dBi (給電部出力端)
駆動範囲	EL: 初期設定角度 $\pm 5^\circ$	雑音温度 (仰角 $45^\circ$ 晴天時)	-	57.4 K (給電部出力端)
	AZ: 初期設定角度 $\pm 10^\circ$	VSWR (給電部)	1.07 以下	1.04 以下
駆動速度 (公称値)	仰角 0.005°/s	サイドローブ特性	96.60%	99.50%
	方位角 0.007°/s	軸比	2.7dB 以下	2.3dB 以下
追尾精度 (20m/s 平均風速時)	0.002°rms (AZ, EL 共)	送受分離度	- 100 dB 以下	
鏡面精度	0.25mm rms (設置時)	G/T	-	35.8 dB/K
運用可能風速	平均 20m/s			
	瞬間最大 30m/s			
耐風速	瞬間最大 60m/s			

表 2 S 帯基準地球局アンテナ部主要諸元

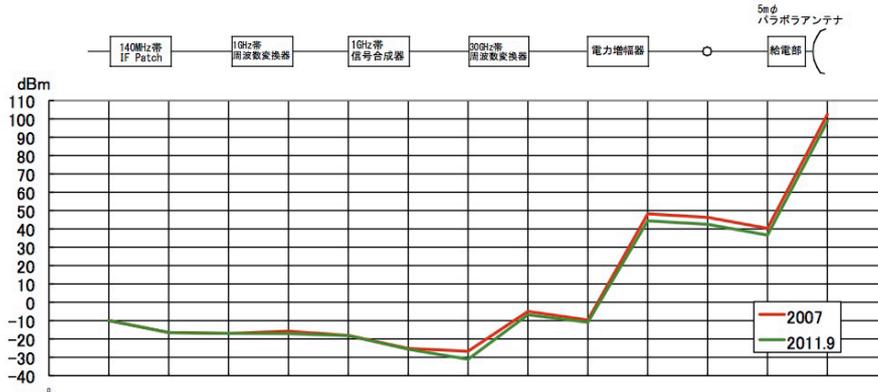
機械的性能		電気的性能		
項目	性能	性能		
		送信	受信	
アンテナ開口直径	3.6m (公称)	周波数帯域	2657.5MHz $\pm$ 2.5MHz	2520.0MHz $\pm$ 20MHz
アンテナ形式	パラボラ 一次放射器: クロスダイポール	偏波	左旋円偏波	
マウント形式	AZ-EL	利得	35.80 dBi (DIP 入力端)	34.54 dBi (LNA 入力端)
駆動範囲 (ソフトウェアリミット)	Elevation: $27.32^\circ \sim 62.47^\circ$	雑音温度 (LNA 入力端)	-	113.0 1K (仰角 $45^\circ$ )
	Azimuth: $155.85^\circ \sim 187.44^\circ$	VSWR	1.26 以下 (DIP 出力)	1.04 以下
駆動適度	Elevation: $0.24^\circ/s$	楕円偏波率	1.12 dB	0.82 dB
	Azimuth: $0.21^\circ/s$	送受信分離度	90 dB 以上	
運用可能風速	瞬間最大 30m/s	G/T	-	9.29 dBIK
耐風速	瞬間最大 60m/s			

ることが出来る。ただし、受信系の振幅周波数特性は地球局の仕様で一定の振幅の変動が許容されているため、測定する信号の周波数によってアンテナ入力電力の計算値に誤差が含まれる場合がある。衛星の電気性能試験で中継器の電気的特性を測定する等、正確な測定を行う必要がある場合は、図 4 (2) の低雑音増幅装置 (LNA ASSY) の低雑音増幅器の前に装備されたカップラに衛星からの受信信号と同等の強度となる信号をキャリブレーション用信号入力端子 (CAL IN) から信号発生器等 (SG) で入力し、その入力電力から低雑音増幅装置の入力端 (RF IN) の電力を求め、受信アンテナ利得を差し引くことで正確なアンテナ入力電力を求める。

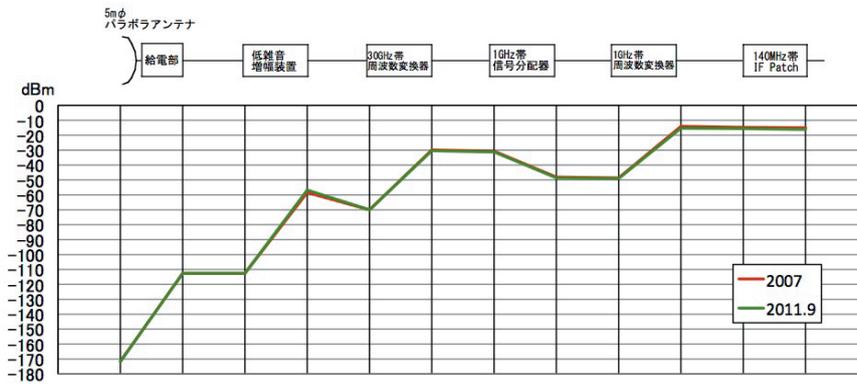
表 3 は衛星から送信される Ka 帯のビーコン信号を受信したとき、140MHz IF PATCH の出力端で測定した受信信号レベルから図 3 の受信系レベルダイヤを用いて衛星の送信 EIRP を求めた結果である。

受信系のアンテナ利得を含めた 140MHz IF PATCH 出力端までの利得は Low-band が 137.0dB、High-band が 137.4dB、伝搬損失は自由空間伝搬損失の計算から Low-band が 210.21dB、High-band が 210.23dB、晴天時の大気損失を 0.39dB (ITU,1994 a、ITU,1994 b の近似式から) とした。計算により、それぞれのビーコン信号の衛星の送信 EIRP (鹿島方向の) は Low-band が +60.89dBm、High-band が +60.61dBm と求められる。打ち上げ前の衛星のプロトフライト試験の結果<sup>3)</sup> から Ka 帯ビーコン信号の送信 EIRP はアンテナ利得を鹿島方向の値とした場合、Low-band ビーコン及び High-band ビーコン共に標準値は 61.8dBm となっており、受信レベルから求めた衛星 EIRP は標準値より約 1dB 低い値となったが、地球局の振幅周波数特性、軌道上のアンテナ指向誤差及び伝搬路の損失の計算値の誤差等を考えると良く合う結果が得られた。この様に、受信系レベルダイヤを正しく把握することで、Ka 帯の

### 3 移動体衛星通信システム実験



(1) 送信系レベルダイヤ



(2) 受信系レベルダイヤ

図3 Ka帯フィーダリンク局レベルダイヤ

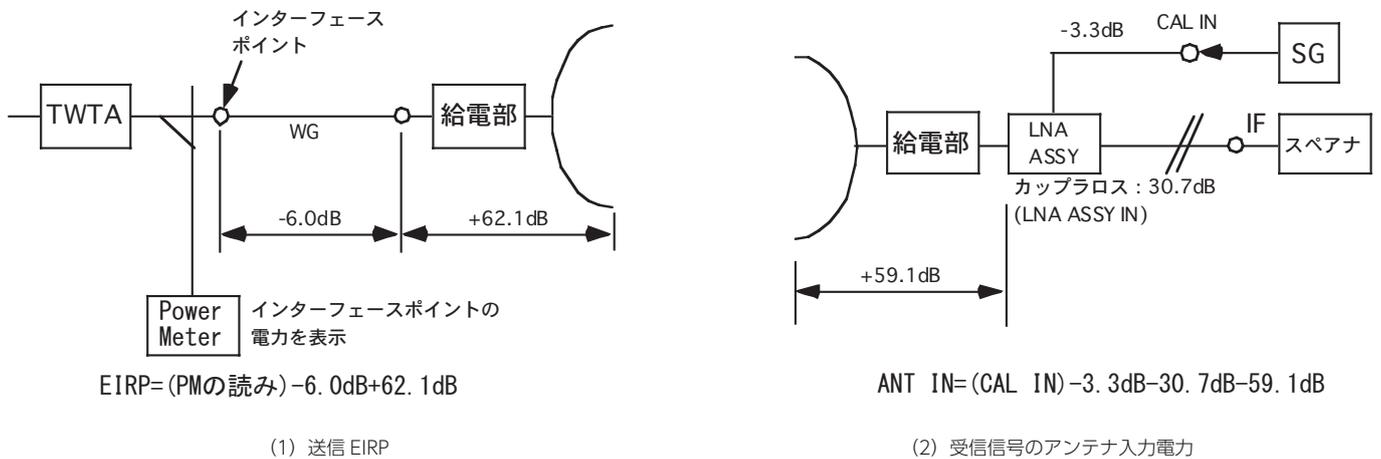


図4 Ka帯フィーダリンク局の送受信電力測定

表3 Ka帯ビーコン信号の衛星送信 EIRP の測定

	IF 信号 レベル (dBm)	アンテナ 入力電力 (dBm)	大気 の損失 (dB)	伝搬 損失 (dB)	衛星 EIRP (dBm)
Low-Band	- 12.9	- 149.9	0.39	210.21	60.70
High-Band	- 12.8	- 150.2	0.39	210.23	60.42

衛星送信 EIRP を 1dB 程度の誤差で求められることが分かる。

### 3.1.2 アンテナ自動追尾機能及び自動周波数調整機能

Ka 帯フィーダリンク局は、衛星からのビーコン信号を受信することで、5mφ パラボラアンテナの自動追尾及び自動周波数制御 (Automatic Frequency Control: AFC) を行う。

自動追尾の方式はステップトラック方式を用いており、1 ステップの実測値はアジマスが 0.0140deg、エレベーションが 0.0110deg である。

表 4 に性能確認時に測定したアンテナの追尾精度について示す。追尾精度はアンテナのビーム中心が衛星方向に向けられてから約 30 分間ステップトラックの軌跡を記録し、その間にステップトラックでアンテナが動いた角度とその角度に含まれるステップ毎の度数から計算で求める。また、総合追尾精度はアジマスとエレベーションの追尾精度から計算で求める。

2011 年 9 月に行った性能試験では追尾精度が以前の測定値より悪くなっている。これは 2011 年 3 月に発生した東日本大震災による被害と思われる。震災後に被害調査を実施したところ、アジマスのレールの水平が東側に数 mm 低くなっていることが確認された。また、通常の実験時のアンテナの駆動範囲内において電動で正常に回転することは確認できたが、角度によってフリクショントルクが規格外になっており、アンテナの動きに支障を与えていると考えられる。なお、震災以前の性能確認時では測定結果に大きな違いは無かった。

5mφ パラボラアンテナの電力半値幅は約 0.15deg

表 4 追尾精度測定結果

測定年月	アジマス (deg rms)	エレベーション (deg rms)	総合追尾精度 (deg rms)
2009.3	0.01484	0.01166	0.01887
2010.3	0.01345	0.00993	0.01671
2011.9	0.0352	0.0269	0.0443

であり、震災後の総合追尾精度は概ねその 1/3 程度となっているが、実験に大きな支障は無かった。

図 5 はアンテナを自動追尾させたときの Ka 帯ビーコン信号のレベルを IF で測定し、約 1 時間分をプロットしたものである。自動追尾は間欠的に行っており、1 回の自動追尾の動作が終了してから次の動作が開始されるまでの時間を設定できる。図 5 は 20 分に設定したときのものである。この設定でのレベル変動の大きさは、ビーコン信号のダウンリンクのみで約 0.5dB 程度となっている。5mφ パラボラアンテナから Ka 帯アップリンク信号を送信すると、アップリンクでも同様の変動が発生するため、Ka 帯の衛星折り返しでは送受信を合わせた変動が発生する。

自動追尾を動作させる時間間隔は任意の時間で設定可能であり、送受信レベルの変動を実験内容により支障が出ないように設定した。

受信部の AFC 機能は、衛星の送信周波数の変動及び衛星の動きによるドップラシフトによる受信信号の周波数変動を自動的に補償する機能である。

Ka 帯では中継器の周波数変換に用いるローカル信号の周波数変動及び衛星の動きによるドップラシフトによる周波数変動が大きくなるため、重要な機能である。図 6 に Ka 帯フィーダリンク局の受信 AFC の構成を示す。

受信した Ka 帯ビーコン信号の IF 出力をパイロット受信装置に入力し、IF (140MHz 帯) においてビーコン信号の公称値の受信周波数と比較し、誤差情報を 1GHz 帯周波数変換器に内蔵されているローカル信号発生器 (PLO) への基準信号 (10MHz) に重畳して受信周波数を制御する構成である。

ビーコン信号は、High-Band (H) と Low-Band (L) に 1 波ずつあり、パイロット信号受信装置もそれぞれに 1 台ずつ装備されている。

AFC はパイロット信号受信装置に入力されたビーコン信号の周波数とビーコン信号の公称値の周波数と

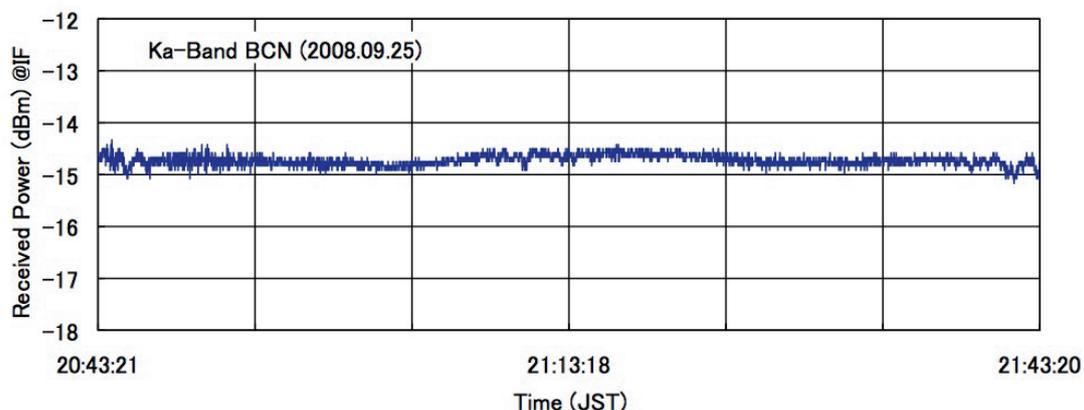


図 5 自動追尾時の Ka 帯ビーコン信号のレベル変動

### 3 移動体衛星通信システム実験

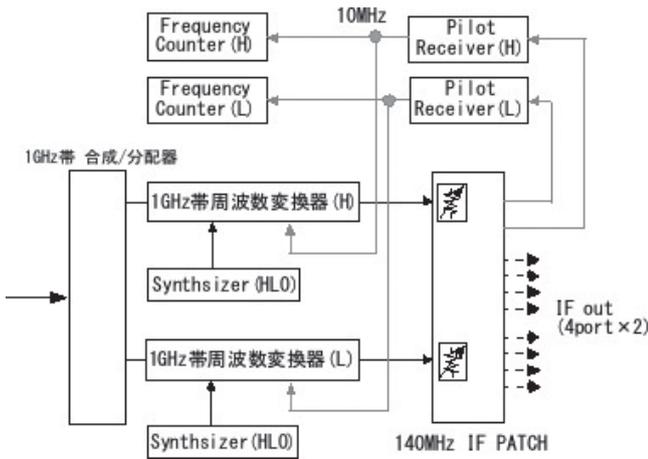
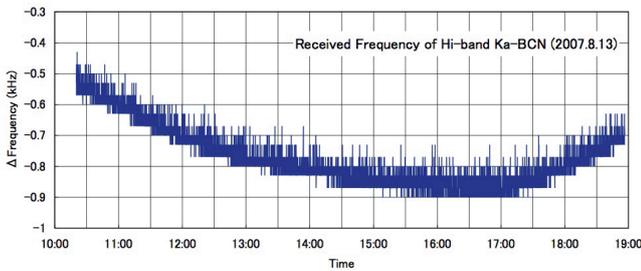


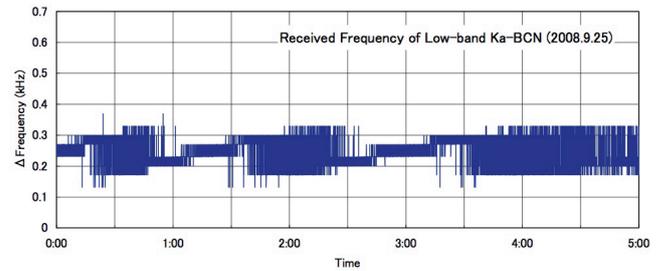
図6 受信AFC構成図

の差を検出し、周波数のズレを補償するように1GHz周波数変換器に内蔵された発振器の周波数を制御している。制御ステップ幅は実測値で117.64Hzである。

図7(1)はAFCを行わなかった場合のビーコン信号の受信結果、(2)はAFCによる制御を行った場合の受信結果である。(1)から、受信されたビーコンの信号の周波数はノミナル周波数に対して約-500Hzから-900Hzの周波数変化を観測しているが、(2)では制御ステップ幅の範囲に周波数変動を制御できることが分かる。周波数の測定にはスペクトラムアナライザのマーカピーク機能を用いたため、また、周波数分解能の設定により、測定結果に誤差を含む。

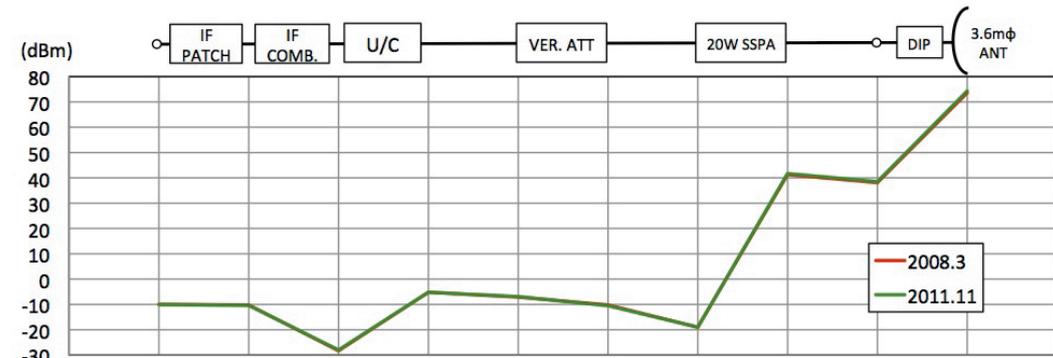


(1) AFC OFF 時

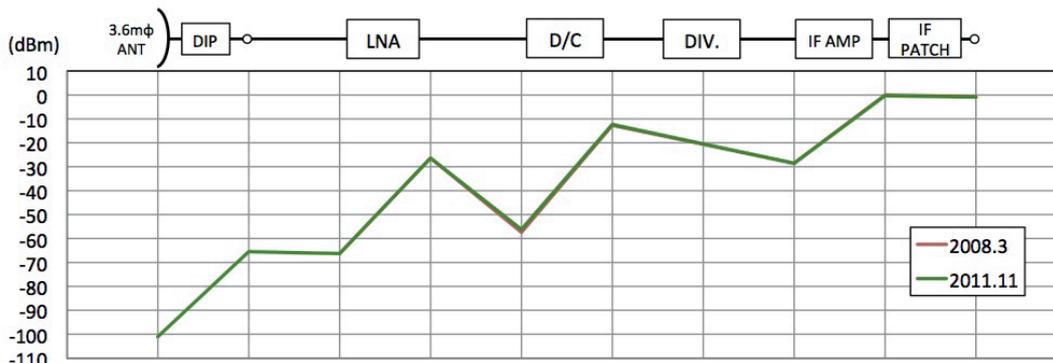


(2) AFC ON 時

図7 AFC OFF 及び ON 時のビーコン信号の受信結果



(1) 送信系レベルダイア



(2) 受信系レベルダイア

図8 S帯基準局レベルダイア

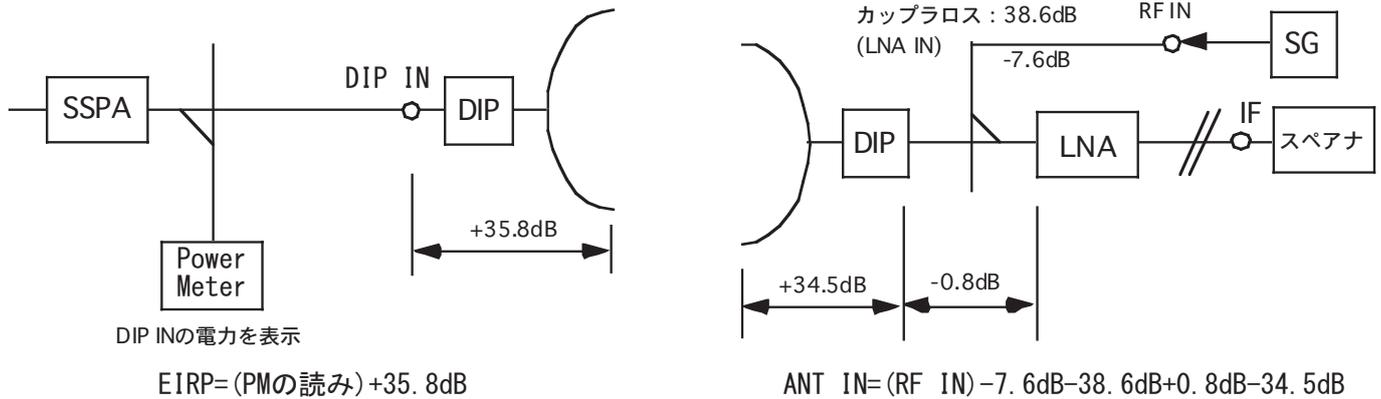


図9 S帯基準局の送受信電力測定

### 3.2 S帯基準局

図8はS帯基準局の送受信系レベルダイヤである。レベルダイヤはKa帯フィーダリンク局と同様に設置時及び年1回行った定期性能試験時に取得した。レベルダイヤは地球局を構成する各装置が正常に動作していることの確認、衛星に対する送信及び受信信号レベルの測定値を評価するために用いる。

衛星打ち上げ後、実際に衛星に信号を送受信してレベルダイヤを調整し、これを初期レベルダイヤとした。S帯基準局は、衛星の大型展開アンテナが使用できなくなることを想定した設計となっており、実際に打ち上げ後に受信用大型展開アンテナが使用できなくなったことで、それに合わせたレベルダイヤに調整を行った。

それぞれの測定値は地球局を構成する各装置の入出力端で測定した。ただし、アンテナの利得は製造時の検査結果の値を用いている。定期性能試験時にレベルダイヤに変動が見られたときは、初期レベルダイヤとなるように調整を行った。実験を行った期間において送信系及び受信系共に大きなレベルの変化は無かった。

S帯基準局の送信信号の等価等方輻射電力 (EIRP) 及び受信信号のアンテナ入力電力を図9によって求めた。

送信電力は、図9(1)に示す地球局のアンテナ系と地球局のインターフェース点であるDIP INにおける信号の電力をパワーメータにより直読出来るように設定した。EIRPはこのパワーメータで測定した値及びインターフェース点からの損失とアンテナ利得から計算で求めた。

衛星からの受信信号の電力は、図2に示す地球局の構成図に示すIF信号出力端(IF OUT)で測定した受信信号レベルから図8の受信系レベルダイヤを用いてアンテナ入力電力を求めることができる。ただし、Ka帯フィーダリンク局と同様に受信系の振幅周波数特性は地球局の仕様で一定の振幅の変動が許容されている

ため、測定する信号の周波数によってアンテナ入力電力の計算値に誤差が含まれる場合がある。衛星の性能試験で中継器の電気的特性を測定する等、正確な測定を行う必要がある場合は図9(2)に示す低雑音増幅器(LNA)の前に装備されたカプラに衛星からの受信信号と同等の強度となる信号をキャリアレーション用信号入力端子(RF IN)から信号発生器等(SG)で入力し、その入力電力からアンテナ入力電力を計算で求めた。

S帯基準局はアンテナの電力半値幅が数度と広く、また、周波数が低いためドップラシフト等による受信信号の周波数変動も小さいことからアンテナの自動追尾機能及びAFC機能は装備されていない。

## 4 むすび

ETS-VIIIは2006年12月に打ち上げられ、2012年12月に実験を終了するまで、多くの通信実験を行った。ここで報告したKa帯フィーダリンク局及びS帯基準局は、常に実験の中心を担ってきた。

実験期間中の定期的な性能試験の実施により、地球局を構成する装置の動作状況を把握し、通信実験を最後まで遂行することができ、また、レベルダイヤを把握することで実験時の信号レベルから装置の動作不良等も早期に発見することができ、実験に大きな支障を与えることも無かった。さらに、2011年3月の東日本大震災では茨城県鹿嶋市でも大きな揺れを観測したが、最も大きな構造物である5mφパラボラアンテナへの被害は小さく、また、地球局にも実験に支障となる大きな損傷は無く、その後も実験を継続して実施できたことは非常に幸運であった。

## 謝辞

地球局の運用にあたり、ご協力を頂いた関係者の

### 3 移動体衛星通信システム実験

方々に感謝します。

#### 【参考文献】

- 1 山本伸一, 小原徳昭, 大橋一, “Ka帯フィーダリンク局,”通信総合研究所季報, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 113-120, Sept./Dec. 2003.
- 2 山本伸一, 小原徳昭, 山崎一郎, “移動体通信実験用S帯基準局,”通信総合研究所季報, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 121-128, Sept./Dec. 2003.
- 3 高畑博樹, 浜真一, “搭載用Ka帯フィーダリンク装置,”通信総合研究所季報, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 33-41, Sept./Dec. 2003.



**山本伸一** (やまもと しんいち)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員  
移動体衛星通信



**川崎和義** (かわさき かずよし)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員  
衛星通信