

「マイクロ波雑学」

2024 JA10GZ 金子明

マイクロ波雑学

項目だけ覚えておいてください。必要に応じて調べてください。

- ▶ マイクロワットメータ
- ▶ パラボラアンテナの f/D 比とは
- ▶ 適切なフィードホーンは
- ▶ リターンロス
- ▶ 電波伝搬
- ▶ コネクタ
- ▶ ケーブル
- ▶ 受信感度
- ▶ アンテナの方位

簡易電力計（マイクロワットメータ）

JA1ATI逸見OM HJ97参照

クリスタルデテクターにオペアンプ使用
中古のアナログパワー計 HP435B,432A
のメータを利用

-45dBm~-20dBm測定

+30dBATT 10dBm=10mWが測定可能

+50dBATT 1 W

使用目的

- ▶ パワー測定、LNAやアンプの調整
- ▶ フィードの放射パターンの測定
- ▶ 標準ANTと比較しアンテナの利得測定



マイクロワットメータ

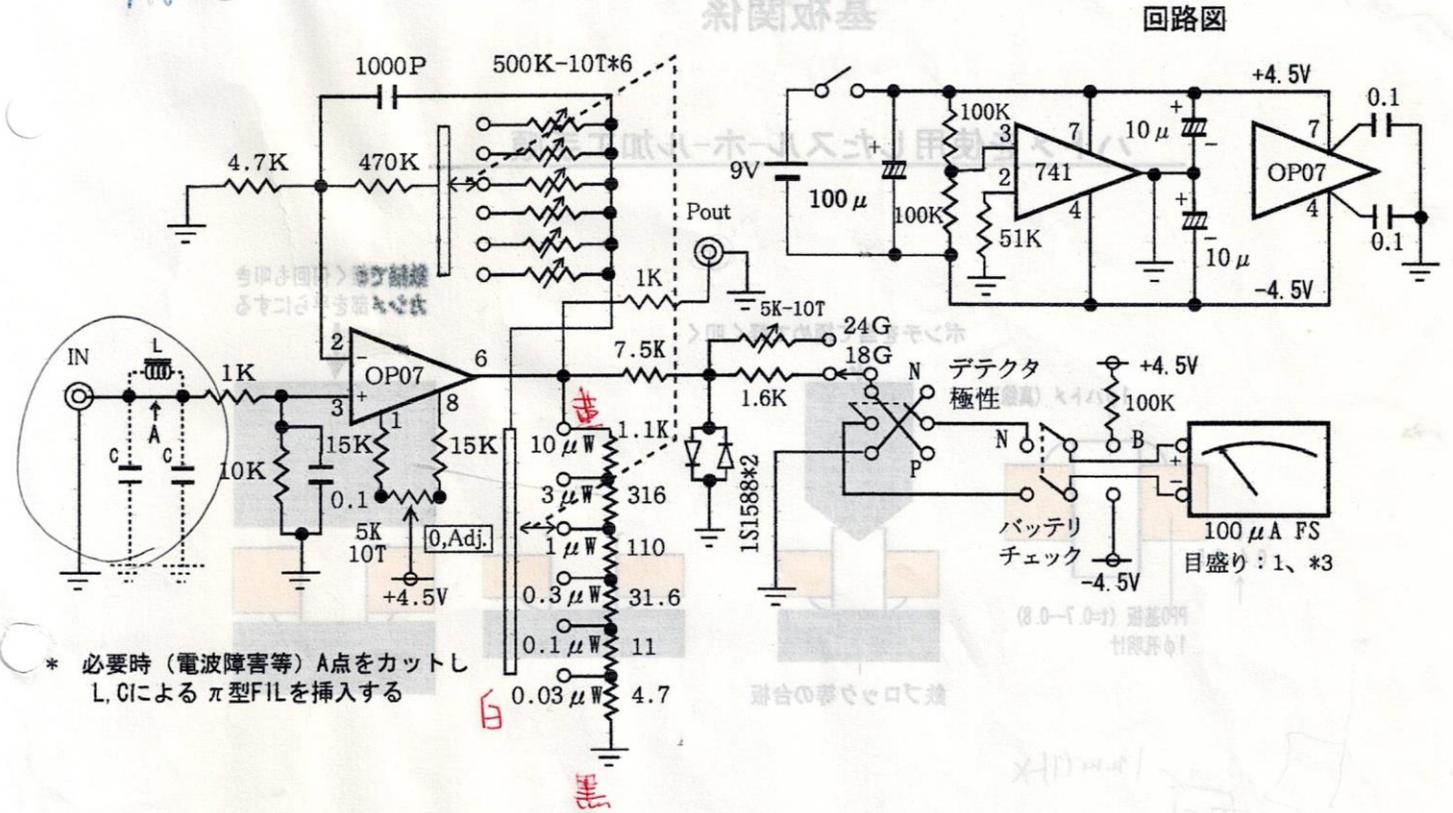
ローバリアー・ショットキー・ダイオード・ディテクター

- 8471D 100kHz-2GHz
- 8472B 10MHz-18GHz
- 8473B //



1N25

逸見式ナノワットメータ



メータはHPのアナログパワーメータを
調達。多回転Pot.の調整は10GHzのSG
にて調整

マイクロワット メータと放射角 度計

フィードホーンの-10dB
幅の角度を測定

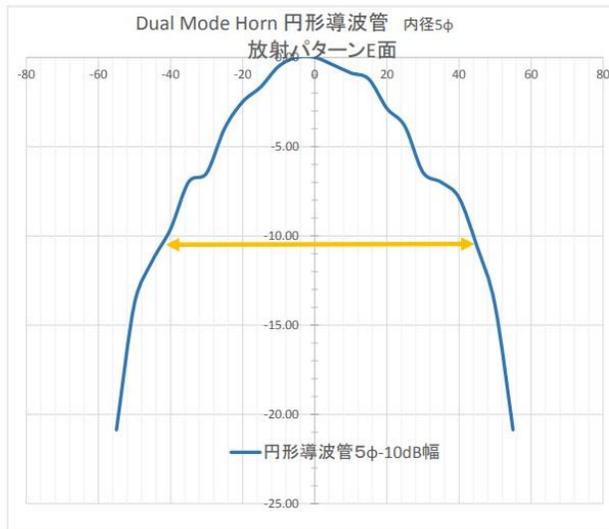


47GHz Dual Mode Horn

2019/04/12 JA10GZ金子

42.4/42.7=85.1度

度数	円形導波管5φ-10dB幅 [V]	円形導波管5φ-10dB幅 [dB]
60		
55	0.009	-20.87
50	0.045	-13.88
45	0.096	-10.59
40	0.18	-7.86
35	0.22	-6.99
30	0.25	-6.43
25	0.452	-3.86
20	0.57	-2.85
15	0.83	-1.22
10	0.9	-0.87
5	1	-0.41
0	1.1	0.00
-5	1.1	0.00
-10	0.98	-0.50
-15	0.75	-1.66
-20	0.62	-2.49
-25	0.44	-3.98
-30	0.247	-6.48
-35	0.22	-6.99
-40	0.12	-9.62
-45	0.08	-11.38
-50	0.046	-13.78
-55	0.009	-20.87
-60		



2022/05/29

パラボラアンテナに適切な放射器は？

左のパラボラアンテナのf/D比は
直径Dと深さCがわかれば算出できる。

$$f = D^2 \div 16C$$

f : 焦点 C : 深さ
D : パラボラの直径

f/D比0.4のフィードは中心より左右に $\theta : 64^\circ$ の角度に
開いている。パラボラ面のエッジで-10dB下がった角度
のフィードホーンが良いとされている。

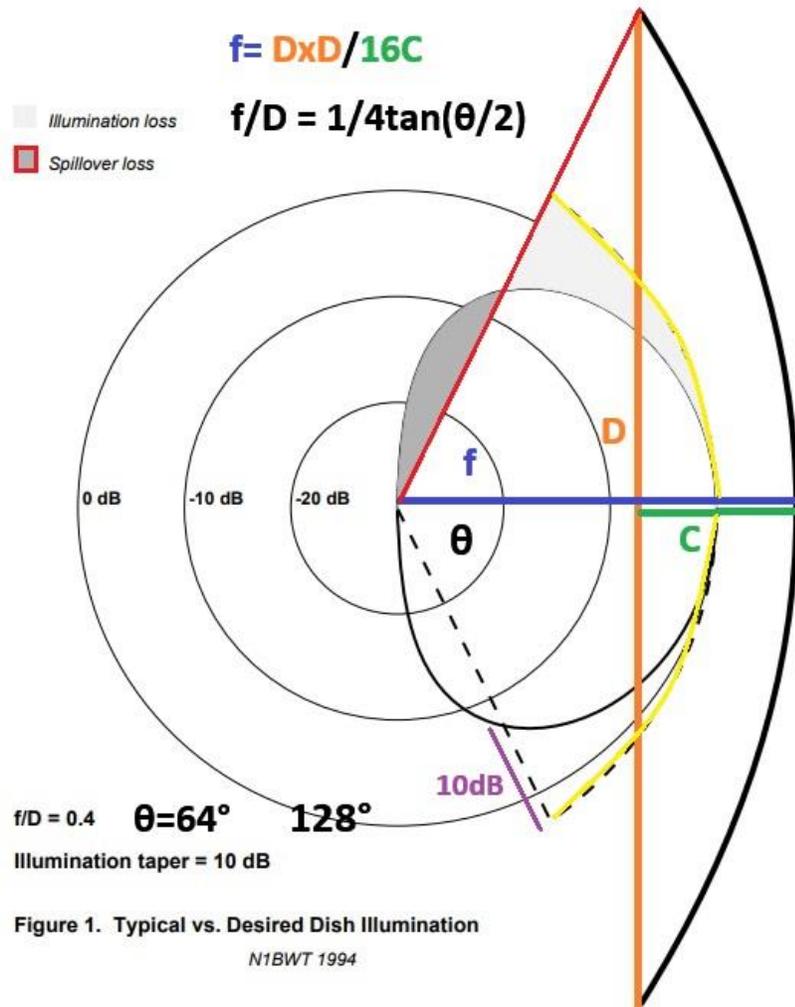
適切な一次放射器は

W1GHZの資料が良い

[c6_3 \(w1ghz.org\)](http://c6_3.w1ghz.org)

各種のフィードホーンの得失について JA1EPK 大日方 悟朗

[untitled \(jh0yqp.org\)](http://untitled.jh0yqp.org)



パラボラアンテナに適切なフィードは？

<u>FEED</u>	<u>Best f/D</u>	<u>Section</u>	
Backfire Helix		6.6	
Backward feeds	—	6.7.2	
Cassegrain		6.10	
Chaparral	0.3 - 0.45	6.3.4	
Circular waveguide rear feed	0.3 - 0.4	6.7.4	
Clavin	0.3 - 0.4	6.7.1, 6.7.2	
Coffee-can	0.25 - 0.4	6.3.1	多くをカバー
Conical horn	≥ 0.4	6.4.2	
Corrugated horn	≥ 0.4	6.4.3	オフセット
Cylindrical horn	0.25 - 0.4	6.3.1	
Diagonal horn	≥ 0.3	6.5.3	
Diffraction Loss	—	6.7.3	
DC3QS	0.25 - 0.3	6.7.2	
DK2RV	0.3 - 0.4	6.7.4	
Dual-mode horn (W2IMU)	0.5 - 0.8	6.5.1	オフセット
Dipole	0.25 - 0.35	6.2.1	
EIA	0.4 - 0.6	6.2.2	
G4ALN (Penny)	0.25 - 0.3	6.7.2	
Handlebar	0.3 - 0.5	6.2.2	
Helix		6.6	
Indirect rear feed	—	6.7.2, 6.7.4	
KF4JU	0.35 - 0.5	6.2	
Koch		6.8	
Kumar	0.3 - 0.45	6.3.3	
Loop	0.35 - 0.5	6.2.3	
Love (diagonal horn)	≥ 0.3	6.5.3	
NBS (see EIA)	0.4 - 0.6	6.2.2	
Penny (G4ALN)	0.25 - 0.3	6.7.2	深いお皿
Pillbox	-0.3	6.7.2	
Potter		6.5.2	
Procom	-0.3	6.7.2	
Pyramidal horn	≥ 0.45	6.4.1	
Rear feeds	—	6.7.2	
Rectangular horn	≥ 0.45	6.4.1	オフセット
RSGB	—	6.7.2, 6.7.4	
Scalar		6.8	

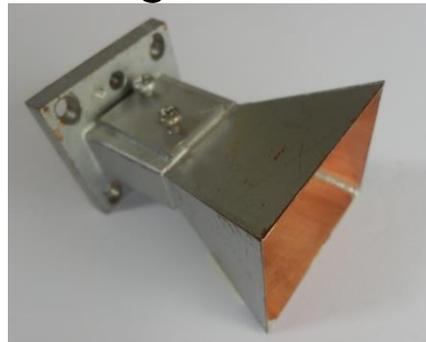
Coffee-can お猪口



Corrugated horn 波板

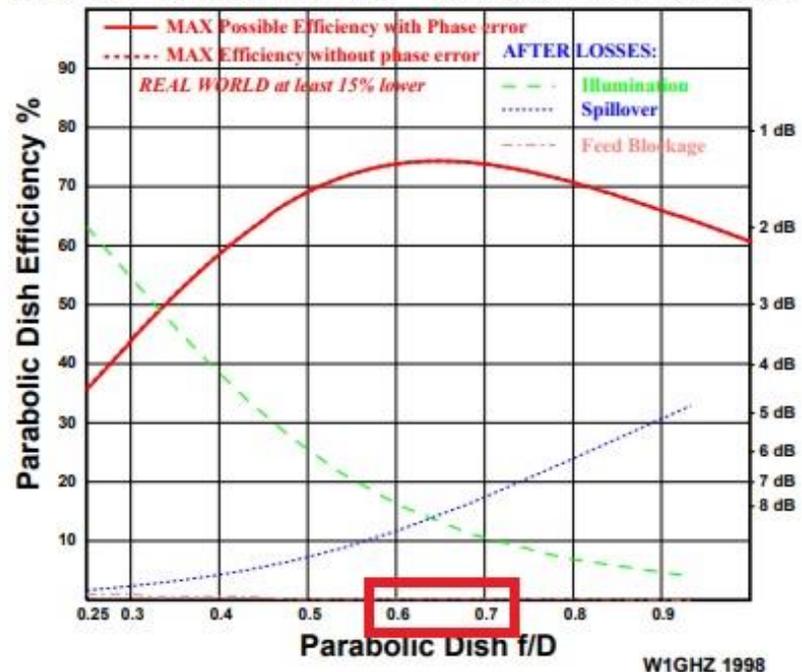
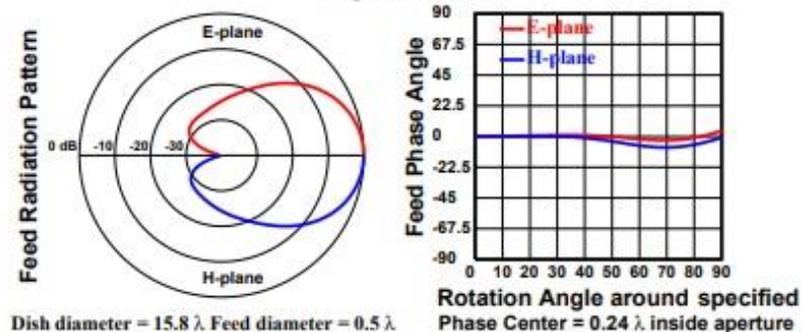


Rectangular horn 角錐



RCA DSS corrugated horn, 1.95" aperture, 58 deg flare, by P.O.

Figure 6.4-18



方向性結合器を使ったリターンロスの測定



10.45GHz発振器に方向性結合器を反射側に接続し出力側をオープンとする。その時の反射電力は0dBmを指示



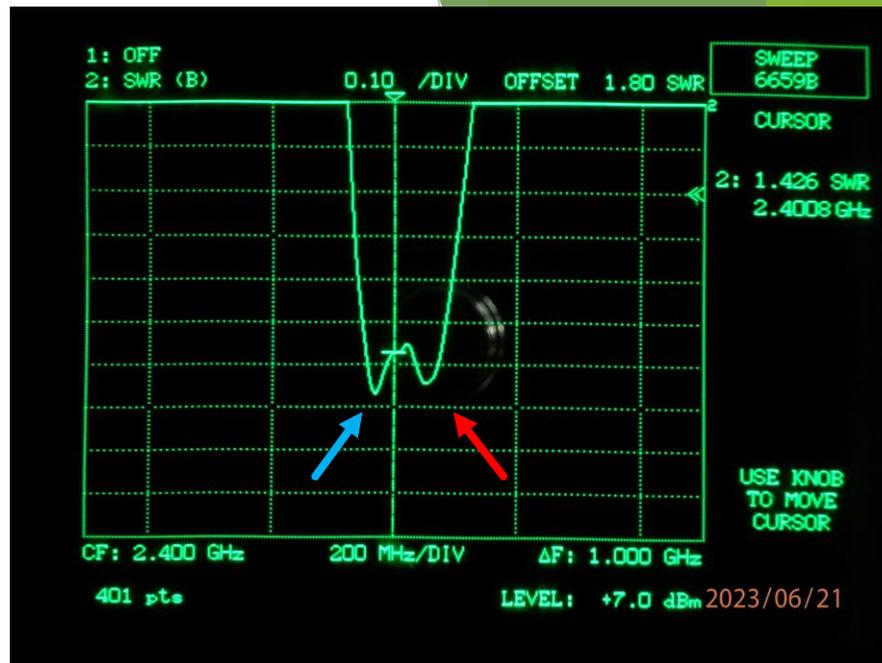
方向性結合器 -10dB



方向性結合器に50ΩATTを接続して、方向性 (Directivity) が30dB以上取れていることを確認後に10GHzコルゲートホーンを接続。パワーメータレンジ-20dBにさらに-6dB
-26dBのリターンロスである。(SWR1.1)



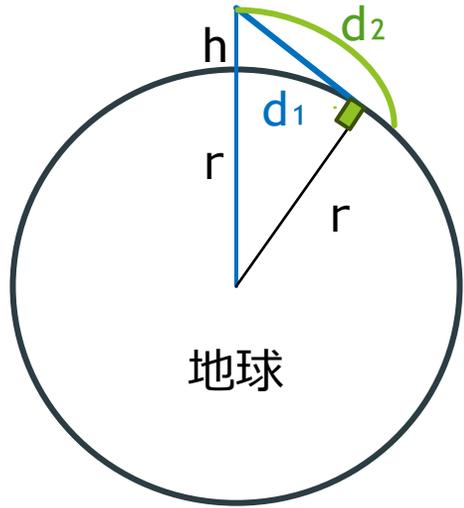
QO-100用 2.4GHz/10.4GHz



パッチアンテナの円偏波調整はカットあり (赤色) と無し (青色) の同調周波数が異なることが必要

電波はどこまで届くか、水平線の見える距離 d_1

海岸で子供が見た水平線までのおおよその距離は？



h の高さから見える光学的な距離は

$$d_1[\text{km}] = 3.6\sqrt{h[\text{m}]}$$

電波の場合は地表面近くでの屈折によって地球に沿って光よりも20%程度距離 d_1 が伸びる。

$$d_2[\text{km}] = 4.2(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})[\text{m}]$$

h : 1000m+0m 133km

h : 2000m+0m 188km

h : 2000+1000m 321km 須走 + 八溝山

(実距離 : 215km)

$$r^2 + d_1^2 = (r+h)^2$$
$$r^2 + d_1^2 = r^2 + h^2 + 2hr$$

$$d_1 = \sqrt{h^2 + 2hr}$$

地球の半径

r : 6380,000m

マイクロ波の電波伝搬損失 (1)

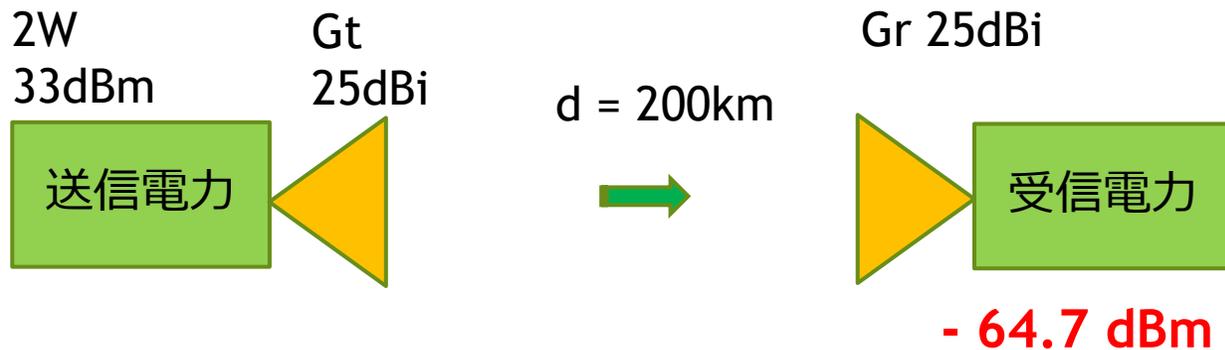
自由空間伝搬損失をデシベルで表現すると

$$L = 32.44 + 20\log(f \text{ [MHz]}) + 20\log(d \text{ [km]})$$

例 : $f=5.76\text{GHz}$, $d=200\text{km}$ $L= 32.44 + 75.21 + 46.02$

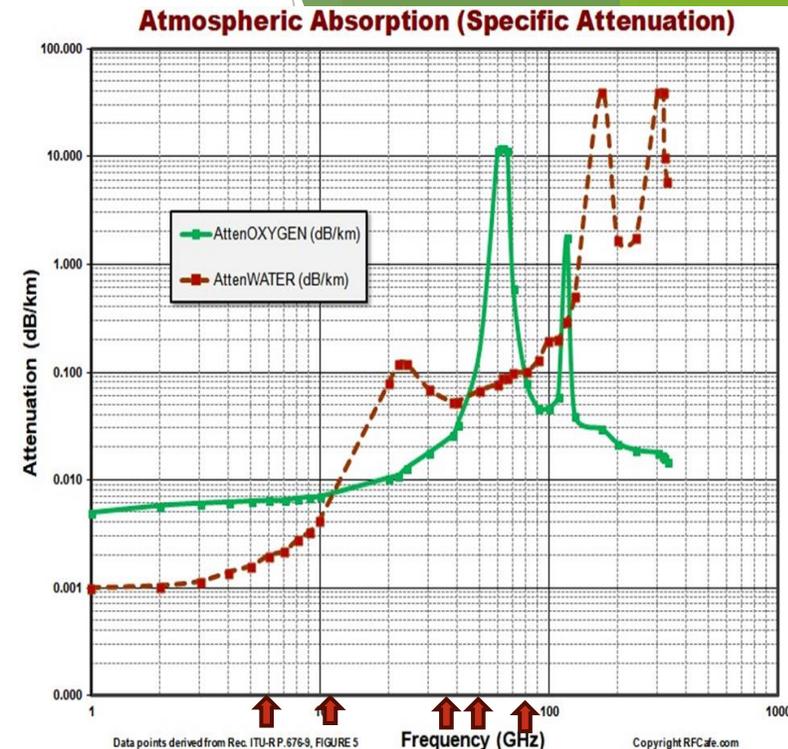
$L= 153.7 \text{ [dB]}$

EIRP = 58dBm 640W



受信電力 = 33[dBm] + 25[dBi] - 153.7 [dB] + 25 [dBi] = - 64.7 [dBm]

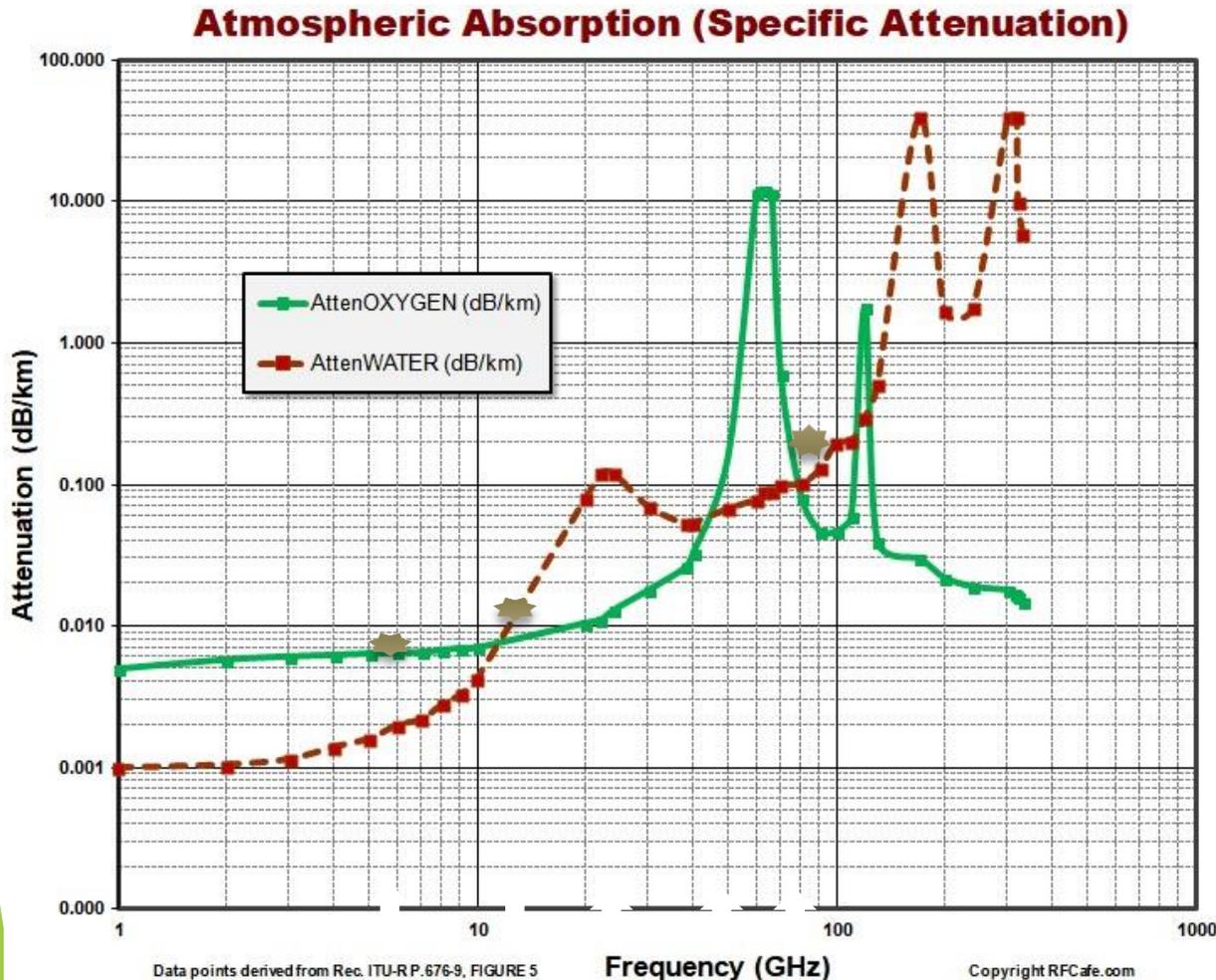
注 酸素 + 湿度 + 雨粒による損失が加味されます。



Freq. [GHz]	Rain rate [mm/h]		
	1	3	10
1	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.02
8	0.00	0.02	0.10
<u>12</u>	<u>0.02</u>	<u>0.07</u>	<u>0.31</u>
25	0.12	0.40	1.42
40	0.35	0.98	3.05
60	0.70	1.75	4.72
80	0.96	2.23	5.65

マイクロ波の電波伝搬損失 (2)

1 気圧 (1013 hPa) , 気温 15°C, 絶対湿度は 7.5 g/m³
 相対湿度約59%



前頁では基本的な損失のモデルとして自由空間損失を扱いましたが、**酸素と湿度**の影響を受けます。

5.76GHz 200km Free Space Loss : - 153.6dB

酸素による損失 0.008dB/km

$$200\text{km} \times 0.008 = - 1.6\text{dB}$$

更に雨量による損失や気象変化にも影響されます。

Total = Free Space Path Loss + Oxygen + WaterVapor + Rain

Rain rate 3[mm/h]水たまり
 ができる程度 5GHz殆ど
 減衰がないが12GHzになると
 0.07dB/kmとなる。

損失は200kmでは14dB

Freq. [GHz]	Rain rate [mm/h]		
	1	3	10
1	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
5	0.00	<u>0.00</u>	0.02
8	0.00	0.02	0.10
12	0.02	<u>0.07</u>	0.31
25	0.12	0.40	1.42
40	0.35	0.98	3.05
60	0.70	1.75	4.72
80	0.96	2.23	5.65

マイクロ波電波伝搬リンクマージン

ここでは、ANTの向き、偏波、空気中の酸素、降雨による減衰など伝搬路に関する損失を仮定し計算に取り入れています。受信側では、ANTの向き、システムノイズ、受信帯域幅によるノイズ上昇を加味し、受信時のFMの音声として必要なS/Nを18dBとしております。結果、受信帯域幅による効果を記載しました。

5.7GHz d= 200km		
TX FM 2W, 35cm Dish => RX 35cm Dish FIL 15kHz		
Parameter:	Value:	Units:
Spacecraft:		
Spacecraft Transmitter Power Output:	2.0 watts	
In dBW:	3.0	dBW
In dBm:	33.0	dBm
Spacecraft Total Transmission Line Losses:	1.0 dB	
Spacecraft Antenna Gain:	25.0 dBi	
Spacecraft EIRP: 500W	27.0	dBW
Downlink Path:		
Spacecraft Antenna Pointing Loss:	3.0 dB	
S/C-to-Ground Antenna Polarization Loss:	0.0 dB	
Path Loss:	153.7 dB	
Atmospheric Loss:	2 dB	
Ionospheric Loss:	0.0 dB	
Rain Loss:	0.0 dB	
Isotropic Signal Level at Ground Station:	-131.7	dBW
Ground Station Alternative Signal Analysis Method (SNR Computation):		
----- SNR Method -----		
Ground Station Antenna Pointing Loss:	3.0 dB	
Ground Station Antenna Gain:	25.0 dBi	
Ground Station Total Transmission Line Losses:	1.0 dB	
Ground Station Effective Noise Temperature:	300 K	
Ground Station Figure of Merit (G/T):	-0.8 dB/K	
Signal Power at Ground Station LNA Input:	-110.7	dBW
Ground Station Receiver Bandwidth (B):	15,000	Hz
G.S. Receiver Noise Power (Pn = kTB)	-162.1	dBW
Signal-to-Noise Power Ratio at G.S. Rcvr:	51.4	dB
Analog or Digital System Required S/N:	18.0	dB
System Link Margin	33.4	dB

5.7GHz d= 200km		
TX FM 2W, 35cm Dish => RX 35cm Dish FIL 7kHz		
Parameter:	Value:	Units:
Spacecraft:		
Spacecraft Transmitter Power Output:	0.0 watts	
In dBW:	3.0	dBW
In dBm:	33.0	dBm
Spacecraft Total Transmission Line Losses:	1.0 dB	
Spacecraft Antenna Gain:	25.0 dBi	
Spacecraft EIRP: 500W	27.0	dBW
Downlink Path:		
Spacecraft Antenna Pointing Loss:	3.0 dB	
S/C-to-Ground Antenna Polarization Loss:	0.0 dB	
Path Loss:	153.7 dB	
Atmospheric Loss:	2 dB	
Ionospheric Loss:	0.0 dB	
Rain Loss:	0.0 dB	
Isotropic Signal Level at Ground Station:	-131.7	dBW
Ground Station Alternative Signal Analysis Method (SNR Computation):		
----- SNR Method -----		
Ground Station Antenna Pointing Loss:	3.0 dB	
Ground Station Antenna Gain:	25.0 dBi	
Ground Station Total Transmission Line Losses:	1.0 dB	
Ground Station Effective Noise Temperature:	300 K	
Ground Station Figure of Merit (G/T):	-0.8 dB/K	
Signal Power at Ground Station LNA Input:	-110.7	dBW
Ground Station Receiver Bandwidth (B):	7,000	Hz
G.S. Receiver Noise Power (Pn = kTB)	-165.4	dBW
Signal-to-Noise Power Ratio at G.S. Rcvr:	54.7	dB
Analog or Digital System Required S/N:	18.0	dB
System Link Margin	36.7	dB

5.7GHz ISDB-T電波伝搬リンクマージン

5.7GHz 0.2W ISDB-Tの送信を30dBiのパラボラで送信したケースを仮定。受信地点は200km離れている。

双方のANT利得は30dBiとし約75cmのパラボラとしました。

給電ケーブルの損失は双方1dBとした。

空気損失は200kmの距離で2dB。

符号化率FEC2/3により所要CNRは18dB。復調のデコード損失として3dBを加算し

Eb/Noは21dBとして計算させたところマージンは0.1dBで受信可能であった。

その他のロスとして双方アンテナの向きの損失として3dB加えているので、これらを除けば6dBのマージンがあることになる。

なお、FMで2W送信した場合はマージンは43dBと計算が得られた。JA0RUZ関崎氏がFMでの受信のマージンが40-50dBないと画像にならないという経験値と合致する。

5.7GHz d= 200km DATV ISDB-T		
TX FM 0.2W, 30dBi Dish => RX 30dBi Dish 16Mbps		
Parameter:	Value:	Units:
Spacecraft:		
Spacecraft Transmitter Power Output:	0.2 watts	
In dBW:	-7.0	dBW
In dBm:	23.0	dBm
Spacecraft Total Transmission Line Losses:	1.0 dB	
Spacecraft Antenna Gain:	30.0 dBi	
Spacecraft EIRP:	22.0	dBW
Downlink Path:		
Spacecraft Antenna Pointing Loss:	3.0 dB	
S/C-to-Ground Antenna Polarization Loss:	0.0 dB	
Path Loss:	153.7 dB	
Atmospheric Loss:	2 dB	
Ionospheric Loss:	0.0 dB	
Rain Loss:	0.0 dB	
Isotropic Signal Level at Ground Station:	-136.7	dBW
Ground Station (EbNo Method):		
----- Eb/No Method -----		
Ground Station Antenna Pointing Loss:	3.0 dB	
Ground Station Antenna Gain:	30.0 dBi	
Ground Station Total Transmission Line Losses:	1.0 dB	
Ground Station Effective Noise Temperature:	300 K	
Ground Station Figure of Merit (G/T):	4.2 dB/K	
G.S. Signal-to-Noise Power Density (S/No):	93.1	dBHz
System Desired Data Rate:	16000000	bps
In dBHz:	72.0	dBHz
Telemetry System Eb/No for the Downlink:	21.1	dB
Demodulation Method Selected:	64QAM	
Forward Error Correction Coding Used:	FEC 2/3	
System Allowed or Specified Bit-Error-Rate:	1.0E-05	
Demodulator Implementation Loss:	3 dB	
Telemetry System Required Eb/No:	18 dB	
Eb/No Threshold:	21	dB
System Link Margin:	0.1	dB

出力は0.2Wとしました。

ケーブルロス
ANTは30dB 75cm 程度

指向性の向け損失

200km 5.7GHz パスロス
空気、湿度

受信側に届く電力(-106.7dBm)

指向性の向け損失
ANTは30dB 75cm 程度

ケーブルロス
受信局の総合雑音温度

1Hz当たりの信号強度

転送速度16Mbps

データレートに相当するノイズ
ノイズに対する有効信号強度

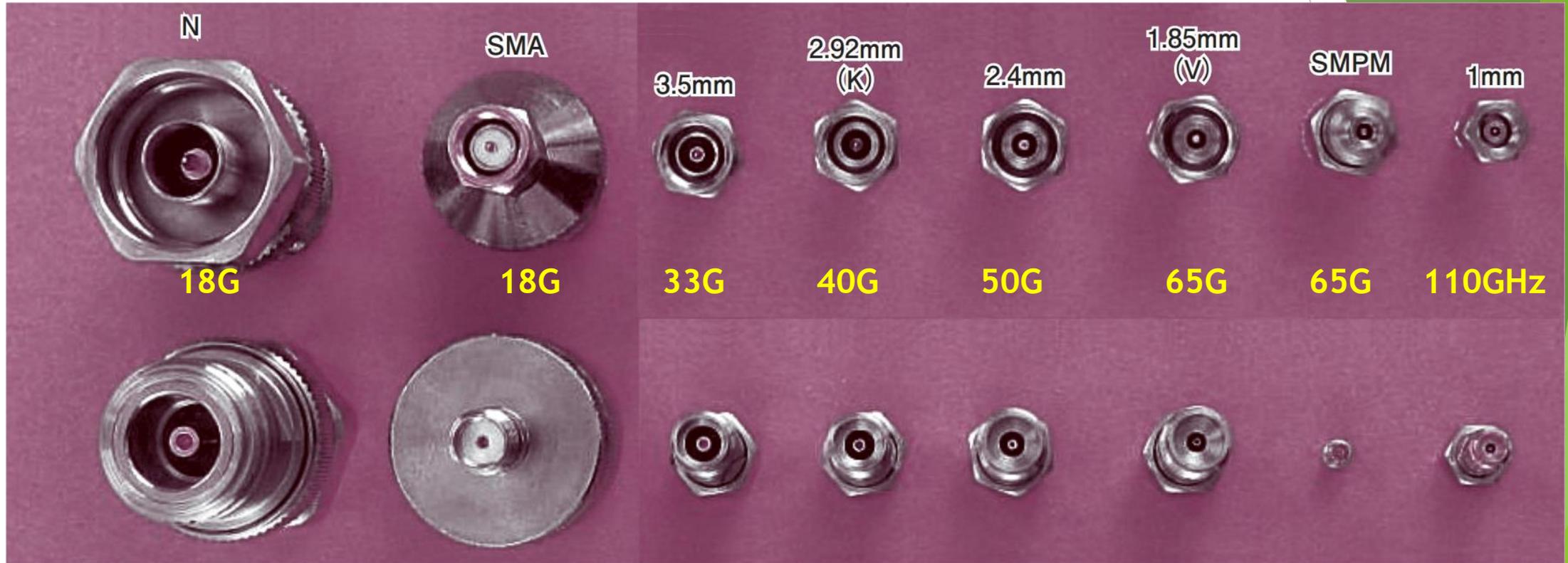
デコードのロス

最低限の受信C/N

デコードに最低限必要な信号強度

マージンは0.1dBと厳しいですが実績有

マイクロ波のコネクターと周波数

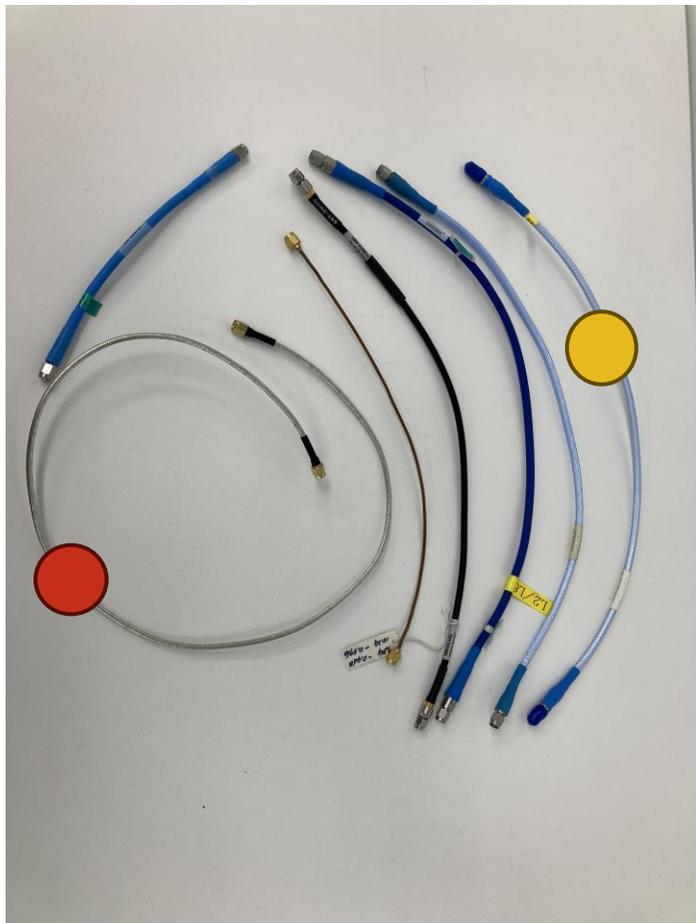
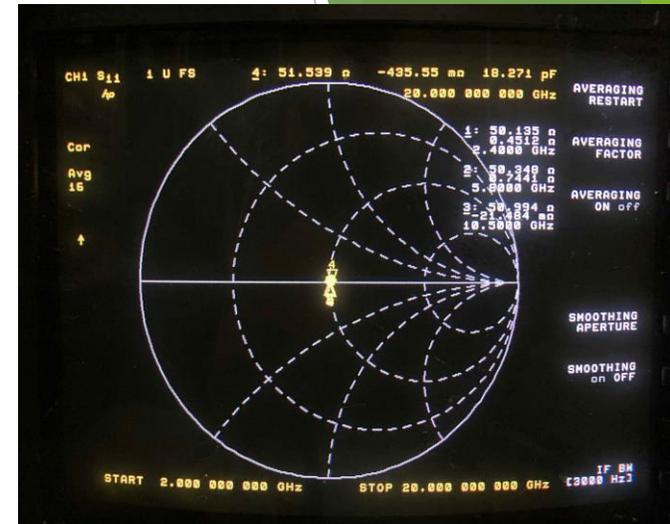
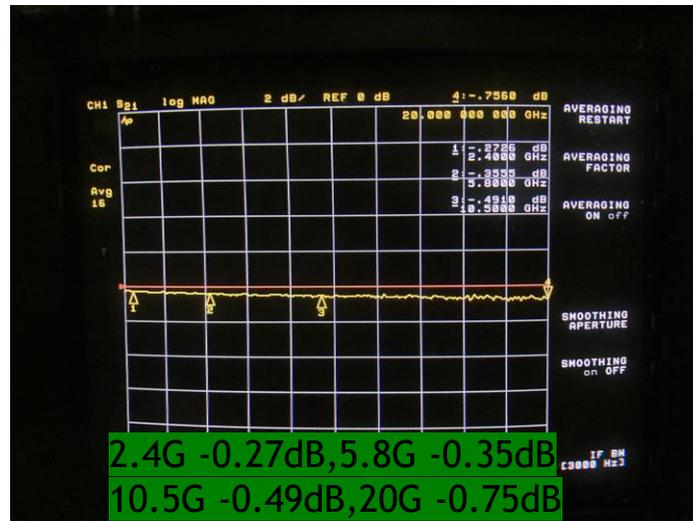


3.5mm 2.4mmとは何を示していますか？

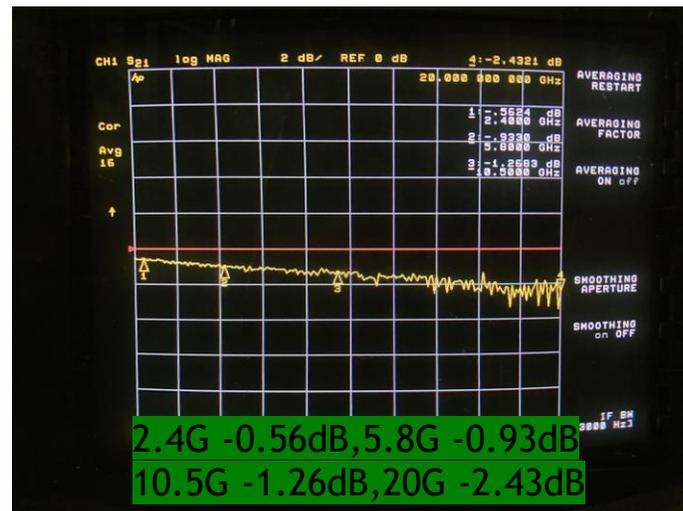
[コネクタ画像](#) [精密同軸コネクタ「KPCシリーズ」の説明](#) | [製品情報](#) | [KMCO 株式会社川島製作所HP](#)より

適切なケーブルは

● Huber + Suhner Sucoflex104 3.5mmコネクタ 50cm長



● 中華 RG402 SMA 75cm



ケーブル損失は1dB以下を目標とする

SWRとケーブル損失

Jh4vaj HPより

条件	SWR 3 同軸損失 1dB	SWR 2 同軸損失 1dB	SWR 1.5 同軸損失 1dB	SWR 2 同軸損失 0.5dB
効率	71%	76%	79%	88%
損失	29%	24%	21%	12%
送信機端で見たSWR	2.3	1.7	1.4	1.9

ケーブル損失の1 dBは20%の損失、SWR1.5の損失は1%

SWR1.5はリターンロス14dB SWR1.2はリターンロス21dB

10GHzからは出来る限りケーブルは使用しない。

10GHz以上ではケーブルを極力使わない設置方法



受信感度？ SNR SINAD MDS



AGC-off

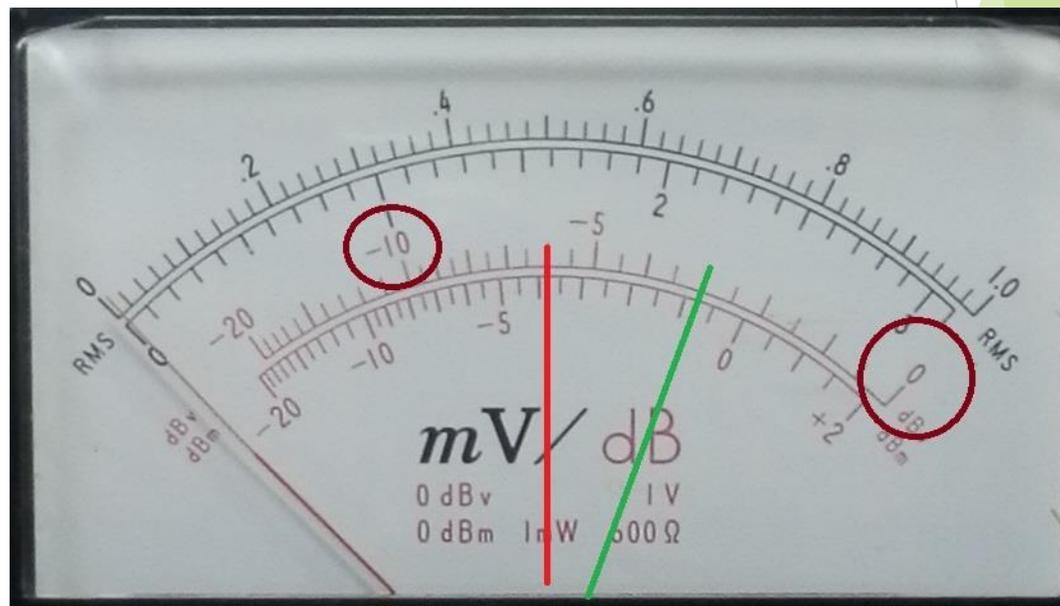


8
Ω



- SSB SNR 10dB, FM SINAD 12dB
- MDS (Minimum Discernible Signal) 500Hz帯域 SGを使って測定するので外部ノイズや受信条件(アンテナ等、伝搬損失)は加味しない。

SSB SNR10dB測定はAF出力に8Ωの抵抗を取り付けて両端にACボルトメータの電圧を10dB増加したSGの出力を読み取る。



受信感度？ MDS

MDS = 雑音温度(290K)

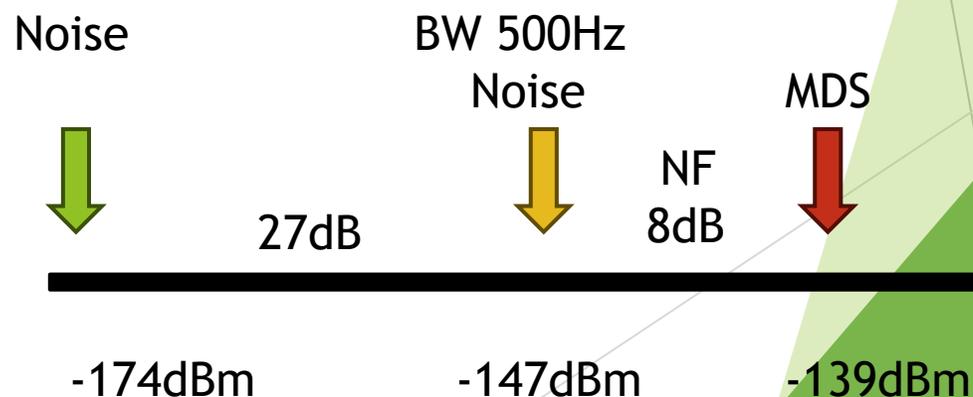
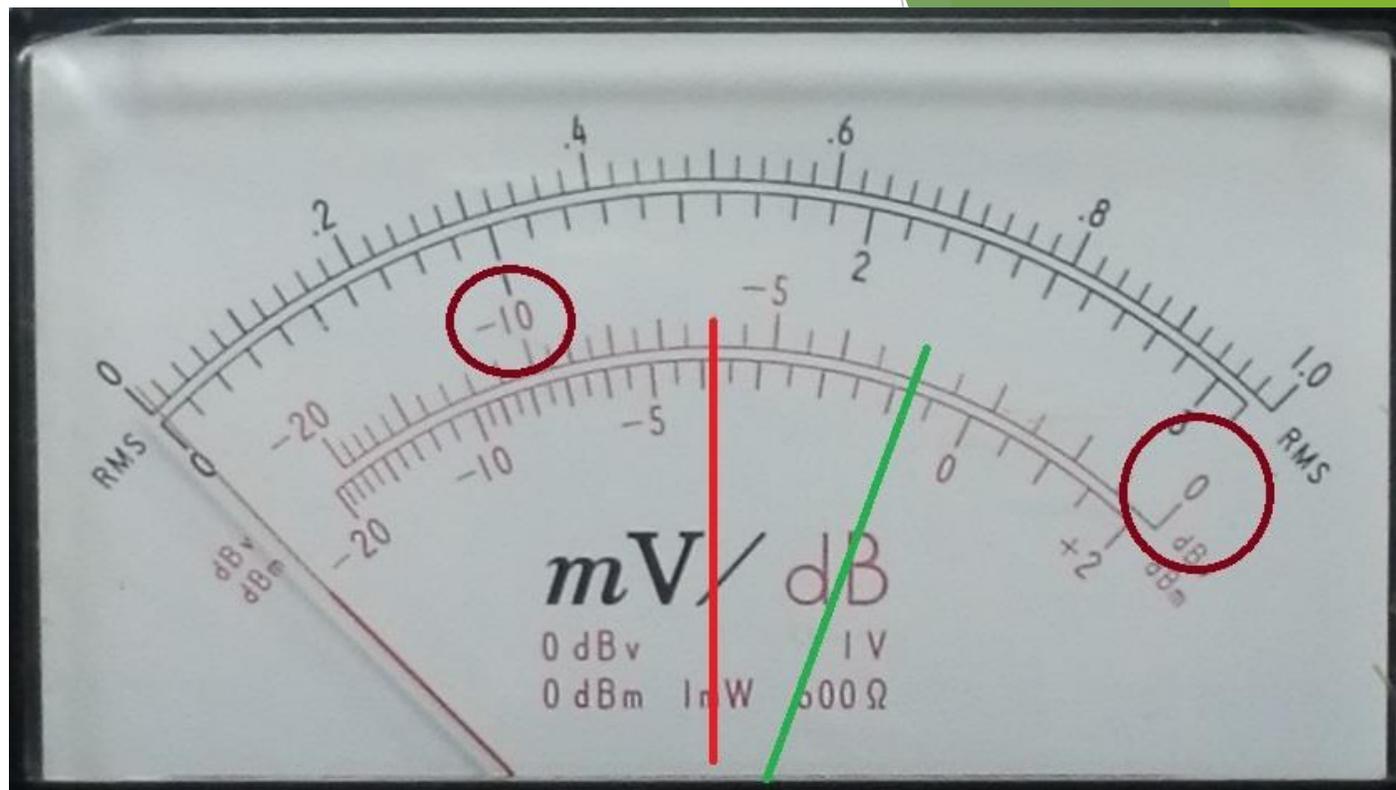
$-174\text{dBm/Hz} + \text{NF} + 10\text{Log}(\text{BW})$

CWフィルタの場合 BW=500Hz とすると $10\text{Log}(500)=27\text{dB}$ ノイズが上昇します。

よって、 $-174+27=-147\text{dBm}$

CWフィルターを通してSGの出力を-147dBmから上昇させてACメータが3dB上昇したSGの出力を読み取ります。

例として-139dBmの時に3dB上昇しました。



相手局へアンテナ確実に向ける (太陽方位)



太陽の高度・方位 @須走登山口

緯度:35.3648° 経度:138.7777° 標高:2000.0 m

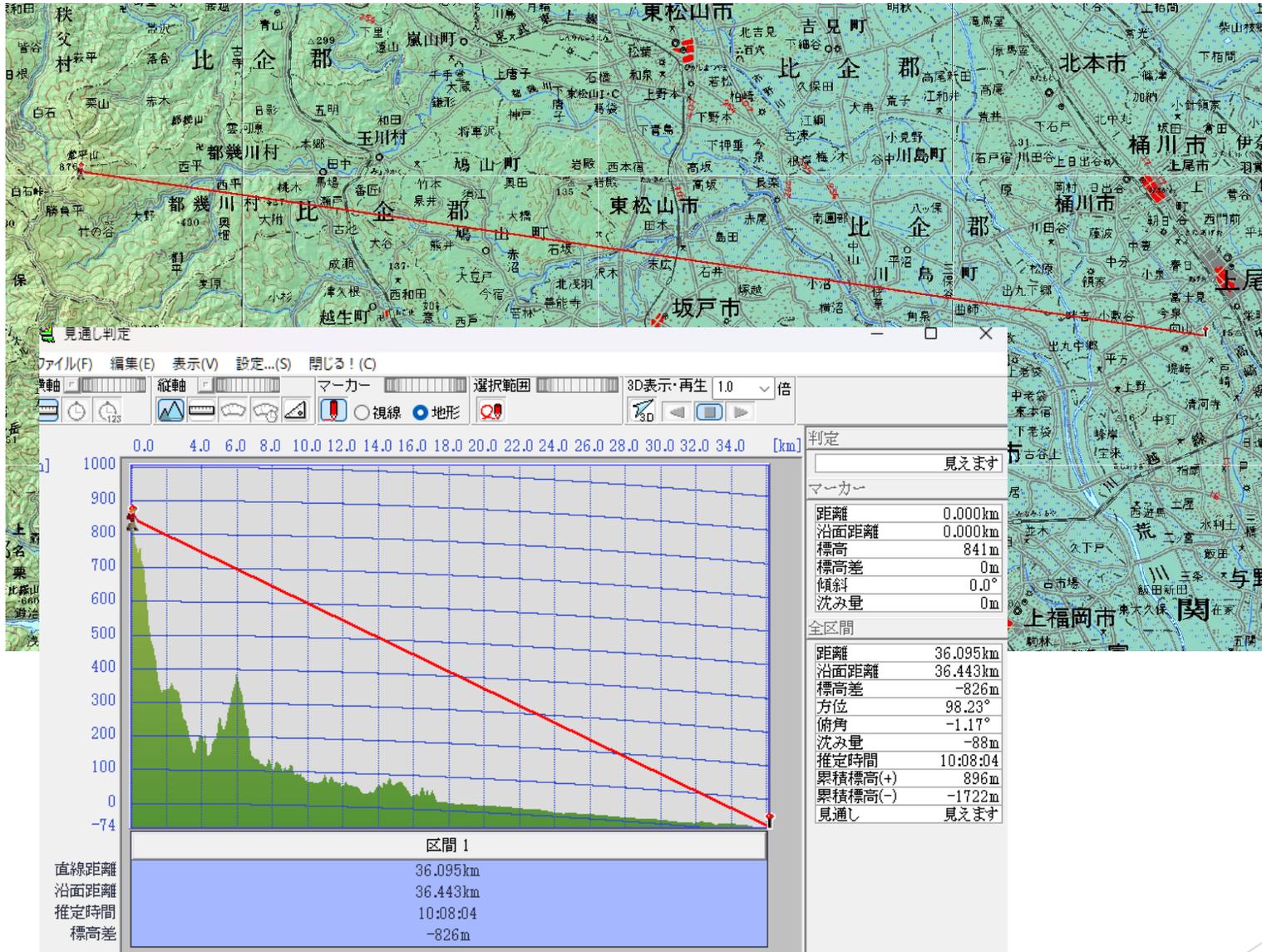
年月日	時刻	高度[°"]	方位[°"]	視半径[""]
2024/10/06	9:31:00	40 19 48	138 29 17	16 01.4
2024/10/06	9:37:00	41 07 32	140 09 22	16 01.4
2024/10/06	9:41:00	41 38 27	141 17 30	16 01.4



校正方法：

360°全円分度器を回して、矢じりの位置が現時点の太陽方位である140度となるように合わせる。その後、パラボラを回して相手局の方位に合わせる。

カシミール3Dを使い移動地からの方位



移動地	経度	緯度	標高 [m]
堂平山	139.190388	36.0060719	876
相手局移動地	方位 [度]	距離 [km]	相手局からの方位
半月山 駐車場	18.0	81.0	198.0
太田市北部運動公園	22.6	40.3	202.6
横根山	23.0	74.0	203.0
御亭山	43.0	127.0	223.0
八溝山	43.0	141.0	223.0
大平山 駐車場	49.0	61.0	229.0
里美牧場	53.4	150.0	233.4
カスリーン公園	67.0	46.0	247.0
筑波山	73.0	84.0	253.0
上尾市	97.0	35.0	277.0
戸田市	116.0	45.0	296.0
千葉市 (JFE)	119.8	94.6	299.8
狭山市 (稲荷山)	133.3	25.6	313.3
木更津太田山公園	135.0	97.0	315.0
上総第四公園	136.0	107.0	316.0
君津市 人見神社	140.0	96.0	320.0
マザー牧場	141.5	107.0	321.5
富津	142.0	95.0	322.0
国立市	145.0	42.0	325.0
富山 (南房総市)	148.0	118.0	328.0
津久井湖・城山	170.0	47.3	350.0
大山	177.0	62.0	357.0
富士山 (白山岳)	210.0	82.0	390.0
軽井沢 碓氷峠	310.5	62.6	130.5
渋峠	321.0	93.5	141.0
牛伏山	321.4	30.2	141.4
標名山 富士見峠	326.0	55.0	146.0
高崎市飯塚町 (JH1YB)	335.8	41.1	155.8
本庄IC西側	352.2	23.7	172.2
赤城山、本庄市、伊勢崎市	359.0	58.4	179.0

堂平山 皇鈴山 (みすずやま) 野末張見晴台 カスリーン公園 里美牧場

参考資料

1. マイクロワットメータ Ham Journal #97 JA1ATI著
2. 各種フィードホーン W1GHZ
3. 電波伝搬 JARL NEWS 2013秋号 特集
4. 回線設計 IARU Satellite Frequency Coordinator
AMSAT IARU Link Model
5. 受信感度 QEX#22 2017.03 無線機を測る JA10GZ著
6. 太陽系天体の高度と方位 国立天文台HP
7. カシミール3D