

GHz帯では、測定器の内部雑音が大きくなり測定を妨げる原因となる。特に多用されるスペアナ(スペクトラムアナライザ)は内部雑音が大きいため注意が必要である。測定値が雑音の影響を受けないようにするには、下図のようにアンテナとプリアンプとを直結して測定系の総合雑音指数の低減を図ることが肝要である。



18GHz ~ 26.5GHz までの周波数帯に対する構成

horn antenna : 12A-18
 Pre-Amp : AMF-5F
 micro wave cable : SF 104A 5m
 Spectrum analyzer : HP 8565E

上記の構成では

18GHz において $C/N: 10dB$ を確保するための所要信号電界強度 : 43.9 [dB μ V/m]
 26.5 GHz においては $C/N: 10dB$ を確保するための所要信号電界強度 : 50.8 [dB μ V/m]

26GHz ~ 40GHz までの周波数帯に対する構成 (構成図は上図と同じ)

horn antenna : 12A-26
 Pre-Amp : SLKa
 micro wave cable : SF 102A 5m
 Spectrum analyzer : HP 8565E

上記の構成では

32 GHz において $C/N: 10dB$ を確保するための所要信号電界強度 : 54.53 [dB μ V/ m]
 40GHz において $C/N: 10dB$ を確保するための所要信号電界強度 : 58.17 [dB μ V/m]

となる。

上記所要電界強度は、測定用受信アンテナの置かれている場所の電界強度である。一般に試供装置からの放射電界強度の限度値は測定距離 3m で表されている。このことは、放射電界強度の限度値が 47[dB μ V/m] の場合、測定距離を 1m に短縮できれば、限度値 56.5[dB μ V/m] と等価となり、更に測定距離を 0.5m に短縮することが可能であれば限度値 62.6[dB μ V/m] と等価となる。したがって、測定距離を 1m に短縮することが出来れば32GHz まで、0.5m まで短縮することが出来れば 40GHz までの試験が可能となる。

ただし、これは供試装置および測定用受信空中線との関係が自由空間遠方界条件を満足していることを確認する注意が必要である。

上記所要電界強度の算出過程を以下に示す。

1. スペクトラムアナライザの雑音指数を確認

スペクトラムアナライザ-8565E の雑音指数を求める。

8565Eの表示平均ノイズ P_{ns} が全て8565Eの初段整合抵抗で発生した熱雑音であるとすると P_{ns} は次式で表される。

$$P_{ns} = KTB F \quad [W] \quad (1)$$

ここに K : ボルツマン定数 : 1.38×10^{-23} [Joul/K]
 T : 初段抵抗体の絶対温度 : 293 [K]
 B : 雑音の帯域幅 : [Hz]
 F : 雑音指数

8565Eの仕様から、周波数 13.2GHz~22.0GHz までの平均表示雑音レベル P_{ns} (DANL)は -140 [dBm] である。まず

dBm 表示された雑音電力 P_{ns} を、真数表示電力 $P_{nst} [W]$ に変換する。

$$P_{nst} = 10 \left(\frac{P_{ns}}{10} \right) \quad [mW] \quad (2)$$

$$= 1 \times 10^{-14} \quad [mW] \quad (3)$$

$$= 1 \times 10^{-17} \quad [W] \quad (4)$$

(1)(4)式から、

$$1 \times 10^{-17} = KTB \square \quad (5)$$

(5)式を変形して雑音指数 F を求める。

$$F = \frac{1 \times 10^{-17}}{KTB} \quad (6)$$

$$= \frac{1 \times 10^{-17}}{1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 1} \quad (7)$$

$$= 2,473.1661 \quad (8)$$

F を dB で表すと

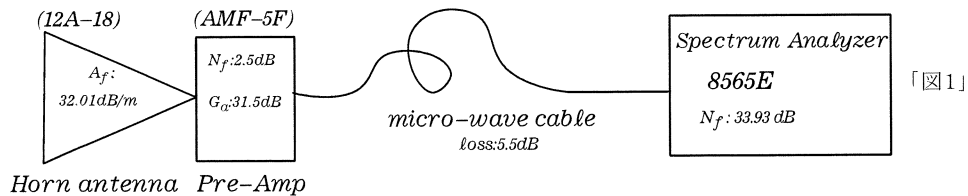
$$F(dB) = 10 \log_{10} 2,473.1661$$

$$= 33.93 \quad [dB] \quad (9)$$

(9)式が示すように、スペクトラムアナライザの雑音指数は良くない。

ホーンアンテナ、プリアンプ、スペアナからなる測定系の検討

測定系の一例を「図1」に示す。



- 1). ホーンアンテナ : 12A-18
 ファクタ $A_f : 32.01$ [dB/m] (at 18GHz)
 利得 $G_a : 23.31$ [dB] (at 18GHz)
- 2). Pre-amp : AMF-5F
 利得 $G_{ap} : 31.6$ [dB] (at 18GHz)
 雑音指数 $N_{fpr} : 1.48$ [dB] (at 18GHz)
- 3). microwave cable : SF104 5m
 cable loss : 5.5 [dB] (at 18GHz)

3. 総合雑音指数 N_{ft}

「図1」の系統図の総合雑音指数を求める。各部の雑音指数、利得を次のとおりとする。

プリアンプの利得 : $G_{ap} = 31.5$ [dB]

雑音指数 : $N_{fpr} = 1.48$ [dB]

マイクロ波ケーブルの利得 : $A_{tm} = -5.5$ [dB]

雑音指数 : $N_{fm} = 5.5$ [dB]

スペアナの雑音指数 : $N_{fsa} = 33.93$ [dB]

dB で表した各値を真数に変換する。 サフィックスに t を付加して真数を表す。

$$G_{apt} = 10^{\left(\frac{31.5}{10}\right)} = 1412.5375$$

$$N_{fppt} = 10^{\left(\frac{1.48}{10}\right)} = 1.4060$$

$$A_{tmt} = 10^{\left(\frac{-5.5}{10}\right)} = 0.2818$$

$$N_{fmt} = 10^{\left(\frac{5.5}{10}\right)} = 3.5481$$

$$N_{fsat} = 10^{\left(\frac{33.93}{10}\right)} = 2471.7241$$

真数で表した各構成要素の損失、利得、雑音指数を下式に代入し、総合雑音指数 N_{ft} を求める。

$$N_{ftt} = N_{fppt} + \frac{N_{fmt} - 1}{G_{apt}} + \frac{N_{fsat} - 1}{G_{apt} A_{tmt}} \quad (10)$$

$$= 1.4060 + \frac{3.5481-1}{1412.5375} + \frac{2471.7241-1}{1412.5375 \times 0.2818} = 7.6148$$

$$= 7.6148$$

$$N_{ft} = 10 * \log_{10}(7.6148) = 8.8166$$

$$= 8.8166 \quad [dB] \quad (11)$$

4. プリアンプの入力に換算した雑音レベル N_{int} は

$$N_{int} = KTB N_{ft} \\ = 1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 10^6 \times 7.6148 = 3.0789 \times 10^{-14} \quad (12)$$

$$= 3.0790 \times 10^{-14} \times 10^3 = 3.0790 \times 10^{-11} \quad [mW] \quad (13)$$

$$= -105.1159 \quad [dBm] \quad (14)$$

$$= 1.8841 \quad [dB\mu V] \quad (15)$$

5. ホーンアンテナ入力側に換算した雑音レベル $E_{ihn} [dB\mu V/m]$

ホーンアンテナのアンテナ係数 A_{f18} は 18GHz において 32.01 [dB/m] であるから

$$E_{ihn} = 1.8841 + 32.01 = 33.8941 \quad [dB\mu V/m] \quad (16)$$

すなわち測定系で発生する雑音をすべてホーンアンテナの入力側電界強度に換算すると、図1の測定系では

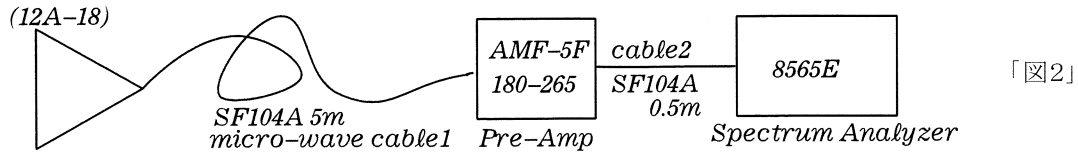
$$E_{ihn} = 33.89 \quad [dB\mu V/m] \quad (17)$$

となる。

電波法等では被測定信号レベルと測定器内部雑音をふくめた雑音レベルの差を 10[dB] 以上取るように要求しているから、図1の測定系統では、43.9[dBμV/m] を超える信号レベルを測定することが可能である。

FCC 規格は 47[dBμV/m] であるから、試験可能である。

6. 測定系統を「図2」としたときの試験可能性検討



6. -1 ホーンアンテナ 12A-18 を外し、ケーブル先端に整合終端抵抗を接続したとき、全測定システムのノイズを整合終端抵抗から発生したものとして換算する。この時の雑音指数を N_{ftt} を求める。

$$N_{ftt} = N_{fc1} + \frac{N_{fpr} - 1}{A_{c1}} + \frac{N_{fc2} - 1}{A_{c1}G_{pre}} + \frac{N_{fsa} - 1}{A_{c1}G_{pre}A_{c2}} \quad (18)$$

ここに N_{fc1} : *micro-wave cable1* の雑音指数 : 5.5 [dB] (20)

A_{c1} : *micro-wave cable1* の利得 : -5.5 [dB] (21)

N_{fpr} : プリアンプの雑音指数 : 1.48 [dB] (22)

G_{pre} : プリアンプの利得 : 31.5 [dB] (23)

N_{fc2} : *micro-wave cable2* の雑音指数 : 0.9 [dB] (24)

A_{c2} : *micro-wave cable2* の利得 : -0.9 [dB] (25)

N_{fsa} : SA 8565Eの雑音指数 : 33.9 [dB] (26)

また上記雑音指数他7項目のdB 値真数に変換する、変換後の N_{fc1t} の様に添え字の最後に t を付す。

$$N_{fc1t} = 10^{\left(\frac{5.5}{10}\right)} = 3.5481 \quad (27)$$

$$A_{c1t} = 10^{\left(\frac{-5.5}{10}\right)} = 0.2818 \quad (28)$$

$$N_{fprt} = 10^{\left(\frac{1.48}{10}\right)} = 1.4060 \quad (29)$$

$$G_{pret} = 10^{\left(\frac{31.5}{10}\right)} = 1412.5375 \quad (30)$$

$$N_{fc2t} = 10^{\left(\frac{0.9}{10}\right)} = 1.2303 \quad (31)$$

$$A_{c2t} = 10^{\left(\frac{-0.9}{10}\right)} = 0.8128 \quad (32)$$

$$N_{fsat} = 10^{\left(\frac{33.9}{10}\right)} = 2454.7089 \quad (33)$$

(27) (33) 式の値を(18)式に代入すると

$$N_{ftt} = 3.5481 + \frac{1.4060 - 1}{0.2818} + \frac{1.2303 - 1}{0.2818 \times 1412.5375} + \frac{2454.7089 - 1}{0.2818 \times 1412.5375 \times 0.8128} \quad (34)$$

$$= 12.5734$$

$$= 10.99 \text{ [dB]} \quad (35)$$

6. -2 ホーンアンテナを外した *micro-wave cable1* の先端に換算したノイズレベル N_{inc1}

$$N_{inc1} = KTB N_{fct}$$

$$= 1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 10^6 \times 12.5734 = 5.0839 \times 10^{-14} \quad [W] \quad (36)$$

$$= 5.0839 \times 10^{-11} \quad [mW] \quad (37)$$

$$= -102.9380 \quad [dBm] \quad (38)$$

$$= 4.0620 \quad [dB\mu V] \quad (39)$$

6. -3 ホーンアンテナ入力に換算した雑音電界強度 E_{nin}

$$\begin{aligned}
 E_{nin} &= N_{inc1} + A_f \\
 &= 4.0620 + 32.01 \\
 &= 36.0720 \qquad \qquad \qquad [dB\mu V/m] \qquad \qquad (40)
 \end{aligned}$$

6. -4 (17) 式の E_{nin} と (40) 式の E_{nin} との間には $2.18[dB]$ の差がある。

すなわち、同一構成機器であっても、接続の方法で等価入力換算雑音レベルには $2.18[dB]$ の差が発生する。プリアンプはアンテナの直下に置くことが肝要である。アンテナとプリアンプとを長いケーブルで接続するようなことは避けるようにしなければならない。

6. -5 雑音による測定誤差をなくすためには、被測定信号レベルは雑音レベルよりも $10[dB]$ 高いことが必要であるから、測定可能最小電界強度は $46[dB\mu V/m]$ となる。

7. 「図1」の測定系統の上限周波数 $26.5GHz$ に於ける内部雑音レベルの確認

- 1). ホーンアンテナ $A_f : 33.69 \quad [dB/m] \quad (at 26.5GHz)$
 $G_a : 24.98 \quad [dB] \quad (at 26.5GHz)$
- 2). Pre-amp $G_{ap} : 31 \quad [dB] \quad (at 26.5GHz)$
 $N_{fpr} : 1.98 \quad [dB] \quad (at 26.5GHz)$
- 3). microwave cable : SF104 5m
cable loss : 6.84 $[dB] \quad (at 26.5GHz)$

4) $26.5GHz$ に於ける $8565E$ の雑音指数 N_{fsa265}

仕様から $DANL$ は $-136dBm$ から、雑音指数 N_{fsa265} は

$$N_{fsa265} = \frac{10^{\left(\frac{-136}{10}\right)} \times 10^{-3}}{1.38 \times 10^{-23} \times 293} = 6212.3124 \qquad (41)$$

$$= 37.93 \qquad [dB] \qquad (42)$$

5) Pre-Amp に換算した総合雑音指数 N_{ft265} は

$$N_{ft265} = 1.5776 + \frac{4.8306-1}{1258.925} + \frac{6212.3124-1}{1258.925 \times 0.2070} = 25.4155 \qquad (43)$$

$$= 14.0509 \qquad [dB] \qquad (44)$$

6) Pre-Amp の入力に換算した雑音電力は P_{npr265} は

$$\begin{aligned}
 P_{npr265} &= KTB N_{ft265} \\
 &= 1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 10^6 \times 25.4155 = 1.027650327 \times 10^{-13} \quad [W] \qquad (45)
 \end{aligned}$$

$$= -99.88 \qquad [dBm] \qquad (46)$$

$$V_{npr265} = 7.12 \qquad [dB\mu V] \qquad (47)$$

7) ホーンアンテナの入力に換算すると

$$E_{in2265} = V_{npr265} + 33.69 \qquad (48)$$

$$= 7.12 + 33.69$$

$$= 40.81 \qquad [dB\mu V/m] \qquad (49)$$

雑音による測定誤差をなくすには $C/N 10[dB]$ を確保するから、測定可能な最小信号レベル E_{265min} は

$$E_{265min} = 50.51 \qquad [dB\mu V/m] \qquad (50)$$

となる。

8. 周波数 26.5GHzから40GHz に対する試験可能性

8. -1 26.5GHzに対する試験可能性

1.) 測定系の仕様

周波数		26.5GHz	32GHz	40GHz	型式
ホーンアンテナ	A_f	35.33[dB/m]	36.01	37.18	12A-26
ケーブル損失	A_{mc2}	10.46[dB]	11.6	13.12	SF102A 5m
Pre Amp Gain	G_{aSLKa}	46.1 [dB]	40.2	42.3	SLKa-35-4
Pre Amp N_{fslka}	N_{fSLKa}	3.5 [dB]		4.0	
8565E DANL	D_{ANL85E}	-139 [dBm]	-130	-127	

2.) 「図1」の系統とした時の 32GHz に於ける Pre-Amp 入力に換算した雑音レベル P_{n32}

総合雑音指数 N_{ft}

$$N_{ft} = 2.2387 + \frac{14.4544-1}{10471.2854} + \frac{24371.66-1}{0.06918 \times 10471.2854} = 35.8823 \quad (51)$$

$$= 15.5488 \quad [dB] \quad (52)$$

$$P_{n32} = 1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 10^6 \times 35.8823 = 1.4508 \times 10^{-13} \quad [W] \quad (53)$$

$$= -128.3836 \quad [dBW] \quad (54)$$

$$= -98.3836 \quad [dBm] \quad (55)$$

電圧では

$$V_{n32} = P_{n32} + 107$$

$$= 8.6163 \quad [dB\mu V] \quad (56)$$

ホーンアンテナ入力側に換算した雑音電界強度値 N_{in32}

$$N_{in32} = V_{n32} + A_{f32}$$

$$= 8.6163 + 36.01 = 44.6263 \quad [dB\mu V/m] \quad (56)$$

S/N 10dB を確保するための信号電界強度 E_{in32}

$$E_{in32} = N_{in32} + 10$$

$$= 54.53 \quad [dB\mu V/m] \quad (57)$$

40GHz に対して S/N 10dB を得るための 信号電化器強度 E_{in40}

1.) 「図1」の系統での40GHz に於ける総合雑音指数 N_{f40}

$$N_{f40} = 2.5119 + \frac{20.5116-1}{16982.436} + \frac{49346.15-1}{0.04875 \times 16982.436} = 62.1162887183326$$

$$= 62.1163 \quad (58)$$

$$= 17.93 \quad [dB] \quad (59)$$

2.) Pre-Amp 入力に換算した雑音電力 P_{n40}

$$P_{n40} = 1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 10^6 \times 62.1163 = 2.5116104742 \times 10^{-13} \quad [W] \quad (60)$$

$$= -126.00 \quad [dBW] \quad (61)$$

$$= -96.00 \quad [dBm] \quad (62)$$

電圧 V_{n40} で表すと

$$V_{n40} = 10.99 \quad [dB\mu V] \quad (63)$$

3.) ホーンアンテナ入力側に換算した雑音電界強度値 N_{in40}

$$\begin{aligned} N_{in40} &= V_{n40} + A_{f40} \\ &= 10.99 + 37.18 = 48.17 \end{aligned} \quad (64)$$

4.) C/N 10dB を確保するための信号電界強度 E_{in40}

$$E_{in40} = N_{in40} + 10 \quad (55)$$

$$= 58.17 \quad [dB\mu V] \quad (66)$$

となる。

十分注意したつもりですが、浅学非才故思わぬ誤謬があるかもしれません、特に計算結果の数値は、ご自身で再計算して確認の後利用して頂きたい。

自由空間遠方界条件等については改めて検討したい。

参考資料

1. 1GHzから18GHzの周波数帯域での放射妨害波測定ガイド 平成11年4月 不要電波問題対策協議会
2. 放送用SHF受信機的设计 (株)産報 小西良弘
3. 雑音 岩波全書 関英男
4. 高周波測定 電気通信学会 山本博