

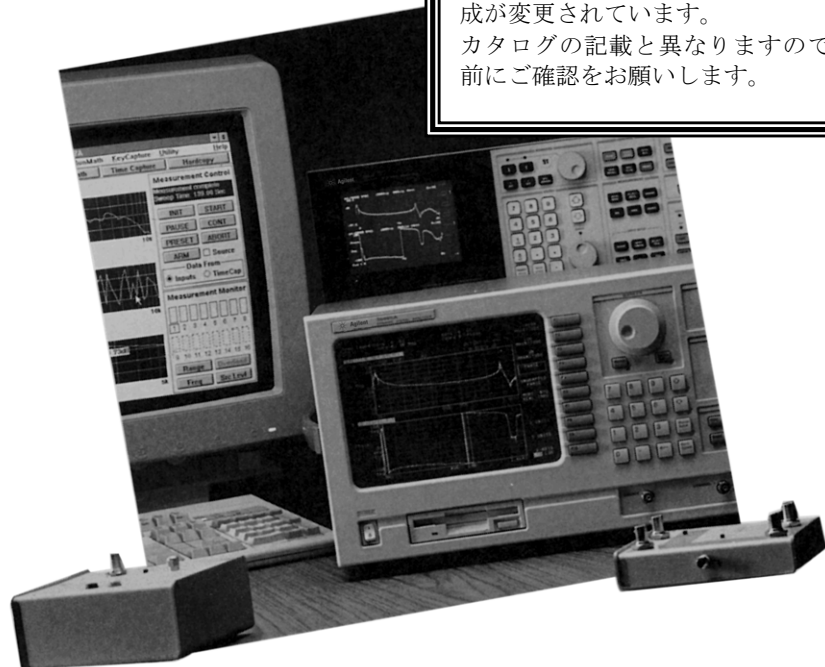
# FFT・アナライザ(サーボ・アナライザ)とアクセサリを用いた制御システムの測定の基礎

AppNote 243-6

Aug. '93

## ご注意

2002年6月13日より、製品のオプション構成が変更されています。  
カタログの記載と異なりますので、ご発注の前にご確認をお願いします。



## 概要

制御システムは急速に一般的なものになりつつあり、技術的に高度な工業製品と同様に、最近の多くの家庭電化製品の中にも使われています。閉ループ制御システムは、コンパクトディスク(CD)プレーヤー、自動車の電子燃料噴射システム、低価格ペン・プロッタのペン位置決めシステムにも使われています。複雑な閉ループ制御システムは、伝統的に戦闘機や、ミサイルの空力制御システムのような航空宇宙分野に使用されてきました。

要求される結果が開ループ周波数応答特性でありながら、安定な動作をする

ためには、ループが閉じていなければならないため、開発過程において制御システムをテストすることは永い間困難でした。ループ・ゲイン特性と呼ばれる開ループ特性は、制御システムに対する数学モデルを定義し、改良するために使用されるので重要な測定値です。また、安定度補償ネットワークを設計し、ゲイン・マージンと位相マージンのような安定度パラメータを決定するのに使用されます。

この数年、制御システムのダイナミック性能特性の研究に対して、新しいタイプのFFT・アナライザが相当に高い

評価を受けています。このアプリケーション・ノートでは基本的な測定方法について概説し、いろいろな状況で正確な測定をするためにいくつかの側面について詳細に検討します。

特に断らない限り、以下の各パラグラフにおいて、小文字は時間ドメインにおける変数または関数を表し、大文字は変換量を表します。これらの量は複素変数 $s(s = \sigma + j\omega)$ の関数としてラプラス変換 $G(s)$ した量あるいは周波数変数 $j\omega$ の関数としてフーリエ変換 $G(j\omega)$ した量です。



**Agilent Technologies**  
Innovating the HP Way

# 第1章

## 制御システムの復習

簡単なフィードバック制御システムのモデルを図1に示します。

この単純なモデルから、閉ループ制御システムの以下のような基本式を導くことができます。

$$C=EG, E=R-B$$

$$C=(R-B)G$$

$$C=RG-BG, \text{ but } B=CH$$

$$C=RG-CHG$$

$$C+CHG=RG$$

$$C(1+GH)=RG$$

$$\frac{C}{R} = \frac{G}{1+GH}$$

GHは開ループ・ゲイン関数です。この式から容易に  $\frac{C}{R}$  が示されます。

$$GH \rightarrow -1 \text{ の場合 } \text{ then } : \frac{C}{R} \rightarrow \infty$$

1930年代にナイキスト (H.Nyquist) によって示されたように、GHは制御システムの安定度を記述し、理解するのに基本的で直接的な方法を与えます。アナログ制御システムとして図1のブロック図がラプラス変換を用いて図2のようになります。デジタル制御システムでは、一般的にブロック図はZ変換を用いて表現されます。

制御システムという観点から、システム開ループ・ゲインの式はラプラス変換式を用いて表現するのが普通です。この方法を用いると解を得るのに微分方程式を簡単な四則演算に置き換えることによって、解析が簡単になります。これらのラプラス・ドメインで表示された式は図3に示すように多項式か極一ゼロ形式です。

一般に、制御システムの取り扱いにおいては極一留数形式は使われません。極一ゼロ形式は、多項式形式の分子と分母の根を求めることによって得られます。最近の周波数応答アナライザの中にはこれらの解析関数を直接取り扱うことのできるものがあります。これは開ループ・ゲインの測定値と補償ネットワークの周波数応答解析結果から、補償ネットワークを付けた場合の閉ループ特性を推定するのに便利です。

図4は図3に示されている式の極とゼロを複素ラプラス平面(s)にプロットしたものです。図3の分子の根は $s=-3.5$ に1個のゼロを与え、分母の根は $s=-12$ と複素共役対 $s=-1+j8$ と $s=-1-j8$ の点に極を与えます。

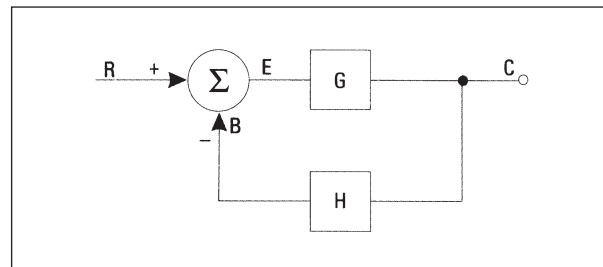


図1 簡単なフィードバック制御システム

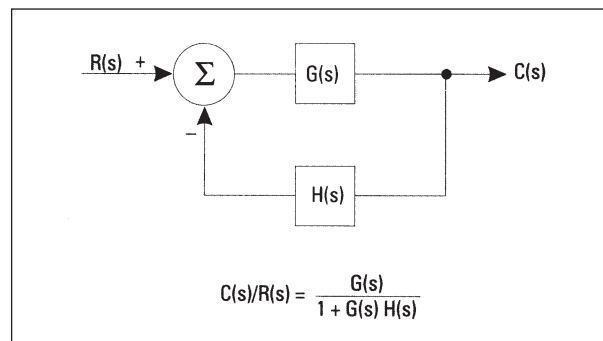


図2 閉ループ伝達関数

$$\begin{aligned} \frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{s+3.5}{s^3+14s^2+89s+780} \\ &= \frac{s+3.5}{(s+12)(s+1+j8)(s+1-j8)} \end{aligned}$$

図3 システム表示式

この安定な閉ループ・システムの $s$ ドメインのプロットを図5と図6に示します。

ナイキストは閉ループ伝達関数を研究した結果、安定な系においては $s$ —平面の右半分に極がないことを発見しました。この関係がナイキストの安定判別条件になっています。閉ループ伝達関数の極を計算するにはかなり労力が必要(1930年代には特にそうでした)になりますが、直接開ループ関数について計算すると、相当な労力削減となります。安定判別を行うために、ナイキストは開ループ・ゲイン関数をグラフ化し、それが複素平面上の点 $-1, j0$ を囲んでいるかどうかを見るという方法を考え出しました。図7には、2つの開ループ利得関数がプロットされています。一方のシステムのプロットはこの点を囲んでいるので、ループを閉じた場合には不安定なシステムになります。

この判別条件で系が安定か不安定かの判断ができるようになりましたが、相対的な安定性の程度を知るためにはさらに測定が必要です。H.Bodeは1940年にゲイン・マージンと位相マージンという形式の概念を発表しました。図8と図9にグラフ形式での相対安定判別条件を示します。ゲイン・マージンは開ループ周波数応答関数の位相が $-180^\circ$ となる点のゲインの単なる逆数です。位相マージンはゲインが1(あるいは0 dB)の点における開ループ周波数応答の位相を $180^\circ$ から引いたものです。通常、位相マージン $30^\circ$ 未満あるいはゲイン・マージンが6 dB(ゲイン係数2.0)未満のシステムは不安定限界にあり使用不能であると判断されます。

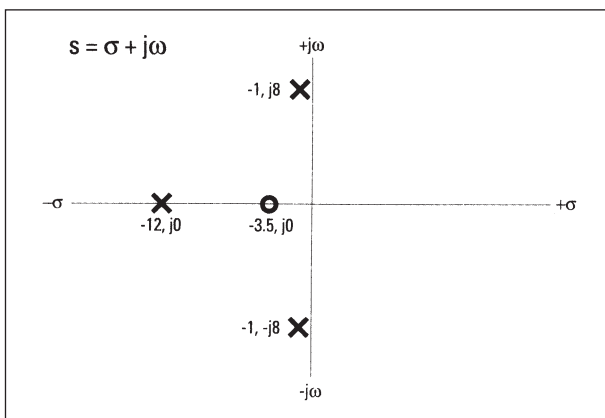


図4 複素ラプラス平面( $s$ )

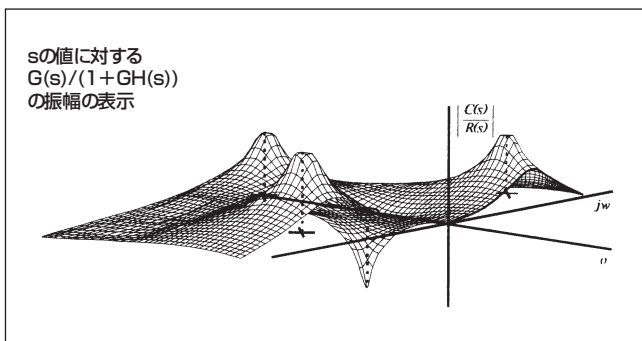


図5 伝達関数の振幅

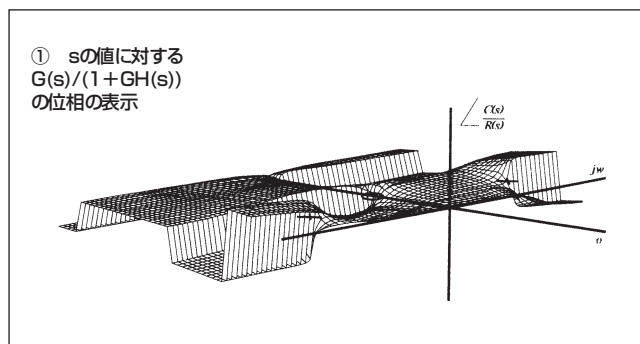


図6 伝達関数の位相

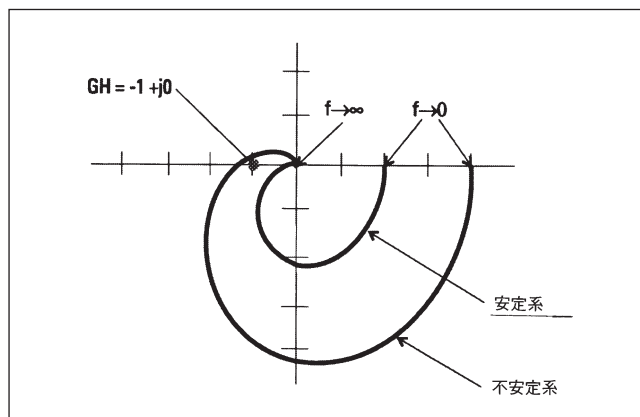


図7 安定性とナイキスト曲線

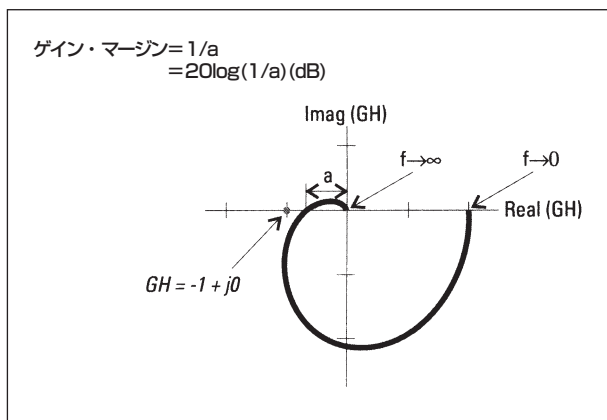


図8 相対安定性 ゲイン・マージン

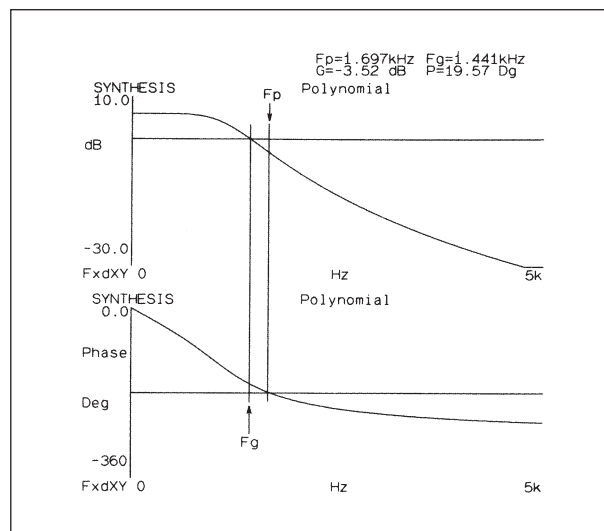


図10 ボード線図

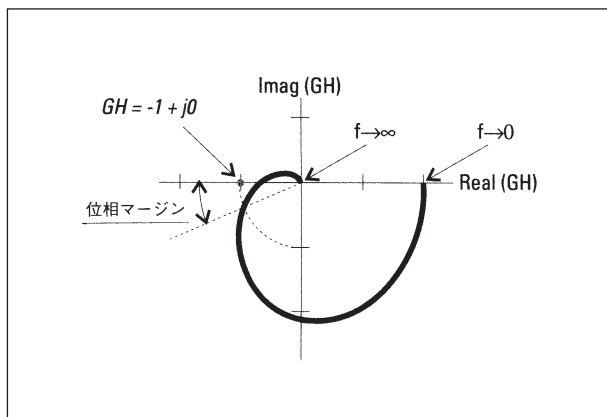


図9 相対安定性 位相マージン

極座標表示での計算の代わりに、同じゲイン・マージンと位相マージンが、ニコルス線図と呼ばれる対数表示のゲインと位相のプロット図からも得ることができます。ナイキスト線図とニコルス線図の欠点は、1個のプロット図では周波数に関する情報を確実に捉えるのが難しいことです。

一方で、周波数情報を確保しつつゲイン・マージンと位相マージンを見る方法は、図10に示すボード線図(周波数に対する振幅の対数表示と周波数に対する位相表示)です。

## 第2章

### 測定の背景

基本的な測定の手順は開ループ特性を決定することから始まります。論理的には、ネットワーク・アナライザまたはFFT・アナライザ(サーボ・アナライザ)を使って、図11に示すようにループを切断して、開ループ・ゲイン $Y/Z$ を直接測定する方法が考えられます。この方法は概念的には正しいのですが、多くの制御システムにおいて限界があります。フィードバックのない簡単な位置サーボのために一方の端にエネルギーが片寄り、増幅器を飽和させてしまうためシステムの制御が困難になるからです。しかし、物理的に大きなデバイスを制御しない単純なシステムでは、この方法で十分な場合があります。

ループを開くことによって直接開ループ特性を測定する代わりに、ループを閉じたまま測定し、ループを閉じたままの測定から開ループ特性を計算する方法をこのアプリケーション・ノートで説明します。

閉ループ・システムでは、多くの測定の組み合わせが作れます。図12には開ループ・ゲイン関数 $GH$ の推定値を決定できる3つの異なる信号の組み合わせ( $Z/S$ 、 $Y/Z$ および $Y/S$ )を与えるシステム・モデルを示しています。

このモデルは追加されたサミング・ジャンクションが制御ループの内部に置かれていることから「内部型」と呼ばれます。また、高速フーリエ変換(FFT)を用いたものとスエプト・フーリエ変換(SFT)を用いた、2つの異なる測定方法を定義することができます。これらの方法には、方法に応じた適切なテスト信号が必要です。FFT法にはランダム・ノイズのような広帯域外励起信号が、SFT法には低速掃引の正弦波信号が必要です。したがって「内部型」は求めるループ・ゲイン関数 $GH$ を推定する6つの異なる方法があることとなります。「内部」方式に関する追加情報はアプリケーション・ノート243-5、「制御システムのループ・ゲイン測定」に記載されています。その中では、これらの測定をする18種類の方法について述べ、どの方法で良い測定結果が得られるかについてランク付けを行い、校正上の問題点や測定を改良する手順について示し、真のコヒーレンス関数を計算するための式を記述し、それぞれの方法で取り扱うことのできるループ・ゲインの最大値を示しています。

図13にはさらに五つの変数対の組み合わせ( $B/E$ 、 $E/A$ 、 $E/S$ 、 $BA$ および $B/S$ )を与える外部サミング・ジャンクションを示しています。

FFT測定法とSFT測定法を使うことによって、ループ・ゲイン関数 $GH$ を推定する方法がさらに10種類あります。理論的には18種類の方法の中で最良のものは $B+E$ の組み合わせです。このノートは新しいユーザーに実際の測定方法とこの概念を応用するときの問題点を紹介するのが目的です。

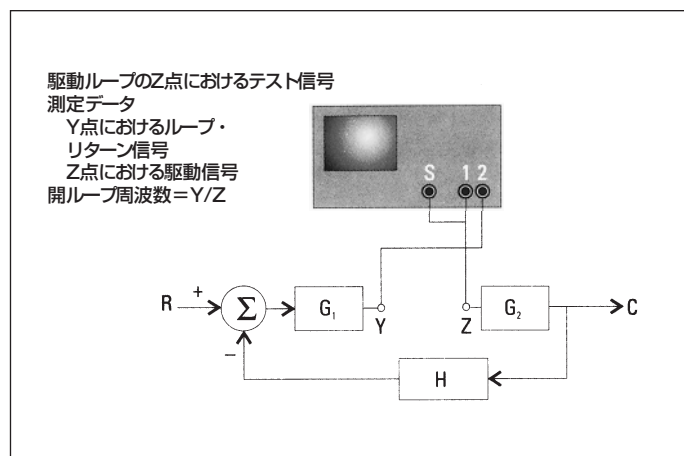


図11 開ループの $Y/Z$ の直接測定

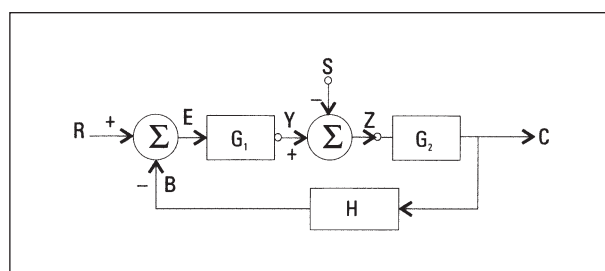


図12 測定構成図 ループの内側に信号を加える場合

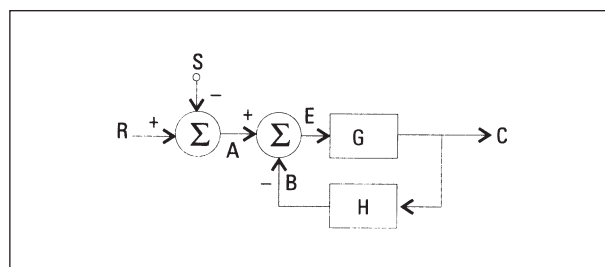


図13 測定構成図 ループの外側から信号を加える場合

## 第3章

### 信号注入デバイス

このアプリケーション・ノートで説明する測定技術はシステムに補助的なゲイン1のサミング・ジャンクションを追加することにあります。理想的なサミング・ジャンクションでは図14に示すように、必要な測定点に接触できると同時に、システムがその正常な閉ループ状態のままで測定することができます。

このサミング・ジャンクションでは、制御ループを閉じたままY信号とZ信号が測定できる状態を保持するための必要な絶縁を保ちながらループに外部信号を注入することができます。回路にこの信号注入デバイスを取り付けるにあたって、信号注入デバイスの挿入点における入出力インピーダンスがどの程度マッチングしているかを考慮しなければなりません。図15にこの考え

方を概念的に示しました。ループのゲインと周波数応答特性 ( $G_1$ あるいは $G_2$ ) が変化しないようにインピーダンスができるだけマッチングしているのが理想的です。つまりこのネットワークを挿入することによって制御ループの応答が混乱したり、変化してはいけません。

サミング・ジャンクションに使用できるいろいろなデバイスがあります。図16には第2の増幅器でソースの信号がバッファされた従来型の演算増幅器のサミング・ジャンクションを示しました。それぞれの演算増幅器は-1のゲインで反転増幅しているので入力点から出力点までのゲインは+1になっています。制御ループ回路の $G_1$ がサミング・ジャンクションのインピーダンスRよりずっと小さい ( $1:10,000$ ) 出力イ

ンピーダンスで、 $G_2$ の入力インピーダンスがおおよそRであればインピーダンスの影響は最小となります。

信号注入デバイスにはアクティブ・ネットワークから図17に示すトランスのような受動デバイスまで各種あります。

各デバイスには特性があるので、アプリケーションに応じて最適な制御システムの測定が行えるものを選択する必要があります。

制御システムの設計段階からこの測定が配慮されている場合は、アナライザの接続はあらかじめ準備されたテスト・ポイントに入力チャンネルを接続するだけの簡単なものになります。

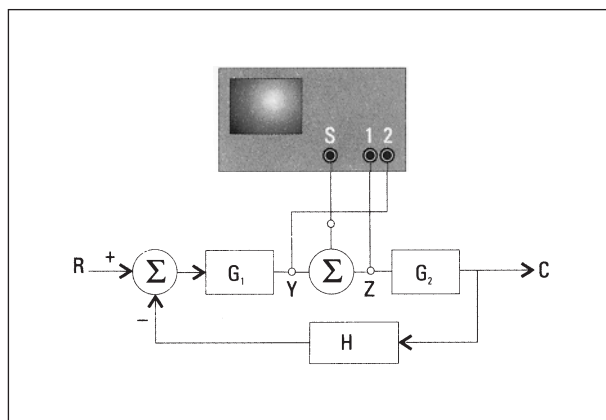


図14 測定構成図 閉ループ(Y/Z)の直接測定

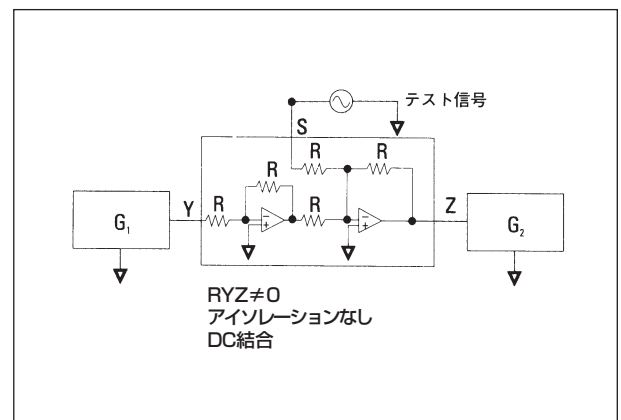


図16 アクティブ注入デバイス

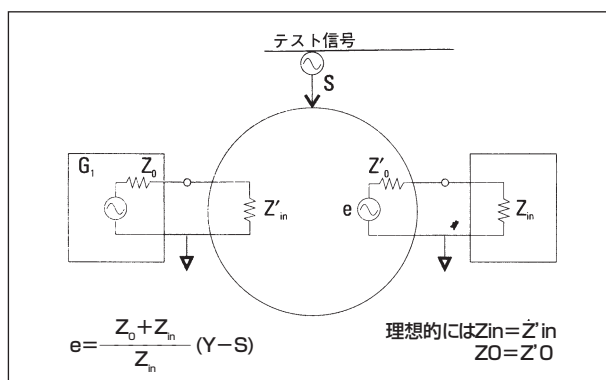


図15 インピーダンス

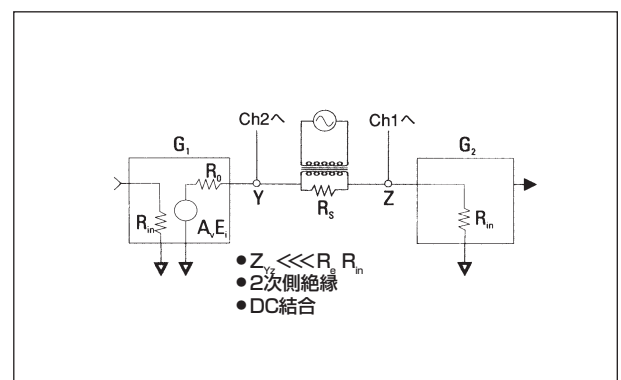


図17 トランスによる信号注入

## 制御システム測定のアクセサリ

アジレント・テクノロジーでは多くの制御システムとネットワーク・アナライザやFFT・アナライザに適合するように設計した制御システム・アクセサリを3機種取り揃えています。DC～1 MHzの範囲で最も用途の広いデバイスとは図18に示す**Agilent 35280A**アクティブ・サミング・ジャンクションです。

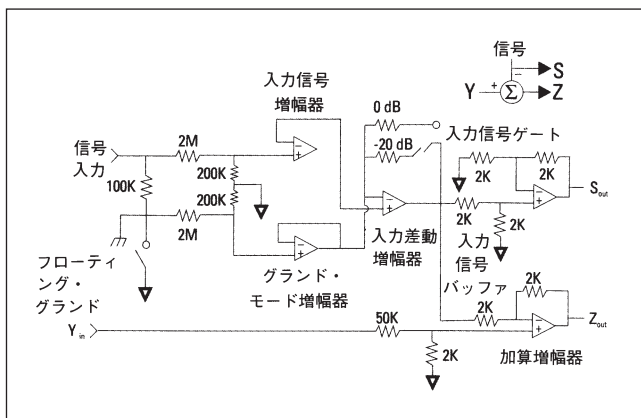


図18 35280Aサミング・ジャンクション

このデバイスは $\pm 10$  Vの信号に対応しており、サミング・ジャンクションの信号は $\pm 42$  Vpkまでのフローティングが可能です。

さらに高電圧(2次フローティング電圧600 Vpk)が必要なアプリケーションや単に受動素子が必要な場合には図19に示す35282Aのようなトランスを使ったデバイスの方が適切です。適用周波数範囲は30 Hz～200 kHzです。

図20に示す35281A「クリップオン」トランスは300 Hz～10 MHzで最も高い周波数特性を持っています。これを使うと信号を注入するのにプローブを「クリップオン」するだけの簡単な操作で済みます。

これら3種類のアクセサリについては付録Aに詳しい仕様が記載してあります。

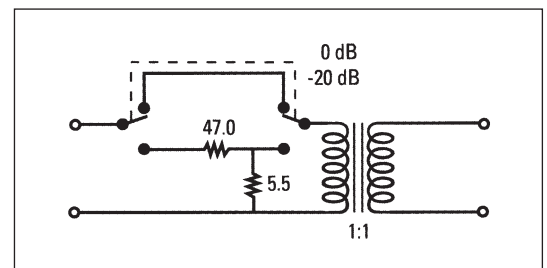


図19 35282A 30 Hz～200 kHz用トランス

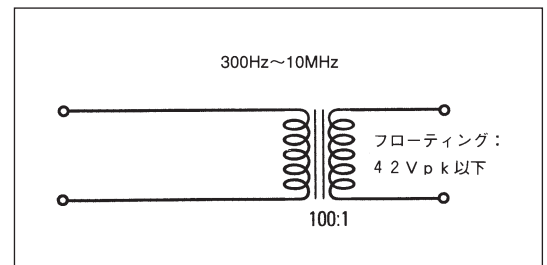


図20 35281A 300 Hz～10 MHz用トランス

第4章

代表的測定例

これらの方法とデバイスをご理解いただくために開ループ・ゲインGHが次の式で示される制御システムの測定を行うことにします。

$$\frac{7 \times 10^7}{s^3 + 972s^2 + 78944s + 1018368}$$

解析的に求めたこのシステムのゲイン・マージンは周波数281.0 Hzにおいて0.68 dB、位相マージンは周波数270.25 Hzのときに1.3°です。DC (0 Hz)のときのゲインは36 dBです。この開ループ・ゲイン関数を35670Aデジタル・サーボ・アナライザのシンセシス機能を用いてプロットしたものが図21です。この図は上述の解析関数のDCから1 kHzまでの801ラインを周波数分解能1.25 Hzでプロットしたものです。(このアプリケーション・ノートに掲載したデータは複数のアナライザで得られたものなので、すべてのデータは標準データ・フォーマット (SDF) ユーティリティ“Viewdata”を用いてプロットしています。このSDFデータ・フォーマットはFFT・アナライザ(サーボ・アナ

ライザ)の現行機種ของすべてに標準となっており、例えばMicrosoftのWord for WindowsやLotusのAMI Proのような多くのワープロ・ソフトがこのプロットを直接取り込むことができます。)

この周波数分解能でマーカ機能を用いて読み取った位相マージンは269 Hzのときに1.4°です。

既に述べたように、制御システム・ループには開ループ・ゲイン関数を推定できる測定位置はたくさんあります。アプリケーション・ノート243-5の表1にはその18種類の方法が示してあります。同じ内容を本書の表1に再度掲載しました。これらの方法のうち8つはSFT解析法としてスエプト・サイン・テスト信号を使います。残りの10の方法は広帯域テスト信号とFFT解析法を使用しています。

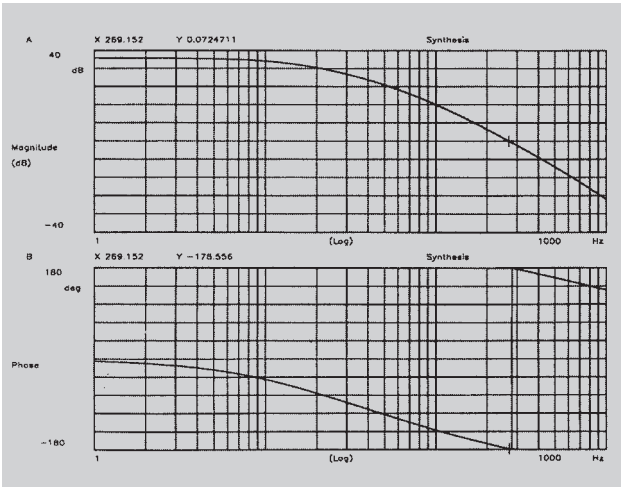


図21 開ループ・ゲインの計算結果

SFTとスエプト・サイン・テスト信号—35280Aサミング・ジャンクション使用

SFT法とおなじみの接続法であるY/Sを使って、これらの測定方法を見ていきましょう。SFTを使うので、アプリケーション・ノート243-5と表現を合わせて、この測定方法をYSS (YSSの2文字目がSFTを表します)と呼ぶことにします。実際の測定を行う測定器は35670Aです。図22のループ内のサミング・ジャンクションは35280Aです。

表2に示す条件でアナライザを設定します。

表2

MEAS MODE	Swept Sine Log Resolution
SELECT MEAS	Frequency Response
AVG	Number of Avg= 1 Auto INtegrate
FREQ	Start Frequency Stop Frequency Resolution 66pts/dec
SOURCE	Level 50 mv
RANGE	Auto up and down
COUPLING	DC and Floating

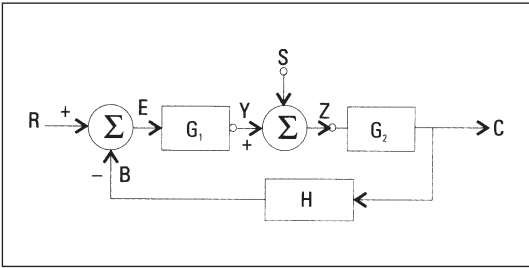


図22 ループ内部に信号を加える一般的な例

MicrosoftはMicrosoft Corporationの米国登録商標です。  
LotusはLotus Developmentの米国登録商標です。

表1 測定法一覧表

外部信号注入法

1*	B + E	1	$B^*/IEI^2$	$(BE^* + BB^*)/(EB^* + EE^*)$	バイアスなし分散（最少）
2*	BSE	3	$BS^*/ES^*$	T	バイアスなし・分散（小）
3	B/E	12	$BE^*/IEI^2$	T	潜在的バイアス・分散（最少）
4*	ESA	4	$ES^*/AS^*$	$(1-T)/T$	低バイアス・分散（小）
5*	E/A	2	$EA^*/IAI^2$	$(1-T)/T$	低バイアス・分散（最小）
6*	ESS	5	$ES^*/ISF^2$	$-(1-T)/T$	低バイアス・分散（小）
7*	E/S	5	$ES^*/ISF^2$	$-(1-T)/T$	6番と同じ
8	BSA	9	$BS^*/AS^*$	$T(1-T)$	潜在的バイアス・分散（大）
9	B/A	8	$BA^*/IAI^2$	$T(1-T)$	潜在的バイアス・分散（大）
10	BSS	11	$BS^*/ISF^2$	$-T(1-T)$	潜在的バイアス・分散（大）
11	B/S	11	$BS^*/ISF^2$	$-T(1-T)$	10番と同じ

内部信号注入法

12*	Z/S	7	$ZS^*/ISF^2$	$-(1+T)/T$	低バイアス・分散（中）
13*	ZSS	7	$ZS^*/ISF^2$	$-(1+T)/T$	12番と同じ
14*	Y-Z	6	$YZ^*/IZI^2$	$(YZ^* - YY^*)/(ZY^* - ZZ^*)$	低バイアス・分散（中）
15*	YSZ	6	$YS^*/ZS^*$	-T	14番と類似
16	Y/Z	13	$YZ^*/IZI^2$	-T	バイアス・分散（中）
17*	YSS	10	$YS^*/ISF^2$	$T/(1-T)$	潜在的バイアス・分散（大）
18*	Y/S	10	$YS^*/ISF^2$	$T/(1-T)$	17番と同じ

表1はアプリケーション・ノート243-5掲載の開ループ・ゲイン関数を計算するための18の「測定法ごとの接続法」の要約を再録したもの

表1の第1欄のアスタリスクは、この方法が大きなループ・ゲイン振幅の測定に適することならびに測定可能な最大ループ・ゲイン振幅がテスト信号振幅とアナライザの雑音の振幅の比によって制限されることを示しています。

35670Aサーボ・アナライザにはスエプト・サイン・モードで良好な計測のできる機能があります。さらに重要な機能の一つはダイナミック・オート・レンジ機能です。“Auto range up and down”に設定しておくことによって、アナライザが掃引の各点において両方のチャンネルの入力レンジを常に最適値になるように調整します。このため、測定ダイナミック・レンジは140 dBを上まわっています。

信号レベルを設定するときに、若干の注意を払う必要があります。多くの制御システムでは、ループ・ゲインが非常に大きく、ゲイン・マージンが位相マージンが最小となる周波数あるいは共振周波数において、制御ループ内の信号レベルまたは制御された変数が大きくなることがあります。通常、精密な測定をする前に、信号源駆動信号の最適レベルを決定しておくことが効果的です。ゲインを飽和させない範囲で、あるいは応答レベルの判定条件を越えない範囲でS/N比をよくする値を決める必要があります。信号レベルを決定する現実的な方法としては低い信号レベルから掃引を開始し、制御ループの数箇所まで信号レベルを（電気的および機械的に）モニタしながら限界周波数まで手動で掃引させます。

被測定デバイスに大きなQの共通点がある（減衰が小さなポール）ときは、もう一つの35670Aの特長である“auto resolution（分解能自動設定）”が有効です。共振のある領域では多くのポイントを測定し、その領域外ではわずかなポイント（粗な分解能）を測定するだけで済むように、掃引が調節されます。この結果、測定結果のデータは不均一な周波数間隔になります。本器に内蔵されたカーブ・フィット機能は普通のリニア周波数間隔とログ周波数間隔のほかにもこの不均一周波数間隔でも利用できます。この機能を用いて低Q領域（減衰の大きい領域）はすみやかに、大きなQの共振領域はゆっくりと掃引することによって測定に要する時間を最短にすることができます。

アナライザの信号出力と35280Aの“S”入力を接続し、35280Aからのバッファされた“S”信号をアナライザのチャンネル1に、“Y”信号をアナライザのチャンネル2に接続してください。

YSS測定をすると図23に示すように開ループ・ゲイン関数GHの推定値が得られます。測定に要する時間は6分を少し超えます。

YSS測定データからこの推定をするためには波形に以下のような四則演算をしなければなりません。

$$GH = \frac{T}{1-T}$$

演算後のデータを図23に示します。

このグラフからアナライザ内蔵のXマーカ機能を使うだけで開ループ・ゲインの測定推定値を求められます。この位相マージンの測定推定値は

$$\text{位相マージン} = 2.281^\circ$$

(264.54 Hzにおいて)

となります。このXマーカを使っただけで、0 dBに最も近い周波数ラインは+0.0518374 dBの値で264.54 Hzの位置にあることがわかります。

この推定値を改善するために、アナライザにはデータを補間し、ゲインが実際に0 dBのときの周波数と位相の値（同様に位相が-180°のときのゲインの値）を決定するスペシャル・マーカ機能があります。この機能を使うと、次のゲイン・マージンと位相マージンの推定値を得ることができます。

$$\text{ゲイン・マージン} = 0.627 \text{ dB}$$

(277.4 Hzにおいて)

$$\text{位相マージン} = 2.04^\circ$$

(265.6 Hzにおいて)

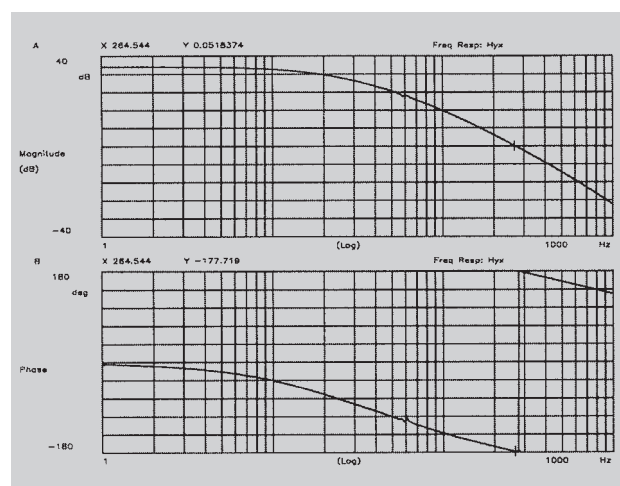


図23 YSS測定から得られた開ループ・ゲインGH

解析関数に基づく予想結果に最もよく似た測定結果は、YSZスエプト・サイン法によって得られました。この測定結果を図24に示します。この測定法の主な欠点は測定時間が長いことで、12分かかります。余分にかかる時間の大部分は、入力チャンネルのオート・レンジングと、分散があらかじめ定めてあるレベル（この例では5%）に達するまで、積分する自動積分機能に使われるものです。

FFTとバースト・ランダム・テスト信号

次の測定は、スエプト・サイン・テスト信号とSFTを使う代わりに、狭帯域FFTモードとバースト・ランダム・テスト信号を使って行ったものです。

バースト・ランダム・テスト信号とは、基本的にはアナログ・デジタル変換器（ADC）が、T秒間のデータ・レコードの捕獲を開始すると同時に始動するバースト・ランダム・ノイズのことです。このT秒間の測定には両方のチャンネルからの2048個のADCデータ・サンプルが含まれています。これらの記録をフーリエ変換するときに「リーケージ」誤差が生じないようにこのランダム・テスト信号の持続時間をT以下に調整します。この測定においては持続時間を70%としました。30%のオフによりデータ記録の終わりまでにシステム応答がほとんど0まで減衰され、これを確保することによりフーリエ変換時のリーケージ誤差を避けることができます。

この測定で使用する正しいウインドウは方形波（ユニフォーム）ウインドウ（すなわちウインドウ関数を使わない）です。図25にチャンネル1とチャンネル2（SとY）の時間履歴を示します。

図25の上段のトレースではランダム・テスト信号はT=0に始まりタイム・レコードの70%の間継続しています。下段のトレースはテスト信号に対するYの応答を示し、テスト信号がゼロになってからの応答の減衰も示しています。リーケージがほとんどないと見なすことができるためには、レコードが終わるまでに応答がほとんどゼロまで減衰させる必要があります。減衰時間がレコードの30%~40%を超える場合には測定のタイム・レコードTを増やす必要があります。これはズーム・モードを使い周波数分解能を増す（Δfをより小さくする）ことによってレコード長Tを大きくするかあるいは（アナライザによっては）変換サイズ（ブロック・サイズ）を増やすことによって行えます。テスト信号のON時間が50%程度以下の場合には、テスト信号が短いためにS/N比の問題が発生する可能性があります。このFFTモードのアナライザの設定条件を表3に示します。

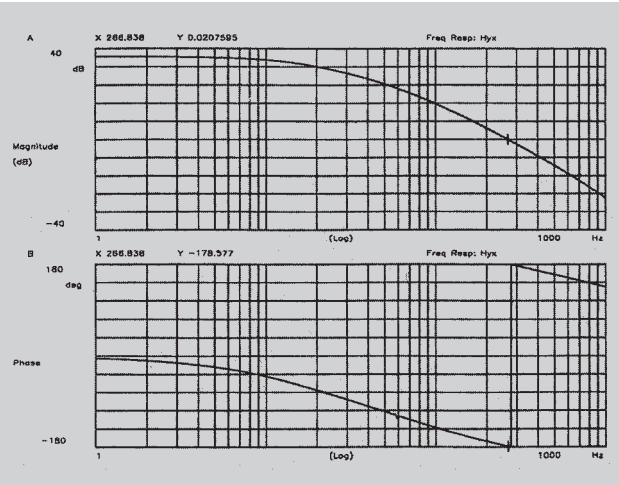


図24 YSZ測定によって得られた開ループ・ゲイン関数

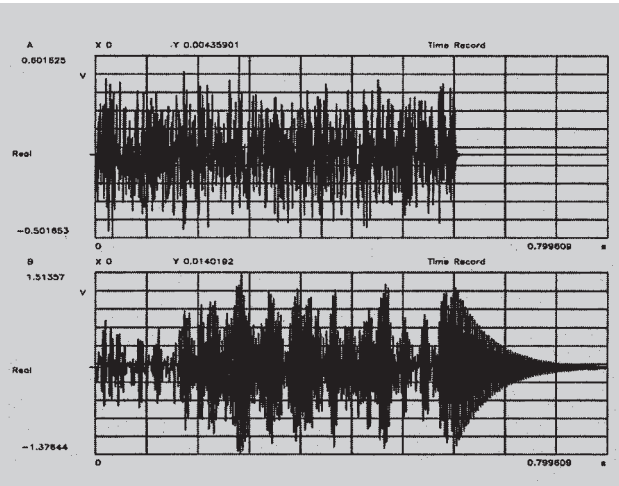


図25 上段のトレースはS、下段のトレースはY

表3

MEAS MODE	Linear Resolution
SELECT MEAS	Frequency Response
WINDOW	Uniform
AVG	Number of Avg=10 Stable (Mean)
FREQ	Span 1 kHz Zero Start
SOURCE	Type:Burst Random Level:0.8 V
TRIGGER	Source Trigger
RANGE	Manual or Auto Up
COUPLING	DC and Floating

## Y/S測定

この方法によって得られた開ループ周波数応答の測定結果を図26に示します。アベレーシングを10回行った測定では、総測定時間として約10秒を必要としました。分散を減らすためにはもっと多くのアベレーシングを行う必要がありましたが、SFTによって6分かかって得られるのと同等のゲイン・マージンと位相マージンの推定値が、10秒間で得られました。

狭帯域FFTモードの速さに関する利点はS/N比が悪いときや、システムに非線形性が含まれているときには、必ずしもSFTモードに比べてよいとは限りません。このテスト・デバイスは外部のノイズの影響を非常に受けにくいので、測定しようとする周波数応答関数にQの高い共振点を持つ場合には、FFTモードは高速になります。実際のY信号スペクトラムにはこの高い共振の動きが含まれており、図30に示すものと似ています。

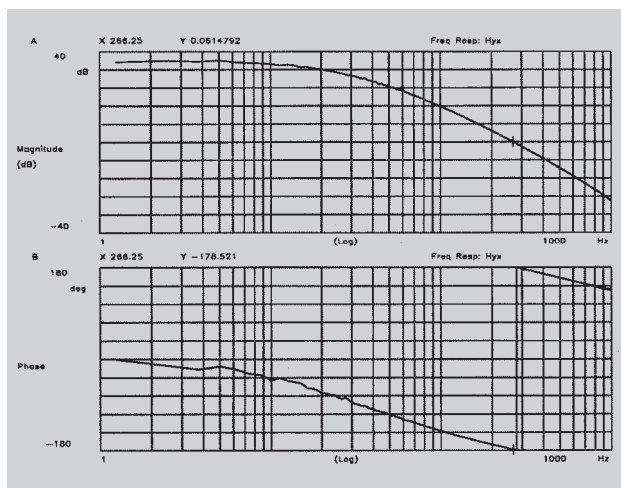


図26 Y/Sを用いて得られた開ループ・ゲインGH

FFTが速さの点で勝るのは、SFTはDUTおよびアナライザのトラッキング・フィルタあるいはそのいずれか一方に、いつも安定した結果をもたらすことができるように、低速掃引を必要とするためです。FFTモードにおいては800ラインの平行・フィルタ・アナライザと同等なので、SFTモードを使って800回の繰り返し結果を得ようとした場合に比べて、セトリング時間が1回で済みます。

非常にS/N比の悪い信号を取り扱う場合には、FFTモードで必要とされるアベレーシング回数は非常に大きくなり、SFTに対する速さのメリットはほとんどなくなります。

## Z/S測定

Z/Sを用いるとアプリケーション・ノート243-5で1ランク上に位置付けられた測定ができます。Z/Sが得られれば演算操作により開ループ・ゲインの推定値が求められます。

$$GH = -\frac{1+T}{T}$$

図27はバースト・ランダム・テスト信号を使った測定結果を示したもので、アベレーシング回数は10回で済んでいます。ゲイン・マージンと位相マージンの測定結果は以下の通りです（スペシャル・マーカ機能を使っています）。

ゲイン・マージン =  $-0.706$  (278.1 Hzにおいて)

位相マージン =  $1.36^\circ$  (267.2 Hzにおいて)

YSS、Y/S、Z/S法は最近開発された測定方法のうちで典型的なものです。アプリケーション・ノート243-5が、従来からの測定方法およびいくつかの新しい方式による測定誤差を解析的に示したのは成果の一つと言えます。アプリケーション・ノート243-5は、その中で示したランク付けを根拠に、従来の測定時の配置が最良のものではないことを指摘しました。これらのランク付けは測定における種々の雑音源や分散によって引き起こされるバイアス誤差に基づいています。

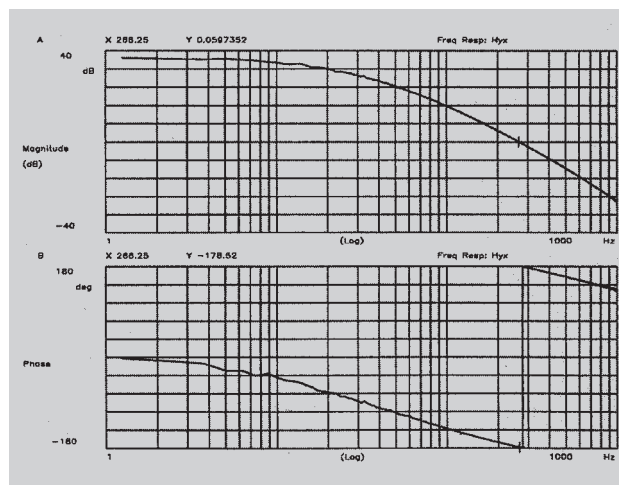


図27 Z/Sから得られた開ループ・ゲイン関数GH

いままで最も一般的な方法であったのはY/Z法ですが、AN243-5では最低にランクされています。バースト・ランダム信号を使いアベレージングを10回行った場合の結果を図28に示します。Y/Zの場合、-1の乗算以外に波形への演算は必要ありません。Y/Zで直接開ループ・ゲインを計算できることが一般的であった理由と思われます。

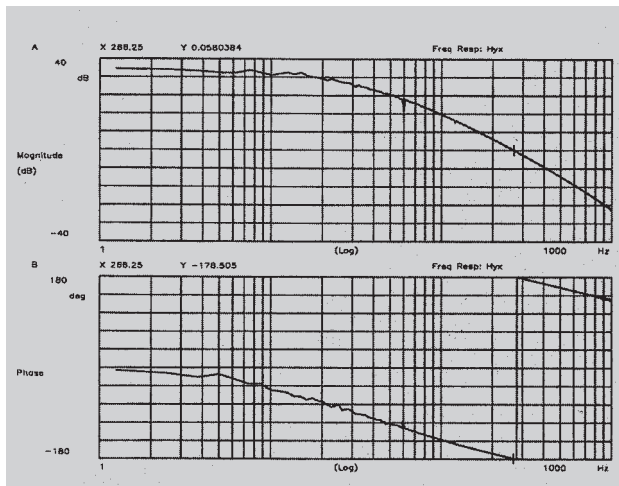


図28 Y/Z測定法によって得られた開ループ・ゲインGH

この方法は分散とバイアスの点から雑音の影響を受けやすいので低周波において分散が大きくなります。

## 第5章

### トランス・タイプの信号注入デバイス

#### FFTモードとバースト・ランダム・テスト信号

35280Aサミング・ジャンクションを使って測定する代わりに、35282A信号注入トランスを使うことができます。図29の測定はFFTモードとバースト・ランダム・テスト信号を使って、表3に示したのと同じ構成で測定した結果です。測定はY/Z法で、アベレージング回数は50回です。

このデバイスのゲイン・マージンと位相マージンの測定結果から、かなり良い推定値を得ることができました。30 Hz以下のテスト信号が注入できないのがこのトランスの欠点です。テスト信号の低周波域のロールオフ特性のために、広帯域FFTモードでは、信号レベルがアナライザのダイナミック・レンジを下まわることになります。図30に測定された入出力信号のパワー・スペクトラムを示します。上段のZ信号のパワー・スペクトラムを見ると、スペクトラムのダイナミック・レンジが約85 dBあることがわかります。低周波数領域における高ループ・ゲインに基づく小信号と、トランスのカット・オフに起因して低周波数において十分なテスト信号が得られないので、この測定法は約30 Hz以上でしか使用できません。

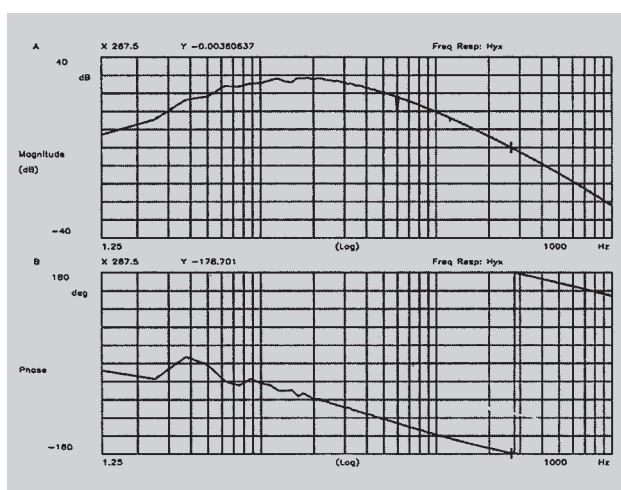


図29 35282A信号注入トランスを使ったY/Z法による測定結果

#### SFTモードとスエプト・サイン・テスト信号

アナライザのスエプト・サイン・モードを使う測定法によってダイナミック・レンジを80 dBから140 dBに広げることができます。図31にこのスエプト・サイン法による測定の結果を示します。

掃引が進むにつれてそれぞれの周波数におけるレンジ設定が最適化できるようになったことによって、ダイナミック・レンジが拡大しDC(周波数ゼロ)近くまで測定できるようになりました。測定時間が長くなってもよい場合は、信号注入トランスを使う場合には特に、スエプト・サインは最適な方法です。

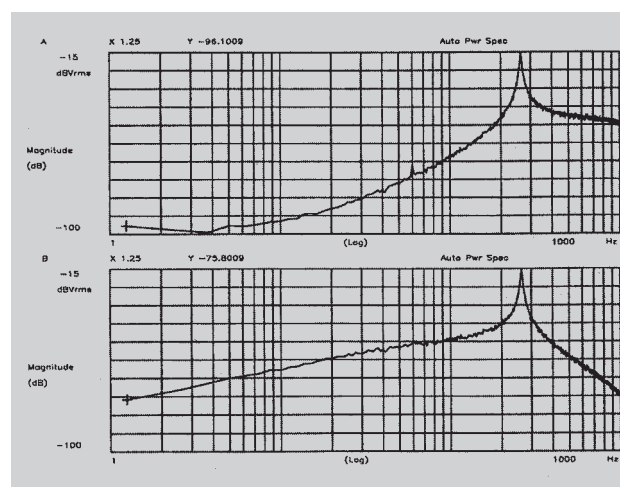


図30 ZとYの入出力パワー・スペクトラム

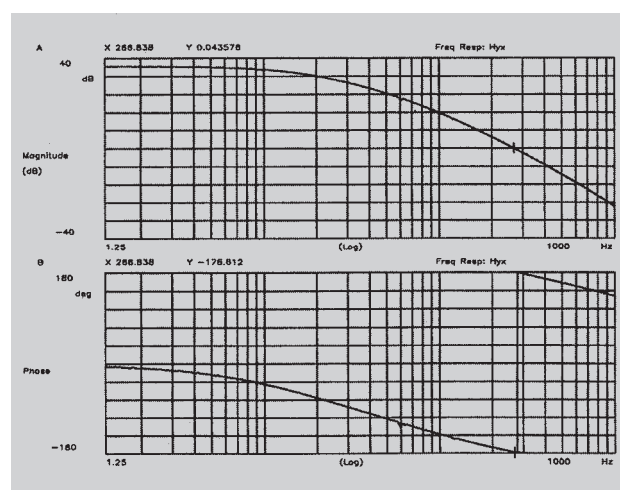


図31 35282Aトランスを用いたYSZ測定の結果

## 第6章

### ディスク・ドライブのサーボ・ループ

今まで述べて来た測定に用いたDUTでは、かなり直接的な測定が可能で、そのほとんどが十分妥当な結果が得られました。ディスク・ドライブの位置決めサーボのようなデバイスでは、理想的な測定環境ではなくなります。機械的な構成要素と疲弊のような、これらのデバイスにありがちな問題があるので、信号に雑音が多量に含まれます。3600 rpmで回転しているために60 Hzの倍数の雑音が大量に発生します。

この測定をするためにループ内のアクチュエータを駆動するパワー・アンプの直前に35280Aサミング・ジャンクションを挿入しました。

主に高速で簡単だという理由から、最初にY/Z法による測定を行いました。バック・グラウンド・ノイズが多いためランダム・ノイズをテスト信号に選びました。この種の信号につきもののリーケージに対処するために、ハニング・ウィンドウを選びました。図32に開ループ応答を求めるために、-1を

掛けたY/Zの測定結果を示します。時間ドメインで観察されたS/N比は約1:1です。60 Hzの倍数におけるすべての特異性に注意してください。この測定結果は1000回のアベレーシングで800ラインの分解能を持っており、高速アベレーシング・モード(アベレーシング終了後、画面更新)で約8.5分かかっています。60 Hzのノイズの影響を避けるためにアベレーシング回数は1000回を選びました。

アプリケーション・ノート243-5で高位にランクされているY/S測定の結果を、図33に示します。この図は開ループ・ゲイン関数GHを推定するために、波形演算処理 $T/(1-T)$ がしてあります。この測定はアベレーシングを700回行い、約6分かかりました。ランダム・ノイズとハニング・ウィンドウを使用しました。当初Y/Z法で得られた結果に基づいて1000回のアベレーシングを設定したのですが、700回で適切な結果が得られたためそこでアベレーシングを中断しました。

スエプト・サイン法を用いて行ったディスク・ドライブのYSZ法による測定結果を図34に示します。この測定には分解能2.5 Hzのリニア・スイープでおよそ12分かかりました。

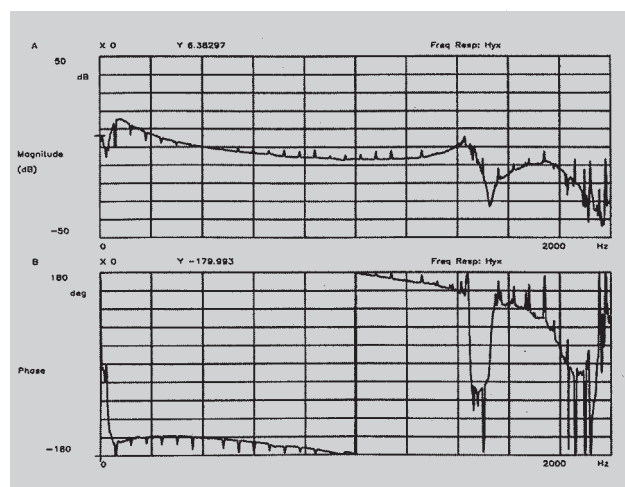


図32 ディスク・サーボのY/Z測定の1000回のアベレーシング結果

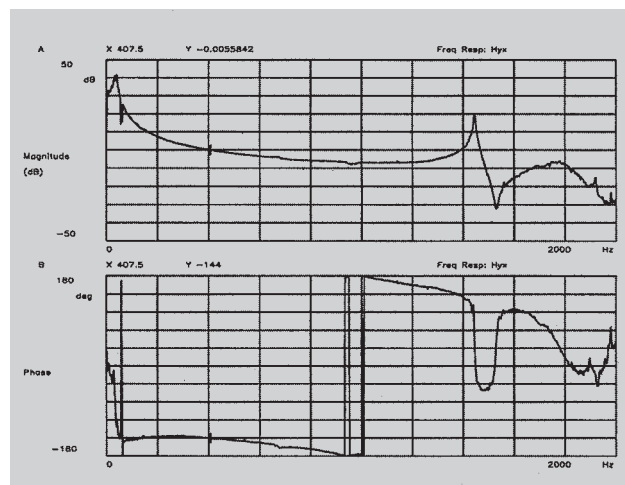


図33 Y/S法によるディスク・ドライブの開ループ測定結果

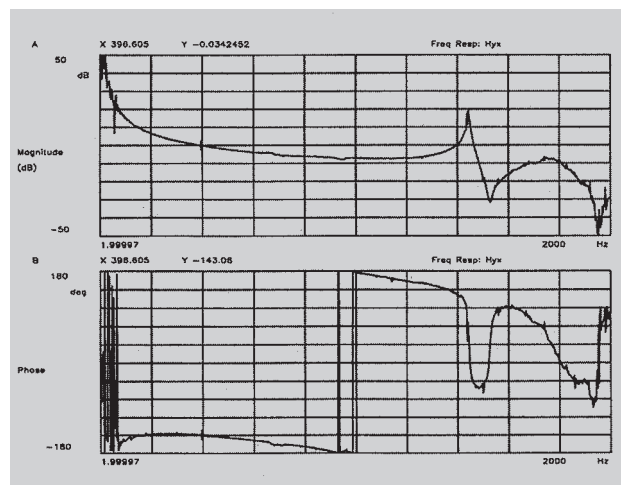


図34 リニア・スイープによるYSZ測定結果

## アプリケーション・ノート243-5 の新しいY-Z法の使用

ループ内テスト信号法の中で、アプリケーション・ノート243-5のランク付けにおける最良の方法は、最低ランキングの構成（オートおよびクロス・パワー・スペクトラム）を使用したものです。図35の上段にZ (ZZ\*) の入力パワー・スペクトラム、下段にY (YY\*) の出力パワー・スペクトラムを示します。図36の上段に振幅表示のクロス・パワー・スペクトラムYZ\*、下段に位相表示を示します。

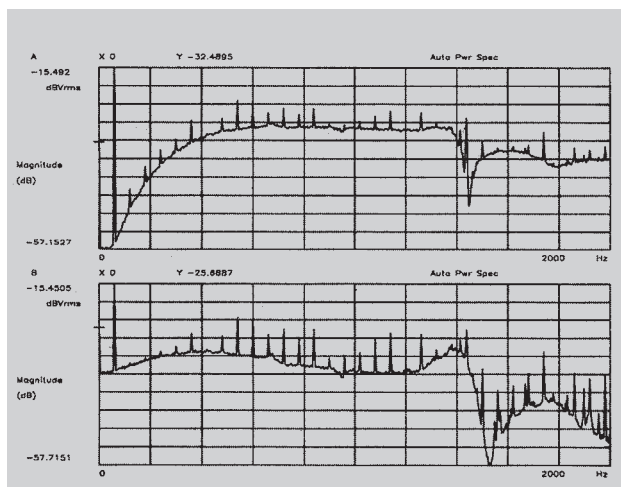


図35 上段はパワー・スペクトラム  $|Z|^2$  すなわち (ZZ\*)、  
下段は  $|Y|^2$  すなわち (YY\*) を示す。

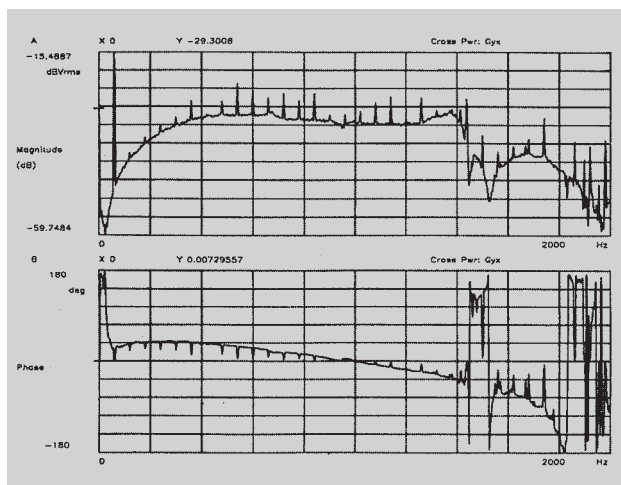


図36 クロス・パワー・スペクトラムYZ\*

これまでの図に示した開ループ・ゲイン関数GHの位相スペクトラムと比較できるようにするには、図36の位相スペクトラムには-1を掛ける必要があります。

最良の方法はY-Zで表され、YとZのオート・スペクトラムとクロス・スペクトラムから次式のように計算されます。

$$\frac{YZ^* - YZ^*}{[YZ^*]^* - ZZ}$$

この計算結果を図37に示します。Y/Z直接法で見られた60 Hzの高調波がY-Z法でのプロットからは除去されています。バイアスも除去されており、1450 Hz周辺の共振ピークの推定に良い結果が得られています。スエプト・サインYSZ法ほどではありませんが、低周波数ゲインの推定値にも良い結果が得られます。

## FFTモードとバースト・チャープ・テスト信号

ランダム・ノイズ・テスト信号のピーク対rms比がスエプト・サイン・チャープ・テスト信号と比較して大きいので、DUTに応答限界がある場合には正弦波チャープを使用するのが有利です。両方向に数度(°)のトラベル・リミットを持つメカニカル・ストップがある航空機の操縦舵面はその一例です。この場合にはスエプト・サイン・チャープを使うと、スエプト・サインではピーク対rms比が低いのでS/N比がよくなります(両方とも操縦舵面の振幅をメカニカル・ストップの近くまで動かすものとします)。

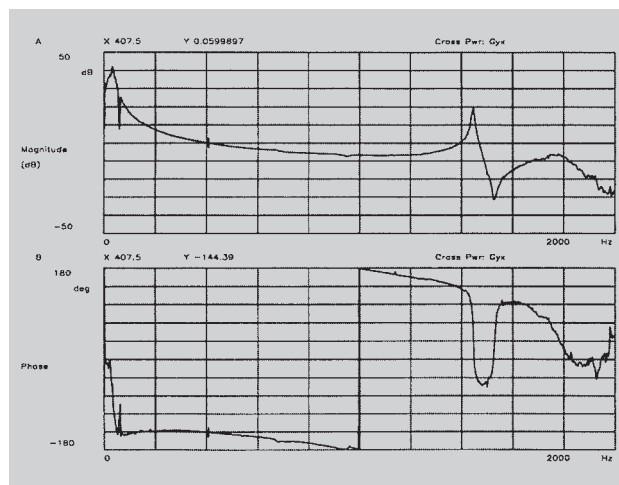


図37 Y-Z法で計算した開ループ・ゲイン関数GH

11ページの表3と同じ設定で、ソース・トリガによる連続チャープ(バースト・スエプト・サイン)出力、ユニフォーム・ウインドウの選択にアナライザを変更するだけで測定が行えます。ベクトル・アベレージング機能を示すために、この測定では35670A FFT・アナライザを使用しました。図38にはこの設定で測定したZとYに対する時間波形を示したものです。この測定において高速正弦波スイープのバースト長はブロック時間の70%としました。ブロック時間の70%に1600 Hzのスペンを掃引するので、掃引速度は非常に高速です。このアナライザは800ライン、1600 Hzスペンとして設定されているので、ブロック時間Tは0.5秒です。この掃引速度ではDUTの定常的な応答が得られないので、この著しく高速な掃引速度を処理する唯一の方法は、高速フーリエ変換(FFT)モードだけです。

図38の応答の最後の25%はやや高いバックグラウンド・ノイズ・レベルを示しています。この測定におけるS/N比は約3:1です。この測定においては各タイム・レコードのスタートに同期して同じ掃引信号を繰り返し出力するので、ベクトル・アベレージング(時間ドメイン・アベレージングと同等)を使うことができます。このプロセスによって、テスト信号掃引と関連しない信号をアベレージングによって除去します。図39はこの方法による255回アベレージング後の測定結果を示します。Y/Zの直接測定はベクトル・アベレージングを用いたY-Zの結果と等価であることがわかります。

ベクトル・アベレージングの代わりに、RMSアベレージングを使って測定を繰り返すと図40に示すようにY/ZとY-Zの違いがわかります。上段にY/Z、下段にY-Zを示しています。

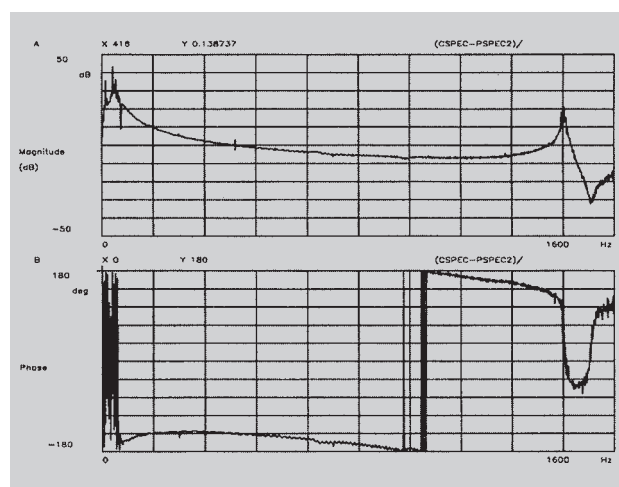


図39 バースト・サイン・チャープとベクトル・アベレージングを用いたY-Z測定結果

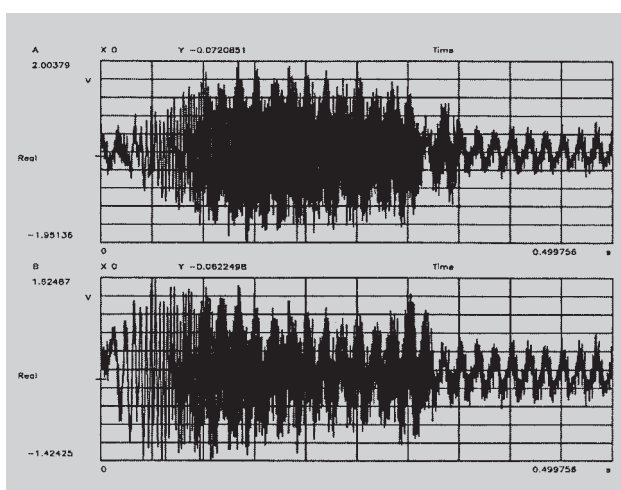


図38 上段はZ、下段はYのバースト・チャープ応答信号

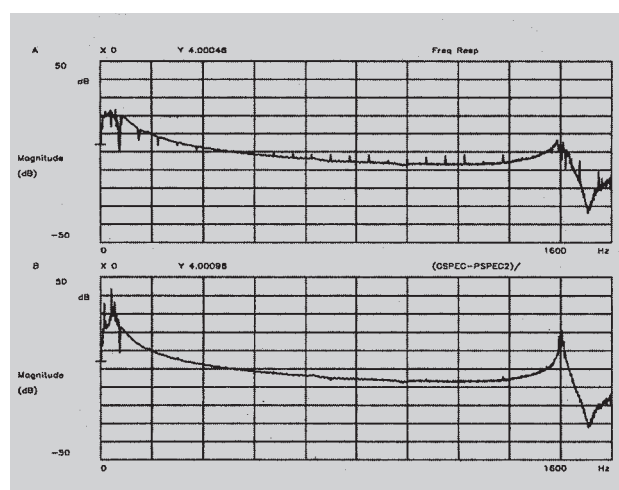


図40 バースト・チャープとRMSアベレージングを用いたY/ZとY-Zの測定結果

## 第7章

### スイッチング電源

これらの制御システムを使う場合、スイッチング電源の測定は信号注入デバイスをどこに入れるかを決め、選択に応じた対応を行うことから始まります。マルチ・ループの設計においてはすべてのループが影響される点に信号が注入されることが重要です。

以下のサンプルでは図42のR2の代わりに35280Aサミング・ジャンクションを信号注入デバイスとして選んでいます。

信号注入には多くの場合1次側が最適ですが、電源電圧の1/2でフローティングしているのが普通です。1次側のコモンを接地するためには絶縁トランスを使う必要があります。このような条件はMagnetek Triad #N-90MD定格115V 250 VAのような医療用絶縁トランス（リーク電流 $<50\mu\text{A}$ ）によって実現できます。

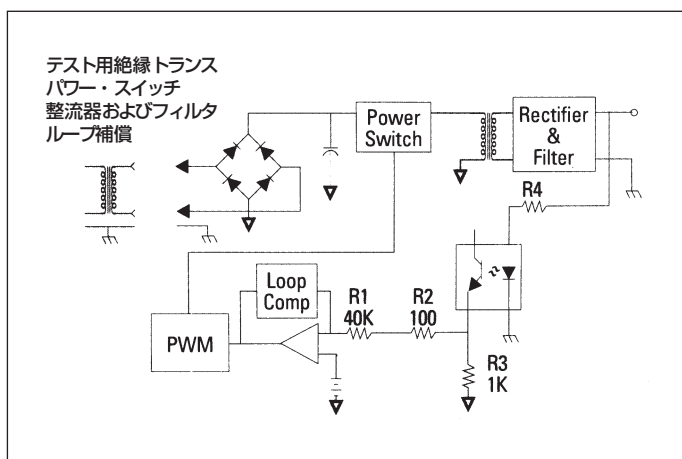


図42 スwitchング電源

図43は-Y/Z測定によって求めた開ループ・ゲイン関数GHです。この測定にはわずかな誤差が含まれます。それはサミング・ジャンクションにおけるY入力の入力インピーダンスが演算増幅回路の通常の負荷インピーダンスと同じではないからです。スエプト・サイン測定は35670Aを用いて行いました。120 Hzにおける特異性は整流器のリップルを矯正しようとするフィード・バックに起因しています。

信号注入デバイスをこの回路に接続するもう一つの方法は100Ωの抵抗R2に並列に接続するだけでよい35282Aトランスを使用することです。図44にYとZ測定のための接続を示します。

このセット・アップを使用した-Y/Zの測定結果を図45に示します。この測定によって開ループ・ゲインGHを得ています。オプティカル・アイソレータのエミッタ・フォロワのインピーダンス増大のために、このゲインは5 kHz以上で低下しています。

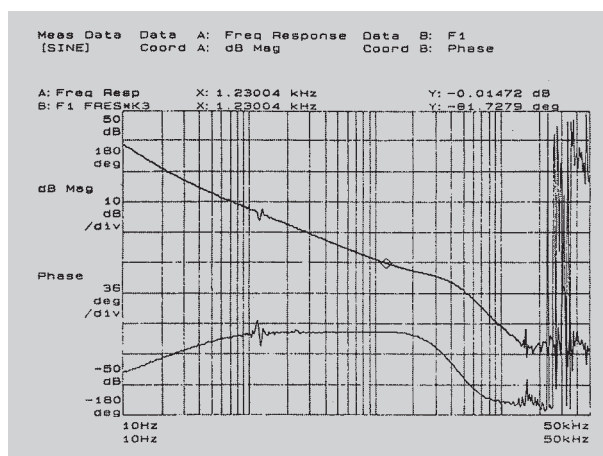


図43 -Y/Z測定によって得られた開ループ・ゲイン関数GH

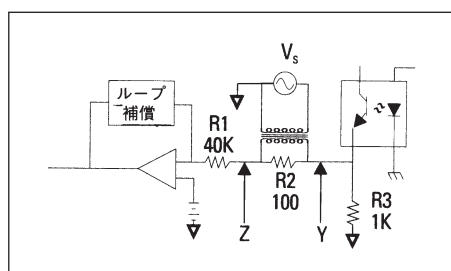


図44 35282Aを使用した信号注入

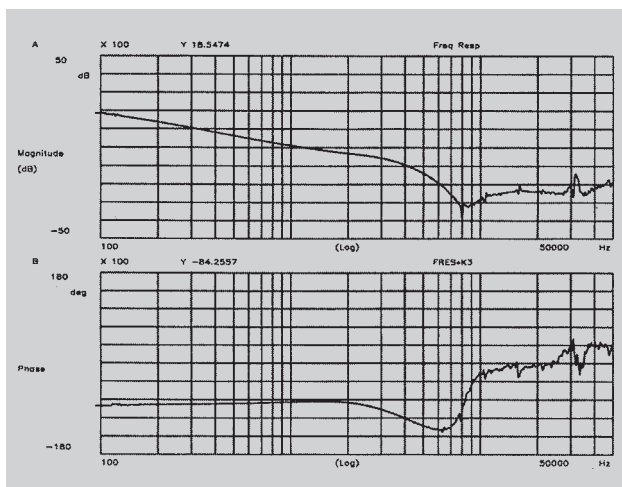


図45 35282Aトランスを用いて求めた開ループ・ゲインGH

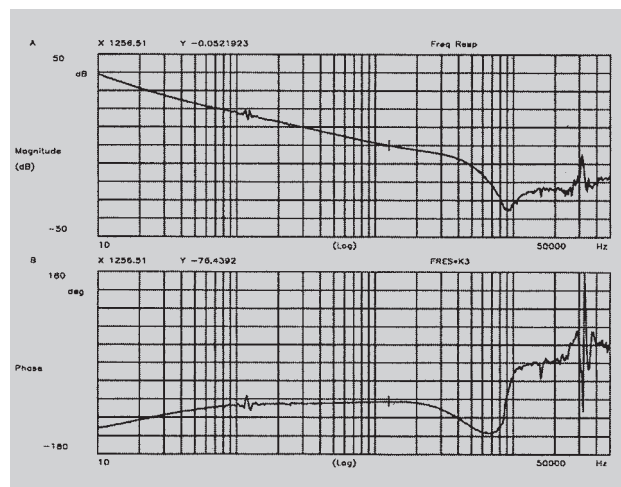


図47 能動トランスを用いて得た開ループ・ゲイン関数

この回路に信号注入デバイスを接続するのに図46に示すように、「能動トランス」として35280Aサミング・ジャンクションを使用するのがより賢明な方法です。この接続を用いると信号源をフロートさせることができ、回路内のインピーダンスに与える影響を最小限にすることができます。図47にゲイン関数GHの測定結果を示します。①入力ショート

図48は図46と同じ構成で35670Aの代わりに3577Aを使用した測定結果です。

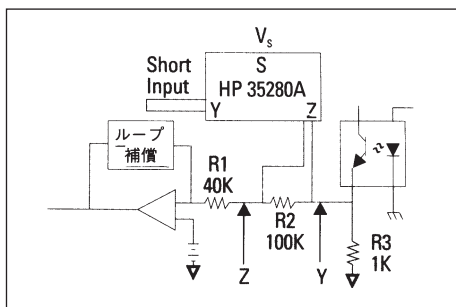


図46 35280Aを能動トランスとして使用する例

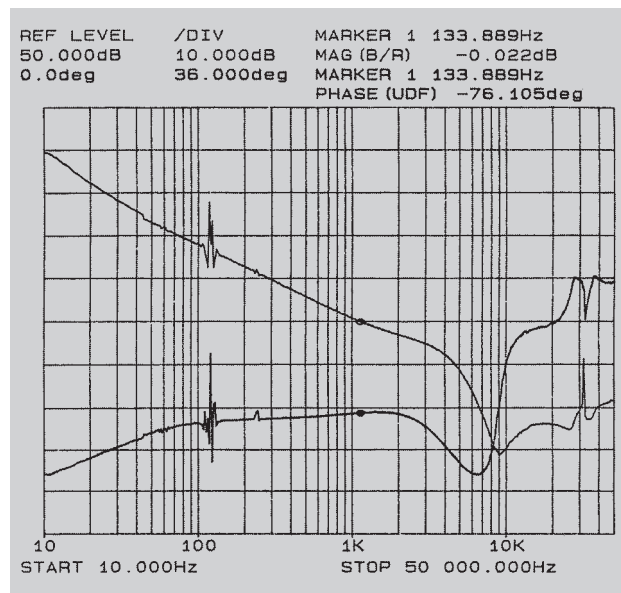


図48 8751Aを用いた測定結果

第8章

要約

制御システムの開ループ・ゲイン関数を有効に測定するには多くの方法があります。信号注入デバイスとしてのサミング・ジャンクションやトランスの使用、テスト信号タイプ(正弦波と広帯域、どんなタイプの広帯域テスト信号か)の選択、測定方式(Y/Z、Y-Z、Y/Sなど)ならびに使用するアナライザの能力などの選択肢があります。どの選択も与えられた状況における測定結果の品質に大きな影響を与えます。

表4に選択肢とテスト信号タイプの観点から、種々の可能な選択肢の際立った長所・短所を要約しました。この表はガイドにすぎず、完璧なものではありません。一般化しようとすれば必ず例外が発生します。

アジレント・テクノロジーではこれらの測定のニーズに対応できる機能を備えた次のような多くのアナライザを用意しております。

- 35670A      サーボ・アナライザ
- 35670A      デジタル・サーボ・アナライザ(デジタル入出力を含む)
- 35670A      FFT・アナライザ
- 3566A/3567A      PCベース 多チャンネルFFT・アナライザ
- 8751A      ネットワーク・アナライザ
- 35670A      2/4チャンネル・FFT・アナライザ

表4

FFT (高速フーリエ変換) アナライザ・モード								
SFT (スエフト・フーリエ変換) アナライザ・モード	非周期的	周期的アナライザ・ウインドウ使用			トランジェント・アナライザ・ウインドウ使用			
	真 正 ランダム ・ノイズ	サイン ・チャープ (高速サイン ・スイープ)	擬 似 ランダム ・ノイズ	周期的 ランダム ・ノイズ	インパクト または デルタ関数	バースト ・サイン ・チャープ	バースト ・ランダム ・ノイズ	
定常正弦波								
---	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES	最少リーケージ
Very High	Fair	High	Fair	Fair	Low	High	Fair	S/N比
Poor	Good	Good	Good	Fair	Good	Very Good	Very Good	測定速度
YES	NO	YES	NO	NO	NO	YES	NO	非線型特性
Fair	Good	Good	Good	Fair	Fair	Good	Good	セット・アップの容易さ
Very High	Fair	High	Fair	Fair	Poor	High	Fair	RMS対ピーク比
YES	NO	YES	NO	YES	YES	YES	NO	ベクトル・アベレージングの可否
Very High	Fair	Good	Fair	Fair	Fair	Good	Fair	測定ダイナミック・レンジ
---	Hann	Rect	Rect	Rect	Rect	Rect	Rect	ノーマル・ウインドウ機能

## References:

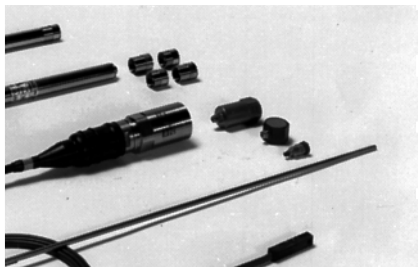
- [1] Control System Development Using Dynamic Signal Analyzers, Hewlett-Packard Application Note 243-2.
- [2] Control System Loop-Gain Measurements, Hewlett-Packard Application Note 243-5.
- [3] Control System Measurement Techniques and Coherence Calculations, Hewlett-Packard Technical Notes. Publication Numbers 5959-5760 and 5959-5761. Printed as a single document.
- [4] Measuring Nonlinear Distortion Using the 35670A Dynamic Signal Analyzer, Hewlett-Packard Product Note 35670A-4.
- [5] Measuring the Open-Loop Frequency Response of the Phased-Locked Loop, Hewlett-Packard Product Note 35670A/35670A-1.
- [6] Measuring the Open-Loop Frequency Response of the Phased-Locked Loop, Hewlett-Packard Product Note 8751A-1.

## 付録A

### 制御システム測定用アクセサリ

#### 35280A、35281A、 35282Aアクセサリ仕様

これらすべてのアクセサリは、ディスク・ドライブ、電源装置、AGC、PLL回路のようなフィードバック制御システムに信号を注入するのに使用します。E/A、Y/S、Y/Zやその他の方法を用いてループ・ゲインを求めることができます。これらのアクセサリは35670A、3566A/67A、および8751Aを含むネットワーク・アナライザ/FFT・アナライザ/サーボ・アナライザと適合します。



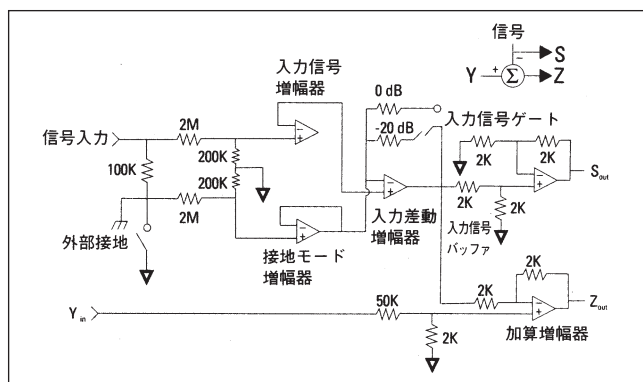
#### 物理量センサ・カタログ

加速度、速度、音圧、温度などの物理量の測定を必要とする場合にはPhysical Sensors Catalog (5952-2996)がお役に立ちます。このカタログには汎用のトランスデューサも記載されています。またモデル解析用の計測ハンマ・キットも含まれています。



#### 35280Aサミング・ジャンクション

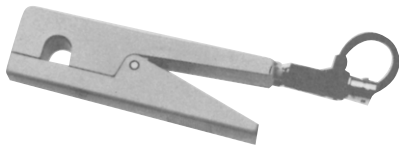
35280Aサミング・ジャンクションは注入信号源をグラウンドに対し $\pm 42$  Vまでフローティングさせることができます。また信号ゲインを $-20$  dBまで減衰させることもできます。必要な電源モジュールを含んでいます。



図A-1 35280Aサミング・ジャンクション概略ブロック図

#### 仕様

周波数レンジ	DC~1 MHz (位相シフト <10°)
電圧レンジ	$\pm 10$ Vpk
最大フロート電圧	$\pm 42$ Vpk
ゲイン	1(0 dB)
入力インピーダンス	100 k $\Omega$
出力インピーダンス	<15 $\Omega$
信号源アッテネータ	0 dBまたは -20 dB



### 35281Aクリップ・オン・トランス

35281Aクリップ・オン・トランスを使うとAGC回路やスイッチング電源のような高周波数サーボ・コントロール・ループやフィードバック・ループにテスト信号を注入することができます。回路を切断せずにトランスをリード線にクリップ・オンすることによって、テスト信号を注入することができます。

#### 仕様

周波数レンジ 300 Hz～10 MHz  
(ロール・オフ<6 dB)

高調波に対する最大電源1次電圧  
< -40 dBc

300 Hz 0.1 Vpk (代表値)  
5 kHz 5 Vpk (代表値)

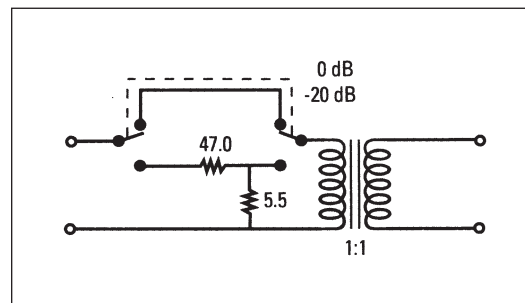
最大2次フロート電圧 ±42 Vpk

1次対2次巻数比  
100:1 (-40 dB ±1.5 dB、  
100 kHzにて)



### 35282A信号注入トランス

35282A信号注入トランスを使うとグラウンドに対して大きなオフセットを有する制御ループに信号を注入することができます。このデバイスは±600 Vpkまでのオフセットが可能で、信号を0 dBあるいは-20 dBに減衰させることができます。



図A-2 35282A信号注入トランスの概略ブロック図

#### 仕様

周波数レンジ 30 Hz～200 kHz  
(ロール・オフ<6 dB)

高調波に対する最大電源1次電圧  
< -40 dBc

30Hz 0.05Vpk (代表値)  
1kHz 5Vpk (代表値)

最大2次フロート電圧 ±600Vpk

1次対2次巻数比  
1:1 (0 dB ±1 dB、1 kHzにて)  
信号アッテネータ 0 dBまたは  
-20 dB  
1次-2次間コモン・モード応答  
< -100 dB (1 kHzにて)

アジレント・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1

計測  
お客様窓口

受付時間 9:00～19:00  
(土・日・祭日を除く)  
※FAXは24時間受付

TEL ☎0120-421-345  
(0426-56-7832)

FAX ☎0120-421-678  
(0426-56-7840)

E-mail: mac\_support@agilent.com

電子計測ホームページ

<http://www.agilent.co.jp/find/tm>

- 記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2000

アジレント・テクノロジー株式会社



**Agilent Technologies**

Innovating the HP Way

December 13, 2000

1A620  
005203-H