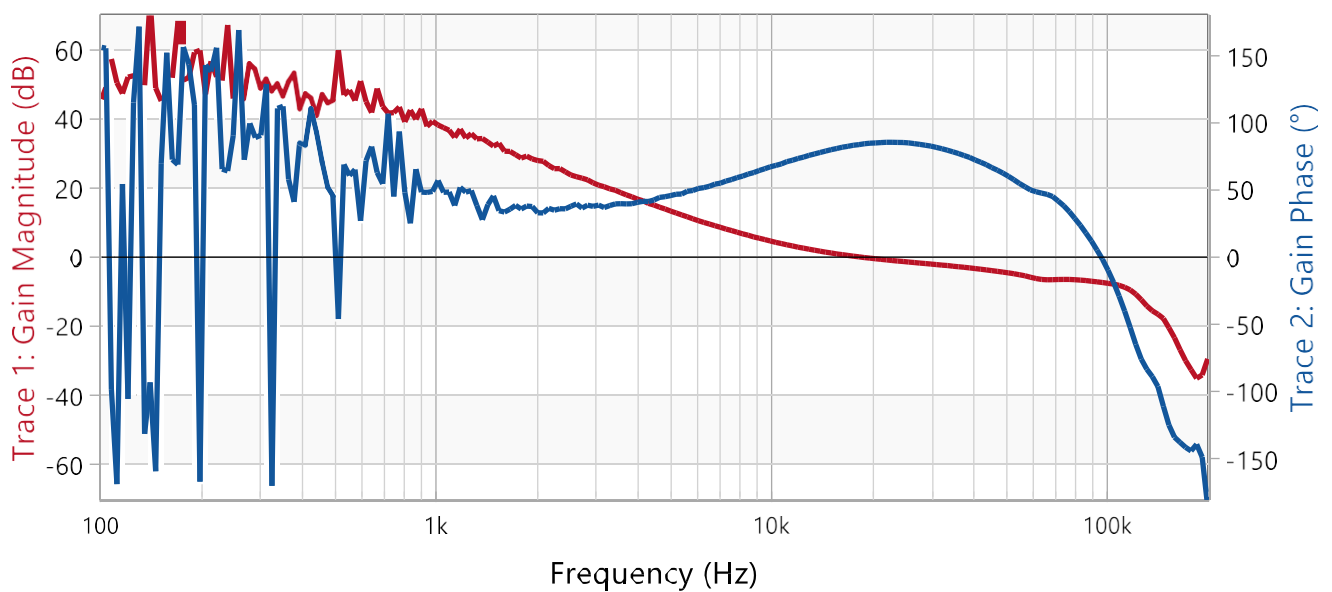


Bode 100 – インフォメーションノート

ループゲイン測定におけるノイズ対策



By Florian Hämmerle

© 2022 by OMICRON Lab – V1.1

Visit www.omicron-lab.com for more information.

Contact support@omicron-lab.com for technical support.

1 はじめに

ループゲイン測定は、電圧レギュレータやスイッチング電源などの電子システムにおける、制御ループの小信号安定性を評価するために一般的に用いられる手法です。

特にスイッチング電源のループゲインを測定する際には、下図に示すように、低周波数領域で測定結果がノイズに覆われてしまうことがあります。

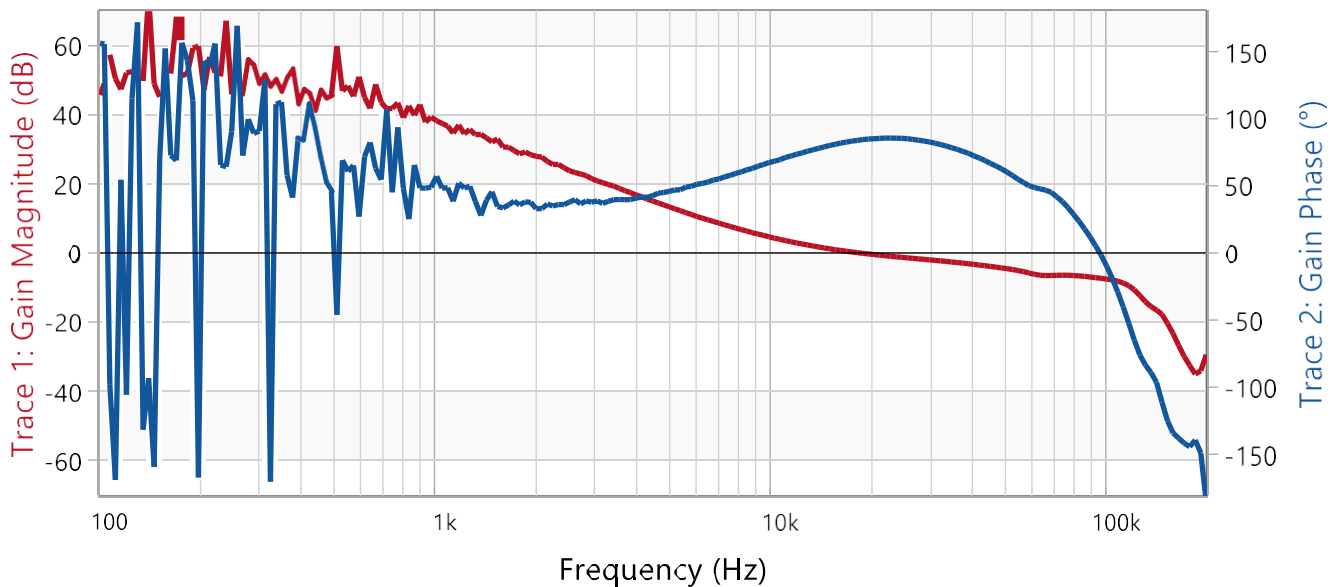


Figure 1: ループゲイン測定における低周波ノイズ

本書では、低周波数におけるノイズの発生要因と、測定結果を改善する方法について説明します。

2 低周波数でノイズが発生する理由

最初に明確にしておきたいのは、低周波数で見られるノイズは Bode 100 自体の問題ではなく、測定方法の性質に起因するものだという点です。Bode 100 は、高直線性かつ高分解能のナローバンド受信機を備えており、低周波において非常に優れた感度とノイズ除去性能を持っています。本章では、ループゲイン測定で低周波数ノイズが生じる理由について説明します。

2.1 ループゲイン測定の基本

電圧インジェクション法によってループゲインを測定する場合、アイソレータ(絶縁トランス)を用いて、フィードバック回路に正弦波の擾乱信号を注入します。アイソレータは、測定器を被試験デバイス(DUT)の直流動作点から絶縁するために必要です。アイソレータなしでは、グラウンド基準の測定器がシステムの直流電圧をグラウンドへ短絡してしまうためです。以下の図では、アイソレータとして B-WIT 100 インジェクション・トランスを、測定器として Bode 100 ベクトルネットワークアナライザを使用した例を示しています。

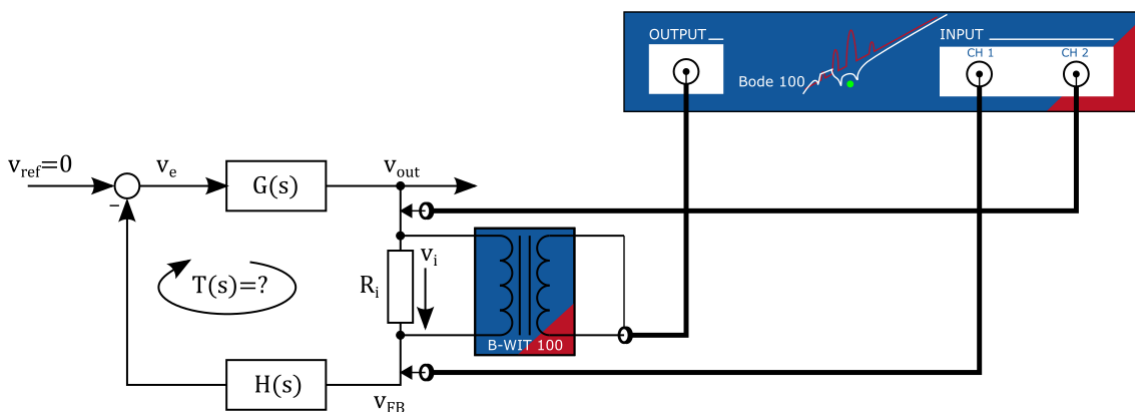


Figure 2: ループゲイン測定における低周波ノイズ

注入された擾乱電圧 v_i は、アイソレータを介してフィードバックループに差動的に印加されます。ループゲイン T は、ベクトルネットワークアナライザにより以下の式で評価されます：

$$T = \frac{v_{CH2}}{v_{CH1}} = \frac{v_{out}}{v_{FB}}$$

ここで使用されるのは 交流成分のみであり、直流値は無視され、伝達関数の測定には直接関係しません。

測定原理の詳細については、当社の一般的な「Loop-Gain Information Note」を参照ください。この資料には、R. Middlebrook による “Measurement of loop gain in feedback systems” の数学的説明の要約も含まれています。

以下に、測定を成立させるための重要な前提と直感的な説明を示します：

- 前提1: 注入点での信号の流れは一方向(順方向)であること
ループゲイン測定では、インジェクション・ポイントにおける制御ループ内の信号の流れが順方向のみであると仮定します。また、情報は電圧として伝達されるとみなします。これは、擾乱を電圧として注入し、測定も電圧で行うため重要です。この条件は、インジェクション・ポイントで出力インピーダンス $Z_{out} \ll$ 入力インピーダンス Z_{in} となるように設計されていることで満たされます。

- 前提2:インジェクション・ポイントをバイパスする並列経路が存在しないこと
インジェクション・ポイントを迂回して信号が伝達できる並列パスが存在すると、本来の擾乱電圧による影響が正しく測定できなくなり、結果が誤ります。

これらの前提条件を踏まえると、次のように考えることができます:制御器(コントローラ/補償器)がフィードバック側で擾乱電圧 V_{FB} を検出すると、その変動を抑制しようとして、システム出力側で応答(補償動作)を行います。補償器の目的は、フィードバックノードを基準電圧に対して交流変動なしに安定させることです。

ループ内に高いゲインが存在する場合、システムの応答電圧 V_{out} は、注入された擾乱をほぼ完全に打ち消すほど大きくなります。ループゲインが非常に高いと、フィードバックノード電圧 V_{FB} はごく小さくなり、出力電圧 V_{out} はほぼ注入電圧 V_i と同じ振幅となります。この V_{FB} の比がループゲインの大きさ $|T|$ であり、ベクトルネットワークアナライザによって測定される量です。

2.2 ループ内の電圧振幅

前節で述べたように、 V_{FB} と V_{out} の比はループゲインの大きさ $|T|$ に等しくなります。しかし、これらの電圧の最大振幅は、注入した擾乱信号 V_i の振幅によって決まります。次の図は、注入電圧 V_i 、フィードバックノードの電圧 V_{FB} 、システム出力電圧 V_{out} を示しています。フィードバックノードは入力インピーダンス Z_{in} でモデル化され、システム出力は有限の出力インピーダンス Z_{out} をもつ電圧源としてモデル化されています。

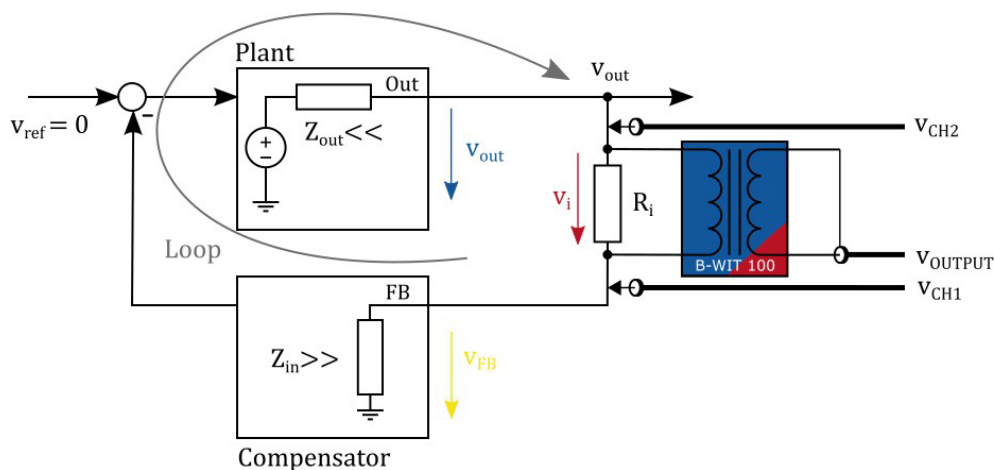


Figure 3: フィードバックシステムの電圧ループ

これら3つの電圧は1つのメッシュを構成し、キルヒホッフの電圧則(KVL)を適用できます。

$$v_i + v_{out} + v_{FB} = 0 \quad (1)$$

以下では、3つの周波数領域のケースを考えます。

- 低周波領域(ループゲインが非常に高い)
ループゲインが高いため、注入信号のほぼすべてが出力側に現れ($v_{out} \approx v_i$)、フィードバックノード v_{FB} におけるリップルは非常に小さくなります。
- クロスオーバー周波数(ループゲイン = 1, 0 dB)
 - V_i と v_{out} はどちらも注入電圧 V の半分程度の振幅となります($v_{FB} = v_{out} \approx v_i/2$)。
- 高周波領域(ループゲイン < 1)

注入信号のほとんどがフィードバックノードに現れます($v_{FB} \approx v_i$)。
出力電圧 v_{out} はほぼ変動せず、リップルは小さくなります。

ループゲイン測定におけるノイズの問題は、一般的に低周波で発生します。この周波数帯では、ループが高いゲインを持っていることが多いためです。高ゲインは、低周波域で良好なレギュレーション性能を得るために設計上必要であり、通常は補償器の伝達関数に積分器(Integrator)を追加することで実現されます。では、ノイズが見られた先ほどの例を分析してみましょう。

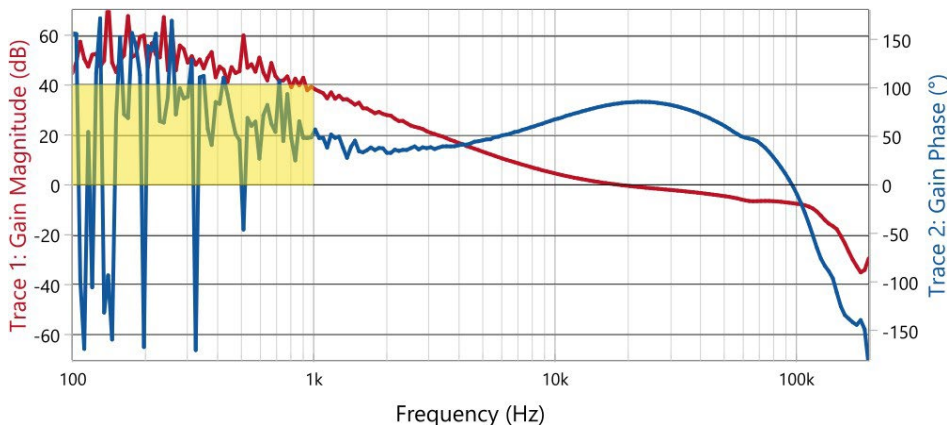


Figure 4: ノイズが目立つ領域とノイズフロア

図からわかるように、ノイズフロアは約 40 dB の位置にあります。ゲインが 40 dB より大きい領域では測定結果が非常にノジーで、特に位相(Phase)の測定がノイズに埋もれてしまっています。約1 kHz 以上になるとゲインが 40 dB を下回り、ノイズの影響は小さくなります。ここでは、図4で使用された条件と同じく、ループゲイン:40 dB、注入信号レベル:-27 dBmとしたときの、測定信号レベルを計算してみます。

2.3 信号振幅

注入信号(Injected signal)の大きさは、次の3つの要素で決まります:

1. ベクトルネットワークアナライザ(VNA)の信号レベル設定
2. 注入トランス(Injection transformer)の減衰量
3. 注入抵抗 R_i の値_i

B-WIT 100 は 1:1 トランスであり、通過帯域内の減衰は非常に小さく(< 0.15 dB)、無視できます。したがってここでは、注入トランスの影響は考慮しないことにします。

この前提のもとでは、注入信号の振幅は、Bode 100 の信号レベル設定、注入抵抗の2つによってのみ決まります。

Bode 100 の内部ソースインピーダンスは 50 Ω です。次の図に、各電圧の比率を示します。

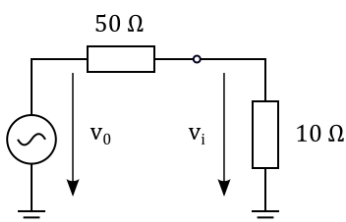


Figure 5: 注入電圧の大きさ

10 Ω のインジェクション抵抗を用いた回路では、Bode 100 の内部ソース電圧 v_0 からインジェクション電圧 v_i を次のように計算できます：

$$v_i = \frac{v_0}{6} \quad (2)$$

内部ソース電圧 v_0 は、通常 dBm で指定される信号レベル設定から計算できます。dBm という単位は 50Ω における消費電力に対応し、0 dBm は 50Ω 負荷時の 1 mW に相当します。インジェクション電圧 v_i (Vrms) は、次の式を用いて dBm 値から計算できます。

$$v_0 = 2 \sqrt{\frac{50\Omega \cdot 10^{dBm/10}}{1000}} \quad (3)$$

以下の図は、インジェクション抵抗値とソースレベル設定に応じた、注入信号レベル(実効値電圧)を示しています：

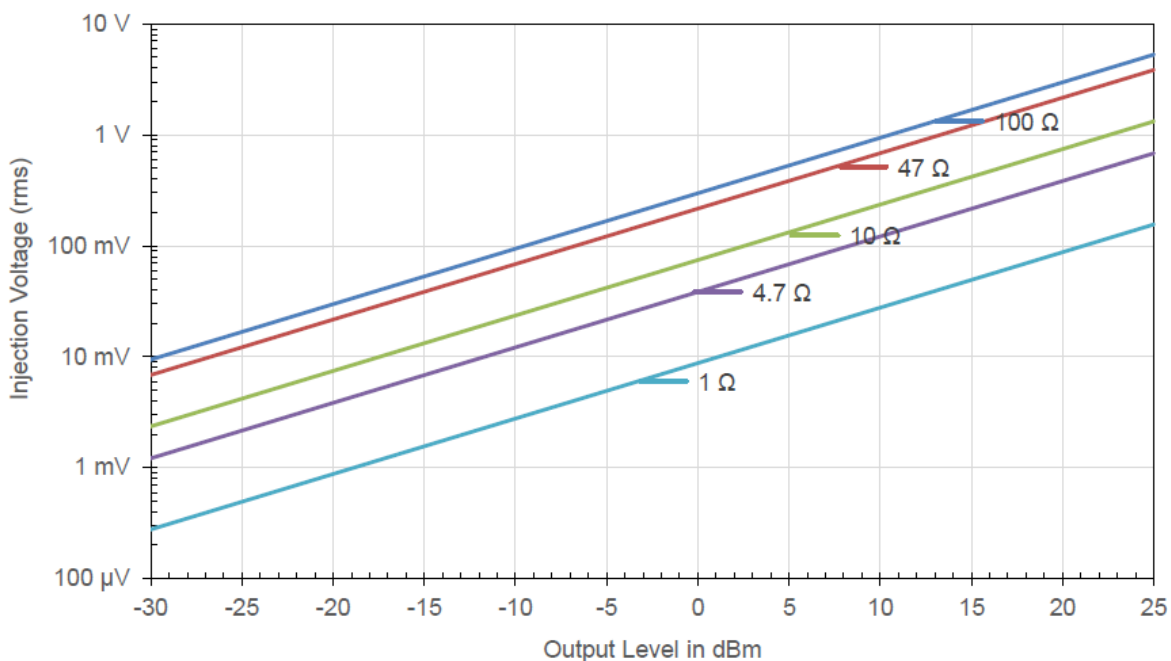


Figure 6: ソースレベルおよびインジェクション抵抗による注入電圧の変化

−27 dBm の設定で 10Ω のインジェクション抵抗を用いる場合、注入信号の大きさを計算すると $v_i=3.3$ mVrms となります。

ここでループゲインを使って 2つの電圧を見積もることができます。40dB は高いゲインとみなせるので、注入した信号のほとんどがシステムの出力側に現れ、 $v_{out} \approx 3.3$ mVrms となります。一方、フィードバックノードでは信号は 40dB 小さくなります。40dB は線形値で 100倍に相当するため、 $v_{FB} \approx 33$ μVrms となります。

Bode 100 にとっての課題は、スイッチングリップルが存在する状況で 33 μV という非常に小さな信号の振幅を測定するだけでなく、3.3 mV の信号と 33 μV の信号の位相比をも測定しなければならない点にあります。

この例では、コンバータ出力のスイッチングリップルは約 25 mVpp です。次の図は、左側にコンバータのスイッチングリップル、右側に Bode 100 が注入した 100 Hz の攪乱信号を示しています。上側の黄色の波形が v_{out} 、下側の緑の波形が v_{FB} です。Bode 100 は 40dB 以上のゲインを示していますが、フィードバック信号 v_{FB} の振幅がマイクロボルト領域であるため、位相差を測定値から得ることができません。



Figure 7: スwitchングリップル(左)と、100 Hz の攪乱信号である v_{out} と v_{FB} (右)

3 ノイズ対策

最も重要となる測定は、通常クロスオーバー周波数付近で行うもので、ここでシステムの位相余裕が測定されます。

この周波数では、2つの電圧(v_{out} と v_{FB})の大きさがほぼ同じになり、ゲインが 1 であるため、ノイズは一般的に問題になりません。その結果、位相も明確に測定することができます。しかし、低周波数領域でも見やすい測定カーブ(ゲイン・位相特性)を得たい場合には、以下の方法が測定曲線上のノイズ低減に役立ちます。

3.1 適切なプローブを選択する

50 Vdc 未満の直流電圧レベルで測定する場合、特別なプローブは必要ありません。Bode 100 の入力は交流結合されており、高インピーダンスモードに設定されていれば 50 Vdc に耐えられます。

もし 50 Vdc を超える電圧レベルで測定を行う必要がある場合は、PML-1110 パッシブ 10:1 プローブが適しており、低ノイズで測定できます。<https://www.omicron-lab.com/products/vector-network-analysis/accessories/pml-1110-passive-probe>

なお、一般的な 10:1 – 10 M Ω のオシロスコーププローブは、Bode100 で 50 Vdc を超える測定には適していません。

危険電圧レベルの場合は、PMK の PHV 1000-O(<https://www.pmk.de/en/phvomicron>)などの専用高電圧プローブ、またはアクティブ高電圧差動プローブの使用を推奨します。ただし、アクティブプローブは通常、パッシブプローブよりノイズが多くなりますのでご注意ください。

3.2 入力アッテネータを選択する

Bode 100 には、入力のフルスケール範囲を調整するために 5 種類の入力アッテネーションレベルが用意されています。最高の感度を得るためには、可能な限り低い入力アッテネータを使用してください。信号が大きすぎる場合、Bode Analyzer Suite にオーバーロード警告が表示されます。

アッテネータ	フルスケール電圧
0 dB	100 mVrms
10 dB	316 mVrms
20 dB	1 Vrms
30 dB	3.16 Vrms
40 dB	10 Vrms

PML-1110 の 10:1 プローブで測定する場合、通常は 0 dB の入力アッテネータで十分です。

3.3 レシーバ帯域幅設定を下げる

Bode 100 は、狭帯域のレシーバフィルタを使用した周波数選択的測定を行います。フィルタ帯域幅を狭くするほどノイズ除去性能は向上しますが、測定時間は長くなります。測定カーブにノイズが乗っている場合は、Bode Analyzer Suite (BAS) の Receiver Bandwidth (RBW) 設定を下げてみてください。

初期設定としては 30 Hz が良い選択です。測定はまだ高速でありながら、高いノイズ除去が得られます。それでも不十分な場合は、10 Hz またはそれ以下を試してください。

3.4 注入信号レベルを上げる

ノイズを低減するための最も効果的な方法のひとつが、注入信号レベルを上げることです。注入信号を大きくすることで、測定中の信号対雑音比 (S/N) が改善されます。以前の例で、3.3 mVrms では測定可能な信号を生成できなかった場面を思い出すと、最も有効な手段は 低周波で注入信号を増加させることです。

注意: 高周波では注入信号レベルを自由に上げられないことがあります。

高周波で大きすぎる信号を用いると、スルーレート制限などにより非線形性が発生し、測定結果が歪む可能性があります。

このような場合は、周波数ごとに注入レベルを変える「レベルシェーピング」を使用してください。詳細は、ループゲインまたは安定性測定に関するアプリケーションノートやビデオをご参照ください。

下図は、本ドキュメントの例に対して周波数ごとに変化する注入信号レベルを示したものです。低周波では +13 dBm (333 mVrms)、高周波では非線形性を避けるため -27 dBm (3.3 mVrms) に下げています。

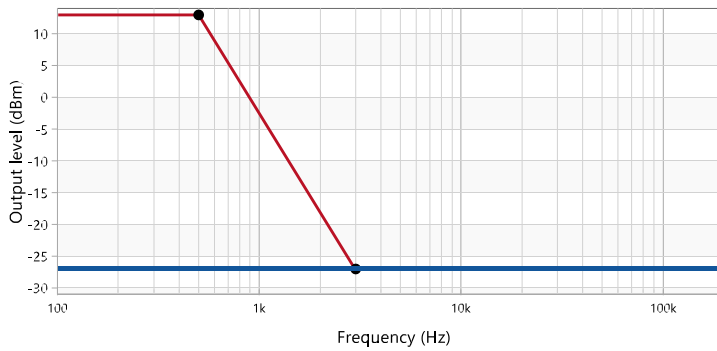


Figure 8: Shaped level -周波数ごとに変化する注入信号レベル

この注入信号を使用すると、ループゲインの測定結果は以下の図に示すように、明瞭でほぼノイズのないカーブになります。

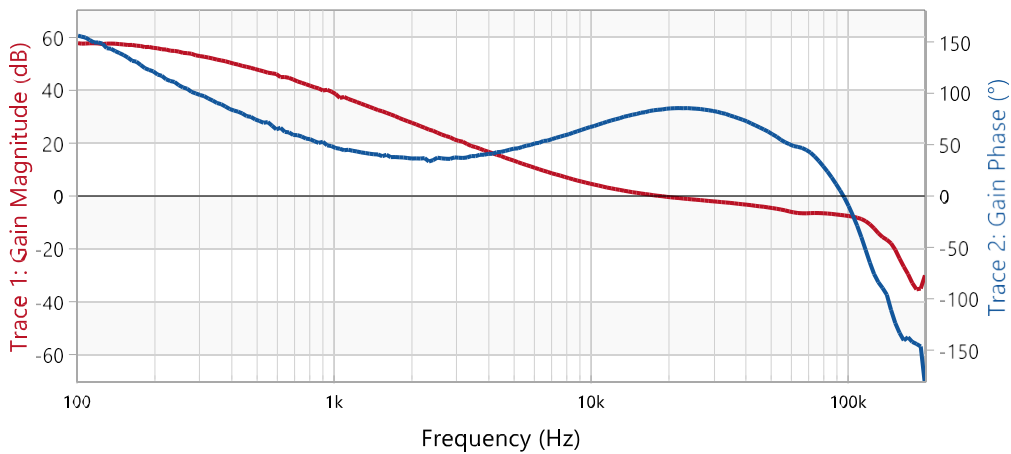


Figure 9: ノイズの少ないループゲインプロット

上の図からわかるように、100 Hz におけるループゲインは約 60 dBであり、これは線形ゲインに換算すると 1000 倍に相当します。

つまり、出力信号 V_{out} は、フィードバック信号 V_{FB} の 1000 倍の大きさになるという意味です。

100 Hz の信号をオシロスコープで観察すると(下図参照)、注入した正弦波は V_{out} (黄色) でははっきり確認できますが、 V_{FB} では依然として確認できません。これは、 V_{FB} の信号が 1000 分の 1 (約 3.3 mVrms) と非常に小さいためです。それでも Bode 100 は、わずか 18 秒という非常に短い時間で、両者の振幅と位相差を極めて低ノイズで測定できます。これは特筆すべき性能です。

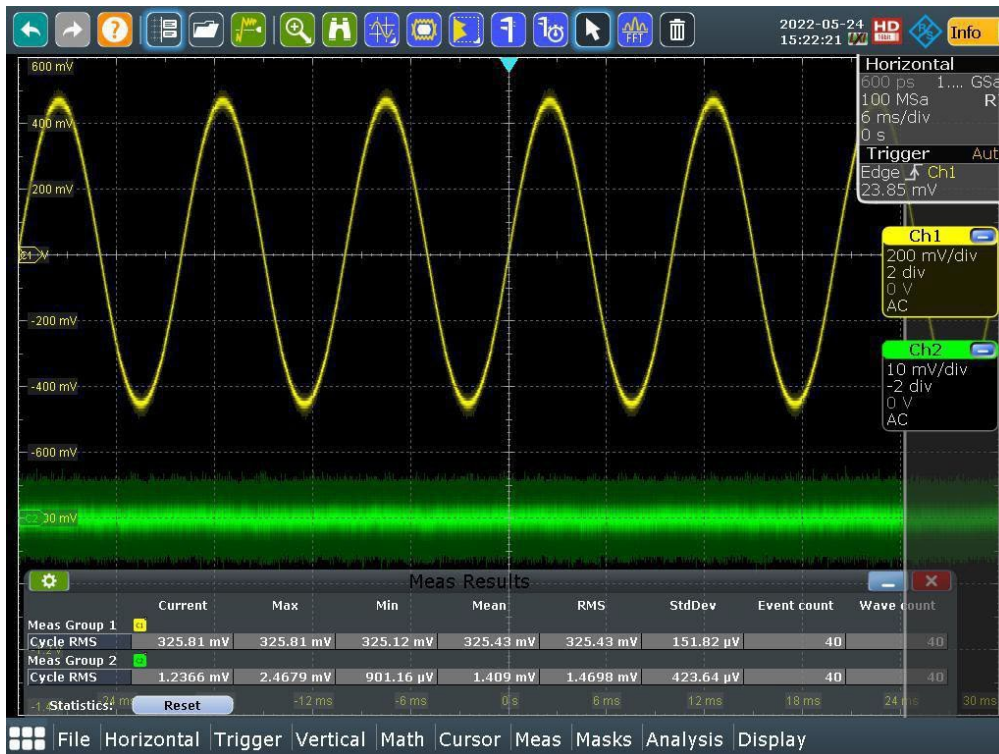


Figure 10: 100 Hz の外乱を時間領域で観測

4 まとめ

Bode 100 は、1 Hz から 50 MHz の全周波数範囲にわたり、非常に高いノイズ除去性能、広いダイナミックレンジ、高感度、優れた直線性を備えています。オシロスコープ画面では正弦波を視認できないような状況でも、Bode 100 はゲインと位相を低ノイズで測定可能です。本ドキュメントで示したスイープは 201 ポイントでわずか 18 秒しかかかっていません。

ループゲイン測定は、ループのゲインが高い場合とくに難しくなります。明瞭なプロットを得るには、十分な外乱(注入)電圧レベルが必要です。Bode 100 は、最大 2 Vrms のオープンソース電圧(50 Ω 負荷では 1 Vrms)を生成できます。これは多くのケースで十分なレベルです。もしそれでも不足する場合は、B-AMP 12 アンプを使用して電圧レベルを +12 dB(4 倍)に増幅し、最大 8 Vrms のオープンソース電圧を生成できます。



OMICRON Lab は、電子工学分野に携わる 研究者、技術者、教育関係者といった専門家向けに、スマートな計測ソリューションを提供することに特化した OMICRON electronics の事業部門です。計測作業を簡素化することで、お客様が本来の業務により多くの時間を割けるよう支援しています。

OMICRON Lab は 2006 年に設立され、現在では 40か国以上のお客様に製品とサービスを提供しています。アメリカ、ヨーロッパ、東アジアに拠点を構え、さらに国際的な販売代理店ネットワークを通じて、迅速かつ卓越したカスタマーサポートを実現しています。

OMICRON Lab の製品は、市場において最適な価格対価比(コストパフォーマンス)で提供される高品質を特長としています。高い信頼性と使いやすさにより、トラブルのない運用を可能にします。また、顧客との密接な関係と 25年以上にわたる社内での専門技術の蓄積により、現場のニーズに即した革新的な製品開発を実現しています。

製造元

OMICRON electronics GmbH

販売元

岩崎通信機株式会社

info@omicron-lab.com • www.omicron-lab.com

Smart Measurement Solutions®