

ノイズ補正による ダイナミックレンジの改善 アプリケーションノート

製品：

- | R&S®FSU
- | R&S®FSQ
- | R&S®FSG

このアプリケーションノートでは、ノイズ補正を使用したスペクトラム測定について説明します、まずスペクトラム・アナライザの基本的な要件であるダイナミックレンジとその制限要因を概説します。次に、ノイズ補正によるダイナミックレンジの改善について説明します。さらに、ノイズ補正による相互変調測定での性能改善を測定例によって示します。

目次

1	概要.....	3
2	ダイナミックレンジの制限要因.....	4
3	信号処理 – ノイズ補正	5
3.1	ノイズ・レベルの評価	5
3.2	ノイズ補正の詳細.....	6
4	測定例	8
4.1	ノイズ補正によるダイナミックレンジの拡大.....	8
4.2	ノイズ状信号の低レベル測定	9
4.3	理論限界での測定.....	11
5	参考文献.....	12
6	オーダー情報	13

1 概要

ダイナミックレンジは、スペクトラム・アナライザの非常に重要な性能の 1 つです。今日の無線システムにおいては、不要なスペクトラム放射（スプリアス信号）を正確に測定するという需要がますます高まっており、測定システムにはこの要求を満たすことが求められています。これらの測定に使用するスペクトラム・アナライザには、非常に高いダイナミックレンジが必要とされます。ダイナミックレンジは、アナライザの最大ミキサ・レベル、相互変調成分、およびノイズ・フロアによって決まります。したがって信号処理ルーチンを使用してアナライザのノイズ・フロアを下げることは、ダイナミックレンジの改善と測定精度の向上につながります。ノイズ補正は多年にわたり ACP（Adjacent Channel Power：隣接チャンネル電力）の測定に使われてきましたが、現在ではスペクトラム放射試験などすべてのスペクトラム・アナライザ測定に使用できるようになりました。

2 ダイナミックレンジの制限要因

測定に使用可能なダイナミックレンジは重要な要素です。DUT（Device Under Test：被試験体）に対して十分な余裕を確保できる高いダイナミックレンジがあれば、スペクトラム・アナライザが試験結果に及ぼす影響を最小限に抑えることができます。スペクトラム・アナライザのダイナミックレンジは、以下の要素によって決まります。

- スペクトラム・アナライザの内部ノイズ・フロア
- 内部位相ノイズ
- 内部相互変調歪み

内部位相ノイズと内部相互変調歪みは、主にキャリア近傍の測定や、マルチ・キャリア信号を伴う測定に影響します。内部ノイズ・フロアは、低レベル信号に関するアナライザの正確な測定能力を制限するので、すべての測定にとって重要な要素となります。アッテネータを減らしたりプリアンプを使うことによって内部ノイズは低下しますが、いずれの場合も歪み成分が大きくなり、与えられた入力信号レベルに対して使用できるダイナミックレンジを広げることができません。既存のスペクトラム・アナライザで使用できるダイナミックレンジが要件に対して十分でない場合、これまでの唯一の対策は、より高い性能の測定器を使用するか、信号を抑制するためのフィルタをセットアップに追加することでした。

このアプリケーションノートでは、信号処理ルーチンを使ってスペクトラム・アナライザの内部ノイズ・フロアを下げる方法を説明します。この方法は、ノイズ補償あるいはノイズ補正と呼ばれます。アナライザの内部ノイズ・フロアを外部ハードウェアの追加や試験セットアップを変更することなく正確に測定することができるということがこの方法の基本です。測定された内部ノイズ・レベルは、その後のすべての測定結果から減じられます。このアプリケーションノートでは、R&S FSU および R&S FSQ スペクトラム・アナライザ・ファミリで使用できるノイズ補正について説明し、さらに実際的な測定例によってその改善状況を示します。

3 信号処理 – ノイズ補正

内部ノイズ源の影響を補正するために信号処理を追加するという考え方は、新しいものではありません。R&S FSU ファミリのような最新のスペクトラム・アナライザはこの機能を内蔵しており、もっぱら、ACP 測定や内部位相ノイズ測定におけるダイナミックレンジを改善するために使われてきました。スペクトラム・アナライザにおけるノイズ補正は、一般に入力信号とアナライザの内部ノイズの組み合わせである実際の電力測定値から、アナライザの内部ノイズ電力を計算で減じることによって行います。したがって、この手順を実用的に活用できるのは、信号レベル、ACP、内部位相ノイズ、相互変調、スプリアス放射測定などのスペクトラム電力測定に限られています。内部ノイズはスカラ電力値として測定されるので、ベクトル信号に基づく測定値や復調結果からこれを減じることができません。したがって、ノイズ補正を行っても、ベクトル信号解析の EVM 測定値は改善されません。

3.1 ノイズ・レベルの評価

ノイズ補正手法に基づくダイナミックレンジ改善の品質は、主に、所定の動作条件下における内部ノイズ・レベルを正確に知ることができるかどうかに影響されます。スペクトラム・アナライザの内部ノイズ・フロアは簡単に測定が可能で、それを補正する手順は、次の 2 つのステップからなります。

- 最初のステップでは、スペクトラム・アナライザから入力信号をはずして、入力を終了します。R&S FSU には、信号入力と終端を選択するための内部スイッチがあります。このセットアップで、実際の周波数における内部ノイズ電力を測定します。
- 次のステップでは、入力を選択して入力信号を測定します。ここで、トレース計算機能が、測定値から内部ノイズ電力を減じることによって入力電力を計算します。

ノイズ・レベルの変動がわずかであっても補正後のノイズ・フロアは大きく変化するので、精度の高い測定のためには、対応する測定と同じハードウェア設定で内部ノイズ・フロアを測定する必要があります。したがって、ハードウェア設定が変更されることにより内部ノイズ・フロアが変わると R&S FSU のノイズ補正も無効になります。

ノイズ補正を成功させる上で非常に重要なのは、電力測定の再現性です。RMS 検波器を使用すれば、最も正確で安定した電力測定を行うことができます。掃引時間は、平均値の計算に使用できるサンプル数に直接影響するので、電力測定の安定性は掃引時間に左右されます。掃引時間を長くすればより安定した結果が得られるので、内部ノイズ電力の補正品質も向上します。レシーバのリニアリティは、ノイズ電力測定の精度に大きく影響します。R&S FSU は、100 kHz までの RBW 設定にデジタル・フィルタリングを使用しているので、優れたリニアリティを備えています。内部ノイズ測定は、入力信号測定における測定器設定と同じ内部ノイズのみを測定するので、リニアリティが重要です。

ノイズ補正では実際の測定と同じ設定でスペクトラム・アナライザの内部ノイズ電力を測定するので、スペクトラム・アナライザの設定にはいかなる変更も加えないようにしなければなりません（特に、周波数、RF ATT、RBW などの設定）。変更を加えた場合は、ノイズ補正を再度有効にして内部ノイズの測定をやり直す必要があります。

3.2 ノイズ補正の詳細

ノイズ補正をより深く理解するには、スペクトラム・アナライザの内部ノイズ・フロアを下げるために使われる減算ルーチンの数学的背景についての検討が非常に有効です。どのスペクトラム測定においても、スペクトラム・アナライザは、常に入力信号レベルとアナライザの内部ノイズ・レベルを測定します。アナライザのノイズは、入力信号とはまったく相関がありません。RMS 検波器を使用する電力測定では、スペクトラム・アナライザの測定値は、入力信号電力と内部ノイズ電力を合計したものとなります。これを線形電力項で数学的に表すと、次のようになります。

$$P_{\text{MEAS}} = P_{\text{SIGNAL}} + P_{\text{NOISE}}$$

この関係を表したグラフは、この式を理解する助けとなります。下の図において、入力信号電力、ノイズ電力、および測定合計電力は、スペクトラム・アナライザで通常使われているように対数スケールで示されています。

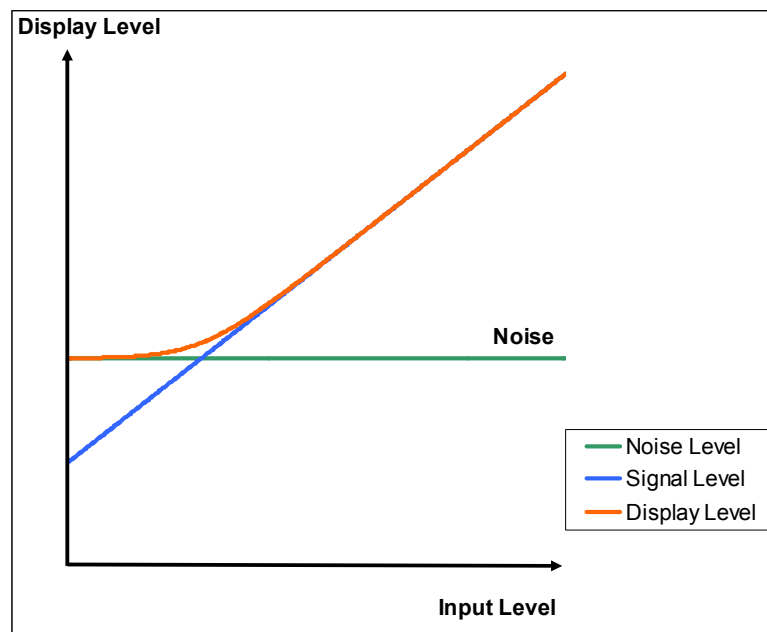


図1：表示信号電力と入力信号電力の関係

このプロットは、入力信号電力と内部ノイズ電力が非常に近い位置にある場合、スペクトラム・アナライザには両者の合計値が表示されることを示しています。内部ノイズよりも十分に高い入力レベルでは、合計電力に対する影響はほとんどありません。ノイズ・フロアよりも低い入力レベルは測定できず、アナライザには内部ノイズ電力が表示されます。

上に挙げた式を入力信号電力について解けば、測定信号電力からアナライザの内部ノイズ電力を減じることによって、信号電力を逆算できることが分かります。

$$P_{\text{SIGNAL}} = P_{\text{MEAS}} - P_{\text{NOISE}}$$

この式から、ノイズ補正の全体的な概念は、測定値から固定された既知の内部ノイズ電力値を減じるという極めて単純なプロセスであることが分かります。ただし実際には、通常、スペクトラム・アナライザの表示には対数スケールが使われます。ノイズ補正を有効にして入力信号を接続していない状態では、補正前の測定値とスペクトラム・アナライザの内部ノイズ電力はほぼ同じ値です。

結果として、入力信号から内部ノイズを減じて得られる電力値が負の値となることもあり、この場合、標準で使われている対数スケールでは負の無限大となってしまいます。これを避けるため、ローデ・シュワルツのスペクトラム・アナライザでは、測定電力値から内部ノイズ電力より若干少ない値を減じています。これにより、内部ノイズ・フロアは部分的に補正され、約 13 dB のノイズ低減となります。測定信号値が内部ノイズ・フロア・レベルを下回る範囲では、特別な数学的アプローチによって、対数スケール上で表示ノイズ・レベルが負の無限大にならないようになっています。

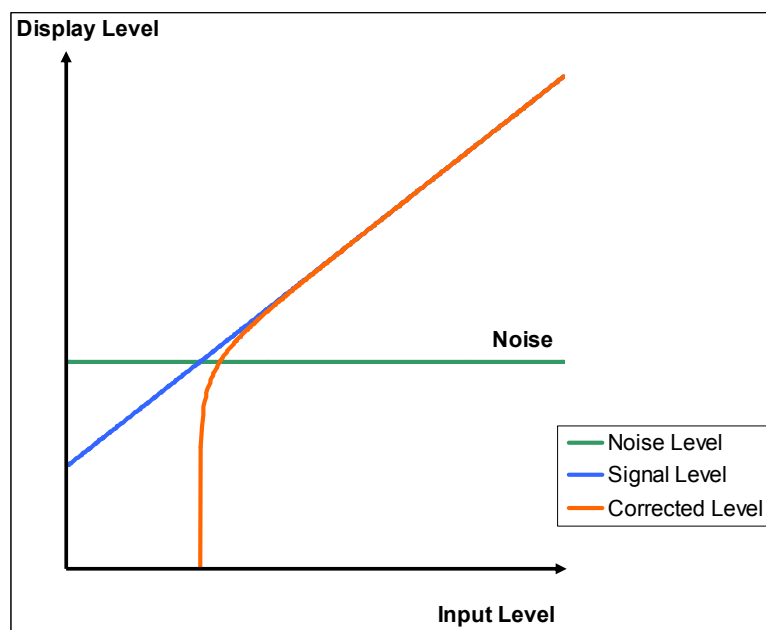


図2：ノイズ減算によって負の無限大となった補正レベル

上の図には、もう 1 つの重要な影響が示されています。ノイズ電力減算の結果がほとんどゼロになるということは、測定信号にわずかな変化があっても、補正ノイズ・フロアのトレースが大きく変動することを意味します。この影響は、上の図の測定信号レベルと内部ノイズ・レベルが近い値を取る領域において見られます。この領域では、減算によって計算された信号を示す線の傾きが非常に大きくなりますが、これはわずかなレベルの変化が大きな変動につながることを示しています。このため、測定ノイズ・レベルが十分に平均化されていない場合は、表示ノイズ・レベルが大きく変動する結果となります。実際の測定においては、この変動を小さく抑えるためのアベレージングを実行するために必要な時間が、ノイズ補正機能を使用する際の制限要因になる場合があります。

4 測定例

4.1 ノイズ補正によるダイナミックレンジの拡大

ダイナミックレンジの改善は難しい作業です。この例では、マルチ・キャリア信号に関する相互変調測定の結果を示します。これらの測定は、一般にパワーアンプや基地局に対して行われ、非常に高いダイナミックレンジが求められます。通常、測定帯域幅はシステムで使われる信号のタイプによって決まるので、使用可能なダイナミックレンジを改善するために測定帯域幅を減らすことはできません。プリアンプを使用するとスペクトラム・アナライザ内の相互変調が増えるので、ほとんどの場合は、プリアンプを使用してもダイナミックレンジが拡大されることはありません。

下に示す測定結果は、ノイズ補正によって測定のダイナミックレンジが改善されたことを示しています。ここでは、シグナル・ジェネレータを使用して GSM に似たマルチ・キャリア信号を生成しており、その出力レベルはアナライザがオーバーロードを起こさない範囲でスペクトラム・アナライザの最大入力レベルに近い値となっています。

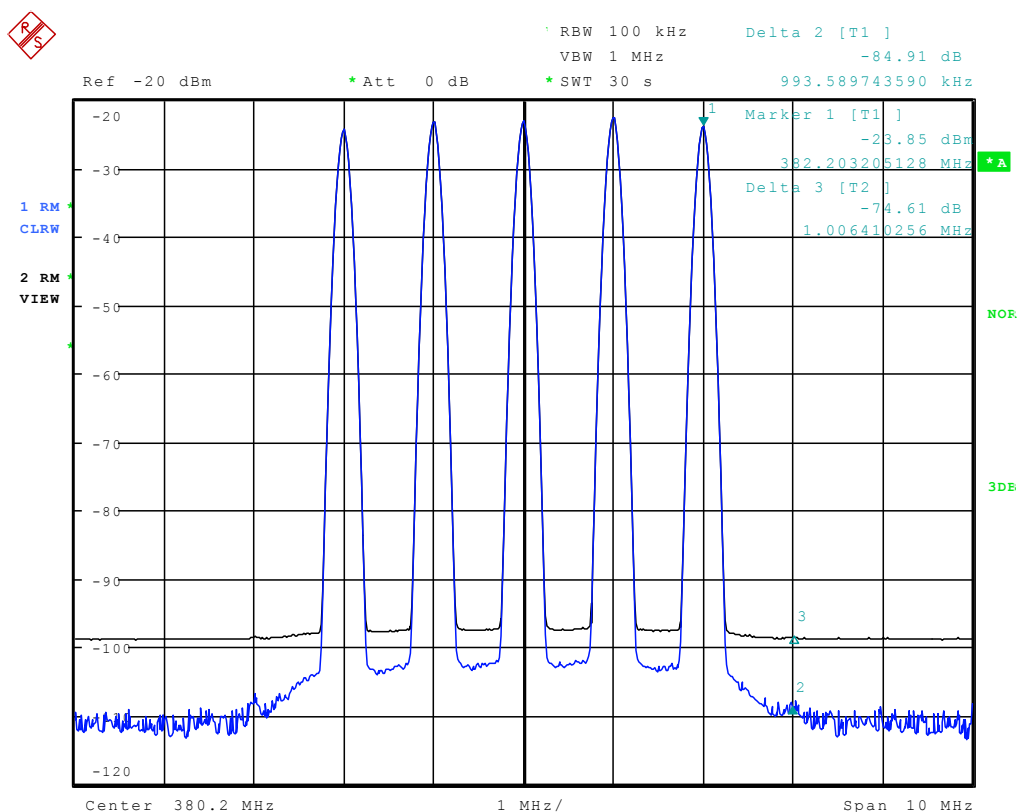


図3：ノイズ補正を使用したマルチ・キャリア信号測定におけるダイナミックレンジの改善

補正していないスペクトラム・アナライザの測定結果を黒のトレースで示します。最初の相互変調成分の位置に置かれた Delta3（デルタ 3）マーカは、ダイナミックレンジが約 75 dBであることを示しています。

スペクトラム・アナライザのノイズ補正を有効にすると、内部ノイズ・フロアが約 13 dB 低下します。上の図では、補正後の測定結果が青で示されています。これでダイナミックレンジは 85 dB となり、相互変調信号を確認できるようになりました。

▶ 注：

ノイズ補正を行うダイナミックレンジ測定では、最大限の性能を得るために RF アッテネータの設定を 5 dB 程度増やさなければならないことがあります。最大ダイナミックレンジは、相互変調成分のレベルがノイズ・フロアに近い値を取るときに得られます。ノイズ補正によってノイズ・フロアが低くなった場合、スペクトラム・アナライザ自体の中で生成される相互変調成分は同じレベルに維持されるため、それによって性能が制限される可能性があります。このような場合は、RF アッテネータの設定を 5 dB 増加させれば、使用可能なダイナミックレンジを簡単に 10 dB 改善することができます。この変更によって相互変調信号が 10 dB 低下するので、使用可能なダイナミックレンジは広くなります。

4.2 ノイズ状信号の低レベル測定

この項では、標準的な通信信号の低レベル測定の結果を示します。すでに述べたように、スペクトラム・アナライザでは信号電力とノイズ電力の合計値が表示されるので、アナライザのノイズ・フロアに近いか、あるいはそれを下回るような低レベル信号の測定においては大きな測定誤差を生じます。たとえばアナライザのノイズ・フロアに等しいレベルを持つ入力信号の場合は 3 dB の測定誤差を生じる結果となります。CW 信号の場合、分解能帯域幅を狭くすればノイズ・フロアの低下につながり、これは S/N 比が増大することになるので、より正確な測定が可能になります。多くの通信システムに使われている W-CDMA 信号のようなノイズ状信号の場合は、信号がノイズ状なため、帯域幅が減少しても精度は向上しません。内部ノイズと信号のレベルが同じ量だけ減少するので、S/N 比は一定のままです。レベル精度の改善は、プリアンプまたはノイズ補正を使用することによって可能になります。

以下の測定例は、ノイズ補正使用時の測定結果とプリアンプ使用時の測定結果を比較したものです。この例ではシグナル・ジェネレータを使用して、出力レベルがスペクトラム・アナライザのノイズ・フロア（プリアンプ不使用時）より約 5 dB 低い W-CDMA 信号を生成しました。

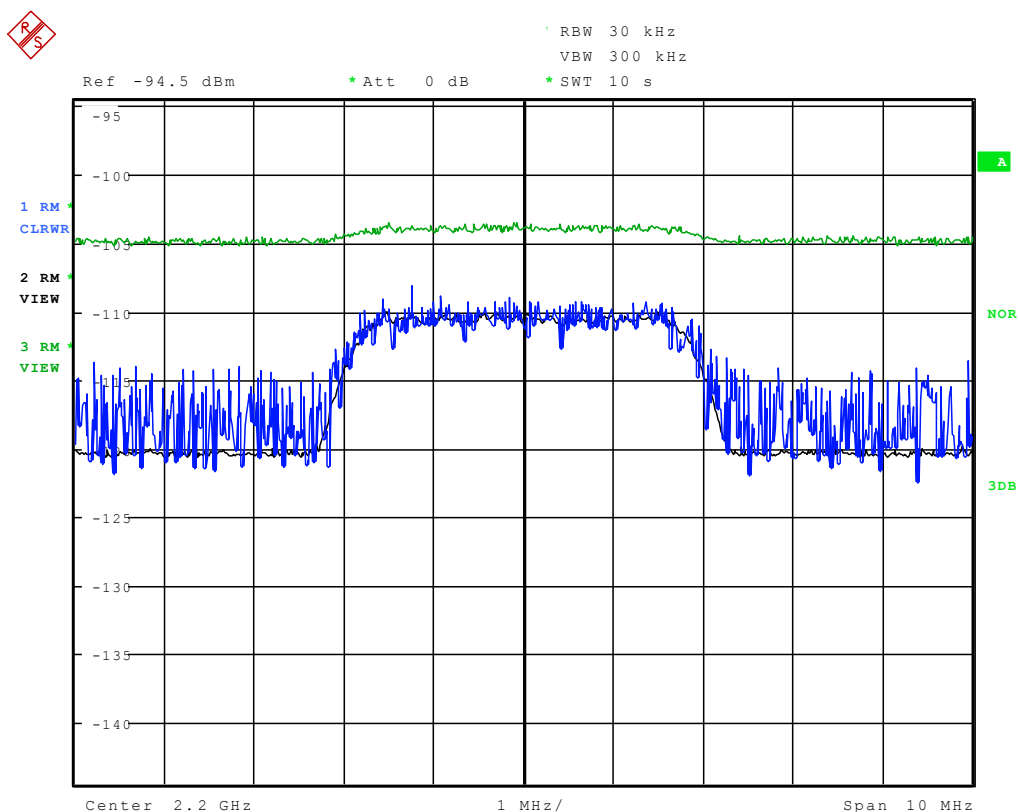


図4：プリアンプまたはノイズ補正を使用したW-CDMA 信号の測定

補正なしのスペクトラム・アナライザの測定結果を緑色のトレースで示します。ノイズ・フロアは信号の位置で約 1 dB 増加しており、レベル誤差は約 6 dB となります。信号は単に識別できる程度でしかありません。

スペクトラム・アナライザのプリアンプを有効にすると、内部ノイズ・フロアが約 15 dB 低下します。上のプロットでは、測定結果が黒のトレースで示されています。これで信号レベルはノイズ・フロアより 10 dB 高くなり、適切な精度で信号レベルを測定できるようになりました。

ノイズ補正も、スペクトラム・アナライザのノイズ・フロアを下げ、低レベル信号測定の精度を上げるための非常に効果的な手段です。今度は、上で使用した設定と同じ設定を使用して、ノイズ補正によって入力信号を測定します。

スペクトラム・アナライザの測定結果は青いトレースで示します。ノイズ補正を有効にすると、スペクトラム・アナライザのノイズ・フロアが約 13 dB 低下します。ローデ・シュワルツのスペクトラム・アナライザでは、ノイズ・レベルが負の値になったりノイズ・フロアにスパイクが生じたりするのを避けるために、低下幅がこの値に制限されています。平均信号レベルは、プリアンプを使用して測定した黒のトレースに示されたレベルと同じです。このことからノイズ補正による測定確度が改善されていることが分かります。ただし、ノイズ補正の結果、ノイズ・レベルの変動が大きく表れています。これは、より長い掃引時間を選択してアベレージングの効果を上げることで改善できます。

4.3 理論限界での測定

ローデ・シュワルツのスペクトラム・アナライザは、数学的モデルだけを使用して所定の測定に対するノイズ・レベルを補正しているわけではありません。精度を向上させるため、入力信号の測定時と同じ設定により、高い精度で正確なノイズ・レベルを測定しています。この手法では、内部ノイズ・レベルの全量を減じれば、理論的にはノイズのないスペクトラム・アナライザを作成することができます。この理想的アナライザは、室温における 50Ω のインピーダンスによる理論限界値である、帯域幅 1 Hz あたり -174 dBm をはるかに下回る値を測定することができます。このような測定は、理論限界を下回る入力信号に対しても有効な結果を得ることを可能にします。実際には、ローデ・シュワルツのスペクトラム・アナライザのノイズ補正は、1 Hz 帯域幅あたり -174 dBm という妥当な値に制限されています。ほとんどのユーザは、入力コネクタを終端した場合のノイズ・フロアを下回るような結果に疑問を持つと考えられるためです。

次に示す測定例は、入力信号なしでノイズ補正測定を行った結果を示したものです。この例を使用して、ノイズ補正した測定値と未補正の測定値を比較します。

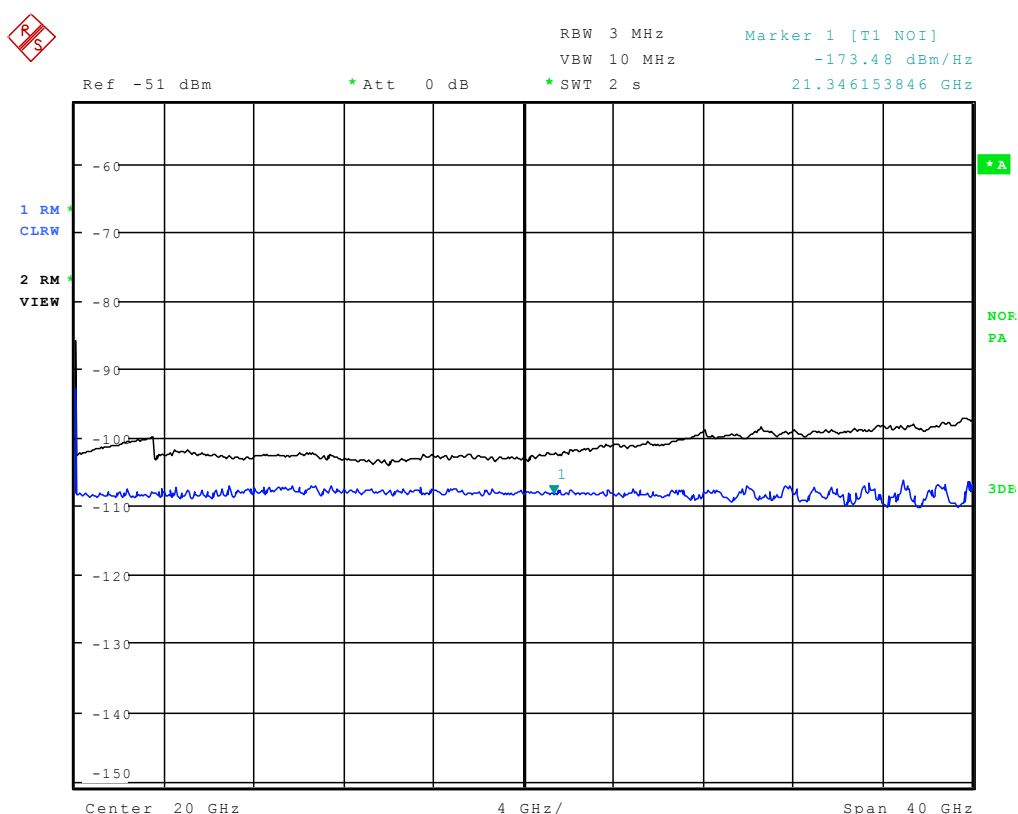


図5：プリアンプ使用時とノイズ補正使用時のノイズ・フロア制限

黒いトレースは、プリアンプを有効にした場合のスペクトラム・アナライザの測定結果を示したものです。ノイズ補正を有効にした場合の測定結果は青いトレースで示します。補正済みトレースのノイズ・マーカは -174 dBm (1 Hz) の限界値に近いノイズ・レベルを示していますが、この限界値は、不適切なノイズ・レベル測定値を避けるためにローデ・シュワルツ・スペクトラム・アナライザに使われている値です。

5 参考文献

- [1] アプリケーションノート 1EF45_E、Spurious Emission Measurement on 3GPP Base Station Transmitters
- [2] R&S FSU オペレーティング・マニュアル

6 オーダー情報

R&S®FSU3	スペクトラム・アナライザ 20 Hz~3.6 GHz	1166.1660.03
R&S®FSU8	スペクトラム・アナライザ 20 Hz~8 GHz	1166.1660.08
R&S®FSU26	スペクトラム・アナライザ 20 Hz~26.5 GHz	1166.1660.26
R&S®FSU46	スペクトラム・アナライザ 20 Hz~46 GHz	1166.1660.46
R&S®FSU50	スペクトラム・アナライザ 20 Hz~50 GHz	1166.1660.50
R&S®FSU67	スペクトラム・アナライザ 20 Hz~67 GHz	1166.1660.67
R&S®FSQ3	シグナル・アナライザ、20 Hz~3.6 GHz	1155.5001.03
R&S®FSQ8	シグナル・アナライザ、20 Hz~8 GHz	1155.5001.08
R&S®FSQ26	シグナル・アナライザ、20 Hz~26.5 GHz	1155.5001.26
R&S®FSQ40	シグナル・アナライザ、20 Hz~40 GHz	1155.5001.40
R&S®FSU-B24	30 dB プリアンプ、100 kHz~50 GHz	1157.2100.50
R&S®FSU-B25	電子アッテネータ、0 dB~30 dB、 および 20 dB プリアンプ (3.6 GHz)	1144.9298.02

ローデ・シュワルツについて

ローデ・シュワルツ・グループ（本社：ドイツ・ミュンヘン）は、エレクトロニクス分野に特化し、電子計測、放送、無線通信の監視・探知および高品質な通信システムなどで世界をリードしています。

75 年以上前に創業し、世界 70 カ国以上で販売と保守・修理を展開している会社です。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

本社／東京オフィス

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1

住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

神奈川オフィス

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-8-12

Attend on Tower 16 階

TEL:045-477-3570 (代) FAX:045-471-7678

大阪オフィス

〒564-0063 大阪府吹田市江坂町 1-23-20

TEK 第 2 ビル 8 階

TEL:06-6310-9651 (代) FAX:06-6330-9651

サービスセンター

〒330-0075 埼玉県さいたま市浦和区針ヶ谷 4-2-11

さくら浦和ビル 4 階

TEL:048-829-8061 FAX:048-822-3156

E-mail: info.rsjp@rohde-schwarz.com

<http://www.rohde-schwarz.co.jp/>

Certified Quality System
ISO 9001
DQS REG. NO 1954 QM

Certified Environmental System
ISO 14001
DQS REG. NO 1954 UM

このアプリケーションノートと付属のプログラムは、ローデ・シュワルツのウェブサイトのダウンロード・エリアに記載されている諸条件に従ってのみ使用することができます。

掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。

おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。あらかじめご了承ください。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1 住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

www.rohde-schwarz.co.jp