

# R&S<sup>®</sup>FSV スペクトラム・ アナライザの レベル不確かさの計算 アプリケーションノート

製品：

- | R&S<sup>®</sup>FSV3
- | R&S<sup>®</sup>FSV7
- | R&S<sup>®</sup>FSV13
- | R&S<sup>®</sup>FSV30
- | R&S<sup>®</sup>FSV40

このアプリケーションノートでは、最新のスペクトラム・アナライザの測定不確かさの計算について説明し、さまざまな測定における総合測定不確かさを計算するためのツールを紹介します。

# 目次

1	はじめに.....	3
2	概要.....	4
3	レベル不確かさの計算.....	5
3.1	レベル不確かさの計算方法.....	5
3.2	レベル不確かさの要因.....	6
4	実際のレベル不確かさの計算.....	8
4.1	例：位相雑音測定の不確かさの計算.....	9
5	参考文献.....	10
6	オーダー情報.....	11

# 1 はじめに

正確な RF レベル測定を保証することは、RF 測定プロセスにおける最も基本的な要素です。中間的な RF レベルではパワー・メータでも高い精度を確保できますが、R&S®FSV などのスペクトラム・アナライザでは、特に低レベル信号の測定に関して、より柔軟かつ高速で測定を行うことが可能です。

このアプリケーションノートでは、測定不確かさの計算について説明するとともに、最新のスペクトラム・アナライザを使用したさまざまな測定における総合測定不確かさを計算するためのツールを紹介します。

## 2 概要

RF レベルやパワーの測定、特に変調信号に関する測定は、RF 測定における基本的なタスクの 1 つです。精度の点からすると、あらゆる搬送波（変調波と非変調波）のパワー測定における第一の選択肢はパワー・メータですが、送信システムのスプリアス信号や隣接チャネルのレベル測定には、スペクトラム・アナライザのようにダイナミックレンジが広く、選択的な測定を行うことのできる装置が必要です。

パワー・メータは周波数選択はできず、広帯域幅でパワーレベルを測定します。またダイナミックレンジが限られているため、この種の測定には向いていません。

スペクトラム・アナライザは選択的な測定が可能のため、より適切なソリューションと言えます。パワー・メータと比較するとパワー測定の精度は劣りますが、一般に、この問題はパワー・メータ、アッテネータ、およびシグナル・ジェネレータを使用する置換法によって解決できます。しかし置き換えには時間がかかり、測定装置が 1 台の場合よりも測定器への投資額が多くなります。そのため、測定精度の点で、少なくとも大部分の要件を満たすようなスペクトラム・アナライザを所有することが一般的です。

R&S®FSV スペクトラム・アナライザは、極めて高いレベル測定精度を備えています。パワー・メータは広帯域幅でパワー・レベルを測定しますが、スペクトラム・アナライザの利点は狭帯域フロントエンド・アーキテクチャを採用していることです。スプリアス信号や隣接チャネルパワーを測定しなければならない場合、低レベル信号を正確に把握するには、フィルタリングと周波数の選択がより重要になってきます。

R&S®FSV は、スーパーヘテロダイン掃引周波数フロントエンドとアナログ RF および中間周波数 (IF) ダウンコンバート段を備えており、そのアナログ/デジタル・コンバータ (ADC) は優れた直線性と高速性を有しています。テスト信号がデジタル化された後は、狭帯域の低レベル測定においてパワー・メータと同様の精度を実現するために、デジタル信号処理とそのデジタル・フィルタによって追加的な信号処理が行われます。

パワー測定時の不確かさは、3 つのクラスに分類できます。

- シグナル・アナライザ内部測定不確かさ
- 被測定物による誤差（たとえば RF インタフェースのインピーダンス）
- 信号対雑音比による誤差

## 3 レベル不確かさの計算

### 3.1 レベル不確かさの計算方法

パワー測定に伴う総合的な測定不確かさは、合計誤差に関係するさまざまな誤差で構成されます。測定の総合不確かさの計算においては、累積誤差の分布に対する標準偏差を計算します（国際度量衡局の BIPM 法）。これは、すべての誤差は確率論に基づくものであることと、合計誤差はガウス分布であることを前提としており、合計誤差が多数の個別誤差の組み合わせである場合に当てはまりますが、個別誤差は必ずしもガウス分布ではありません。

したがって、測定不確かさは必要な信頼性レベルで計算することが可能です。累積誤差の標準偏差計算は、測定不確かさに関係する個々の誤差の標準偏差を合計することによって行われます。したがって、個別誤差の分布を把握するか仮定する必要があります。

合計累積誤差分布の標準偏差は、68%の信頼性レベルに相当します。これは、個別誤差の数が多く、すべての誤差の大きさが同程度の場合に当てはまります。これによって得られる不確かさの分布は、正規分布によって近似できます。したがって、包含係数を使用すれば他の信頼性レベルを計算することが可能です（信頼性レベルは、ユーザが他の測定不確かさを計算できるようにテスト・レポートに示しておく必要があります）。95%の信頼性レベルに対する包含係数の値は 1.96 で、信頼性レベルが 99%の場合は 2.58 です。

#### 誤差分布と標準偏差

系統誤差については、実際の分布が分かっている場合を除いて矩形分布であるものとします。これは、誤差限界の範囲内では、位置に関わらず誤差が等しい確率で分布していることを意味します。誤差限界は、標準不確かさまたは統計的分散に変換することができます。

$$\text{誤差限界}\pm a、\text{分散}\sigma^2 = \frac{a^2}{3}$$

系統誤差には、たとえば周波数応答、入力アッテネータの不確かさ、または対数表示の線形性などがあります。

確率的誤差はガウス分布です（たとえば雑音）。その標準偏差は、繰り返し測定によって決定または計算されます。信号対雑音比が十分な値でない場合、誤差は確率的なものとなります。

不整合誤差や温度変化によって生じる誤差はU型分布になります。これは、不整合によって生じる誤差は、小さい値やゼロに近い位置よりも、限界値に近い位置で発生しやすいという事実を反映しています。

$$\text{誤差限界}\pm a、\text{分散}\sigma^2 = \frac{a^2}{2}$$

全体的な合成不確かさ $\sigma_{\text{tot}}$ の分散は、さまざまな分散 $\sigma_i^2$ を合計することによって計算されます。

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_1^2 + \dots + \sigma_n^2$$

測定における全体的な合成標準不確かさ $\sigma_{\text{tot}}$ は、平方根を取ることによってその分散から計算されます。

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{tot}}^2}$$

標準偏差の信頼性レベルは68%です。信頼性レベルを変更するには、標準偏差に包含係数を乗じる必要があります。信頼性レベル95%に相当する包含係数は1.96です。

合計誤差を計算するには、すべての誤差が同じ単位でなければなりません。R&S®FSVでは、ほとんどの誤差がdB単位で得られます。帯域幅誤差は公称帯域幅に対するパーセンテージで与えられるので、これをdBに変換する必要があります。変調信号のパワー測定を考えた場合、帯域幅誤差に関係する誤差は次のようになります。

$$\text{RBW\_error}[\text{dB}] = 10 \cdot \lg\left(1 + \frac{(\text{RBWerror})\%}{100}\right)$$

スペクトラム・アナライザのデータシートには、合計誤差に関するさまざまな誤差が示されています。特定の測定における全体的なレベル誤差を把握するには、該当するすべての誤差を合計する必要がありますが、これを異なるレベルや周波数ごとに行わなければならない場合は、非常に手間がかかります。R&S®FSVスペクトラム・アナライザ・ファミリーでは、たとえば、最大3.6GHzまでの周波数で、基準レベルから基準レベルより70dB低い値までの範囲に対して0.28dBというように、いくつかの具体的な設定に対して総合測定不確かさが仕様化されています。30GHzまでの周波数では、指定された総合測定不確かさは1.32dBです。これによって、多くの場合は誤差を計算する必要がなくなります。

たとえば、相対測定のように必ずしもすべての誤差が適用されない場合は、誤差源から具体的な誤差を計算することができます。

## 3.2 レベル不確かさの要因

スペクトラム・アナライザの総合的なレベル不確かさには、さまざまな要因が関係しています。

これらの要因としては、以下のようなものが挙げられます。

- 内部校正器の絶対的なレベル不確かさ
- RF入力の周波数応答
- 入力アッテネータ切り替えの不確かさ
- 分解能帯域幅切り替えの不確かさ
- 検波器の表示直線性

チャンネルのパワー測定や隣接チャンネルのパワー測定の場合は、分解能帯域幅の誤差も測定不確かさに関係します。

- 分解能帯域幅不確かさ

R&S®FSVではIF利得切り替えを使用しないので、このアナライザではIF利得設定（リファレンス・レベル切り替え）の不確かさは発生しません。

もう1つの誤差要因は信号対雑音比です。信号対雑音比が不十分だと測定信号に雑音信号が加わり、測定結果は実際の値より大きくなります。検波器が異なれば雑音の重み付けも異なるため、誤差は使用する検波器に依存します。誤差が最も大きいのはピーク検波器ですが、サンプル検波器やRMS検波器ではそれほどでもありません。

たとえば、測定などによって信号対雑音比が分かっている場合は、それぞれの補正係数を差し引くことによって誤差を補正できます。

## 4 実際のレベル不確かさの計算

このアプリケーションノートにはレベル不確かさを計算するためのスプレッドシートが付属しており、レベル不確かさの計算に関係するすべての項目がリストされています。

Level Uncertainty Calculation for R&S FSV		
General Calculation		
Inherent errors	specified error	standard uncertainty
Absolute error @128 MHz [dB]	0.2	0.12
Frequency response [dB]	0.3	0.17
Input attenuator switching [dB]	0.2	0.12
IF Gain switching [dB]	0	0.00
Display linearity [dB]	0.1	0.06
Bandwidth switching error [dB]	0.1	0.06
Resolution Bandwidth error [%]	3.00	0.08
combined variance		0.07
combined standard uncertainty		0.26
<b>rss error [dB] (95 % confidence level)</b>		<b>0.52</b>
Error due to source mismatch		
VSWR of SA	1.5	
VSWR of DUT	1.5	-0.25
combined variance		0.13
combined standard uncertainty		0.36
<b>error including source mismatch (95%)</b>		<b>0.71</b>

図 1: レベル不確かさの計算用のスプレッドシート

指定された誤差限界はR&S®FSVのデータシートにある値で、10MHz~3.6GHzの周波数範囲と、リファレンス・レベルから、リファレンス・レベルより70dB低い値までの範囲で有効です。他の周波数範囲とレベル範囲については、それぞれの値を仕様から入力することができます。

さらに、シグナル・アナライザと被測定物のVSWRを入力することによって、信号源の不整合による誤差を考慮に入れることができます。

このスプレッドシートは、個々の誤差を基に95%の信頼性レベルで不確かさを計算します。

R&S®FSVをテスト・システム内の他の装置と接続して使用する場合は、計算された合成分散を使用してシステムの総合不確かさを計算できます。

システム内の他の装置の不確かさ分散に、R&S®FSVの不確かさ分散が加えられます。合成分散の正の平方根を取ると、指定された信頼性レベルの下で全体的な不確かさを計算できます。



## 4.1 例：位相雑音測定の不確かさの計算

位相雑音測定はCW信号の相対測定です。したがって、128MHzにおける絶対誤差をゼロに設定することができます。

通常、狭い周波数範囲に対する周波数応答はフラットです。そのため、搬送波近傍での位相雑音測定には周波数応答を適用しません。これは、1MHzまでの周波数オフセットに対しても有効です。

位相雑音測定の場合、測定における分解能帯域幅は変化せず、帯域幅切り替え誤差は適用されません。

R&S®FSV の IF 利得切り替え誤差は常にゼロです。

Level Uncertainty Calculation for R&S FSV		
Example: Phase Noise Measurement		
Inherent errors	specified error	standard uncertainty
Absolute error @128 MHz [dB]	0	0.00
Frequency response [dB]	0	0.00
Input attenuator switching [dB]	0	0.00
IF Gain switching [dB]	0	0.00
Display linearity [dB]	0.1	0.06
Bandwidth switching error [dB]	0	0.00
Resolution Bandwidth error [%]	3.00	0.08
combined variance		0.01
combined standard uncertainty		0.10
<b>rss error [dB] (95 % confidence level)</b>		<b>0.19</b>

図 2：位相雑音測定レベルの不確かさの計算

雑音電力測定では、公称帯域幅と比較した分解能帯域幅の誤差も総合不確かさに関係します。したがって、不確かさの計算には分解能帯域幅の誤差が含まれます。

## 5 参考文献

- [1] ETSI Technical Report ETR 028: March 1994 Radio Equipment and Systems (RES); Uncertainties in the measurement of mobile radio equipment characteristics
- [2] Guide to the Expression of uncertainty in Measurement; International Organization of Standardization, 1995

## 6 オーダー情報

品名	型番	オーダー番号
スペクトラム・アナライザ	R&S®FSV3	1307.9002.03
スペクトラム・アナライザ	R&S®FSV7	1307.9002.07
スペクトラム・アナライザ	R&S®FSV13	1307.9002.13
スペクトラム・アナライザ	R&S®FSV30	1307.9002.30
スペクトラム・アナライザ	R&S®FSV40	1307.9002.40

#### 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](mailto: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](http://www.rohde-schwarz.co.jp)