

軌道上衛星に対する地上局テスト アプリケーションノート



製品:

- R&S®FSW
- R&S®SMW
- R&S®NRP
- R&S®ZVA

通信衛星が目標軌道に乗ったら、いくつかの手順を実行して、ペイロード内のトランスポンダーが正しく動作しているかどうかを確認する必要があります。この軌道上測定は、運用中の衛星のメンテナンスでも重要な役割を果たします。

衛星チャネルを軌道上測定のために使用すれば、その間目的のアプリケーションは実行できなくなるので、大きな機会コストが生じます。このため、テスト時間は可能な限り短くする必要があります。

この記事で推奨されているローデ・シュワルツのテスト/測定機器は、測定確度だけでなく、測定速度の点でも業界最高レベルのものです。

このアプリケーションノートでは、衛星のメンテナンスルーチン実行時の機能チェックに用いられる、衛星の打ち上げ後あるいは軌道上の測定/モニタリング戦略について説明します。補完記事(アプリケーションノート:1MA273)では、打ち上げ前のペイロード測定について説明しています。

注記:

最新のドキュメントについては、当社ホームページをご覧ください。

<http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA263>

アプリケーションノート:KバンドでのDVB-S2/DVB-S2X信号発生および解析

<http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA273>

目次

1	概要	3
2	理論的背景.....	5
2.1	等価等方放射電力(EIRP).....	5
2.2	群遅延.....	6
2.3	ダブルイルミネーション.....	7
2.4	軌道上測定へのドップラー効果の影響.....	7
3	R&Sの衛星テスト用製品ポートフォリオ.....	8
4	R&Sの軌道上測定用推奨製品.....	9
5	軌道上測定のテスト手順.....	10
5.1	軌道上EIRP測定.....	10
5.2	軌道上群遅延測定.....	14
5.2.1	群遅延測定の問題.....	22
5.3	ダブルイルミネーションのモニタリング.....	25
5.4	衛星搬送波のモニタリング.....	27
6	軌道上衛星ペイロード・テスト・システム.....	30
7	参考資料.....	32
8	オーダー情報.....	33

1 概要

2016年6月現在、宇宙空間で運用中の衛星は1419個に上ります[1]。その半分以上が通信衛星であり、3分の1以上が民間の通信衛星です。衛星が目標軌道に達して起動されたら、テストルーチンを実行して、ペイロード内のトランスポンダーが正しく動作しているかどうかを検証する必要があります。この軌道上測定は、運用中の衛星のメンテナンスでも重要な役割を果たします[2]。

このアプリケーションノートでは、軌道上の衛星の機能を評価するために必要な測定について説明します。軌道上測定は複雑なので、理論と現実的な課題の両方を理解しておく必要があります。関連する課題に対処するための物理的な条件と解決策について説明します。例えば、理論的なリンクバジェットの計算結果と、測定されたリンクバジェットの値には、必ず違いがあります。ローデ・シュワルツのソリューションを使用して、クラス最高のNRPシリーズ パワーセンサを基準にしてEIRP測定を実行することで、これら2つのリンクバジェットの値の差を最小限に抑えることができます。NRPシリーズには、ソースの負荷整合を内部で自動補正する機能もあります。

長距離の群遅延テストでは、ZVAシリーズ ネットワーク・アナライザに内蔵された測定の不確かさ計算機能を利用することで、最適なアパーチャー値の選択が容易になります。同じセクションでは、利得伝達(変換損失)測定についても説明します。

リアルタイムスペクトラム解析はダブルイルミネーションのモニタリングに非常に有効です。また、汎用ベクトル信号解析は衛星搬送波のモニタリングに役立ちます。

テストコストの最大の要因は、衛星の無線チャネルが測定のために稼働していない時間です。衛星ペイロードを最初に軌道上でテストする際には、できるだけ短時間でテストを完了して、衛星を稼働させ、収益を生むようにすることが重要です。信頼性を低下させずに、軌道上測定にかかる時間を最小化することが必要です。このアプリケーションノートで推奨されているR&S機器は、測定確度と測定速度の両面で業界最高レベルのもので、このアプリケーションノートのさまざまな箇所でも、測定速度に関する記述があります。これは、ローデ・シュワルツのソリューションで測定を行うことで、測定時間とテストコストをどの程度節約できるかを、大まかに把握していただくためです。

このアプリケーションノートでは、いくつかの重要な打ち上げ後測定のセットアップについて説明します。これらのセットアップでは、ローデ・シュワルツの独自のソリューションを利用して、衛星の機能チェックとメンテナンスルーチンを実行できます。同じローデ・シュワルツの機器で実行可能な測定のうち、ここでは説明していないものとして、IPFD、G/T、利得フラットネス、パワーバックオフ、周波数変換誤差があります。

補完的なアプリケーションノートである1MA273では、Ku/KaバンドのDVB-S2/DVB-S2X信号に対して実行できるテストと測定について説明しています。

製品名の略称

このアプリケーションノートでは、ローデ・シュワルツの製品について、以下のように略称で記載しています。

- R&S[®] SMW200Aベクトル信号発生器: SMW
- R&S[®] SMF100Aベクトル信号発生器: SMF
- R&S[®] SMZ周波数逡倍器: SMZ
- R&S[®] FSWシグナル／スペクトラム・アナライザ: FSW
- R&S[®] ZNBTベクトル・ネットワーク・アナライザ: ZNBT
- R&S[®] ZVTベクトル・ネットワーク・アナライザ: ZVT
- R&S[®] ZVAベクトル・ネットワーク・アナライザ: ZVA
- R&S[®] RTOデジタル・オシロスコープ: RTO
- R&S[®] AFQ100B UWB信号／I/Q変調発生器: AFQ
- R&S[®] NRPxxS/SN 3パス・ダイオード・パワー・センサ: NRPxxS/SN
- R&S[®] NRP2パワーメータ: NRP2
- R&S[®] FSUPシグナル・ソース・アナライザ: FSUP
- R&S[®] FSLスペクトラム・アナライザ: FSL
- R&S[®] SMBV100Aベクトル信号発生器: SMBV
- R&S[®] SMB100A RF/マイクロ波信号発生器: SMB

2 理論的背景

2.1 等価等方放射電力(EIRP)

EIRP測定は、アンテナ・パターンのマッピング時に、衛星のアンテナが地上局に正しく向けられていることを検証するために役立ちます。アンテナ・パターン・テストは、ビームパターンが正しく地球に向けられていることを確認する役割を果たします。また、アンテナの向きが確認または修正された後で、衛星のアンテナ・フィード・システムの問題を早期に発見するためにも役立ちます。

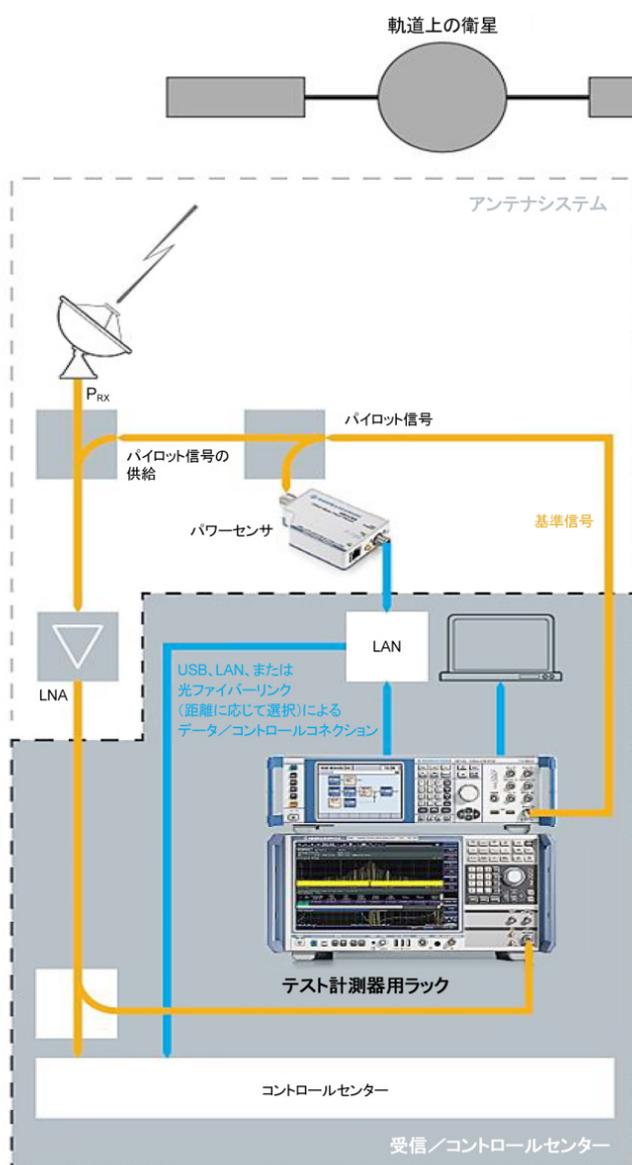


図2-1: 衛星が目標軌道上にあるときのEIRP測定用の地上局セットアップ

衛星送信チェーンの性能の確立後は、無線経路の品質(ダウンリンクでの減衰)の指標として使用できます。このパラメータの値を定義するには、Friisの伝達公式を参照する必要があります。EIRPは、最大利得方向での送信アンテナの利得 G_T と、衛星での入力送信パワー(P_T)の積で表されます。

$$EIRP = P_T G_T$$

地上局からのEIRPの測定には、受信側での導出が必要です。

$$EIRP = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{P_R}{G_R} \right)$$

ここで、

P_R = 受信アンテナでの受信パワー

G_R = 受信アンテナの利得

R = 衛星と地上局の間の距離

λ = 放射信号の(中央)波長

EIRPは一般的にdBW単位で表されます。

2.2 群遅延

軌道上の群遅延測定では、フィルターや周波数コンバーターで通常測定される絶対時間遅延を問題にすることはあまりありません。最大の関心事は、信号の各周波数成分の遅延が等しく、相対位相が維持されるかどうかです。信号の相対群遅延が特に重要なのは、今日の衛星通信で一般的に用いられているデジタル変調方式の場合です。わかりやすくいえば、信号がRFコンポーネントを通過するときに、その形状が維持されることが必要です。

群遅延測定は、位相測定に基づいています。測定手順は、群遅延 τ_{gr} の定義、すなわち位相 φ (度)の周波数 f に対する導関数にマイナス符号を付けたものに対応します。

$$\tau_{gr} = -\frac{1}{360^\circ} \cdot \frac{d\varphi}{df} \quad (1)$$

実用上の理由で、ベクトル・ネットワーク・アナライザは、微分係数の代わりに、伝送パラメータ S_{21} の差分係数を測定します。これは、測定対象の周波数レンジ Δf (アパーチャーと呼ばれます)内の位相 φ の変化の非線形性が大きすぎなければ、必要な群遅延 τ_{gr} の良好な近似を与えます。

$$\tau_{gr} = -\frac{1}{360^\circ} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} \quad (2)$$

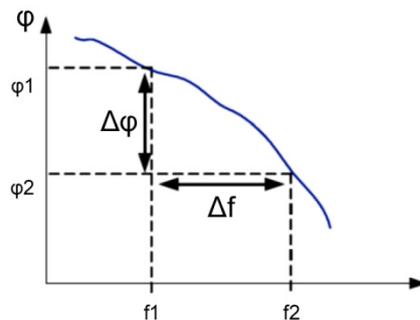


図2-2: 位相シフト $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$ およびアパーチャー $\Delta f=f_2-f_1$ の定義

図2-2には、リニアに減少する位相応答(遅延ラインなど)の項 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$ と $\Delta f=f_2-f_1$ が示されています。

一般的に用いられる群遅延測定には、相対群遅延と絶対群遅延があります。相対群遅延測定は、DUTに起因する一定の遅延を無視します。この遅延は、すべての周波数成分に同じように作用するため、信号形状の変化の原因になりません。ただし、絶対群遅延が重要な場合もいくつかあります。例えば、2つの伝送チャネルの信号遅延を調整する場合などです。絶対群遅延を測定する場合には、衛星の地上局に対する移動を考慮する必要があります。これは特に、非静止軌道上にある衛星を測定する場合に重要です。

$$\tau_{rel} = \tau_{abs} + \min|\tau_{gr}| \quad (3)$$

2.3 ダブルイルミネーション

衛星の運用期間中に、衛星通信に関して起きる一般的な問題の1つとして、ダブルイルミネーションと呼ばれる干渉があります。

これは、地上局が間違った衛星に向けてアップリンクを送信したために、衛星のトランスポンダーが飽和状態にドライブされることです。これは場合によっては偶発的な問題でないこともあります。

混雑した軌道空間内でこのような飽和を防ぐには、この有害な干渉を、理想的にはリアルタイム・スペクトラム・モニタリングによって検出する必要があります。ダブルイルミネーションを迅速に検出して、間違った搬送波のIDを自動的に検出することが、問題を短時間で解決するために役立ちます。

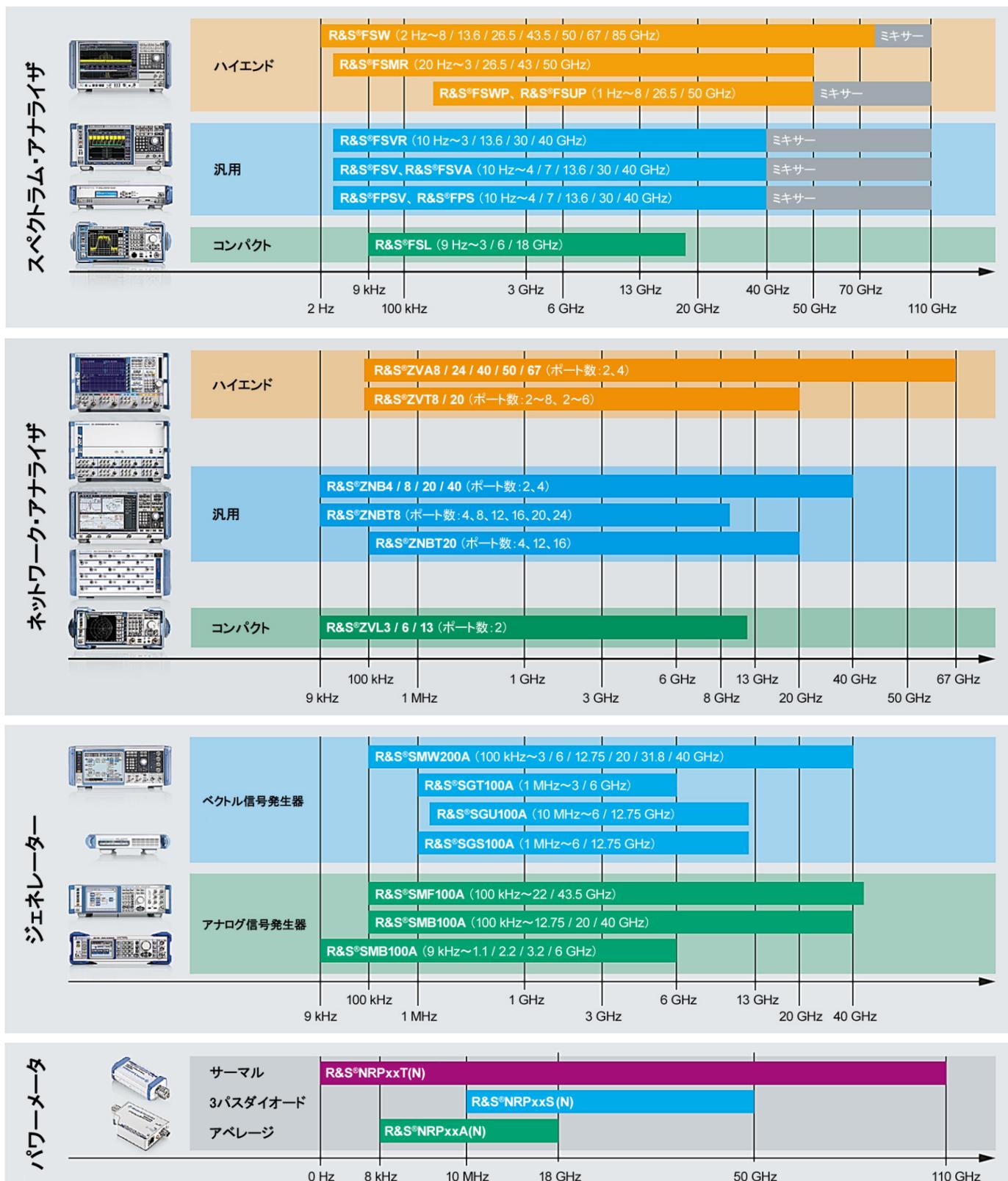
2.4 軌道上測定へのドップラー効果の影響

ドップラー効果は、レシーバーがソースに対して移動しているときに観察される電磁(EM)波の周波数の変動と定義されます。宇宙空間内の衛星は、その軌道に応じて、非常に高速で移動しています。このため、大きな周波数変動が生じ、宇宙通信の複雑さが増加する原因となります。低軌道衛星は特に高速に移動しているため、追跡している地上局で観察されるドップラーシフトは、数百キロヘルツに達することがあります。ドップラーシフトは、地球の曲率によっても変化します。宇宙空間内の衛星と正しく通信するには、動的なドップラー補正方式を採用することが必要です。

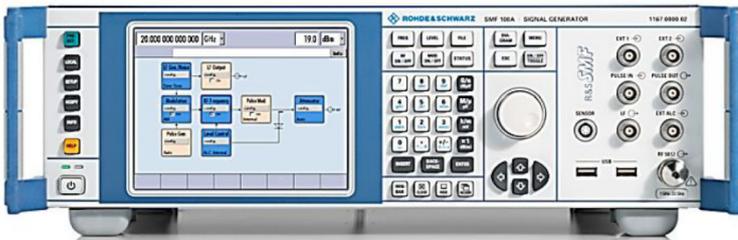
衛星が一定の周波数の信号を受信できるように、送信信号の周波数が複数回調整されます。周波数への影響に加えて、パワーレベルもレンジ(衛星までの距離)に応じて変化します。このようなドップラーシフトの原因は、衛星に働く楕円状の力によって、衛星が垂直方向(地表に垂直な方向)に移動することです。この効果は静止衛星の場合はそれほど大きくありませんが、低軌道衛星の場合はかなり大きくなります。

衛星の移動速度は、測定セットアップの複雑さに大きな影響を及ぼします。

3 R&Sの衛星テスト用製品ポートフォリオ



4 R&Sの軌道上測定用推奨製品



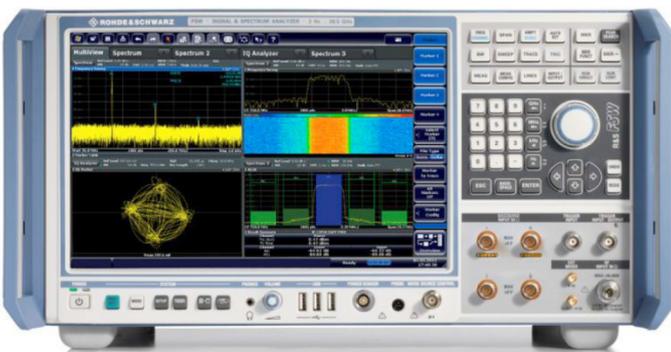
R&S®SMF100Aマイクロ波信号発生器

- 100 kHz~43 GHzの最大周波数レンジ
- R&S®SMZ周波数乗倍器により110 GHzまで対応
- -120 dBc(代表値)の優れたSSB位相雑音(10 GHz、10 kHz搬送波オフセット)
- +25 dBm(代表値)のきわめて高い出力パワー
- 優れたデータを持つオプションのパルス変調器
- 独自のパルス列発生機能
- 追加のR&S®NRP-Zxxパワーセンサによる汎用パワー解析



R&S®ZVAベクトル・ネットワーク・アナライザ

- 周波数レンジ:300 kHz~8 GHz(R&S®ZVA8)、10 MHz~24/40/50/67/110 GHz(R&S ZVA24/40/50/67/110)ミキサーの位相/群遅延測定を、LOアクセスありまたはなしで実行
- 長距離群遅延測定
- リニア/ノンリニア増幅器/ミキサー測定
- 雑音指数測定
- 分解能12.5 nsのパルスプロファイル測定
- 平衡ポートを持つアクティブデバイスの信頼できる特性評価のための真の差動測定
- 高速シンセサイザー、広いIF帯域幅、広いダイナミックレンジによる短い測定時間
- ジェネレーター/レシーバーへのダイレクトアクセスによる30 dBmの出力パワーと150 dBのダイナミックレンジ
- 増幅器/ミキサーのパルス測定のための、最大30 MHzのIF帯域幅を備えた初めてのVNA



R&S®FSWシグナル/スペクトラム・アナライザ

- 周波数レンジ:2 Hz~8/13.6/26.5/43.5/50/67/85 GHz
- -137 dBc(1 Hz)の小さい位相雑音(10 kHzオフセット、1 GHz搬送波)
- -88 dBcのダイナミックレンジ(ノイズキャンセルあり)
- 最大2 GHzの解析帯域幅
- 最大160 MHz帯域幅のリアルタイム解析
- 複数の測定アプリケーションを並列実行して表示可能
- 分解能帯域幅:1 Hz~10 MHz、80 MHz



R&S®NRPxxS/SN

- 10 MHz~50 GHzの周波数レンジ
- 10,000回/sのトリガ測定
- 50,000回/sの測定
- LAN経由の任意の距離でのリモートモニタリング
- 93 dBのダイナミックレンジ
- 内蔵トリガI/Oポート
- 測定時間を最小化するインテリジェントなアベレージング機能
- 測定の不確かさを最小化
- 3パス・ダイオード・パワー・センサ

5 軌道上測定の実験手順

5.1 軌道上EIRP測定

衛星リンクは、音声放送やテレビ放送、および電話、インターネット、移動無線機による世界規模の通信に不可欠な役割を果たします。特に商用システムの場合は、スムーズな動作を24時間保証する必要があります。

ただし、衛星信号が地上局に到達したときの電界強度が不十分だと、深刻な問題が発生することがあります。ビットエラー比(BER)が急激に増加し、通信リンクが使用不可能になる可能性があるからです。このような重大な影響が起きる原因は、いくつか考えられます。大気の状態が電磁波の伝搬に影響を与えることはよくあります。例えば、霧、雲、降水などによって信号が減衰され、Kuバンドや、特にKaバンドといった高い周波数バンドでノイズが増加することがあります。

アンテナ調整に誤差があると、利用可能なパワーの一部しか受信できないことがあります。これは特に、大規模な指向性の高いパラボラアンテナの場合に当てはまります。また、受信システムを運用する場所の環境条件にも注意が必要です。多くの衛星アンテナは屋外に設置されるので、湿度、高温/低温、風による機械的応力などに耐える必要があります。これは信号品質にも悪影響があり、経年劣化の影響によってさらに悪化します。

上記の影響による伝送経路の減衰は数dBに過ぎませんが、その影響はバックグラウンド補正アルゴリズムの能力を簡単に超える場合があります。これは、搬送波対雑音(C/N)比に関する性能限界が比較的小さいからです。これは計画上の誤りではなく、経済的な考慮の結果です。安全マージンを高めるために、入力信号のレベル(アンテナ到達時点で約 -115 dBm)をわずか3 dB増やすだけでも、衛星の送信パワーを2倍にするか、受信アンテナの直径を50 %増やすことが必要になるからです。このため、現実的な方法としては、既存の乏しいリソースを最大限に活用する適当な代替手法の開発に力を注ぐ必要があります。その例として、徐々に起きるシステムの性能低下を防ぐために、受信パワーを連続的にモニターする方法があります。

図5-1に、衛星が目標軌道上にあるときのEIRP測定の地上局セットアップを示します。次の性質を持つ基準パイロット信号を使用します。

- 既知のRFレベル(パワーレベルは、パワーセンサで測定可能な程度に高く、かつLNAを非線形領域にドライブするほどには高くないことが必要です)
- 衛星のダウンリンクと同じ搬送波周波数と信号帯域幅。この信号は、SMF信号発生器によって測定ポイントに供給されます。

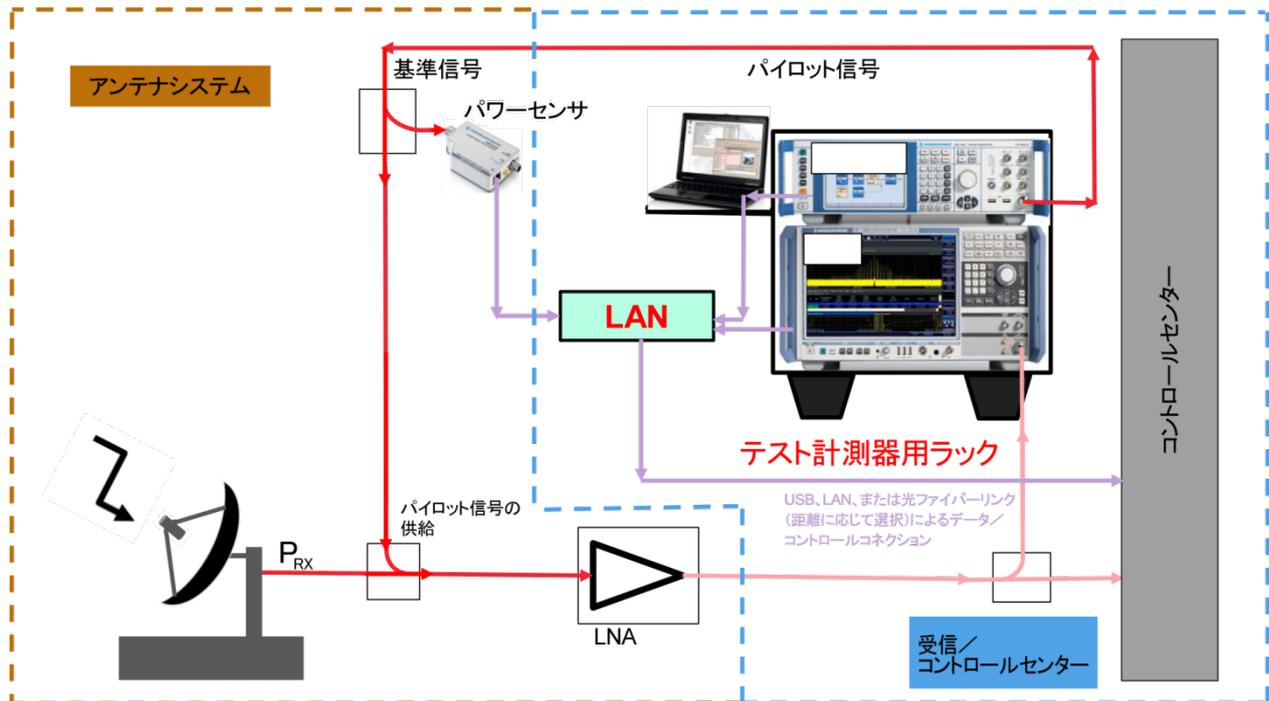


図5-1: 衛星-地上無線局間の受信経路のEIRP測定の実験セットアップ

衛星からの信号と同様に、パイロットRF信号は受信伝送経路のほとんどを通過して受信/コントロールセンターに達し、そこでシグナル・アナライザまたはスペクトラム・アナライザを使用して2つの信号のレベル差が測定されます。2つの信号の搬送波周波数とスペクトラム形状はほぼ同じなので、伝送経路全体で両方の信号に同じ増幅と減衰が適用されます。すなわち、スペクトラム・アナライザで測定されるレベル差は、基準ポイントでのレベル差を反映したもので、これによって地上局アンテナ出力でのRF受信レベルがわかります。ただし、パワーセンサはパイロットRF信号レベルを基準ポイントで直接測定するのではなく、少し手前で測定するため、パイロットレベルは少し高くなります。

このレベル差は、中間のパッシブコンポーネントによる減衰から生じます。この減衰は長期的に安定していると仮定できるので、想定されるダウンリンクチャネルのそれぞれに対してとどき測定するだけで済みます。測定されたチャネル固有の値は、パワーメータの読み値から減算されます。

新しいR&S®NRPxxSNパワーセンサは、工場での校正済みであり、レベル、周波数、温度の全範囲でかわめて正確な測定を実現します。このアプリケーションのケースでは、パワーレベルが低く、センサのパワー仕様に記述された -70 dBm \sim $+23$ dBm(33 GHzまで)の許容範囲内に収まるため、過負荷によるセンサの障害は考慮する必要はありません。

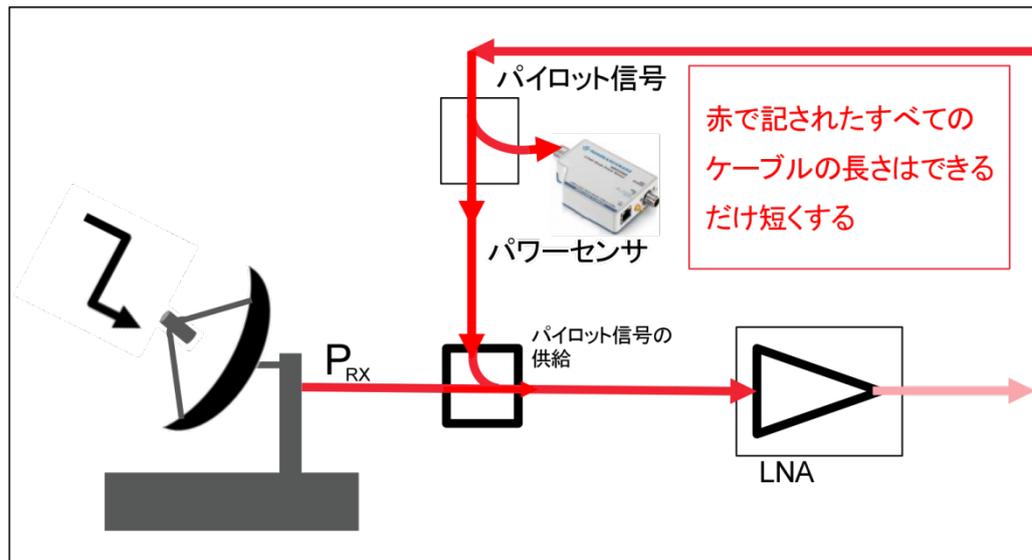


図5-2: アンテナシステムの最適な測定ポイント

図5-2に、アンテナシステムの最適な測定ポイントを示します。これは、アンテナ出力と、最初の超低雑音増幅器(LNA)の入力の間にあります。LNAは通常、アンテナにフランジマウントされています。このポイントではRF信号レベルが最も低くなりますが、達成可能な測定精度は最高になります。チェーンの後ろのほうの受信/コントロールセンターでパワーを測定すると、不確かさが大きくなります。これは、LNAの利得と、アンテナからの(非常に長い場合もある)受信フィードによる減衰の安定性が十分でないからです。アンテナ出力のRFレベルは非常に低いので、場合によってはダイオードパワーセンサの測定リミットを50 dB程度下回ることもあります。このため、帯域制限のあるアナライザを使用して、帯域幅を制限して測定する必要があります。広帯域パワーメータを使用すれば最高の測定精度が得られますが、この精度をスペクトラム・アナライザなどの帯域制限のある測定器に転送する間接測定が最適です。そのためには、2ステップの方法が必要です。

受信アンテナの特性と独立した、受信パワーの比較可能な結果を得るには衛星の等価等方放射電力(EIRP)を受信パワーから計算します。EIRPは、測定された受信パワーを実現するために衛星が放射する必要があるパワーを表します。この計算では、等方送信アンテナ、すなわち全方向に一律に放射するアンテナが使用されていると仮定されます。

$$\frac{EIRP}{dBW} = \frac{P_{RX}}{dBm} + \frac{G_r}{dB} + \frac{a}{dB} - 30$$

ここで、 P_{RX} は受信パワー、 G_r は受信アンテナの利得、 a は公称経路減衰(200 dB程度)を表します。こうして得られたEIRPの値と、衛星の仕様で記述されたEIRPを比較することにより、無線リンクの現在の品質の指標が得られます。

3パス・ダイオード・パワー・センサは、このアプリケーションを含め、さまざまなアプリケーションに適しています。連続平均、バースト平均、タイムスロット平均、ゲート平均、トレース測定が可能な上、測定リミットがきわめて低いからです。これらのパワーセンサは、優れた性能と、これまででない測定速度と精度を実現します。詳細な解析が必要な場合は、このセンサでは、ビデオ帯域幅100 kHzのタイムスロットモード/トレースモードなどの追加の測定機能が利用できます。

最高50 GHzの周波数レンジを備えたNRPxxS/SNパワーセンサは、衛星システムの地上局の設置、保守、リモートモニタリングのための最適な選択肢です。NRPxxSN LAN/パワーセンサは、衛星システムなどのリモートモニタリングアプリケーション(すなわち、システムと異なるポイントにセンサを配置する必要がある場合)に最適です。Power over Ethernet(PoE)でセンサをLANに接続すると、コントロールセンターからシステムをリモートモニターできます。

インターネットに接続したPCを使用すれば、NRPxxSNセンサをWebブラウザから簡単に制御できます。このため、追加のソフトウェアアプリケーションを制御PCにインストールする必要はありません。

5.2 軌道上群遅延測定

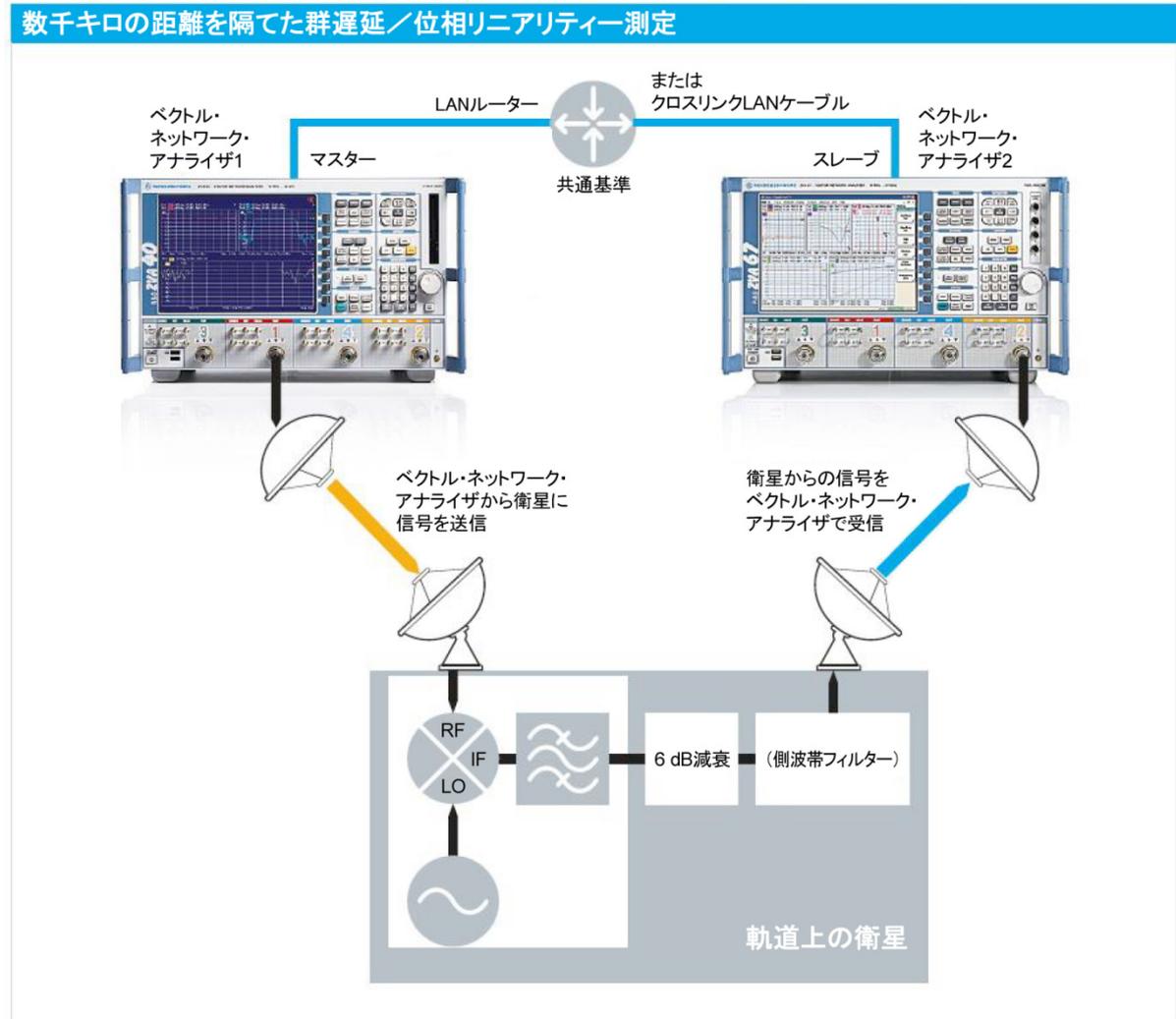


図5-3: 2台のZVAを使用した群遅延測定

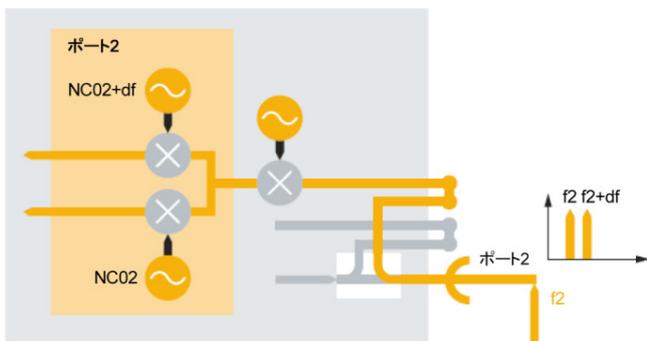
トランスミッターとレシーバーの間の距離を隔てた群遅延を測定するには、2つのステーションからの結果の同期、トリガ、転送が必要です。図5-3の構成を使用すると、長距離群遅延測定を容易に実行できます。

ZVA-K10長距離群遅延測定は、エンベディッドLOを搭載した周波数変換デバイスに対する既存のZVA-K9群遅延測定を拡張したものです。オプションZVA-K10は、ZVA/Tファミリーの2台の別々の測定器を使用して、周波数変換／非周波数変換DUTの相対群遅延とリニア位相からのずれを測定するために設計されています。測定の際に、2台の測定器間の同軸接続は不要です。2台の測定器間の通信は、LAN/LXI接続で行われます。2台のネットワーク・アナライザは、LAN接続で相互に通信し、テストシーケンスを同期します。

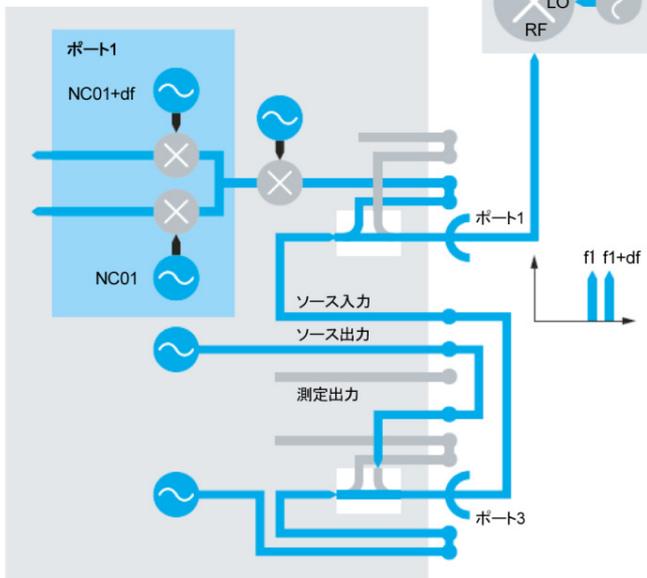
図5-3の構成を使用すると、長距離群遅延測定を容易に実行できます。この測定セットアップには2台のZVAベクトル・ネットワーク・アナライザが必要で、これらをマスターとスレーブに設定します。ZVAのファームウェアバージョンはどちらも2.76以上である必要があります。1台目のZVAはマスターとして動作し、LAN/LXI接続で2台目のスレーブZVAを制御します。マスターは、必要な2トーン信号を発生し、スレーブ測定器のレシーバーを制御して同期し、測定結果を画面に表示します。両方の測定器は、共通の基準周波数(通常はGPS基準などの無線)に接続されます。2台の測定器をLANケーブルで直接接続するか、LANルーター経由で接続することにより、同期のための接続が確立されます。

Rohde&Schwarzの2台のVNAを使用した 群遅延測定セットアップの内部ブロック図

ベクトル・ネットワーク・アナライザ2(スレーブ)



ベクトル・ネットワーク・アナライザ1(マスター)

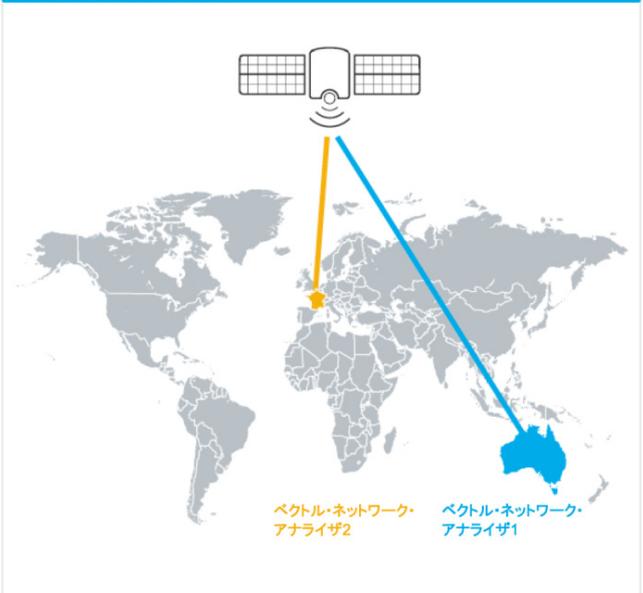


- 2台の異なるZVA:

基準チャンネルとレシーバーチャンネルのNCO(デジタルLO)は別々
→きわめて安定した時間条件

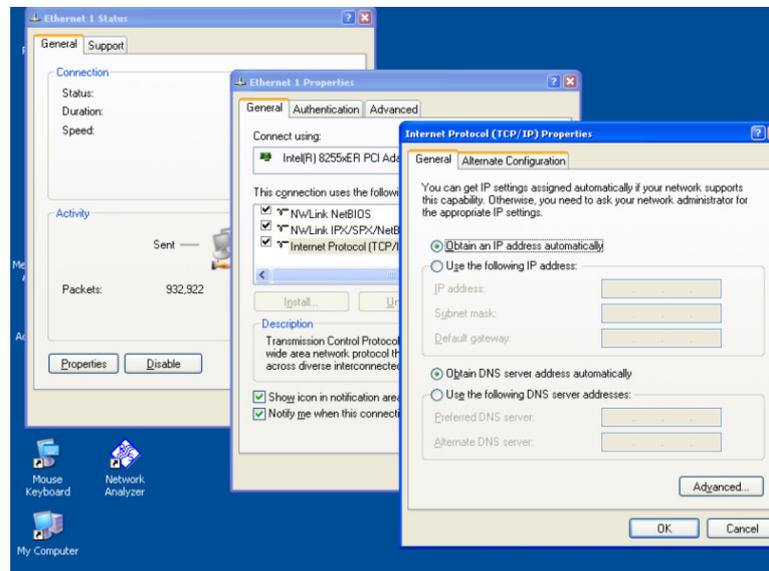
- 共通の周波数基準が非常に重要

2台のVNAの配置の例

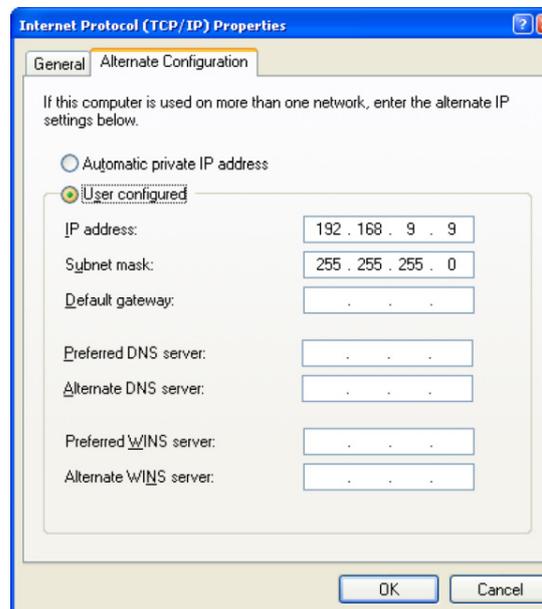


LXI測定器セットアップの場合:

- 2台のZVA/ZVTをLANルーターに接続するか、(クロスリンク)ケーブルで直接接続
- 両方のZVA/ZVTを「Obtain IP address automatically」に設定

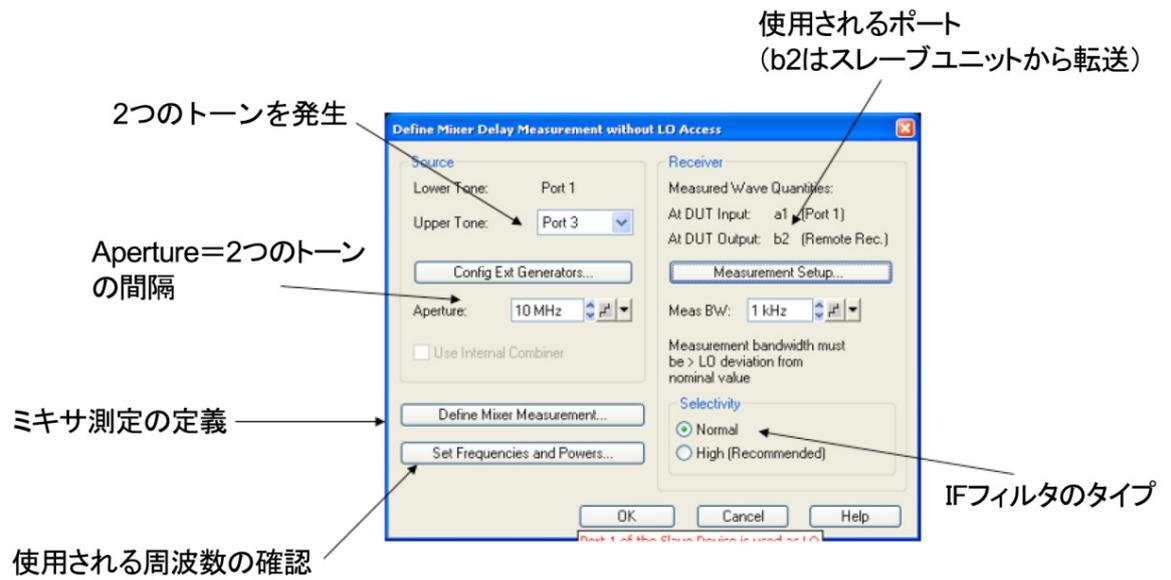


- 「Alternate configuration」を開き、「User configured」IPアドレスを入力(例、スレーブZVATアドレスより1つ上)

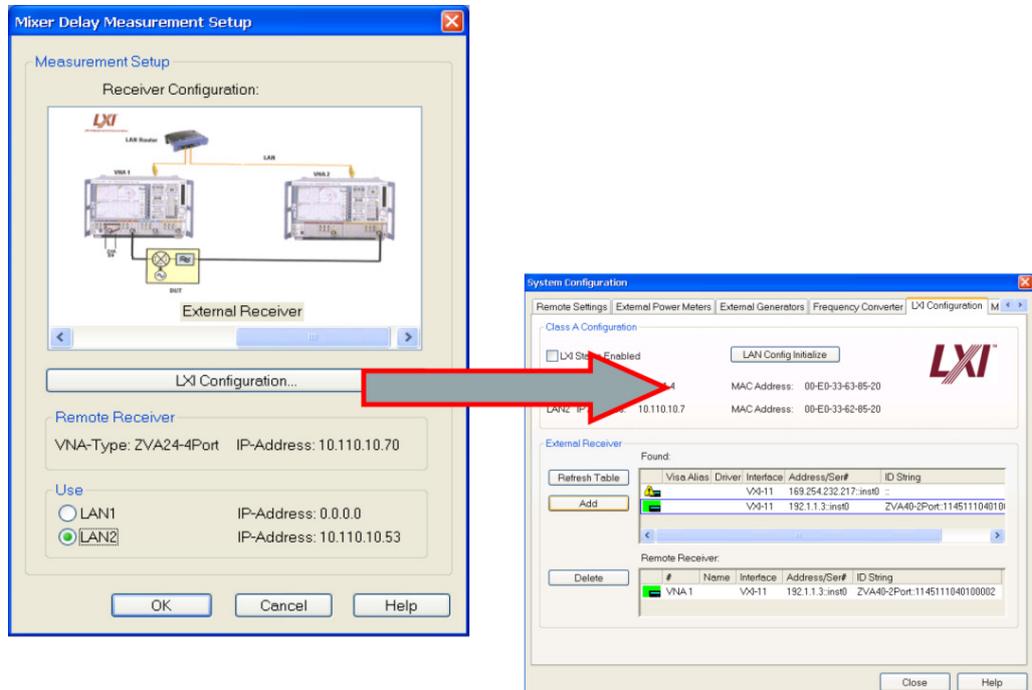


- NIの「Measurement & Automation Explorer」を開始
- 新しいネットワークデバイスを追加
- →IPアドレスを手動で入力

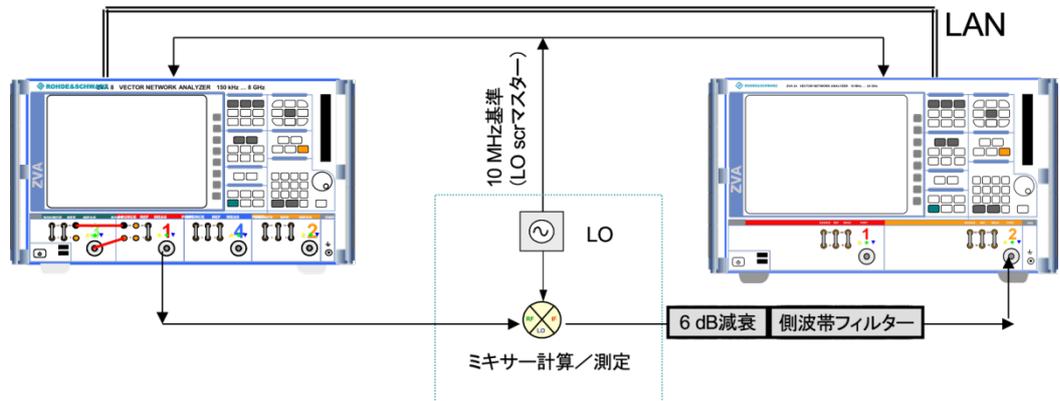
R&S® ZVAでのユーザーインターフェースの設定:



ミキサー遅延設定:



校正と検証:



校正セットアップ:

- ゴールデンミキサーまたは既知のミキサー
- エンベディッドLOは外部信号源で実現
- 10 MHz基準を接続

測定設定

- 校正と同じミキサーセットアップ

検証:

- 校正ミキサーは接続したまま
- 50 cmケーブルを挿入
- →約2 nsの遅延を評価

代表値:

- 群遅延:ミキサーのサイズ程度
- ミニ回路: 100 psまたは320 ps
- 50 cmケーブル:約2 ns

群遅延(デフォルト)

- MEAS : → : → : Mixer Meas :
 - ミキサー遅延
 - 遅延導関数
 - ミキサー位相(相対)
- 比b2/a1

長距離群遅延校正の注意事項

校正の有効性を維持するために、以下のことはしないでください。

- アナライザの電源をオフにする。
- アパーチャーを変更する。
- ZVA-K10でサポートされていない測定に切り替える。

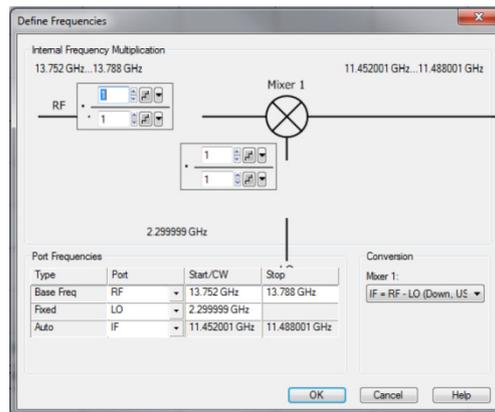
理由

- NCO(内部デジタルLO)が任意の位相でリスタートするため。
→任意の遅延の発生(再度校正が必要)。
- 校正後に測定器をオフにしなければ絶対GD測定が可能。
→オフにした場合はGDは校正ミキサーに対する値。
- 校正用の10 MHz基準信号を切り離さないでください。
- 波形測定に切り替えしないでください。
トレースが表示されますが、通常は意味のあるデータは表示されません。
- ケーブル損失を最小にするために、できる限り低い周波数レンジを使用します。
- Txポートのアナライザ1とRxポートのアナライザ2の間には、遅延が既知のケーブルとミキサーを使用します。

通常、衛星のアップリンクとダウンリンク、および衛星内部では、衛星コンバーターが使用されます。LOはアクセス不可能なので、基準信号は得られません。群遅延は、データ伝送のビット・エラー・レートを低くするための重要なパラメータです。

群遅延測定のテスト条件

- 帯域幅: 36 MHz
- Pin: -25 dBm
- Pout: -85 dBm ~ -45 dBm
- アップリンク: 13 GHz
- ダウンリンク: 11 GHz
- LO: 2.3 GHz
- 高度: 39553 km
- 絶対群遅延: アップリンク: 131.8 ms
- アップリンク+ダウンリンク: 263.6 ms



- 隣接する2個の周波数ポイント間の位相シフトが 180° を超えないこと。
- 2トーン方式の場合、アパーチャ内の位相シフトが 180° を超えないこと。

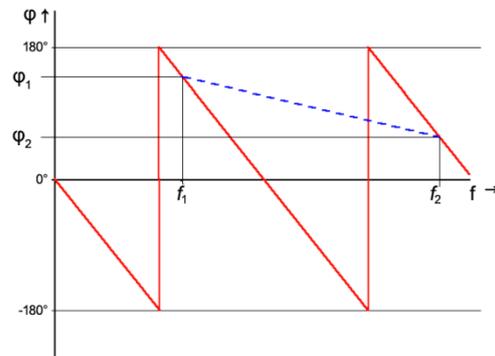


図5-4: アパーチャが大きすぎるために生じる位相トラッキングの誤り

$$\Delta\varphi(f) = -360 * \Delta f * \tau$$

$$\Delta\varphi_{max} = 180^\circ \quad \Rightarrow \quad \Delta f_{max} = \frac{0.5}{\tau}$$

$$\tau = 260 \text{ ms}$$

$$\Delta f_{max} = \frac{0.5}{260 \text{ ms}} = 1.9 \text{ Hz}$$

測定の不確かさ:

$$\partial\tau = \frac{-1}{360^\circ} * \frac{\partial\varphi}{\Delta f}$$

$$\partial\varphi = 0.1^\circ$$

アパーチャ	群遅延の不確かさ
2 Hz	140 μ s
10 Hz	28 μ s
10 kHz	28 ns
100 kHz	2.8 ns
1 MHz	278 ps
2 MHz	140 ps
5 MHz	56 ps

表5-1: さまざまなアパーチャでの群遅延の不確かさの代表値

群遅延 τ	アパーチャ Δf		
	最小値	最適値	最大値
1 ns	300 kHz	300 MHz	500 MHz
10 ns	30 kHz	30 MHz	50 MHz
100 ns	3 kHz	3 MHz	5 MHz
1 μ s	300 Hz	300 kHz	500 kHz
10 μ s	30 Hz	30 kHz	50 kHz
100 μ s	3 Hz	3 kHz	5 kHz
1 ms	0.3 Hz	300 Hz	500 Hz

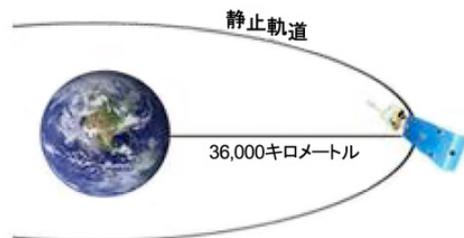
表5-2: さまざまなアパーチャでの群遅延の代表値

- 大きいアパーチャ(例、3 MHz)の使用
- アパーチャは、トランスポンダーの群遅延の変動に基づいて選択されます。
 - ・ 相対群遅延の測定
 - ・ トランスポンダーチャンネル(アップリンクとダウンリンクの増幅器を含む)の周波数バンド内の群遅延の変動を示します。

5.2.1 群遅延測定の問題

長距離の群遅延測定には、一般的に2つの問題があります。

1. 長い距離



- 地球との距離のために生じる、静止衛星の場合で約130 msの伝送時間(より正確な遅延値は、衛星の軌道状態ベクトルから計算できます)
- 2トーン信号測定の送受信間の260 msの遅延。前の信号が到達したときに、ZVAレシーバーはすでに次の周波数ポイントに切り替わっている可能性があります。

解決策=>トリガ遅延を >260 msに設定

- トリガ遅延を選択
- 1ポイントあたりの測定時間は約260 ms

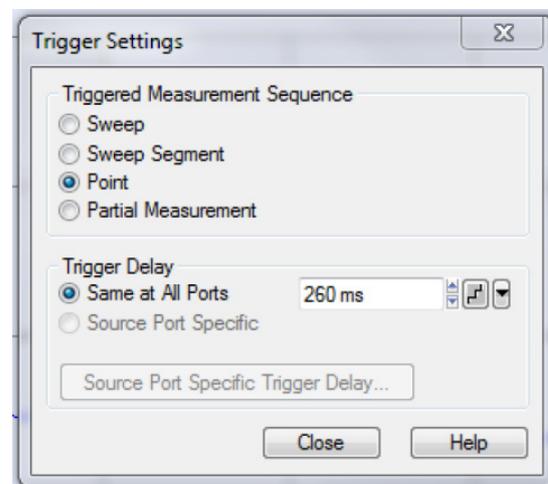
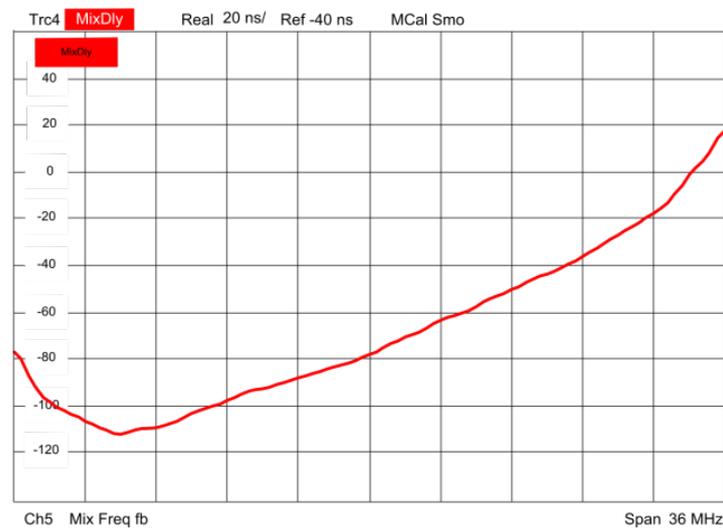


図5-5: トリガ設定

2. 衛星の移動



- 衛星の楕円軌道上の移動
- 距離の変化(例、2230 m/h)。この値は衛星によって異なり、衛星の軌道上の位置によっても変わります。
- ZVAの測定時間:
- 101ポイント×260 ms → 26 s



- 1時間の距離シフト
 - = 2230 m
- 1秒間の距離シフト
 - = 2230 m / 3600 = 0.62 m
 - => アップリンクとダウンリンクで $2 \times 0.62 \text{ m} = 1.24 \text{ m}$
- 掃引開始から掃引終了までの距離シフト
 - 101ポイントの掃引時間
 - = $101 \times 0.26 = 26.3 \text{ s}$
 - = 掃引時間(s) × 1.24 m
 - = $26.3 \times 1.24 \text{ m} = 32.58 \text{ m}$
- 掃引開始から掃引終了までの群遅延の増加
 - $Dt = \text{Dist} / c$
 - $32.58 \text{ m} / 3 \times 10^8 = 108.6 \text{ ns}$

- 準CW掃引の使用による補正：
 - 狭帯域スパンを使用して同一の掃引速度を実現する追加の群遅延測定
 - 表示されるリニア変動は衛星の移動が原因
 - トレース演算を使用して周波数掃引群遅延から減算
 - Trc4 - Trc5 (図5-6)

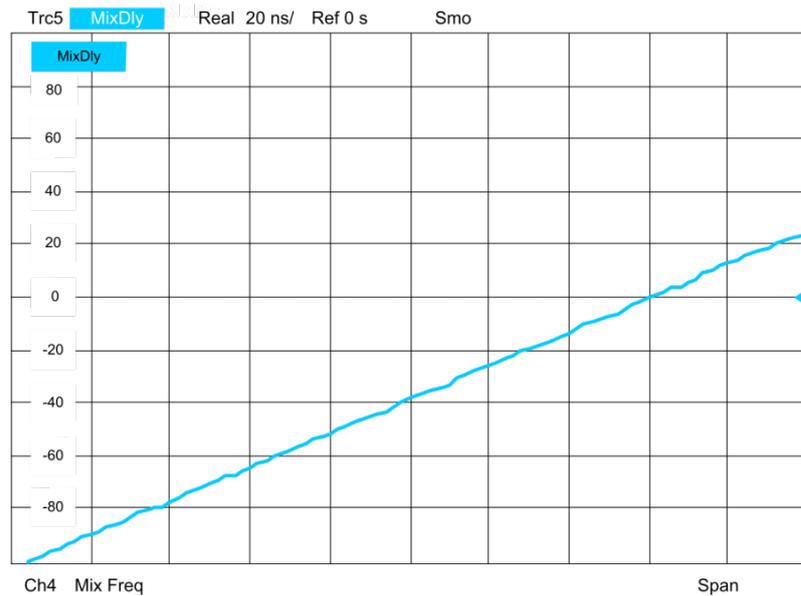


図5-6: 補正された長距離群遅延プロット

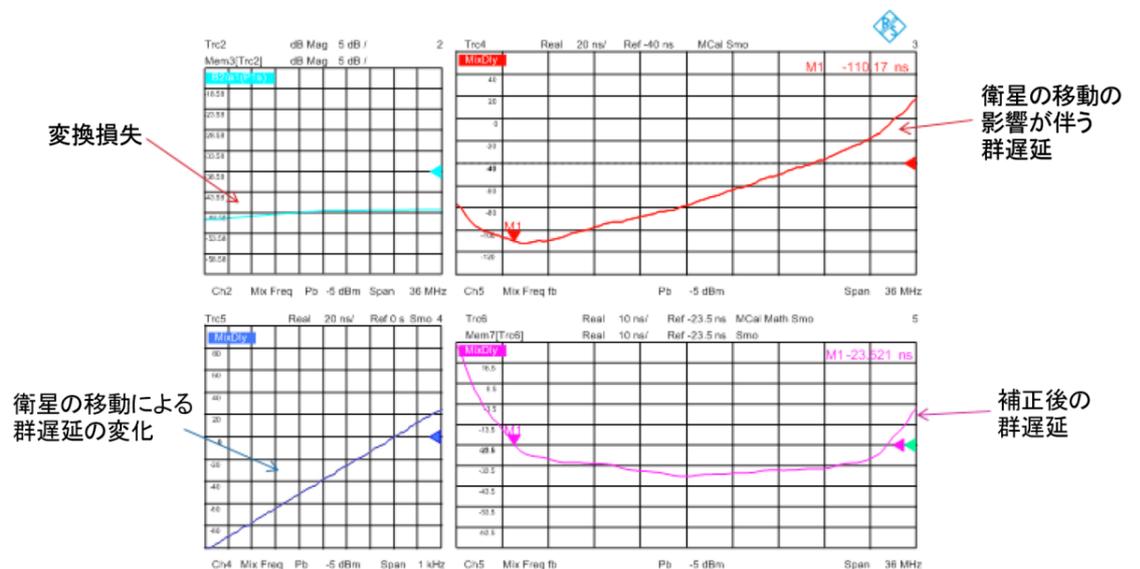


図5-7: 補正前後の群遅延結果

図5-7は、エンドツーエンドの衛星リンクに対する群遅延測定の、準CW掃引による補正を行った場合と行わない場合の結果を示します。

5.3 ダブルイルミネーションのモニタリング

衛星リンクに意図しない干渉があると、最悪の場合、動作が中断したり、保証されたQOSが低下したりするおそれがあります。ダブルイルミネーションのモニタリングは、できる限り高速に行うことが重要です。FSWをオプションのリアルタイム測定アプリケーションで拡張することで、フル機能のリアルタイム・スペクトラム・アナライザを実現できます。これにより、FSWは、優れたRF性能を備えたハイエンドのシグナル・アナライザとスペクトラム・アナライザの組み合わせたものになり、従来のリアルタイムアナライザの弱点をなくして、優れたリアルタイム性能をワンボックスで実現できます。

FSW-B512Rオプションは、512 MHzのRFスペクトラムをリアルタイムでシームレスに表示し、1,200,000 FFT/sに近い速度と、最小0.91 μ sの持続時間の信号に対する100%の信号捕捉率(POI)を実現します。評価帯域幅の要件が最大160 MHzの場合は、FSW-B160Rを使用してシームレスなリアルタイム・スペクトラム・モニターを実現することもできます。

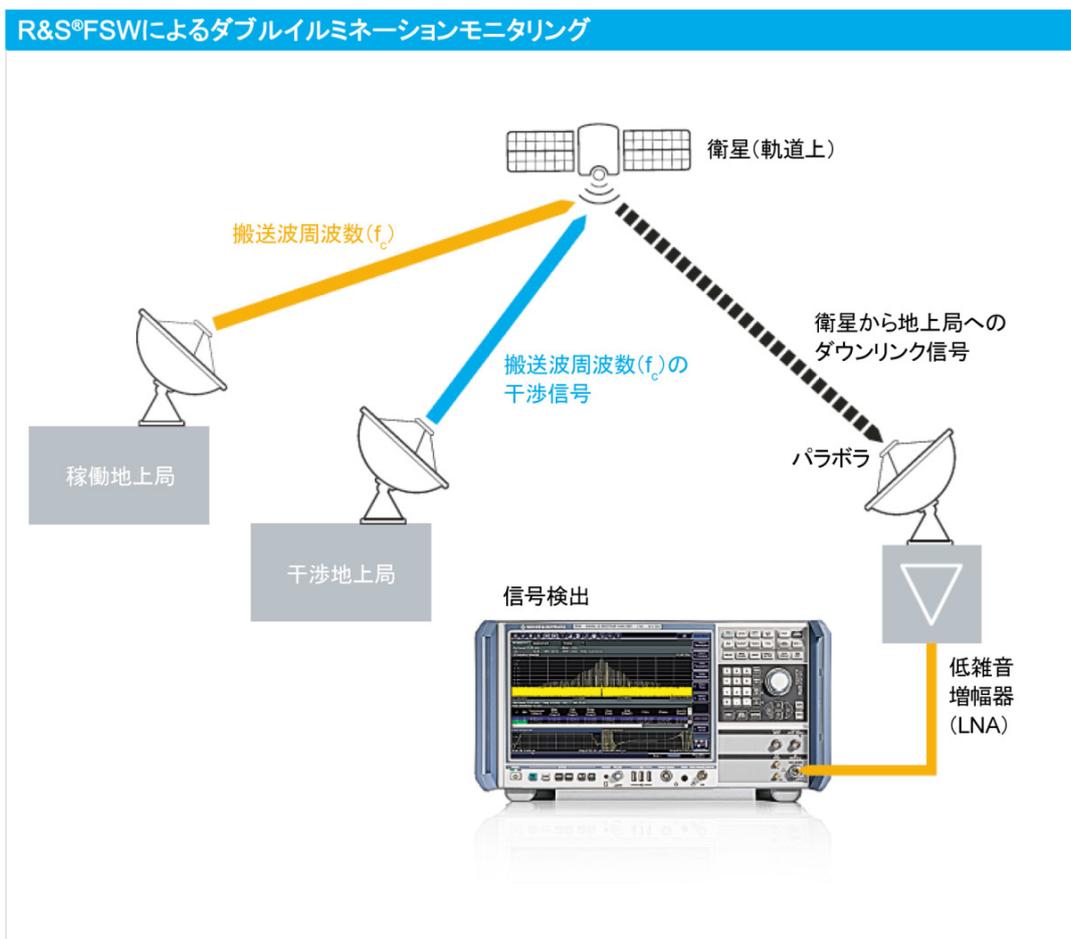


図5-8: ダブルイルミネーションモニタリングのセットアップ

スペクトラム・アナライザのリアルタイム測定アプリケーションを使用すると、RFデザインエンジニアは、短時間の間欠的な干渉信号を検出し、その原因を特定できます。FSWは、観測地上局に配置します。

ダブルイルミネーションモニタリングのセットアップを図5-8に示します。FSWに接続された地上局のアンテナは、モニター対象の衛星から送信された信号を受信します。

FSW:

- モード:リアルタイムスペクトラム
- 周波数:1.09 GHz(モニターするチャンネルに応じて周波数を調整)
- スパン: 80 MHz(最大512 MHzが可能)

図5-9に示すのは、FSW-B160Rオプションによる、周波数依存マスクを使用して捕捉した間欠信号の解析です。マーカーM1を使用して、捕捉した信号のフレーム時間と周波数を確認しています。

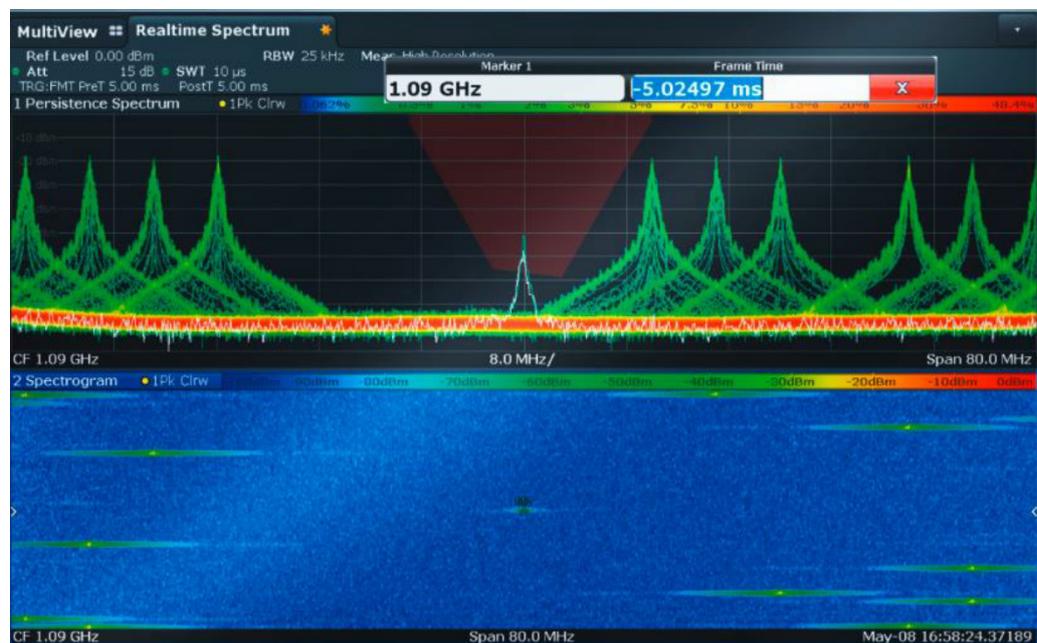


図5-9: FSWのリアルタイムスペクトラム表示

視覚的な評価を行うには、FSWとFSW-B512Rを組み合わせることにより、リアルタイムスペクトログラムと瞬時スペクトラムを表示できます。また、残光表示モードでは、信号振幅をその発生周波数に応じて異なる色でリアルタイム表示(残光スペクトラム表示)できます。周波数依存マスクを使用すれば、スペクトラムがマスクに違反するたびにFSWがトリガを発生するため、間欠的な信号を高い信頼性で検出できます。

図5-9では、ダブルイルミネーションが、残光表示スペクトラムの中央の小さいピークとして表示されています(画面上部)。一方、障害が時間変動するかどうかは、画面下部のスペクトログラム表示に基づいて判定できます。

FSWとFSW-B160R/B512Rスペクトラム・アナライザ・オプションの組み合わせたものは、スペクトラムモニターに最適な測定器です。

5.4 衛星搬送波のモニタリング

衛星搬送波のモニタリングには、多くの場合、大きなスペクトラムブロックをモニターし、軌道上の衛星から複数の周波数で送信された搬送波を解析して、パワー特性とデジタル変調特性を調べる必要があります。チャンネルのモニタリングには、帯域幅全体のチャンネルパワーと、チャンネルの搬送波のデジタル復調が重要です。アナライザのオプションのVSAモードを使用することにより、エラーベクトル振幅 (EVM)、信号の振幅/位相、復調信号のコンスタレーション表示などのパラメータも容易にモニターできます。

FSW-K70は、シングルキャリアの復調のための汎用ベクトル・シグナル・アナライザです。ASK、MSKなどの単純な方式から1024 QAMまで、すべての標準のシングルキャリア変調方式の復調がサポートされています。FSW-K70のその他の機能を以下に示します。

- イコライザー
- 2-ASK、APSK/4-ASK、512QAM、1024QAMのサポート
- FSWユーザーインターフェース、シーケンサー、MSRA(マルチスタンダード無線アナライザ)
- 16-APKシステムまたはユーザー定義可能な変調方式の衛星システム

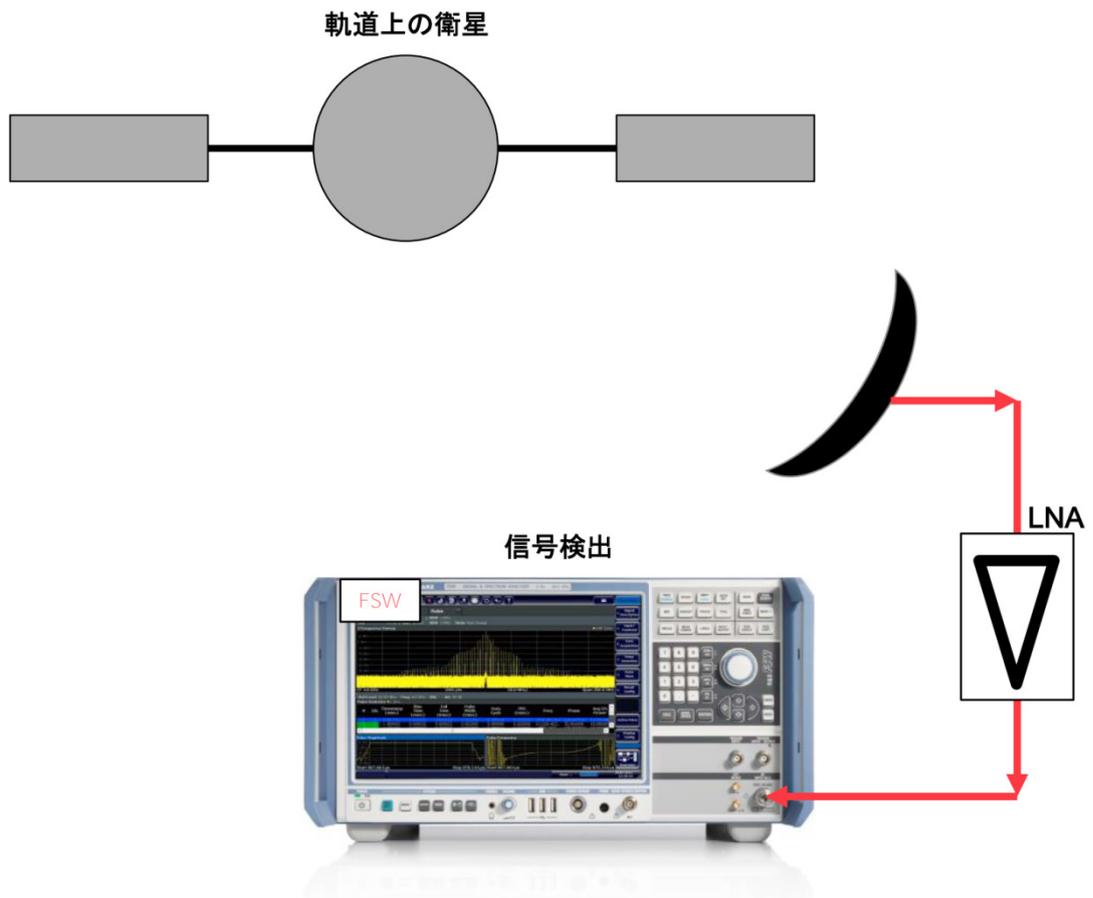


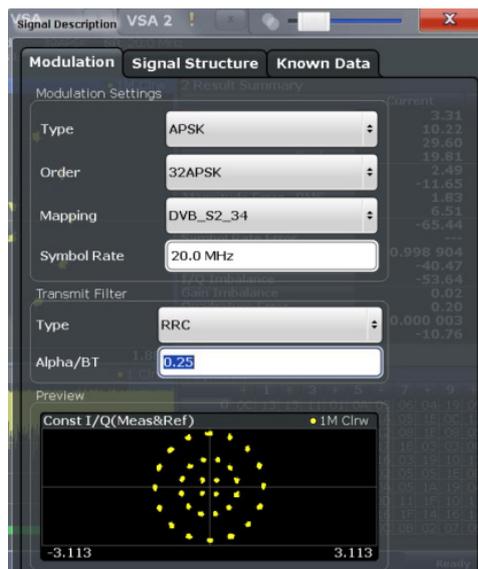
図5-10: 軌道上衛星の搬送波モニタリング

図5-10のセットアップを使用することにより、衛星のモニタリング動作を高い確度と速度で実行できます。地上局の構成と使用する周波数バンドに応じて、モニタリング前に周波数を低い周波数に変換するダウンコンバーターが用いられることがあります。R&Sスペクトラム・アナライザには、さまざまな周波数レンジ(最高8/13.6/26.5/43.5/50/67/85 GHz)のモデルが用意されています。受信側のLNAより後では、追加の周波数ダウンコンバートの要件は存在しませんが、信号がダウンコンバートされる場合には、必要な周波数バンドに応じてFSWを選択します。

FSW:

VSAアプリケーションを起動する手順

- FSWのフロントパネルにあるMODEキーを押します。
ダイアログボックスが開き、FSWで現在使用できるすべての動作モードとアプリケーションが表示されます。
- 「VSA」項目を選択します。
VSAアプリケーション用の新しい測定チャネルが開かれます。
- 「Signal Description」を選択します。



- 信号の変調パラメータを定義します。
- 次に、「MEAS CONFIG」>「Signal Capture」>「Data Acquisition」>「20000 symbols」を選択します。
- 「MEAS CONFIG」>「Range Settings」>「Result Range」>「2000 Symbols」を選択します。
- 「Frequency」>「21 GHz」および「30 GHz」を選択します(この例の場合)。

- 「Result Summary」ウィンドウで、関連するすべての信号特性をモニターできます。

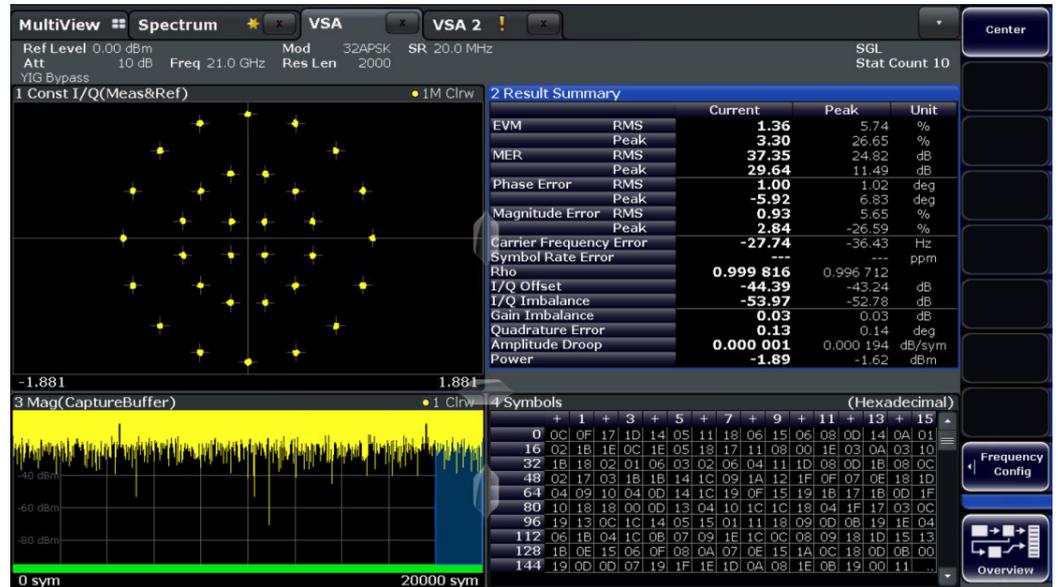


図5-11: FSW-K70による21 GHzのDVB-S2信号解析

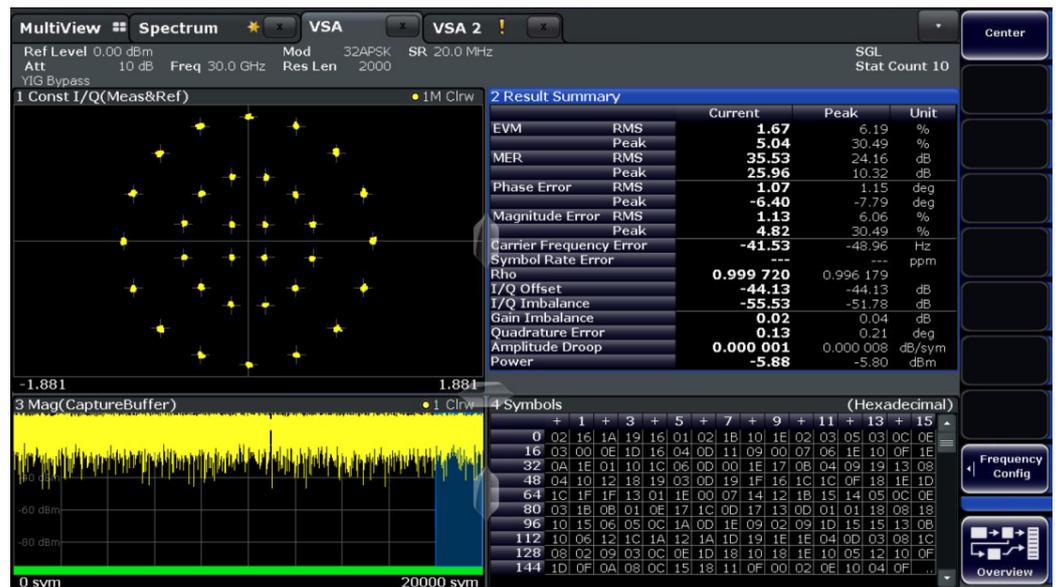


図5-12: FSW-K70による30 GHzのDVB-S2信号解析

図5-11と図5-12では、32APSK変調のDVB-S2信号（ロールオフ=0.25、シンボルレート=20 MS/s、コードレート3/4）を、21 GHzと30 GHzで解析しています。

FSW-K70（ベクトル信号解析）オプションを使用すると、デジタル変調されたシングルキャリア（帯域幅2 GHzまで）に対するビットレベルまでの柔軟な解析が可能です。さまざまな解析ツールが使用できるにも関わらず、わかりやすく構造化された操作コンセプトにより、容易に測定を実行できます。

6 軌道上衛星ペイロード・テスト・システム

自動軌道上ペイロード・テスト・システム(IOTテストシステムとも呼ばれる)は、打ち上げ後のペイロードテストを高速かつ高信頼性で実行するための、以前からある考え方です。リンク全体のEVM測定や長距離群遅延測定といった代表的な打ち上げ後測定だけでなく、さらに重要なこととして、お客様固有のテスト要件もテストシステムで自動化できます。

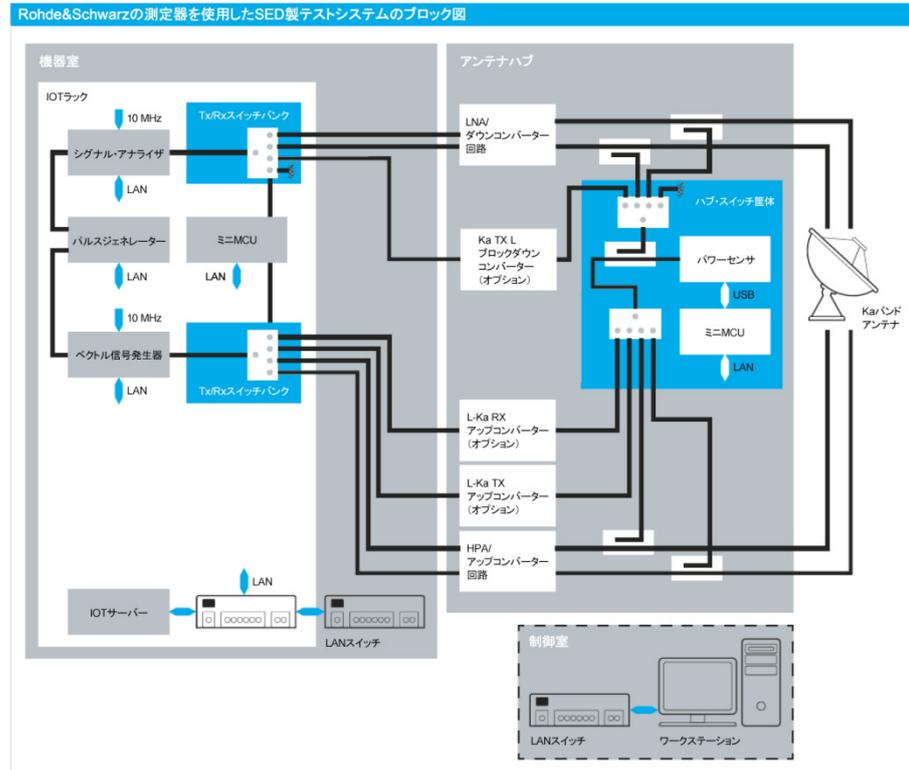
図6-1に示すのは、テスト・システム・メーカーのSED Systemsがローデ・シュワルツの測定器を使用して構築した自動衛星ペイロード・テスト・システムです。ローデ・シュワルツの機器は、完成品のテストベンチ用のOEMの役割を果たしています。



図6-1: ローデ・シュワルツのテスト機器を使用した自動テストシステム(SED Systems提供)

この自動テストシステムは、ローデ・シュワルツのCOTS測定器を使用した市販製品です。具体的には、FSLスペクトラム・アナライザ1台、SMBVベクトル信号発生器2台(デジタル変調テスト信号の発生用)、SMB RF/マイクロ波信号発生器1台、FSUPシグナル・ソース・アナライザ1台(信号解析/スペクトラム解析/位相雑音解析用)が使用されています。

テストシステムの重要なコンポーネントの1つは、システムサーバーで動作するソフトウェアコードです。サーバーコードはC++で作成され、Linuxオペレーティングシステム上で動作して、テスト測定器と通信しながら測定を実行します。ローデ・シュワルツの信号発生器が、測定または校正信号源用のクリーンなテスト搬送波を発生します。ローデ・シュワルツの信号発生器をもう1台追加して、複数のテスト搬送波が必要なオプションの測定を実行することもできます。多数のテスト搬送波が必要な測定用には、ローデ・シュワルツのベクトル信号発生器を追加します。



中心となる測定機器は、ローデ・シュワルツのシグナル／スペクトラム・アナライザです。これは周波数ドメインまたはタイムドメインの測定を実行します。パルスジェネレーターでシンセサイザーとシグナル・アナライザをトリガすることで、周波数またはパワーの高速ステップ測定が実行されます。アンテナハブでは、SED製のハブスイッチ筐体が、送信されるテスト搬送波のパワーと周波数をモニターします。送信機能と受信機能の両方のスイッチングと信号ルーティングがサポートされています。その他にも、ユーザーの要件に応じて、長距離群遅延測定、ダブルイルミネーションモニタリングなど、さまざまな機能をテストシステムに統合できます。軌道上テストキャンペーンの準備の際には、オペレーターがグラフィカルインターフェースを使用して、実行する測定のシーケンス、実行する測定のパラメータテーブル、測定する衛星のデータ、公称校正データを入力します。キャンペーン中は、システムは完全自動モードで動作し、指定された測定シーケンスを実行します。測定の実行中は、結果とシステムの現在のステータスが表示されます。

ルーチン校正は完全に自動化されています。単発的なイベント(送信モニターカップラーの交換時など)に対応するために、手動校正を実行することもできます。この場合、必要なのはパッシブコンポーネントだけです。単発的校正の結果は、システムデータベースに入力されます。

7 参考資料

1. UCS Satellite Database:
http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html#.VK0CAivF9WE
2. Grammar in Space:Are Satellites 'In Orbit' or 'On Orbit':
<http://www.theatlantic.com/technology/archive/2014/11/grammar-in-space-are-you-in-orbit-or-on-orbit/381522/>

8 オーダー情報

型番	名称/内容	オーダー番号
ベクトル・ネットワーク・アナライザ *		
R&S® ZVA40	Vector Network Analyzer, 10MHz to 40GHz, Four ports, four generators / sources	1145.1110.48
R&S® ZVA40-B16	Direct generator/receiver access for 4 port ZVA40	1164.0209.42
R&S® ZVA40-B9	Set of cables for the ZVA-K9	1305.6541.03
R&S® VA-K4	Frequency Conversion	1164.1863.02
R&S® VA-K9	Embedded LO Mixer Delay Measurements	1311.3128.02
R&S® VA-K10	Long Distance Group Delay Measurement	1164.1805.02
R&S® VA40-B31	Receiver Step Attenuator, Port 1	1302.5444.02
R&S® VA40-B32	Receiver Step Attenuator, Port 2	1302.5450.02
R&S® VA40-B33	Receiver Step Attenuator, Port 3	1302.5467.02
R&S® VA40-B34	Receiver Step Attenuator, Port 4	1302.5473.02
R&S® VA40-B21	Generator Step Attenuator, Port 1	1302.5409.02
R&S® VA40-B22	Generator Step Attenuator, Port 2	1302.5415.02
R&S® VA40-B23	Generator Step Attenuator, Port 3	1302.5421.02
R&S® VA40-B24	Generator Step Attenuator, Port 4	1302.5438.02
シグナル/スペクトラム・アナライザ *		
R&S® SW43	Signal und spectrum analyzer 2 Hz to 43.5 GHz	1312.8000.43
R&S® SW-B24	RF preamplifier, 100 kHz to 43 GHz	1313.0832.43
R&S® SW-B8	Resolution bandwidth > 10 MHz	1313.2464.02
R&S® SW-K70	Vector Signal Analysis	1313.1416.02
R&S® SW-B512R	Real-Time Spectrum Analyzer, 512 MHz	1325.4296.06
R&S® SW-B512	512 MHz Analysis Bandwidth	1313.4296.04
R&S® SW-B2000	2 GHz Analysis Bandwidth	1325.4750.02
R&S® SW-B4	OCXO Precision Reference Frequency	1313.0703.02

R&S® SW-B17	Digital Baseband Interface	1313.0784.02
R&S® SW-B71	Analog Baseband Inputs	1313.1651.13
R&S® SW-B25	Electronic Attenuator, 1 dB steps	1313.0990.02
ベクトル信号発生器 *		
R&S® MF100A	Microwave Signal Generator	1167.0000.02
R&S® MF-B122	Frequency Range 1 GHz to 22 GHz	1167.7004.03
R&S® MF-B144	Frequency Range 1 GHz to 43.5 GHz	1167.7204.03
R&S® MF-B2	Frequency Extension 100 kHz to 1 GHz	1167.4005.02
R&S® MF-B1	OCXO Reference Oscillator	1167.9159.02
R&S® MF-B20	AM/FM/φM/LOG AM	1167.9594.02
R&S® MF-B22	Enhanced phase noise performance	1415.2204.02
R&S® MF-B34	High Output Power	1415.2404.02
R&S® MF-B27	Step attenuator 43.5 GHz	1167.5776.02
R&S® MF-B41	Low Leakage	1415.0901.02
R&S® MF-B28	Power Analysis	1415.2104.02
パワーセンサ *		
R&S® RP18SN	100 pW to 200 mW, 10 MHz to 18 GHz three-path diode power sensors	1419.0035.02
R&S® RP33S	100 pW to 200 mW, 10 MHz to 33 GHz three-path diode power sensors	1419.0064.02
R&S® RP33SN	100 pW to 200 mW, 10 MHz to 33 GHz (LAN)	1419.0070.02
R&S® RP40SN	100 pW to 100 mW, 50 MHz to 40 GHz (LAN)	1419.0058.02
R&S® RP-50SN	100 pW to 100 mW, 50 MHz to 50 GHz (LAN)	1419.0093.02

* その他のR&S® ZVAモデル、パワーセンサ、信号発生器、シグナル／スペクトラム・アナライザも使用できます。お客様固有の要件に適合するさまざまなオプションを提供しています。表に示されているのは、このアプリケーションに対する測定器の最小構成です。お客様のニーズ最適な機器構成については、最寄りの弊社オフィス、または営業担当者にお問い合わせください。

ローデ・シュワルツについて

Rohde & Schwarz(本社:ドイツ・ミュンヘン)は、エレクトロニクスを専門とする独立した企業グループです。試験／測定、放送、無線信号の検出／位置特定、セキュアコミュニケーションの分野で業界をリードするソリューションを提供しています。設立から80年以上にわたり、グローバル企業として70カ国以上で独自のサービスネットワークを展開しています。

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/>

本社(ドイツ)

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
Mühldorfstraße 15 | D - 81671 München
TEL: + 49 89 4129 - 0 FAX: + 49 89 4129 - 13777
www.rohde-schwarz.com

持続可能な製品デザイン

- 環境適合性とエコロジカルフットプリント
- エネルギー効率と低エミッション
- 長寿命化と所有コストの最適化

Certified Quality Management
ISO 9001

Certified Environmental Management
ISO 14001

本アプリケーションノートと付属のプログラムの使用にあたっては、Rohde & Schwarz Webサイトのダウンロードエリアに記載されている条件に従ってください。

R&S®は、Rohde & Schwarz GmbH & Co. KGの登録商標です。商品名は、各所有者の商標です。

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