



ワイヤレスバックホール 大容量・高速伝送の実現と課題

目次

1	はじめに	3
2	モバイルバックホールの概要	3
3	ワイヤレスバックホールの技術要素	5
3.1	機器構成.....	5
3.2	周波数帯.....	6
3.3	変調方式.....	8
4	大容量／高速伝送実現に向けた無線技術上の課題	9
5	マイクロ／ミリ波無線ユニット 測定のポイント	10
5.1	無線ユニットの基本ブロック.....	10
5.2	スペクトラムアナライザによる位相雑音測定.....	11
5.3	位相雑音測定機能の使用.....	12
5.4	ミリ波帯で重要となる測定系のノイズフロア.....	13
5.5	ポイントとなる外部ミキサの選択.....	15
6	まとめ	16

1 はじめに

モバイルデータトラフィック容量が増加し続けています。Cisco Systems 社のレポート「Cisco Visual Networking Index 2015」によれば、全世界のモバイルデバイスと接続の数は、2014 年には 74 億にまで増加し、2014 年から 2019 年の間に全世界のモバイルデータトラフィックは約 10 倍増加する見込みです。

このような状況に対応するため、モバイル端末と基地局間の通信方式だけでなく、それを支えるモバイルバックホールにおいても伝送容量/速度の向上が継続的に求められています。これに対し、無線を使用したモバイルバックホールの通信システム（以下、ワイヤレスバックホール）では、変調の多値化や広帯域化によって解決する取組が行われてきました。

本書は、ワイヤレスバックホールのような、大容量で高速なマイクロ/ミリ波通信で使用される無線ユニットの課題について考察します。

2. モバイルバックホールの概要

モバイル端末は、他のモバイル端末またはサーバと通信するために基地局と接続します。基地局はモバイル端末との通信データをコアネットワークに転送します。エリアに配置された複数の基地局からのデータを、各種中継局によって通じて転送・集約するモバイル通信システムのネットワークを、「モバイルバックホール」と呼びます。

モバイルバックホールの地点間の通信には、物理層/ハードウェアインタフェースとして、有線と無線が利用されています。有線には主に銅線と光ファイバの 2 種類があり、最近では光ファイバが主流です。光ファイバは、無線と比較してトラフィック容量が大きく、通信品質も安定するという特長がありますが、地形的や経済的な問題で敷設が困難な場合があります。一方、無線を利用した通信は、容量と安定性の面で光ファイバに劣るものの、敷設の自由度・工事期間・コストという点で有利とされています。また無線は、有線の補完・拡張的な役割や障害/災害時の緊急通信手段としても利用されます。日本や韓国、中国は国策で光ファイバの普及が進んでいますが、その他のアジア地域と欧州、中東、アフリカ地域、特に新興国において、迅速なモバイルサービスの開始とコスト重視の視点から、無線が広く使用されています。

モバイルバックホールの方式説明では、有線/無線の種類と共に、データリンク/多元接続方式が示されます。これには、電話通信網由来の回線交換/TDM (Time-Division Multiplexing) とパケット通信をベースとするイーサネット方式があります。近年は、モバイルがパケット通信のみをサポートする LTE に移行していることから、バックホールもパケットベースであるイーサネットの利用が広がっています (TDM とイーサネットのハイブリッド機器もあります)。しかし、モバイルの従来方式である GSM や W-CDMA も当面の間サービスが継続されることから、それらをサポートする TDM が直ぐになくなることはないでしょう。

まとめると、モバイルバックホールのインタフェースは次のように分類でき、これらは用途や敷設環境、通信キャリア/地域の戦略に応じて選択されます。

- ① 有線・TDM
- ② 有線・イーサネット
- ③ 無線・TDM
- ④ 無線・イーサネット

モバイルバックホールに関連する用語として、「モバイルフロントホール」があります。一般に、モバイルの基地局はベースバンド信号処理と RRH 制御を行う BBU (Base Band Unit) と無線送受信部である RRH (Remote Radio Head) / RRU (Remote Radio Unit)、そしてアンテナの組合せで構成されています。モバイルバックホールは、BBU からコアネットワークの間を結ぶ構成/ネットワークを指すのに対して、モバイルフロントホールは BBU と RRH を結ぶ構成を指します。現在は、BBU と RRH のインタフェースは光ファイバが主流で、CPRI (Common Public Radio Interface) や OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative) といったプロトコルで接続されます。

モバイルフロントホールの概念が生まれた背景には、C-RAN (Centralized Radio Access Network) と呼ばれるような新しいモバイルネットワークのアーキテクチャの導入・検討があります。C-RAN では、複数の基地局の BBU は 1 か所に集約され、基地局は RRH とアンテナのみになります。このような中央制御構成により、そこにつながる多数の RRH / スモールセル (小型基地局) 間の干渉制御や協調通信といった高度で複雑な制御が可能になります。こうした中、モバイルフロントホールにおいても光ファイバに加えて、無線の利用することで設備投資・運用コストを最適化する事が検討されています。

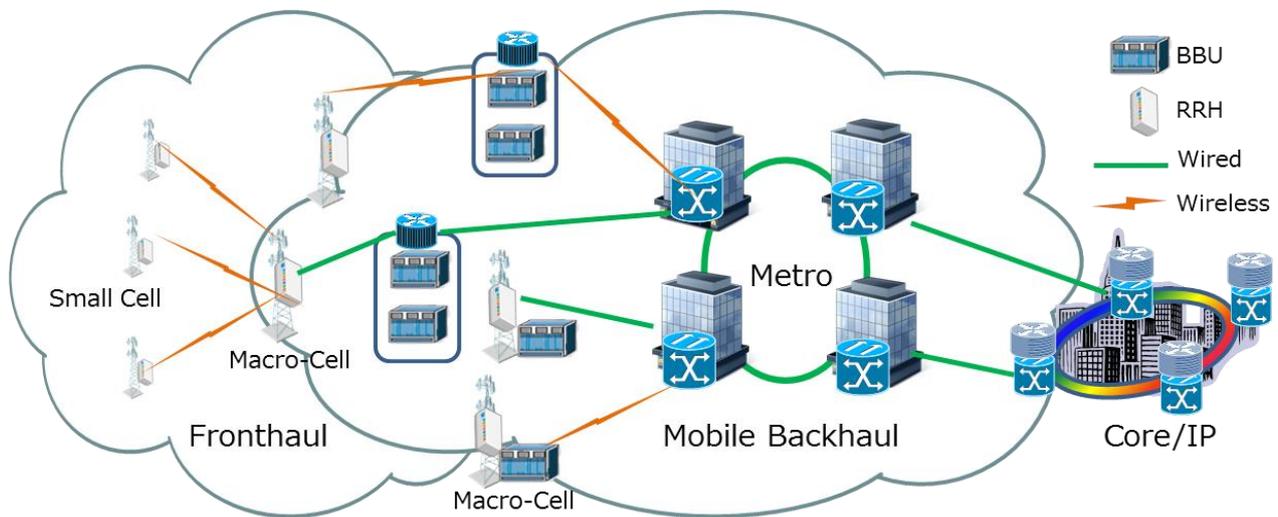


図 2-1 モバイルバックホールの概念図

3. ワイヤレスバックホールの技術要素

3.1 機器構成

ワイヤレスバックホールは、マイクロ/ミリ波帯を使用した PTP (Point-to-Point) の固定無線通信システムであり、旧来の電話・放送無線中継と似たシステム構成です。2つの同じ無線通信装置が対となって双方向通信を行います。FDD と TDD の2つの方式がありますが、マイクロ/ミリ波通信では FDD が主流のようです。ミリ波帯では、天候の状態によって無線伝送特性が大きく変化しますが、装置が互いに受信感度や通信品質、温度・湿度などを監視し、その状態に応じて送信電力や変調方式を変更して最適な状態で通信できるよう制御しています。

ワイヤレスバックホールは、屋外に設置されるアンテナと ODU (Out Door Unit)、そして屋内に設置される IDU (In Door Unit) で構成されています。アンテナは ODU に接続されています。ODU には、無線の送信・受信を行うユニットが収納されています。ODU は、受信したマイクロ/ミリ波を IF (中間周波数) データ信号に、送信する IF データ信号をマイクロ/ミリ波信号にそれぞれ変換します。ODU と IDU の間は同軸ケーブルで接続され、データ信号と ODU の制御信号や電源などが送られます。IDU は、ネットワークとつながり、ODU と送受信する IF データ信号と、TDM (SDH) /イーサネットなどのデータ送信単位である STM/パケットとの変換を行います。IDU は、STM-x や 1000Base-SX/TX など、ネットワークに応じた多様なインターフェースが取り付け可能になっています。

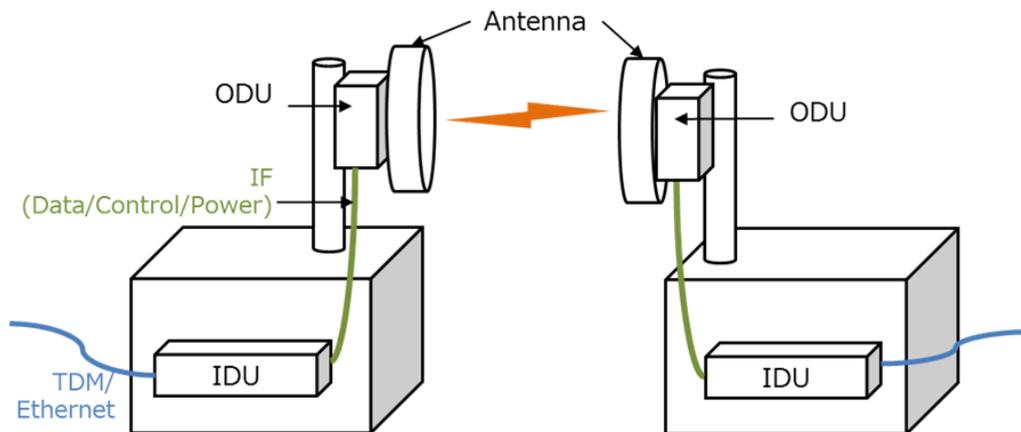


図 3-1 ワイヤレスバックホールの構成

最近では、ネットワークとのインターフェースをイーサネットに限定し、ベースバンド部を小型化した、ODU・IDU 一体型のコンパクトな製品もあります。このような小型タイプの製品は、直線性が強い V バンド (60 GHz 帯)・E バンド (70-80 GHz 帯) を使用した近距離の見通し通信 (LOS : Line Of Sight) での利用が想定されています。特にモバイルフロントホールでの応用が期待されています。

3.2 周波数帯

本書では、3 GHz から 30 GHz (波長 1 cm から 10 cm) をマイクロ波、30 GHz から 300 GHz (波長 1 mm から 10 cm) ままでミリ波と呼ぶことにします。ワイヤレスバックホールの周波数帯割当ては、図 3-2 のグラフのようになっています。

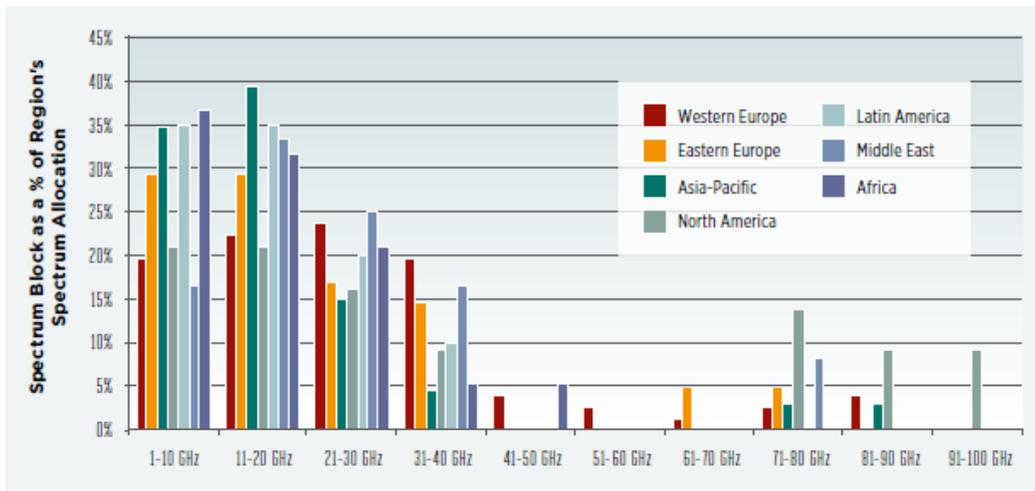


図 3-2 世界のバックホールのスペクトラム割当て

(引用 : GSMA Wireless Backhaul Spectrum Policy Recommendations & Analysis Oct.2014 / ABI Research)

従来は 38 GHz 以下が主に利用されてきました。最近は、より大容量・高速な伝送を実現するため、広い帯域幅が確保できる 60 GHz 帯・70-80 GHz 帯の使用が始まっています。実際には各国の電波法によって使える周波数帯やその用途が決められているため、すべての地域で利用できるわけではありません。

マイクロ/ミリ波は、電波の性質として直線性が強く、また、酸素や雨によって減衰しやすいという特徴があります (図 3-3)。特に 60 GHz 付近で減衰は大きくなります。このような性質があるため、10 km から 200 km くらいまでの長距離伝送に利用できるのは 10 GHz 以下までになります。

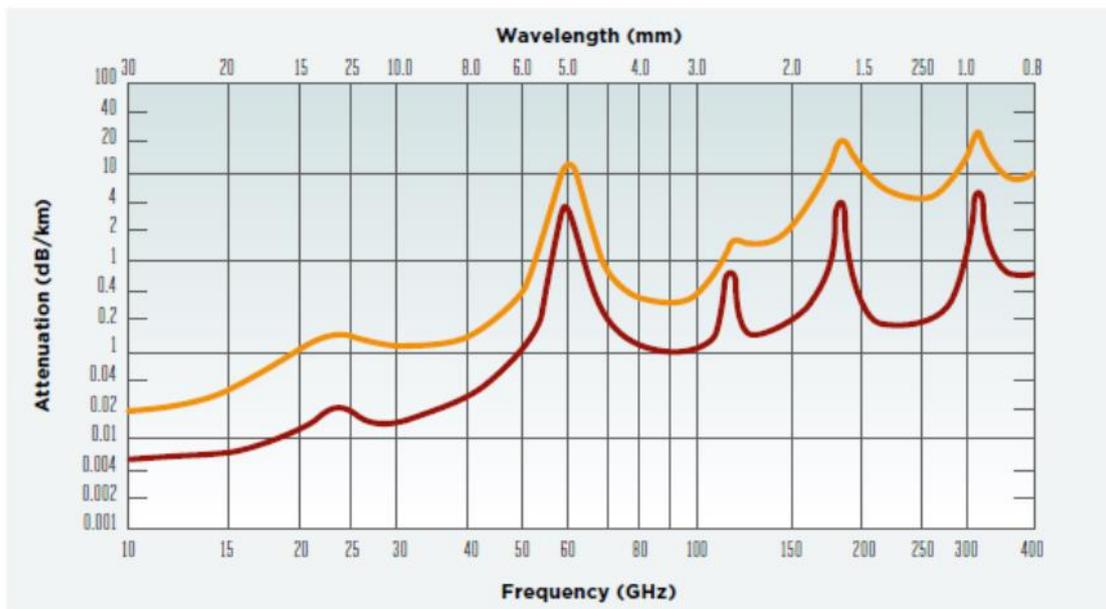


図 3-3 酸素と雨による吸収と周波数

(引用 : GSMA Wireless Backhaul Spectrum Policy Recommendations & Analysis Oct.2014)

6 GHz - 42 GHz 帯

42 GHz 帯 (40.5 - 43.5) より低い周波数帯は、免許が必要な周波数帯 (ライセンスバンド) です。チャンネル帯域幅は、3.5 MHz から 112 MHz までの間になっています。帯域幅 112 MHz、変調 2048QAM を適用した場合、伝送速度は約 1 Gbps になり、この周波数帯を使用した最大伝送容量の指標になっています。

60 GHz 帯 (Vバンド)

Vバンドと呼ばれる 60 GHz 帯は、日本・欧州では 57 - 66 GHz、米国・カナダ・韓国では 57 - 64 GHz に割り当てられています。割当て帯域幅が約 7 - 9 GHz と広く、7 Gbps 以上の伝送容量/速度を達成できる可能性があります。また、免許が不要な周波数帯 (アンライセンスバンド) であり、運用コストを抑えることができる点でも注目されています。

60 GHz 帯は、酸素・雨による減衰が大きい周波数帯であるため、スモールセルのバックホール/フロントホールなど短距離・大容量の伝送用途として主に使用されます。その他、ワイヤレス HD/HDMI や IEEE802.11ad/WiGig などの大容量コンテンツの転送を必要とする情報家電、レーダなどでも利用されているため、チャンネル/帯域幅の動的割当て、電力制御などの干渉制御が必要になります。

欧州規格の ETSI EN 300 408 (58 GHz 帯 PTP デジタル無線システム) では、チャンネル間隔は 50 MHz または 100 MHz と規定されています。また、固定 PTP 無線システムの ECC Recommendation (09)01 および(05)02 では、チャンネル帯域幅は 50 MHz の倍倍と定義されています。広い帯域幅を確保する場合は、チャンネルを束ねて使用することになります。

70/80 GHz 帯 (Eバンド)

60 GHz 帯より広い帯域幅を確保可能なのが、Eバンドと呼ばれる 70-80 GHz 帯 (71 - 76 GHz・81 - 86 GHz) のライセンスバンドです。Eバンドは、Vバンドと比較して、伝搬の直進性が強いですが、酸素・雨による減衰量は少ないです。ECC Recommendation 05(07)ではチャンネル配置は 250 MHz から 4750 MHz までになっています。FDD と TDD を柔軟に適用することができ、2.5 GHz 双方向や 10 GHz での利用ができます。

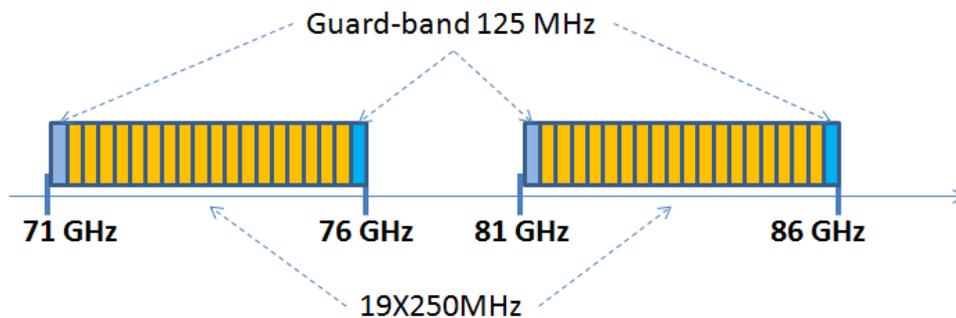


図 3-4 ECC/REC(05)07 による Eバンドのチャンネル配置
(引用 : ETSI E-Band and V-Band Survey on status of worldwide regulation, Jun.2015)

3.3 変調方式

変調方式には QAM (Quadrature Amplitude Modulation) が多く採用されています。降雨などの伝送状態に応じて最適な変調方式を選択する「適応変調」に対応しており、QPSK/16QAM/32QAM/64QAM/128QAM/256QAM/512QAM などの複数の変調方式の中から選択されるようになっています。E バンドの広い帯域幅を利用することで、理論的な伝送容量は 5 GHz 帯域幅と 16QAM の利用で 10 Gbps に達します。

表 3-1 理論的な帯域幅と最大容量の関係

(引用 : Wen Wu, "A FPGA-based 5 Gbit/s D-QPSK Modem" /

Carlos Salema. " Microwave Radio Links: From Theory to Design" , Wiley 2003)

帯域幅		2.5 GHz	5 GHz	10 GHz
最大容量 [Gbps]	BPSK	1.25	2.5	5
	QPSK	2.5	5	10
	16QAM	5	10	20

4 大容量／高速伝送実現に向けた無線技術上の課題

伝送容量／速度を上げるための無線技術のアプローチとして、より多値の変調方式を使用すること（多値化）と、広い帯域幅を使用すること（広帯域化）の2つがありますが、実現には技術的な課題があります。

高い次元の変調方式を適用した場合、PAPR（Peak to Average Power Ratio；ピーク対平均電力比）が高くなり、アンプの歪みや非線形特性の悪影響を受けやすくなります。また、SNR（Signal to Noise Ratio）が悪化し、シンボルエラーを引き起こしやすくなります。変調の次元を1つあげると3 dB 感度が下がります。このため、より高い次元の変調方式を適用するためには、無線ユニット自体が低位相雑音・低NF（Noise Figure；雑音指数）である必要があります。

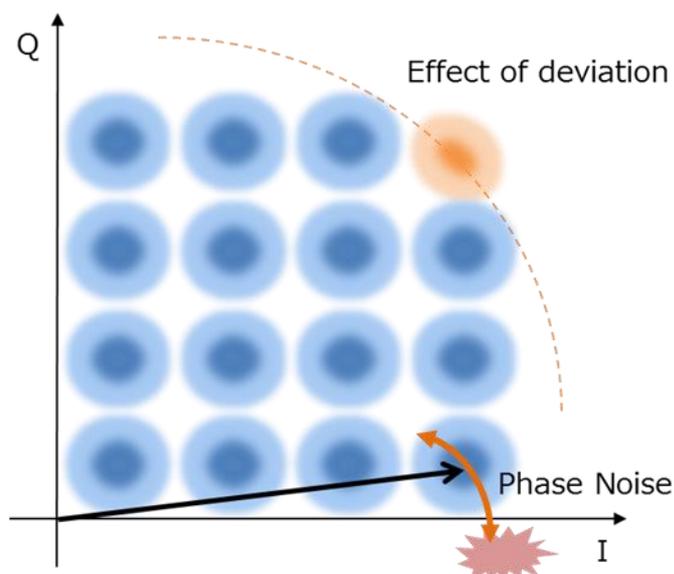


図 4-1 多値変調の課題

変調帯域幅が広い場合、SNR が下がるために高い次元の変調方式の適用が難しくなり、低い次元の変調を適用することになります。これにより、非常に高速なサンプリングレートを使用した伝送になり、位相雑音／ジッタ性能が伝送品質に関わる大事な要素になってきます。

広い帯域幅を確保するために V バンド・E バンドのようなミリ波帯が使用されます。現在、多くのミリ波帯送信機／受信機では、VCO と PLL を使用した信号をマルチプライヤで逡倍することによって高い LO 周波数を得ています。一般に、逡倍比率で LO 信号に加算される位相雑音が決まるため、出力／受信周波数で求められる位相雑音性能よりも数倍良い位相雑音性能が LO 信号源に求められます（単純な計算では $20\text{Log}(\text{逡倍率})$ だけ加算されます。たとえば、8 逡倍で 18 dB 増加されます）。オンチップの高周波数発振器であっても、ミリ波帯において高い位相雑音性能が求められる点では同じです。

5 マイクロ/ミリ波無線ユニット 測定のポイント

5.1 無線ユニットの基本ブロック

ワイヤレスバックホールの ODU は、IDU から入力された送信 IF 信号を、対応するマイクロ/ミリ波周波数の信号にアップコンバートして出力します。また、アンテナから受信したマイクロ/ミリ波周波数の信号を IF 信号にダウンコンバートして IDU に出力します。IF 信号には、そのメーカーの ODU の種類によらず使用できるようにするため、共通の周波数が使用されていることが多いようです。

送信ユニットは、入力された IF 信号を LO 信号とミキサでミキシングすることでマイクロ/ミリ波信号にアップコンバートします。後段のフィルタによって不要な周波数を取り除いたあと、アンテナに出力します。受信ユニットは、アンテナから受信した信号を LNA によって増幅した後、LO 信号とミキシングして IF 信号にダウンコンバートします。

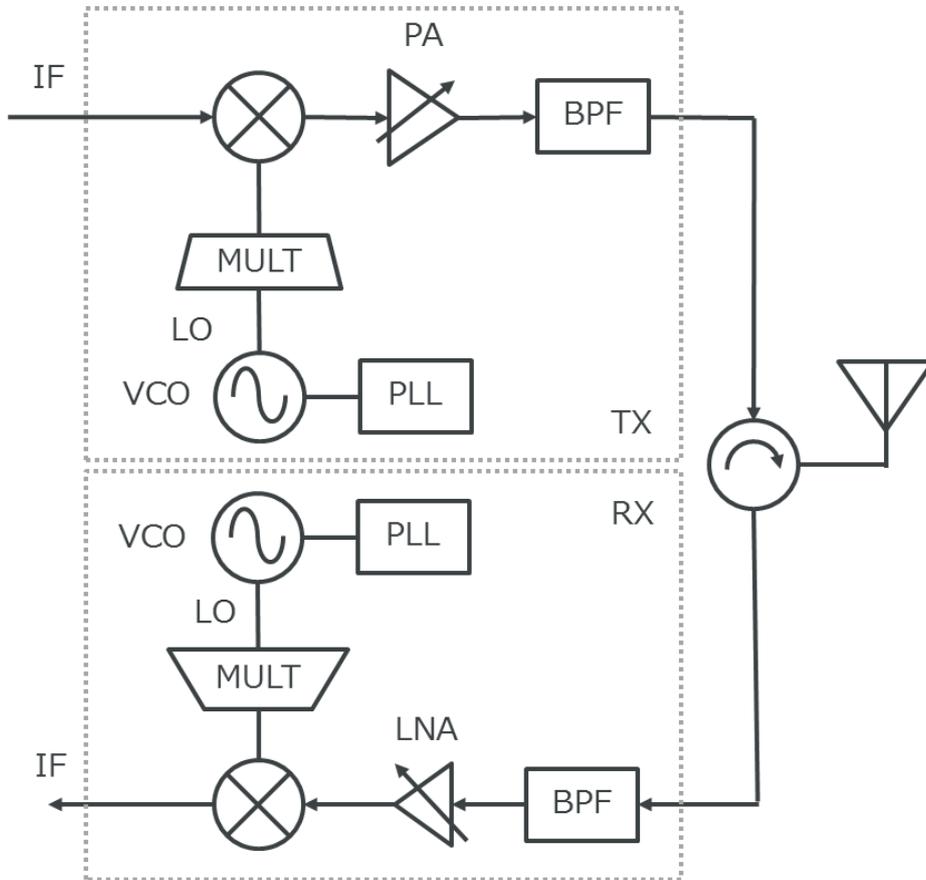


図 5-1 ODU の基本ブロック

LO 信号の周波数は、送信・受信周波数によって選択されます。LO 信号は VCO と PLL 回路で生成されます。高い周波数帯とのアップコンバート/ダウンコンバートでは LO 信号を高くする必要があり、マルチプライヤを通して通倍します。無線ユニットの位相雑音性能は、この VCO+PLL・マルチプライヤの位相雑音性能で決まってきます。

コストを抑制するためには、VCO と PLL 回路の部分を送信・受信周波数によらず共通にすることが望まれます。そのため、送信・受信周波数に応じてマルチプライヤの種類/倍率を調整・選択することになります。この通倍率が高いほど位相雑音が増加します。したがって、できる限り送信・受信周波数の高い製品に合わせて VCO と PLL 回路の目標性能を設定することで、その共通化を進められることとなります。

5.2 スペクトラムアナライザによる位相雑音測定

位相雑音はスペクトラムアナライザで測定することができます。低い位相雑音を測定するには、無線ユニットに期待する位相雑音性能よりも、十分にマージンをもった位相雑音性能をもつスペクトラムアナライザを選択する必要があります。たとえば無線ユニットの位相雑音性能が-90 dBc/Hzでスペクトラムアナライザが10 dBのマージンを持つ-100 dBc/Hzの性能であった場合、測定結果に対する測定器の影響度は0.4 dBとなります。一般に、位相雑音性能の良いスペクトラムアナライザは非常に高価になる傾向にあります。無線ユニットを短時間で開発・評価するため、また、信頼性向上のため多くの性能データを収集するためには、必要十分な測定設備を整える必要があります。特に、6 GHzから80 GHzと非常に幅広い周波数を扱うワイヤレスバックホールの評価を1種類のスペクトラムアナライザで測定することができれば、作業効率の向上や測定結果の互換性維持が可能になります。そのため、必要な位相雑音を持ちかつリーズナブルな価格のスペクトラムアナライザを選択することがポイントになります。ワイヤレスバックホールの評価では、中心周波数から10 kHz オフセットと100 kHz オフセットの「近傍の位相雑音性能」がその判断基準になります。

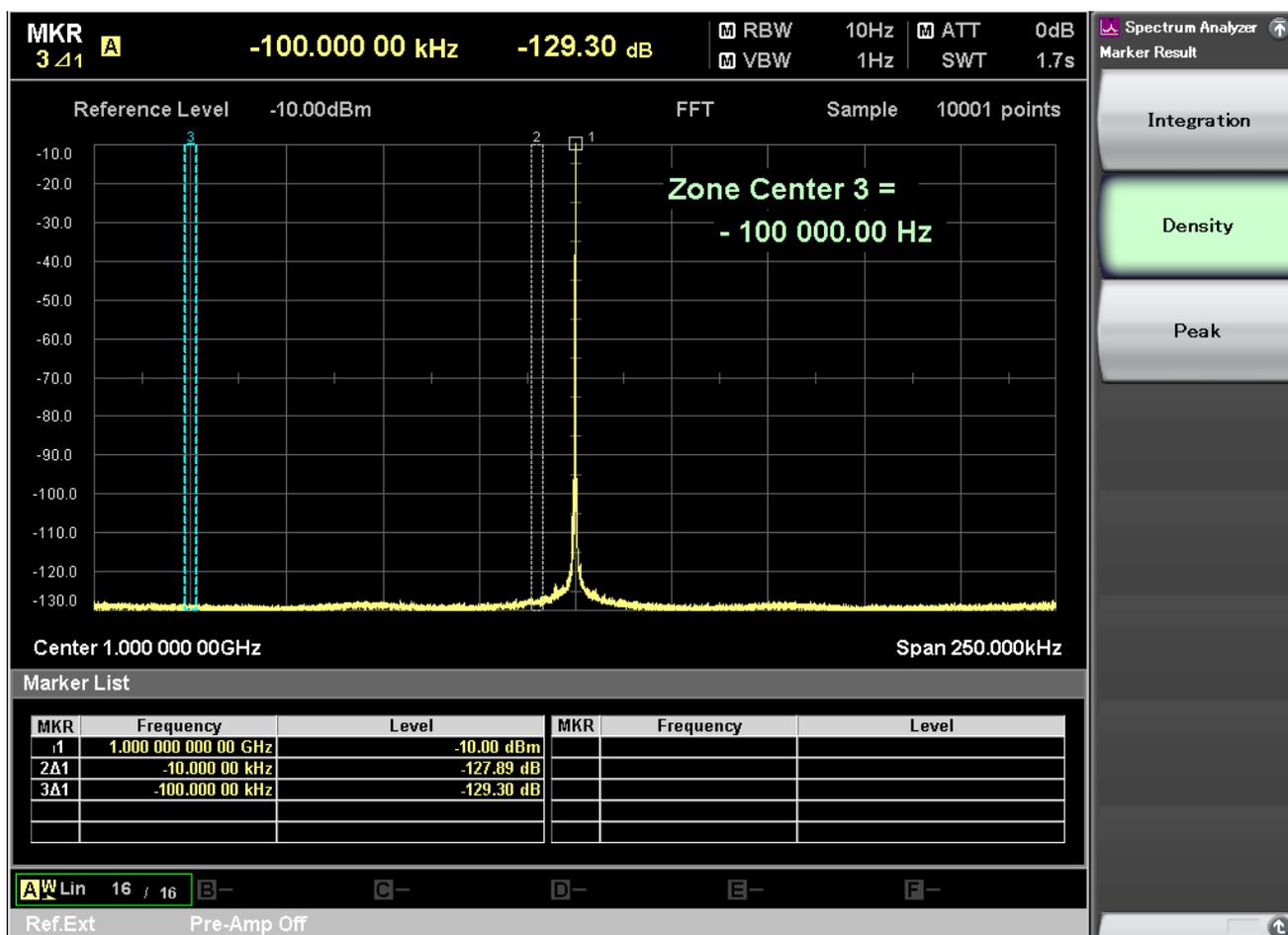


図 5-2 スペクトラムアナライザ（掃引機能）による位相雑音測定の実例

5.3 位相雑音測定機能の使用

スペクトラムアナライザの中には、専用の位相雑音測定機能／ソフトウェアを提供しているものもあります。位相雑音測定機能は、X 軸に中心周波数からの周波数オフセットを対数で、Y 軸に電力密度を表示します。通常のスペクトラムアナライザ（掃引機能）による測定と比較して操作が簡単です。また、掃引機能はノイズの振幅成分と位相成分が合成されたものを表示しますが、位相雑音測定機能では信号処理によって位相雑音成分のみを表示することができます。

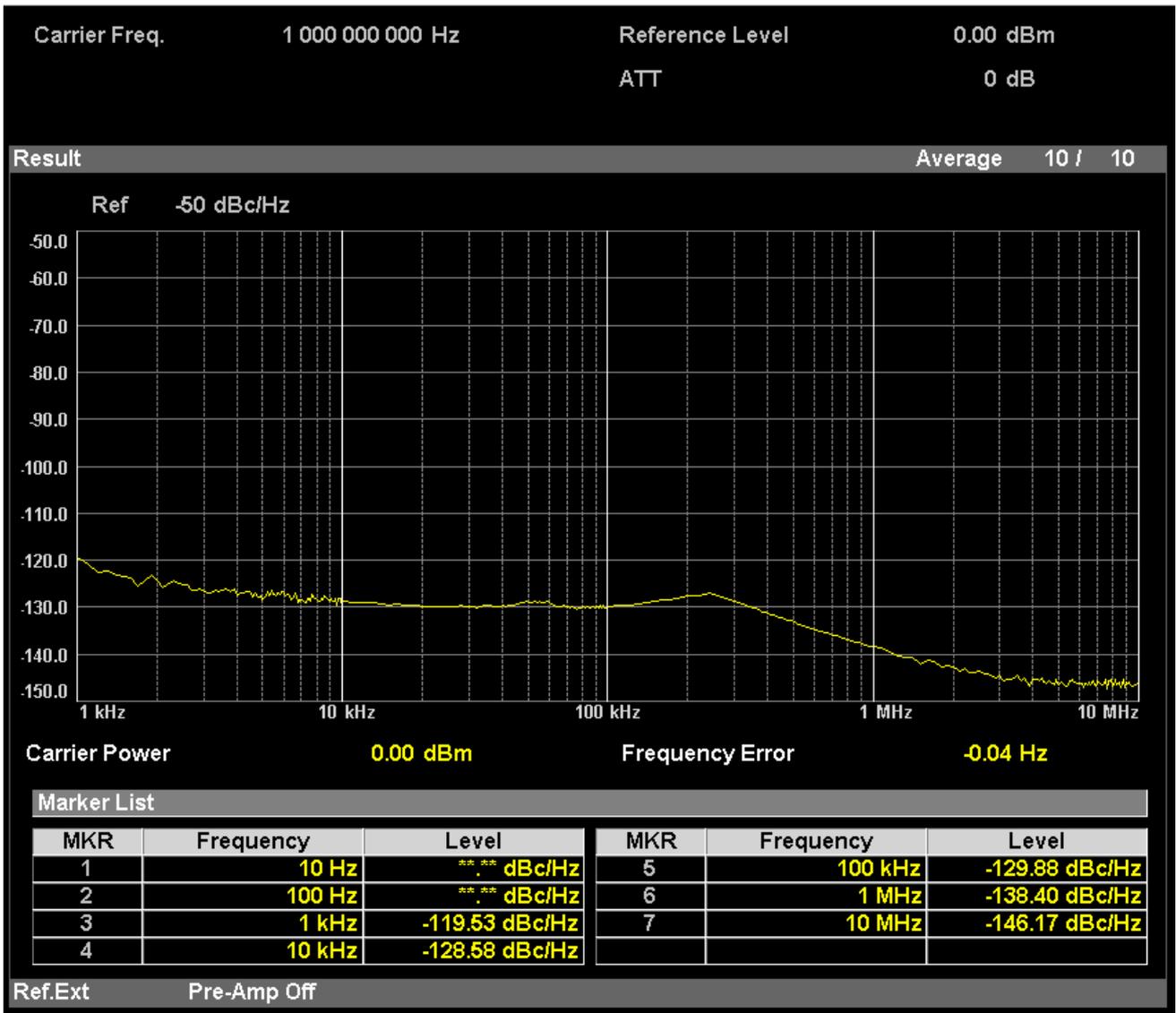


図 5-3 位相雑音測定機能による測定の例

5.4 ミリ波帯で重要となる測定系のノイズフロア

高い周波数帯・広帯域信号のスペクトラムを測定する場合、位相雑音に加えて、測定系のノイズフロア/DANL（表示平均雑音レベル）が重要になります。ノイズフロアは1 Hzあたりに正規化された信号の電力で表現されます。信号が広帯域になるほど同じ電力に対して1Hzあたりの電力が低下します。たとえば、帯域幅が2 GHzで、総電力が-20 dBmの信号の場合、ノイズフロアは $-20 - 10 \log(2,000,000,000) = -113 \text{ dBm/Hz}$ になります。この信号を測定するには、この数字よりも十分に低いノイズフロアをもった測定系が必要になります。最近、外部ミキサを使わずに50 GHzを超えた周波数を測定できるスペクトラムアナライザが登場してきていますが、そのノイズフロア性能にはまだ課題があると言えます。

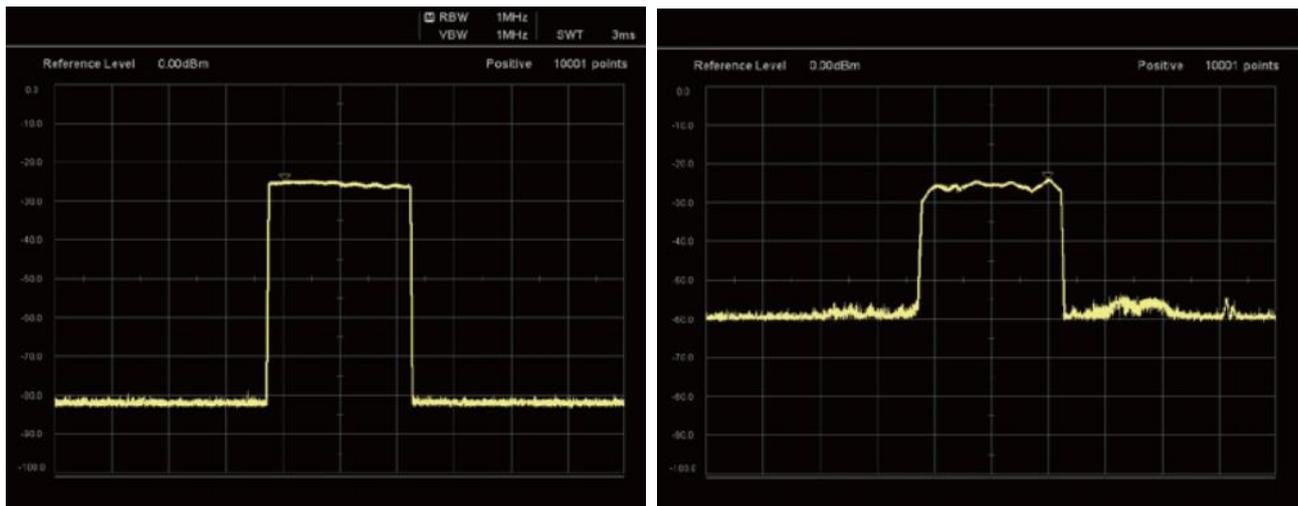


図 5-4-1 ノイズフロアの比較例

(左：アンリツの高性能導波管ミキサを使った例 | 右：一般的なハーモニクスミキサを使った例)

ワイヤレスバックホールのスペクトラムマスク試験では、信号レベルから-45 dB の規格線のため測定ダイナミックレンジが重要になります。ミリ波帯では、ダイナミックレンジ性能は P1dB 性能とノイズフロア性能との差を指します。例として P1dB 性能が 0 dBm の場合、P1dB によるレベル圧縮の影響を避けるため 10dB のマージンを持つとするとトータルパワーとして-10 dBm の信号が入力可能です。信号の帯域幅が 2 GHz の場合 1 Hz あたりの信号レベルは-103 dBm/Hz となります。スペクトラムマスク試験に必要なフロア性能は-148 dBm/Hz となり、測定器に必要なダイナミックレンジ性能は 0 dBm - (-148 dBm) = 148 dB になります。

仮に P1dB 0 dBm、ノイズフロア性能 -150 dBm/Hz の測定器の場合ダイナミックレンジ性能は 150 dB となりスペクトラムマスク試験ができます。しかしながら測定結果に対する測定器による影響度は 2.2dB となり、レベル誤差が大きくなります。ノイズフロアを改善するためにプリアンプの使用が一般的ですが、プリアンプは P1dB 性能が大幅に悪化するのでダイナミックレンジは狭くなります。そのため NFR 機能を使用して、P1dB 性能を維持したままダイナミックレンジを拡大する方法が有効です。NFR 機能とは事前に把握しておいた測定器内部のノイズ成分を測定結果から差し引いて表示する機能です。低減の効果は周波数によって異なりますが 7~11dB になります。したがってこの例ではダイナミックレンジ性能が 150 dB + 11 dB = 161 dB となり、測定器による影響度は 0.22 dB と小さくなります。誤差の少ないスペクトラムマスク試験を行うためには、十分なダイナミックレンジ性能を持ったスペクトラムアナライザを選択する必要があります。

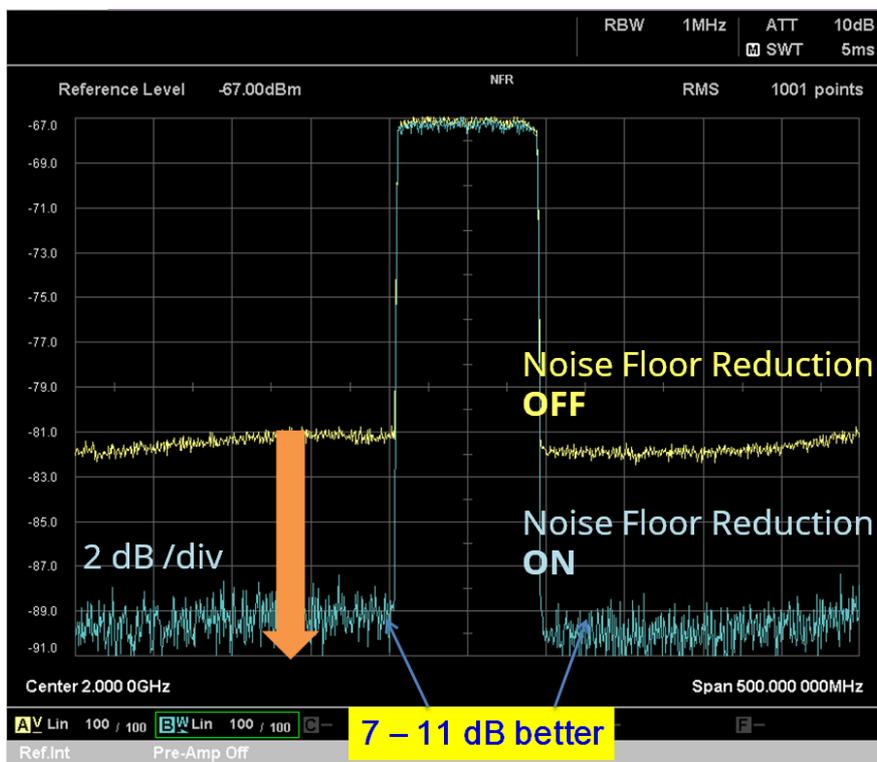


図 5-4-2 MS2840A の Noise Floor Reduction 機能の例

5.5 ポイントとなる外部ミキサの選択

スペクトラムアナライザの上限周波数を超える周波数を測定する場合、外部にミキサを使用して測定することができます。外部ミキサに対応したマイクロ/ミリ波測定用スペクトラムアナライザには、測定周波数に同調する LO 信号を出力し、外部ミキサによって IF 周波数に変換した信号を入力する同軸ポートが備わっています。



図 5-5 外部ミキサとスペクトラムアナライザによるマイクロ/ミリ波の測定

外部ミキサでは周波数変換によって損失が発生します。この変換損失が大きいとノイズフロアが上がります。また、外部ミキサを使った測定では、スペクトラムアナライザの IF 入力より後にはアッテネータが無い場合、アッテネータを外部ミキサの前段に入れて入力レベルを調整する必要があります。変調信号を測定する場合は外部ミキサによる測定結果への歪みを避けるために、また、CW 信号を測定する場合は外部ミキサの許容レベルに合わせ、入力信号をアッテネータで減衰させる必要があります。これらは、ノイズフロアを上げる追加要因になります。

このように、高い周波数・広帯域の信号を必要・十分なマージンをもって測定するためには、スペクトラムアナライザの選択と外部ミキサの両方の性能を考慮する必要があります。

6. まとめ

モバイルトラフィックデータの増加傾向が続く中、モバイルバックホール/ワイヤレスバックホールには 1 Gbps を超える大容量で高速な伝送性能が求められています。このために、変調の多値化や広帯域化の検討・導入が進められており、無線ユニットの性能として位相雑音が重要になってきます。その測定系の選択にあたっては、位相雑音とノイズフロアという点で測定マージンが十分にとれる性能と、様々な周波数帯に対応できる汎用性、そして導入・運用コストのバランスをとる必要があります。

関連資料

[1] GSMA "Wireless Backhaul Spectrum Policy Recommendations & Analysis", Oct 2014

[2] ETSI White Paper No. 9 "E-Band and V-Band Survey on status of worldwide regulation", Jun 2015

[3] ETSI EN 302 217-2-1 Fixed Radio Systems Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part 2-1: System-dependent requirements for digital systems operating in frequency bands where frequency co-ordination is applied

[4] ETSI EN 302 217-2-2 Fixed Radio Systems Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part 2-2: Digital systems operating in frequency bands where frequency co-ordination is applied

アンリツ株式会社

<http://www.anritsu.com>

本社 〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1 TEL 046-223-1111
厚木 〒243-0016 神奈川県厚木市田村町8-5
計測器営業本部 TEL 046-296-1202 FAX 046-296-1239
計測器営業本部 営業推進部 TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248
仙台 〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1 住友生命仙中央ビル
計測器営業本部 TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529
名古屋 〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南2-14-19 住友生命名古屋ビル
計測器営業本部 TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485
大阪 〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101 大同生命江坂ビル
計測器営業本部 TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118
福岡 〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田1-8-28 ツインスクエア
計測器営業本部 TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699

ご使用の前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

1602

■カタログのご請求、価格・納期のお問い合わせは、下記または営業担当までお問い合わせください。

計測器営業本部 営業推進部

TEL: 0120-133-099 (046-296-1208) FAX: 046-296-1248
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: SJPost@zy.anritsu.co.jp

■計測器の使用法、その他については、下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221 (046-296-6640)
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。
また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。