

A-5

高速・広帯域通信時代の最新ノイズ計測技術



テクトロニクス/ケースレー
イノベーション・フォーラム2013 大阪

岡田 信孝

Tektronix[®]

KEITHLEY
A Tektronix Company

本日の予定

- 最近のノイズ環境とEMI規制の動向
- ノイズ対策のためのスペクトラム・アナライザ
- テクトロニクス社のノイズ測定ソリューション

市場動向と設計者の課題

ここ近年、世界で年間10億個を超えるRFデバイスが出荷

- **どこでもワイヤレス**
 - 業務用と個人用途に関わらず、あらゆる業界に浸透
- **設計者の責務は拡大**
 - デジタル・アナログ・RFの設計統合
- **RF信号はより時間変動する仕様に推移**
 - バースト通信が省電力に寄与
 - 複雑な周波数ホッピング変調方式の導入(耐ノイズ・セキュリティ)
- **異なる周波数の複数の通信規格が同居**
 - 900MHz帯のZigBeeと2.4GHz帯のBluetoothが一つのデバイスに統合
- **機器の小型化と高機能化**
 - 製品内での電波干渉が性能低下の原因に
- **EMCのトラブルシューティングが更に困難に**
 - 輻射が**間欠的**になり**広帯域化**している



近年のノイズ環境

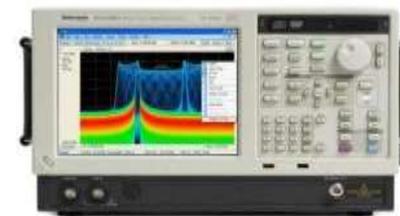
- 搭載される無線機器の増加
 - 無線LAN, Bluetooth, GPS, 地上波デジタル放送・チューナー, RFID
 - スマート・メータ(スマート・グリッド)
- 高密度実装
 - GNDプレーンの減少
 - 回路のアイソレーション低下
 - 複数の発振無線回路をメイン・ボードに実装
 - モーター回路(DVDなど)の増加
- 省エネ・環境対策
 - インバータ
 - スイッチング電源、IGBT
- LSIの高速化
 - CPU, Memoryの動作周波数高速化
 - CPU, Memoryの動作電圧の低下

EMCの分類

- EMC (Electro-Magnetic Compatibility) : 電磁的両立性

- EMI (Electro-Magnetic Interference) : 電磁妨害

- エミッション(ノイズ放出)試験
 - 導電性ノイズ(電源線、データ線)
 - 放射性ノイズ(電磁波)



スペクトラム・アナライザ

- EMS (Electro-Magnetic Susceptibility) : 電磁妨害感受性

- イミュニティ(ノイズ耐性)試験
 - 静電気試験
 - 落雷試験



オシロスコープ

$$EMC = EMI + EMS$$

周波数とパワーの法規制

電気用品安全法

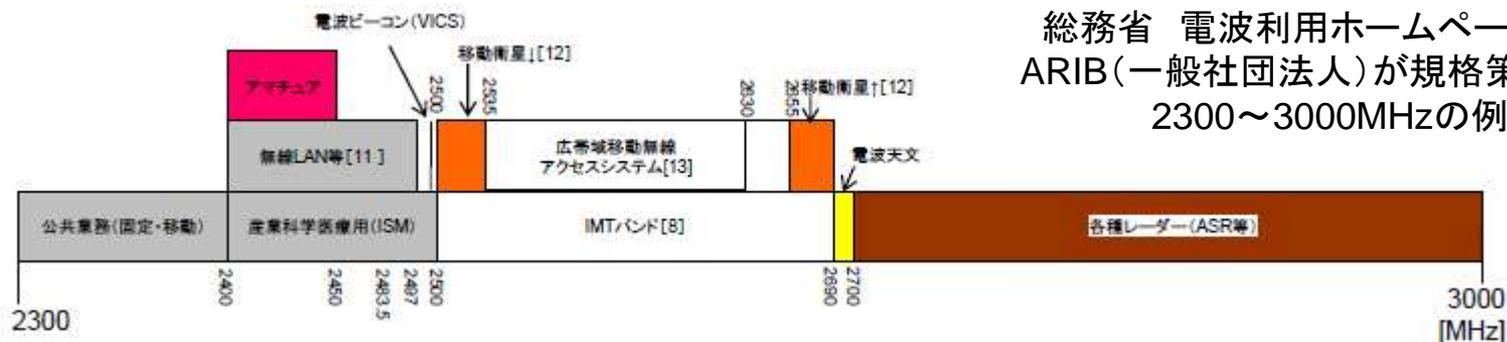


日本の法令



■ 電波法規制

- 国内法規制：電波利用周波数(パワー)は国別に法規制されている。



総務省 電波利用ホームページ資料
ARIB(一般社団法人)が規格策定する。
2300~3000MHzの例

- 国際法規制(主にエミッション:EMI 電磁波障害)

EMI : Electro-Magnetic Interference

- CISPR(国際無線障害特別委員会 勧告)
- FCC(米国連邦通信委員会 法規制)
- EN(欧州EC指令 法規制) CEマーキングはEMS(イミュニティ:電磁耐性)も含む
- VCCI(日本 情報処理装置等電波障害自主規制協議会:メーカーの自主規制)



EMCノイズ国際規格・規制(一例)

CISPR (国際無線障害特別委員会)

- CISPR11 工業・科学・医療(ISM) 高周波装置 --- EN55011(欧)、FCC47-Part18(米)
- CISPR12 自動車、ボート、内燃機関 --- 自動車規格JASO(日)、SAE J551/2(米)
- CISPR13 音声・TV放送受信機 ----- EN55013、FCC-Part15
- CISPR14 家庭用機器、電動工具 ----- EN55014
- CISPR15 電気照明及び類似機器 ----- EN55015
- CISPR16 無線妨害、イミュニティ測定装置 ----- ANSI/IEEE291(米)
- CISPR22 情報技術(IT)装置 ----- VCCI(日本)、EN55022、FCC47-Part15,18
- CISPR25 車載受信機
- CISPR32 マルチメディア機器(審議中) ----- CISPR13と22の統合、VCCIに反映予定

IEC (国際電気標準会議) 総会 TC77(EMC専門委員会)

- 61000-3-2 入力16A以下の機器の高調波電流エミッション限度値 ----- JIS C 61000-3-2
- 61000-4-3 放射無線周波電磁界イミュニティ試験 ----- JSI C 61000-4-3



広帯域化するノイズ規制

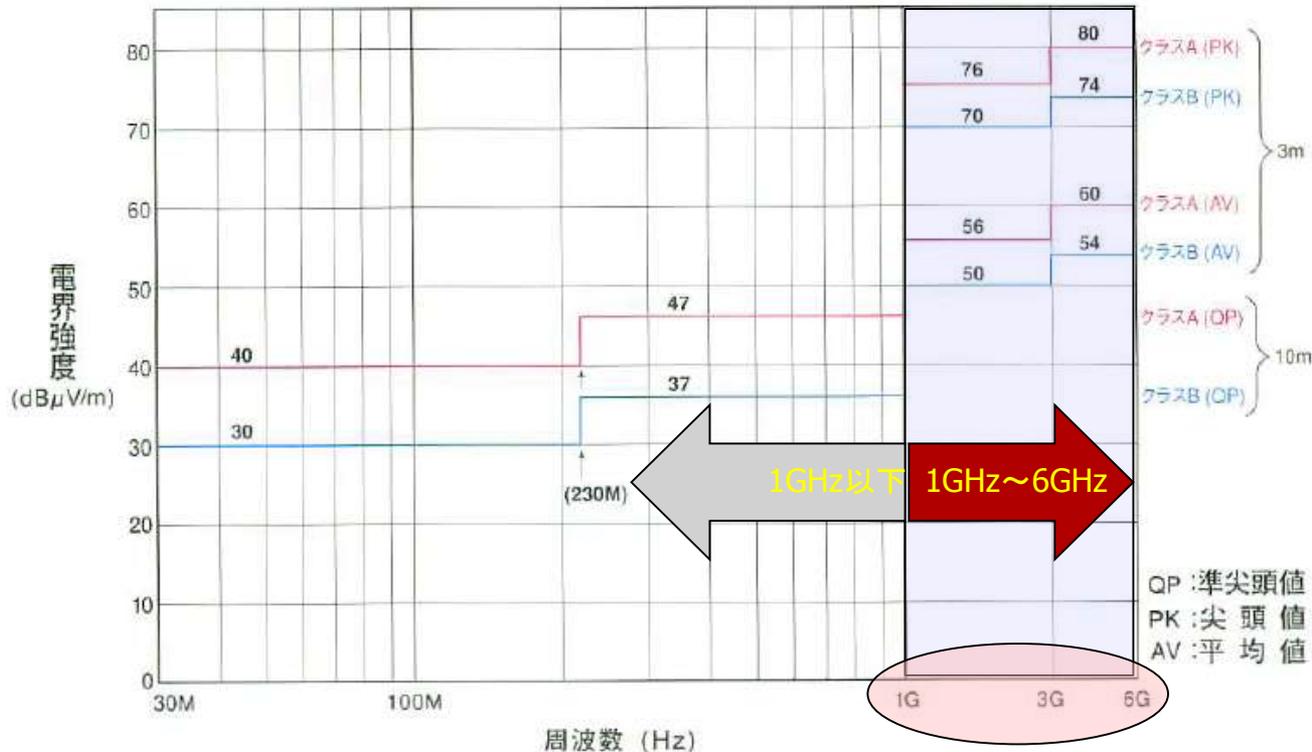
CISPR22 edition 5.2, VCCI, EN55022, FCC part 15

- 1GHz→6GHz: PK(尖頭値)とAV(平均値) 規格改定(追加)
- 規制対象は情報技術装置(PC,複合機,プリンタなど)=CISPR22
- CISPR32でデジタル家電全般に拡大の予定 (CISPR13,22は2017年3月で廃止)

妨害波電界強度の許容値

出典:一般財団法人VCCI協会

クラスA/B情報技術装置(測定距離3m/10m)



CISPR22 edition5.2での測定周波数範囲

- 装置内部で使用している周波数もしくは装置に供給されるクロック周波数によってEMIの測定周波数範囲が決定

EUT内の最高周波数	測定の上限周波数
108MHz未満	1GHz
108MHz以上 500MHz未満	2GHz
500MHz以上 1GHz未満	5GHz
1GHz以上	最高周波数の5倍または 6GHzの低い方

- CISPR32でもCISPR22と同じ値が採用される予定

さまざまなノイズの種類

- 外部ノイズ
 - 電源ノイズ
 - AC電源
 - モータ、発電機、変圧器
 - DC電源
 - スイッチング・レギュレータ
 - 開閉器ノイズ
 - アーク放電、突入電流
 - 雷サージ
 - 静電気放電、誘導雷
- 電波(無線通信)干渉
- 位相ノイズ
 - クロック・ジッタ
- 内部ノイズ(イントラEMC)
 - 熱雑音 (ホワイト・ノイズ)
 - ショット・ノイズ (微小電流の揺らぎ)
 - フリッカ・ノイズ (1/fノイズ、ピンク・ノイズ)
 - バースト・ノイズ (ポップコーン・ノイズ)
 - アバランシェ・ノイズ (ツェナー振動)
- PCBのノイズ
 - 信号品質 SI Signal Integrity
 - 電源品質 PI Power Integrity
 - グラウンド・バウンス、リンギング
 - クロストーク、チャージ・インジェクション
 - SSO(CMOS同時スイッチング)ノイズ
- コモン・モード・ノイズ
 - 高速差動伝送、プレーン共振

高速・広帯域化するPCのノイズ環境

■ 通信モジュールの増加 & 高速化

Bluetoothモジュール

2.4~2.5GHz

無線LANモジュール

2.4GHz, 5~5.8GHz

CPUボード

•SATA3.0 6 Gbps

•DDR3 2.4Gbps

•USB3.0 5 Gbps

•DVI/HDMI1.4 3.4 Gbps

•DisplayPort 5.4 Gbps

•PCI Express 8 Gbps

•Thunderbolt 10 Gbps

**バスクロック周波数
>1GHz**

ハードディスク・ドライブ

ディスプレイ・ドライブ

NFCモジュール

13.56MHz

DVDモータドライブ

GPSモジュール

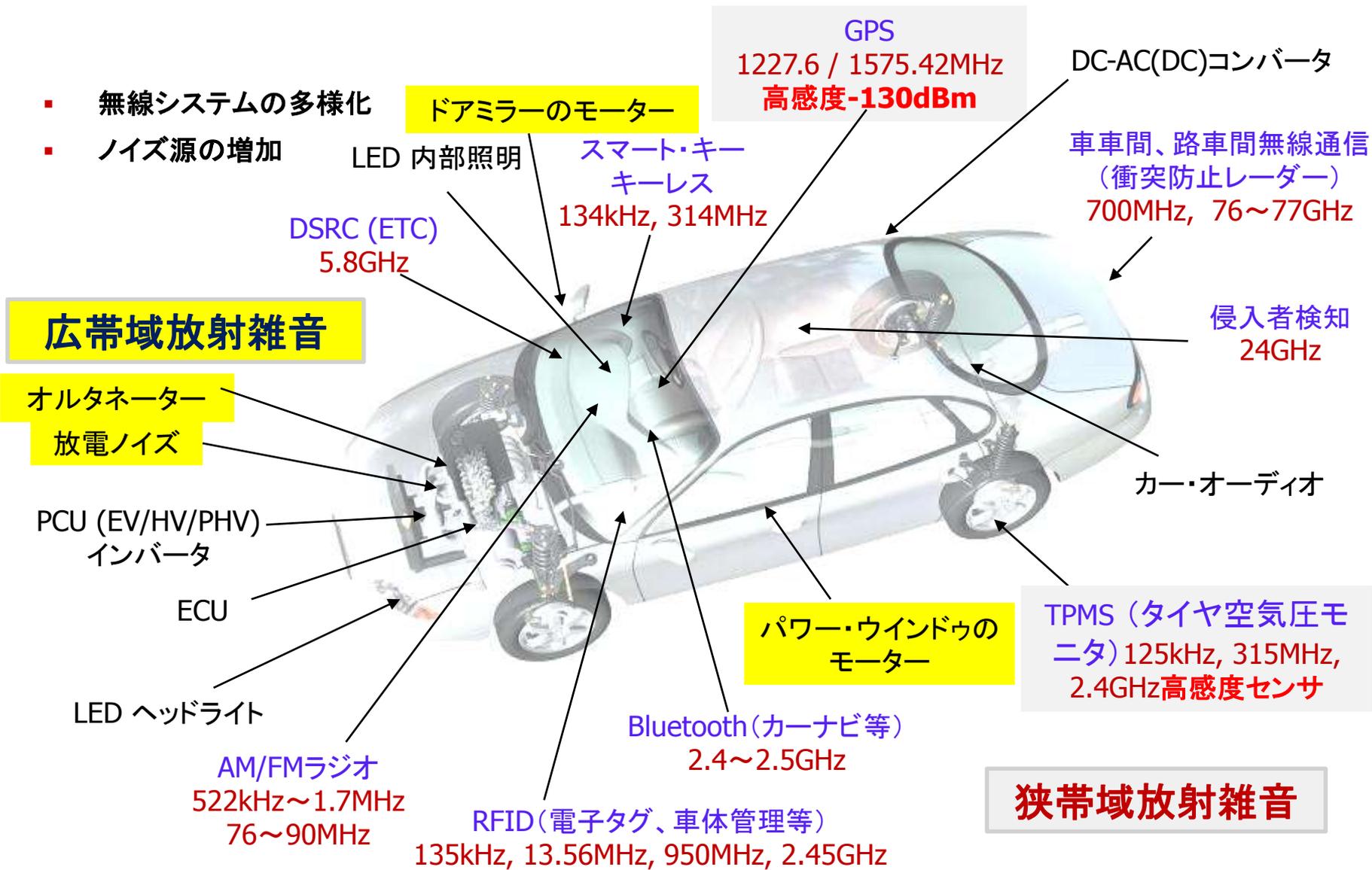
1227.6 / 1575.42MHz

地上波デジタル

470~770MHz

多様化する自動車のノイズ環境

- 無線システムの多様化
- ノイズ源の増加



ノイズの種類と測定器

■ ノイズ測定全般

- スペクトラム・アナライザ
- 近接界プローブ
- アンテナ



スペクトラム・アナライザ

■ インパルスノイズ、サージノイズの測定

- オシロスコープ
- 高電圧プローブ、高圧差動プローブ
- 電流プローブ

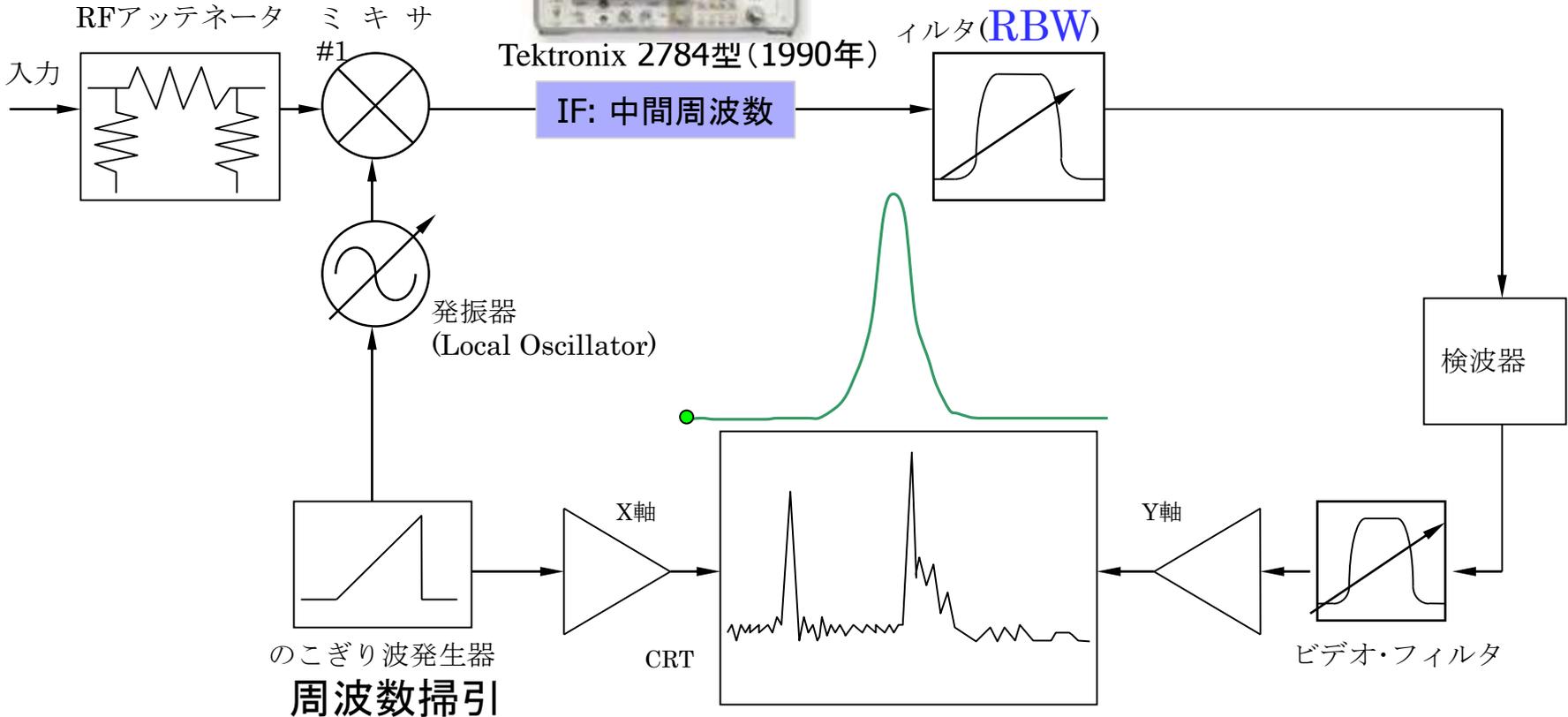


オシロスコープ

掃引型スペアナの基本構造



Tektronix 2784型(1990年)

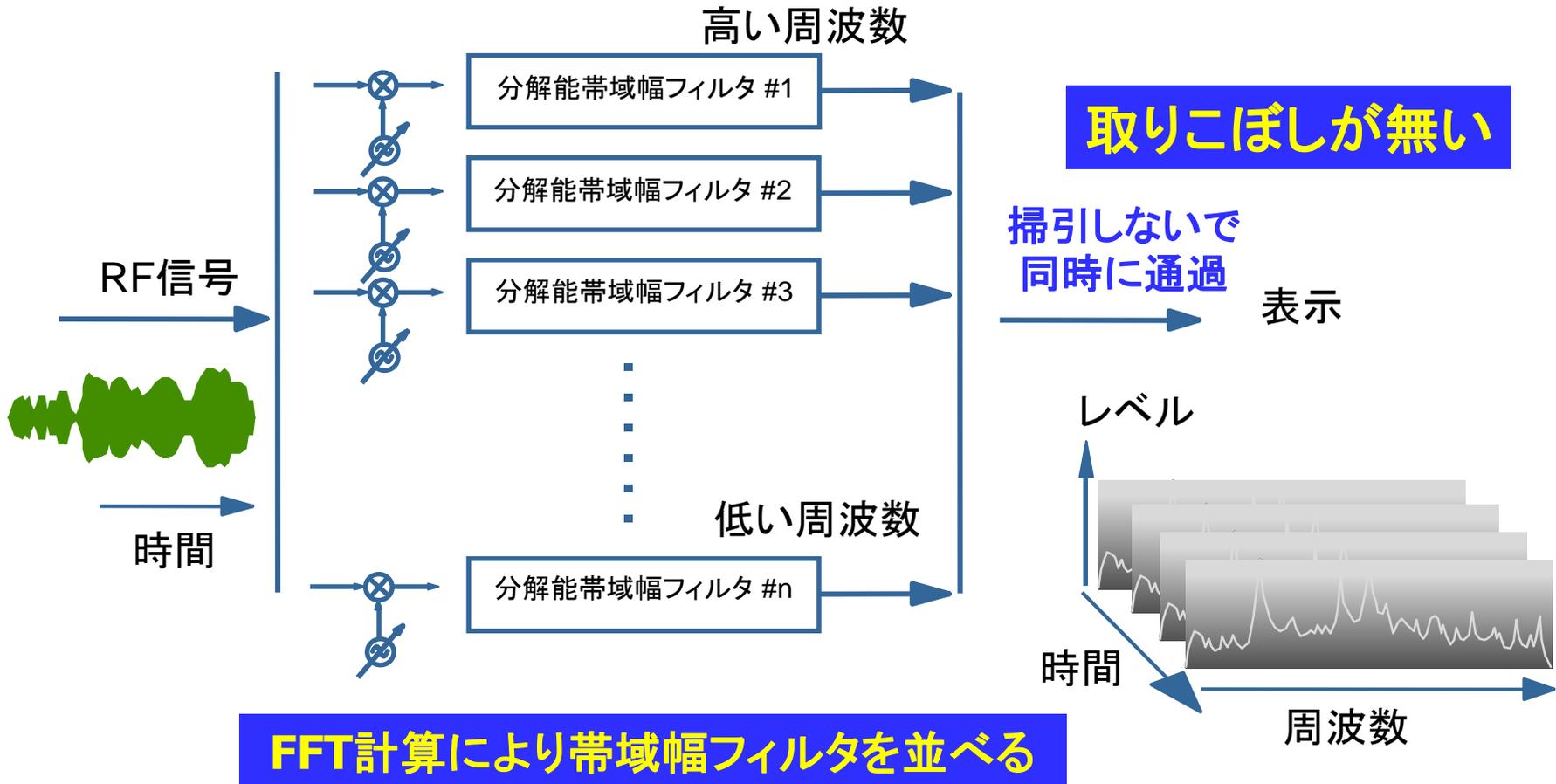


分解能帯域幅 (RBW) は
1Hz ~ **最大でも10MHz程度**

掃引速度は
最速でも1ms/スweep

分解能帯域幅 (RBW) を1/2に
すると、掃引時間は4倍必要

リアルタイム・シグナル・アナライザ(RTSA)の概念



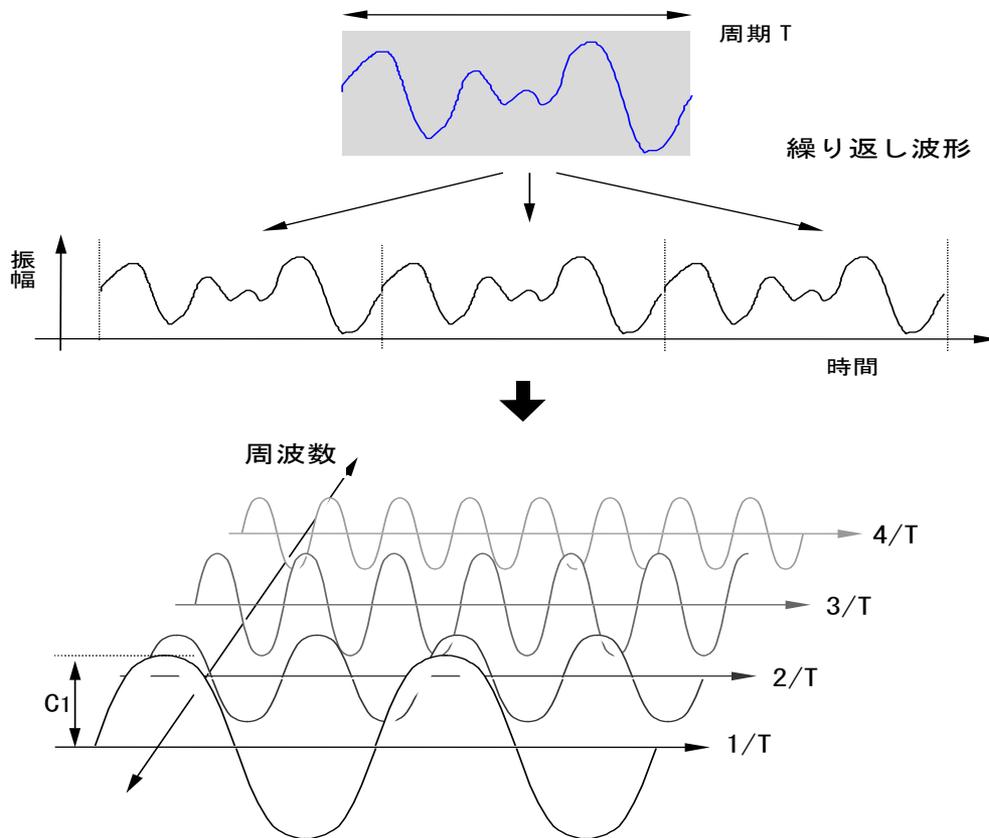
FFTとは？

FFT: Fast Fourier Transform (高速フーリエ変換)

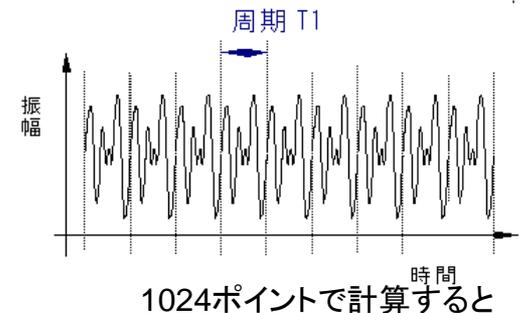
あらゆる信号は、さまざまな周波数の正弦波の組み合わせで成り立っています。

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-2\pi kn/N}$$

離散フーリエ変換(DFT)を高速に行うのがFFT



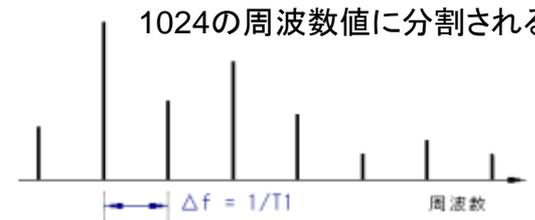
オシロスコープ表示



1024ポイントで計算すると

FFT計算

1024の周波数値に分割される

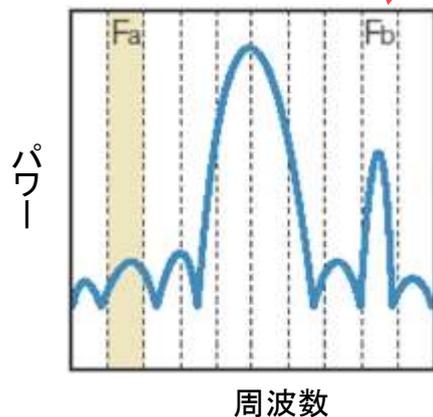


スペアナ表示

FFT方式のスペアナは速い

■ 掃引型スペアナ

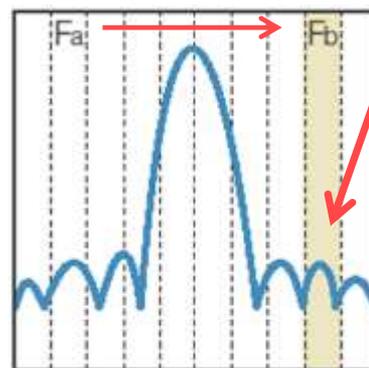
- アナログ掃引方式



Faを見ている時、Fbは見えていない

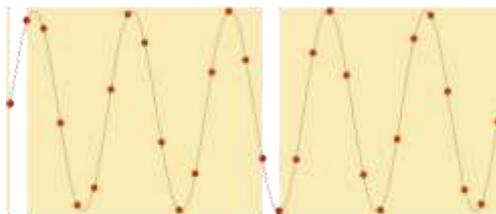
最速
1m秒
で掃引

FaからFbまで掃引した時には、Fbは消えている。



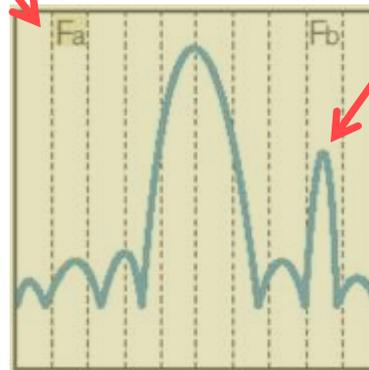
■ FFT方式のスペアナ

- デジタル計算方式



最速
200n秒で
FFT

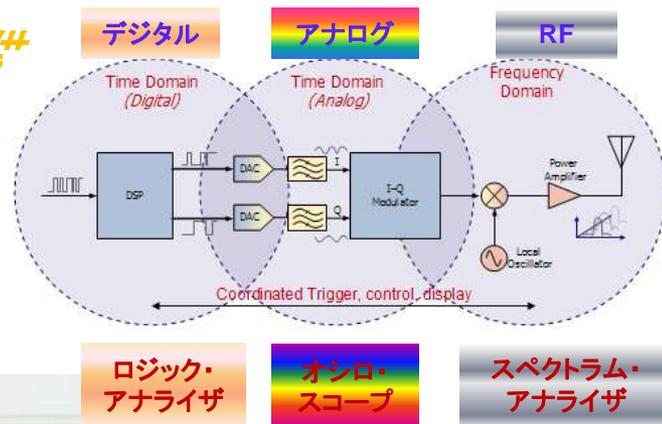
Faを見る時、Fbも同時に見えている



MDO4000B ミックスド・ドメイン・オシロスコープ

アナログ／デジタル／RFの時間相関 測定を1台で提供

1GHz x 4ch のオシロ +
6GHz x 1ch のスペアナ +
ロジアナ x 16ch = 全21ch



16ch ロジック・アナライザ

Tektronix MDO4104-6

ノイズの発生源を探索する 近接界プローブの使い方

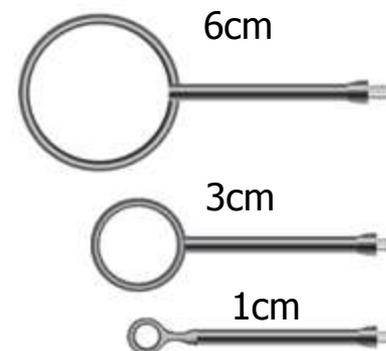
■ 近接界プローブを使用するメリット

- コスト
 - 卓上での手軽なノイズ対策
 - PCBの部品レベルでのノイズ対策
- 時間短縮
 - 電波暗室使用の順番待ちが不要

■ 近接界プローブの種類と用途

- 電界プローブは電圧、磁界プローブは電流検出
- ノイズの発生源を探索する。
- 磁界(H)プローブは径が大きいほど感度が良い

磁界(H)プローブ



電界(E)プローブ



微細ピッチの近接界プローブ

- 30MHz～6GHz
- 0.2mm 空間分解能
- 磁界プローブ(H)
- 電界プローブ(E)

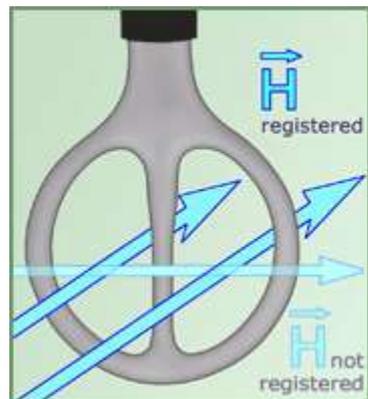
パソコンを付ける
端子を判別できる



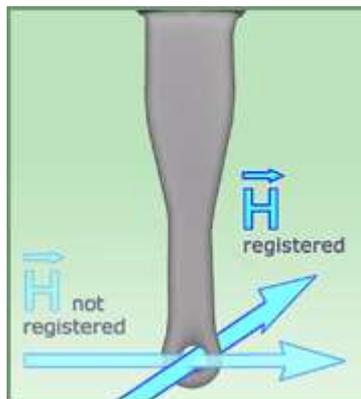
ドイツ LANGER社製

国内連絡先: TSSジャパン
<http://www.tssj.co.jp/>

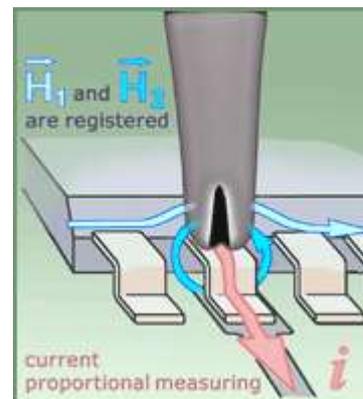
微細ピッチの近接界プローブ(詳細)



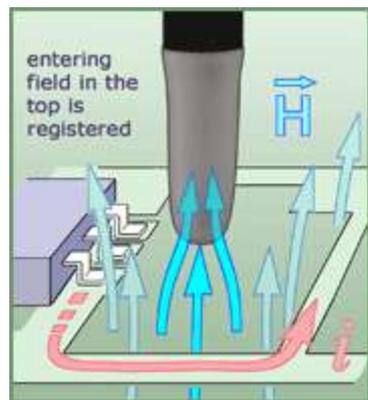
磁界プローブ
直径: 25 mm



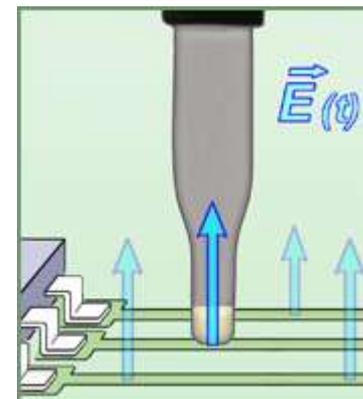
磁界プローブ
空間分解能: 1 mm



磁界プローブ
空間分解能: 0.5 mm



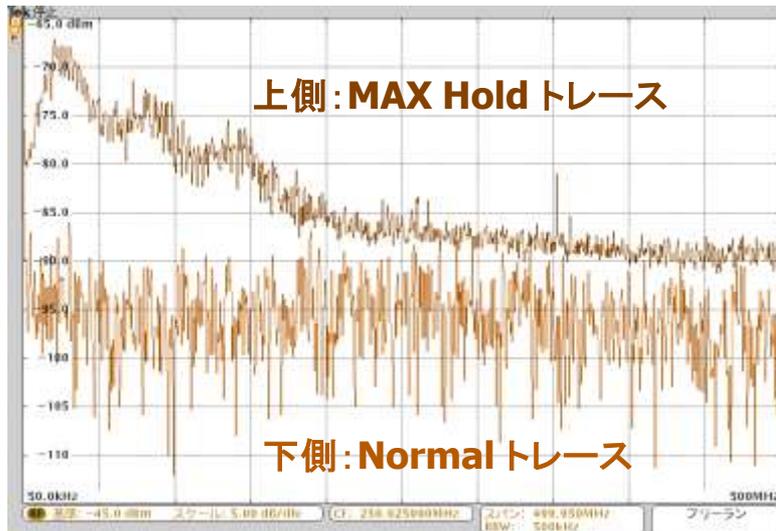
垂直磁界用プローブ
空間分解能: 2 mm



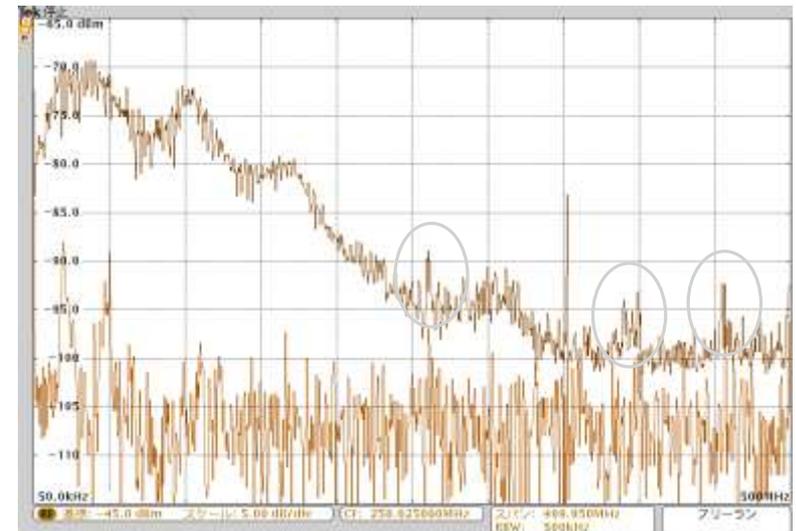
電界プローブ
空間分解能: 0.2 mm

低ノイズ・フロア測定に最適なプリアンプ

- MDO4000/Bシリーズ用
TPA-N-PRE 型プリアンプ
 - ダイナミックレンジを減らさずに、
低ノイズ・フロアを実現
 - 特長
 - 周波数帯域: 9 kHz – 6 GHz
 - ゲイン: 12 dB
 - 表示平均ノイズレベルの改善(DANL)
: **10 dB**



TPA-N-PRE
使用



ノイズ対策用プローブとアンテナ

■ アクティブ・プローブ・アダプタ

- TPA-N-VPI型アダプタ
 - TekVPI インタフェース・プローブ用アダプタ
- 1103型プローブ用電源
 - Tek Probe Level2インタフェース対応
- RTPA2A型プローブ・アダプタ
 - プローブ型式を認識して自動電圧補正
 - P7000シリーズ用プローブ・アダプタ

■ 指向性ビームアンテナ

- P/N: 119-9594-xx 824~896MHz
- P/N: 119-9595-xx 896~960MHz
- P/N: 119-9596-xx 1710~1880MHz
- P/N: 119-9597-xx 1850~1990MHz



TPA-N-VPI型アダプタ



1103型プローブ電源



RTPA2A型(50Ω出力)

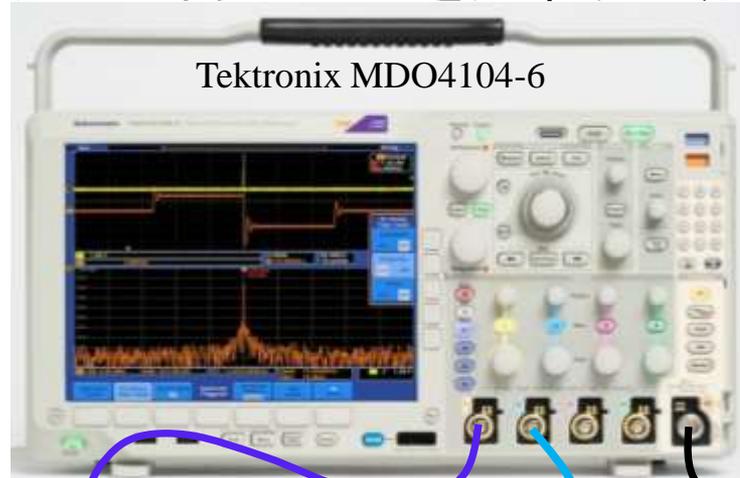


ビーム・アンテナ

広帯域パルス・ノイズ測定例(1)

スイッチング電源のノイズ測定

- パルス・ノイズを放出している時間タイミングは？
- μ 秒以下の単発パルスを広帯域で観測できるか？



AMラジオ
522kHz~1.7MHz
FMラジオ
76MHz~90MHz

磁界プローブ

放射ノイズ

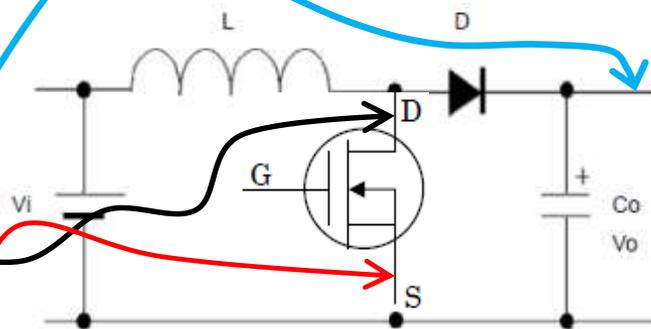
一次平滑回路



高電圧差動プローブ



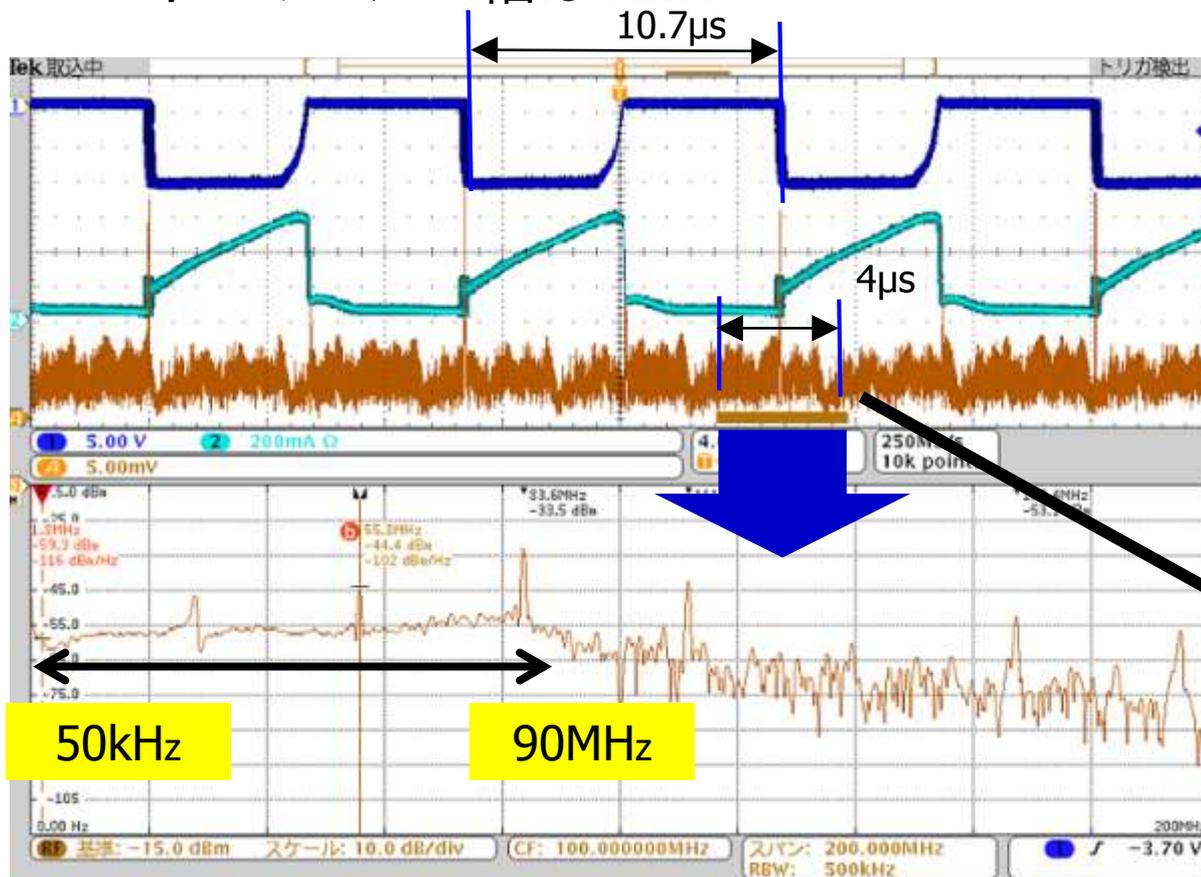
電流プローブ



広帯域パルス・ノイズ測定例(1)

スイッチング電源のノイズ測定

- **チャージ電圧**の立下がり時に50kHz~90MHzの**広帯域ノイズ**発生
- ノイズのパルス幅は82ns

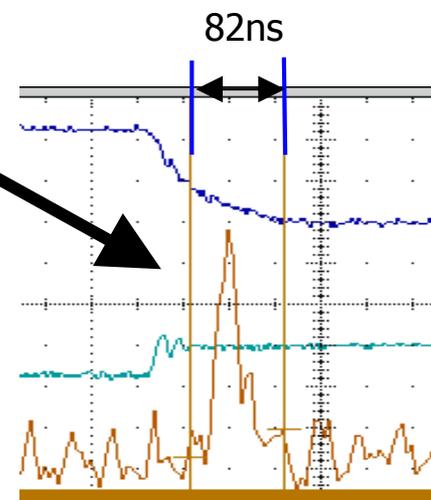


一次平滑コンデンサ

チャージ電圧

放出電流

ノイズ電力の時間変動



広帯域パルス・ノイズ測定例(1) スイッチング電源のノイズ測定

- 放出電流の立下がり時は1.8MHzの狭帯域ノイズ発生



一次平滑コンデンサ

チャージ電圧

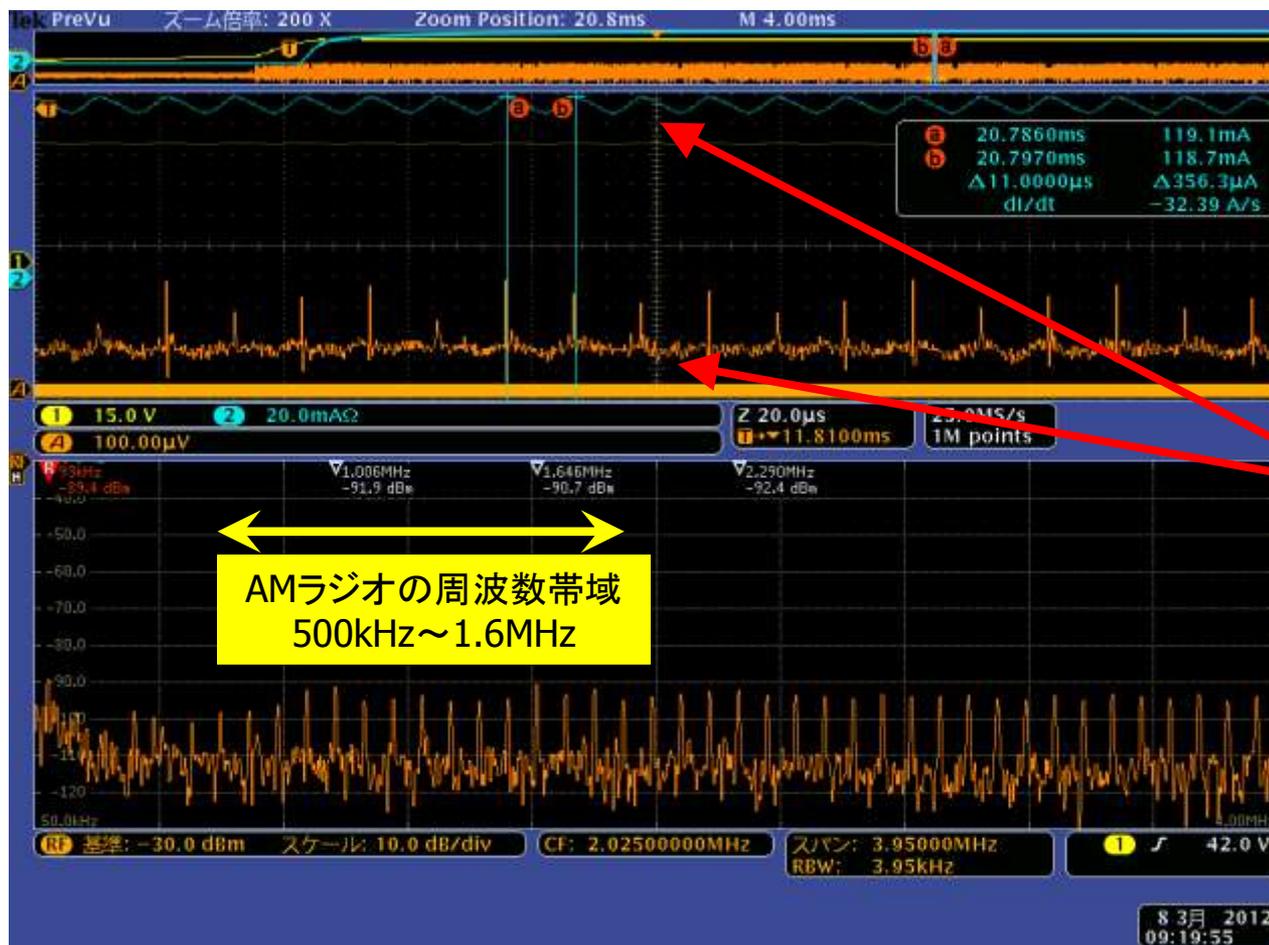
放出電流

ノイズ電力の時間変動

1.8MHz

広帯域パルス・ノイズ測定例(2) LED電球の放射ノイズ測定

- LED駆動電流のリップルと放射ノイズの時間相関



磁界(H)プローブ



電流のリップルと
ノイズ・パワーの変動
周期は相関がある

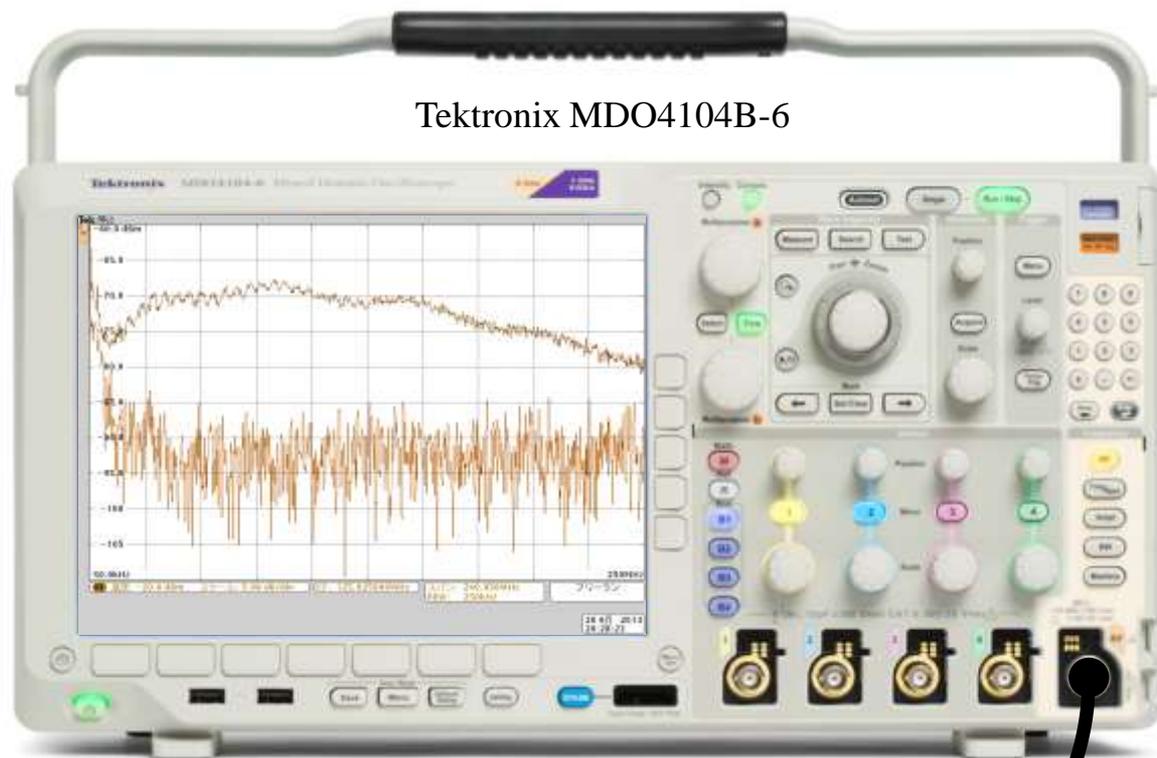
広帯域パルス・ノイズ測定(3)

スマートフォンのディスプレイ・ノイズの観測

Tektronix MDO4104B-6

上側: ディスプレイ・ノイズの
スペクトラム
(MAX Holdトレース)

下側: ディスプレイ・ノイズが
出ていない状態
(Normalトレース)



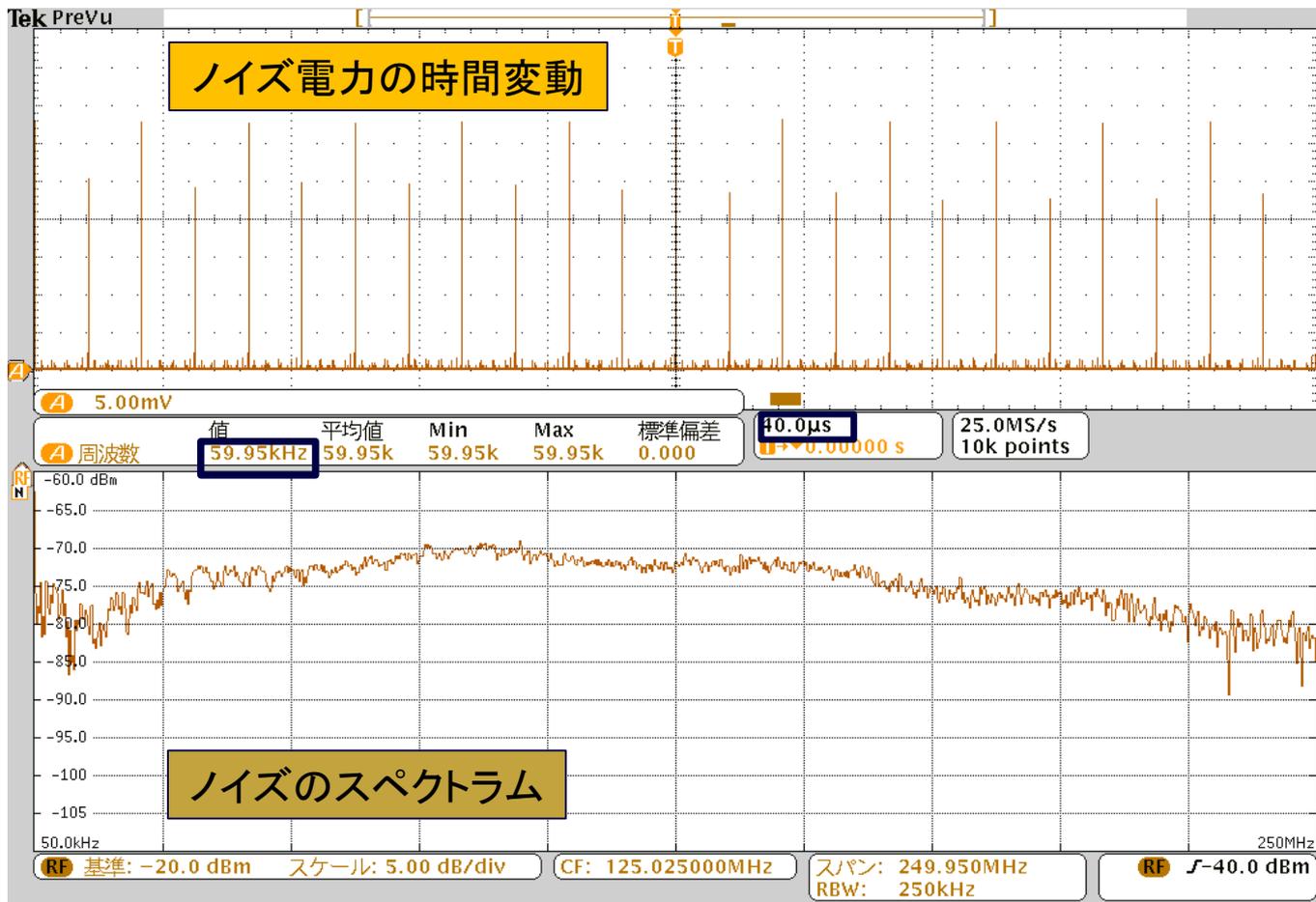
- **9kHz-250MHz** スパンでの
広帯域ノイズ観測
- ノイズ電力の時間変化に規則
性があるか？

磁界プローブ



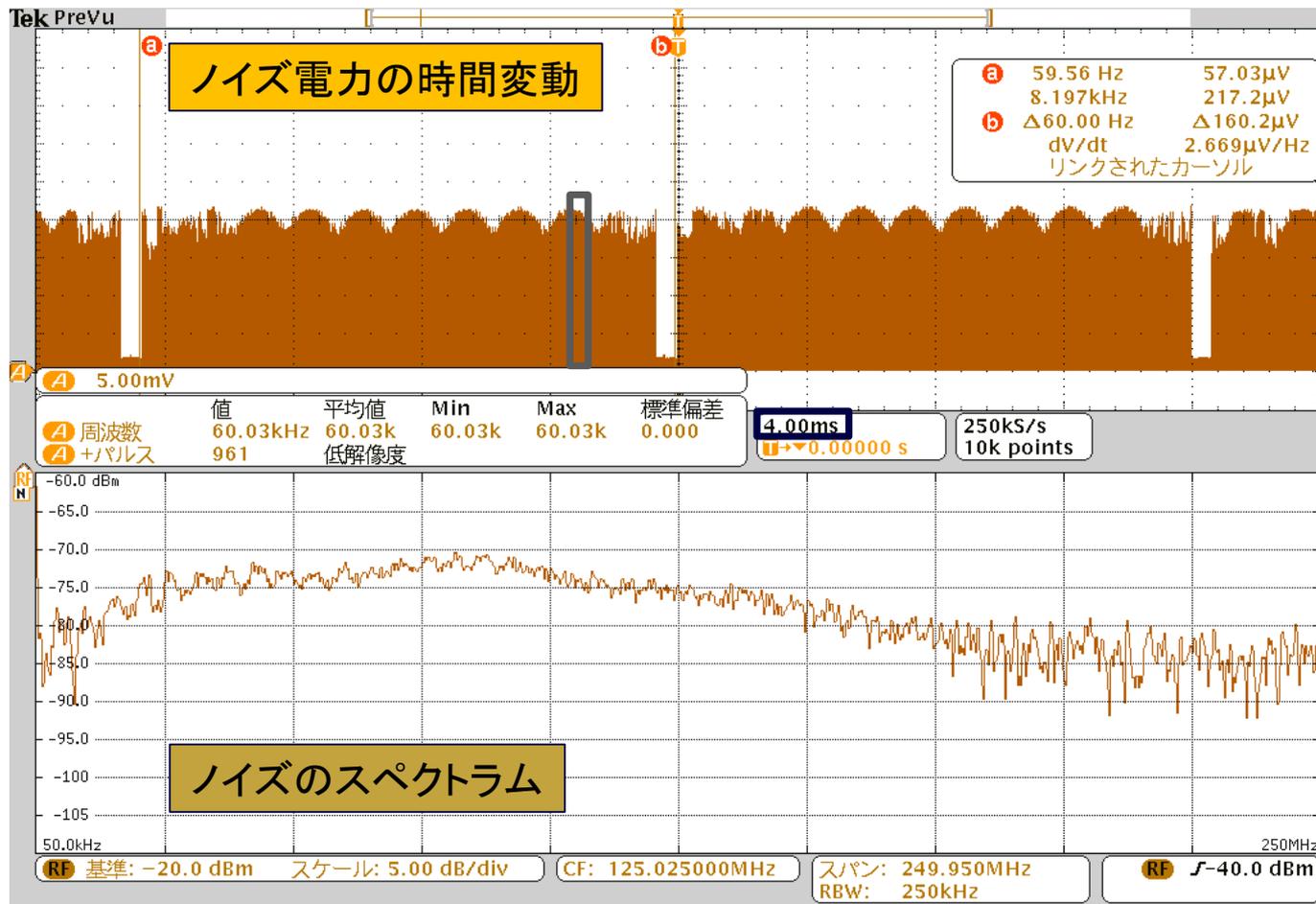
広帯域パルス・ノイズ測定(3)

スマートフォンのディスプレイ・ノイズの観測



- MDO4000の自動測定機能で、パルス・ノイズの発生間隔を求める
- 60kHzのサイクルで、広帯域スイッチング・ノイズの発生が確認できる

広帯域パルス・ノイズ測定(3) スマートフォンのディスプレイ・ノイズの観測



- 時間軸を拡大し、40ms間のノイズの変化を測定

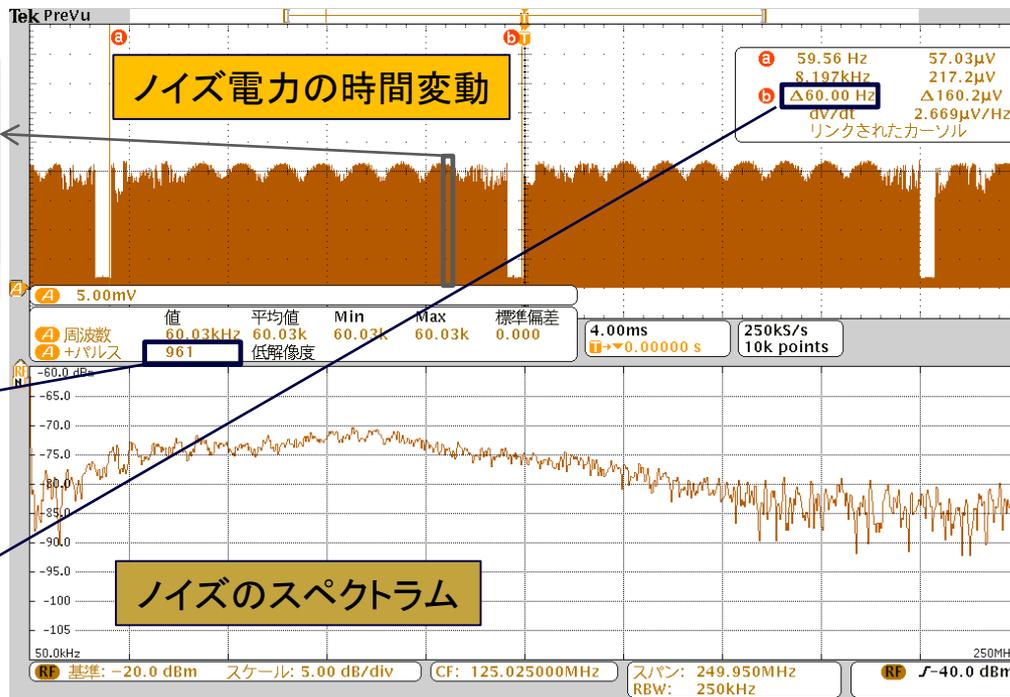
広帯域パルス・ノイズ測定(3) スマートフォンのディスプレイ・ノイズの観測

ノイズの発生周波数: **60kHz**

ノイズ電力の時間変動

1サイクル当たりの
パルス・ノイズの数: **961回**

ノイズの変化周波数: **60Hz**



- ノイズの変化周波数: 60Hz → **ディスプレイのリフレッシュ・レートに一致**
- 1サイクル当たりのノイズ発生回数: 961回 → **ディスプレイ解像度 960 × 640**
- ディ스플레이の表示画像によって、ノイズ電力の時間変動の様子も変化

基板(PCB)レベルでのノイズ対策の重要性

- **ノイズの発生源に対策を打つ**⇒コスト・ダウン、品質向上
- **イントラシステムEMC(自家中毒)対策**
 - 装置内部のノイズによって干渉・誤動作を起こす問題
 - モジュール同士が近接しており、極めて微弱なレベルでも問題を引き起こす
 - リレー、電動機、インバータ、クロストーク、デジタル・アナログ混在回路
 - 内蔵するLSIやインタフェースの**高速化**で、発生するノイズは**広帯域化**し、電源電圧や信号レベルが低電圧化している事でさらにノイズの影響を受けやすくなる



比較的安価な設備投資金額

シールド・テント

シールドBOX

電波暗箱

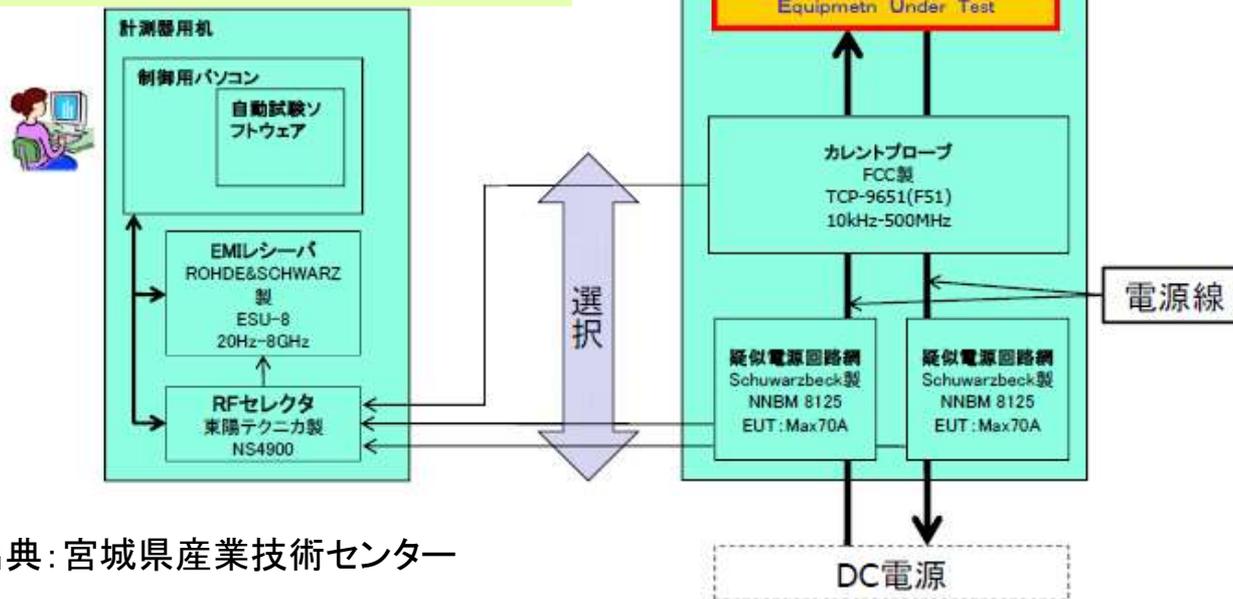


50~150万円 -30~-80dB

(例)自動車ワイヤ・ハーネスのノイズ対策

- CISPR25の規格に従いコンプライアンス試験を行った結果、対策が必要
- ハーネスにシールド対策を行うとコスト高になるので、ECU/PCUのPCB側にノイズ対策を行う
⇒ トータルコスト削減

CISPR25車載ハーネス
コンプライアンス試験設備



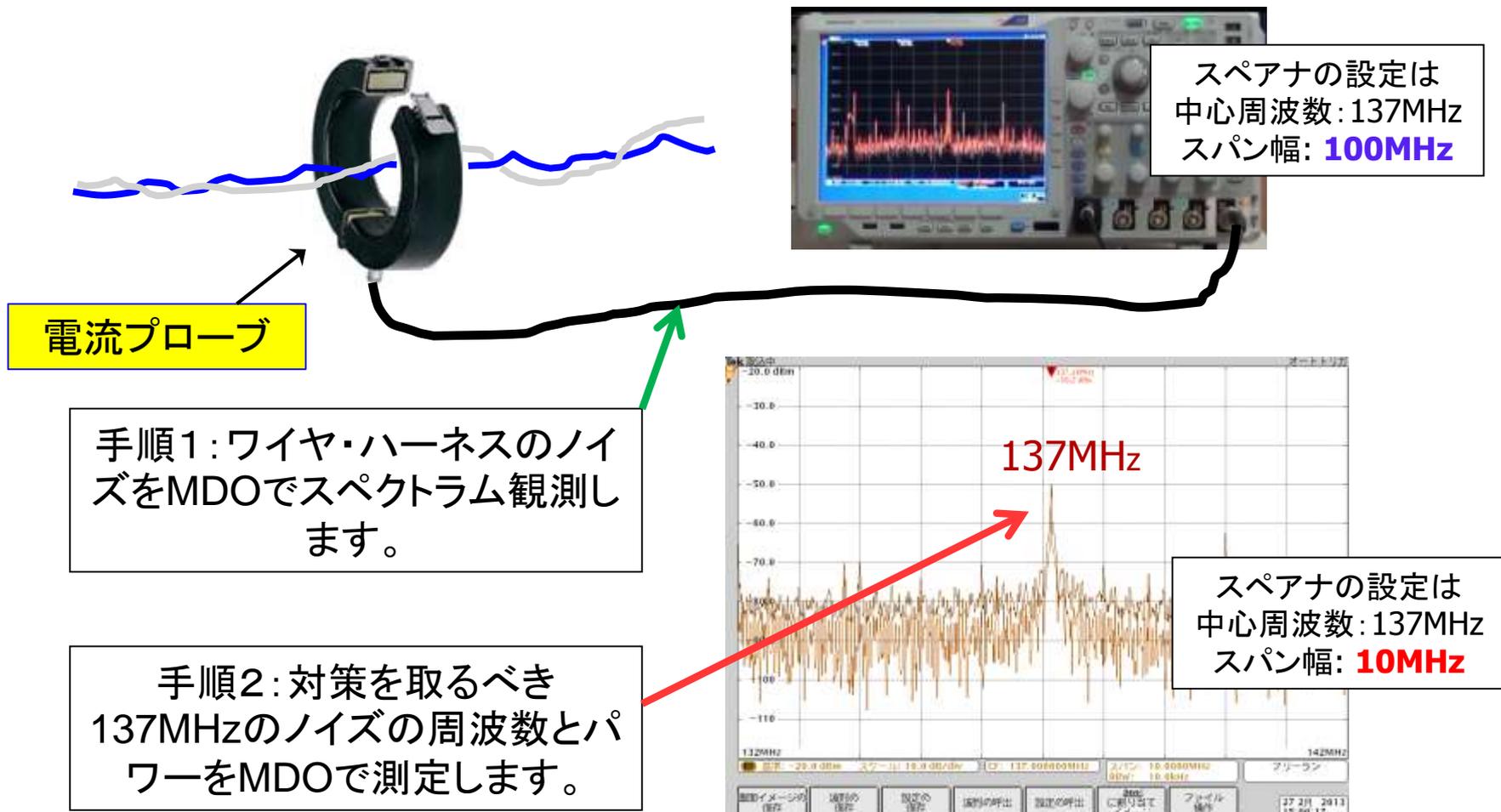
電流プローブ

出典:宮城県産業技術センター

伝導エミッション測定時の構成

狭帯域・変動ノイズ測定 自動車ワイヤ・ハーネスのノイズ対策事例

- (事例) ハーネスの137MHzの伝導ノイズ対策



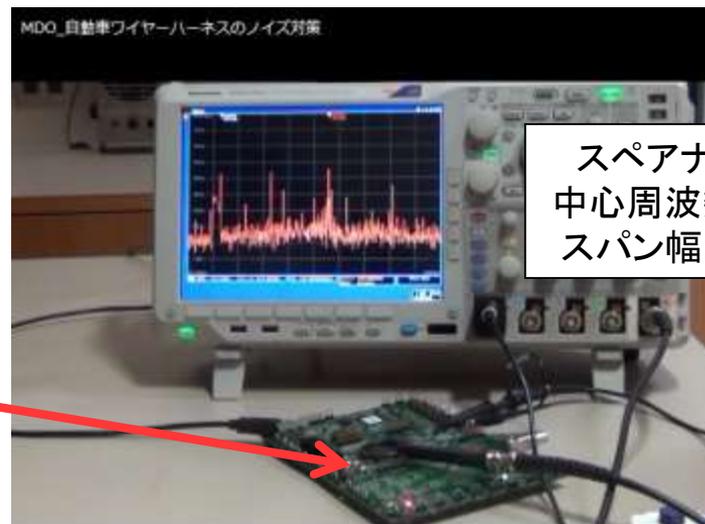
自動車ワイヤ・ハーネスのノイズ対策事例

ノイズ発生源探索用の
近接界プローブ

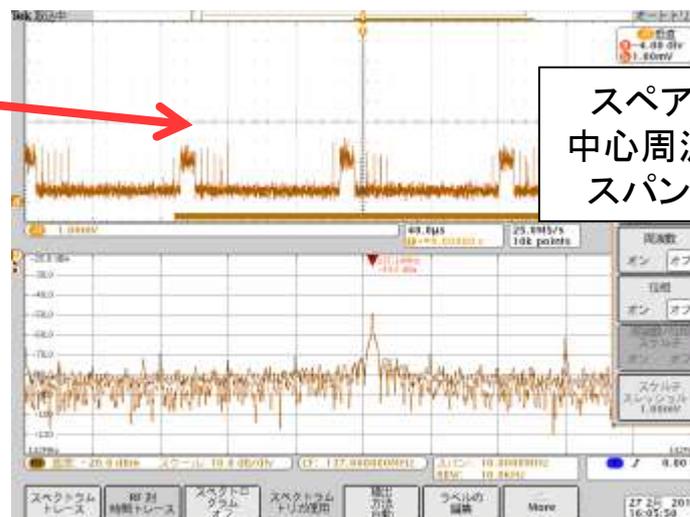


手順3: ハーネスが接続されている制御回路上のノイズを近接界プローブで探索してMDOで周波数観測します。

手順4: MDOスペアナのRF振幅対時間表示を使用して、対策を取るべき137MHzのパワーの時間変動を測定します。



スペアナの設定は
中心周波数: 137MHz
スパン幅: **100MHz**



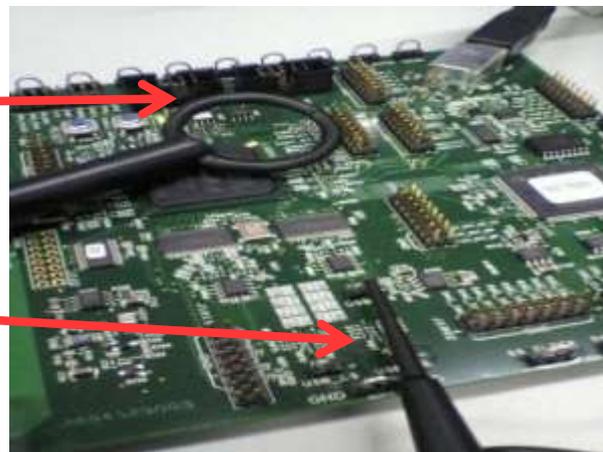
スペアナの設定は
中心周波数: 137MHz
スパン幅: **10MHz**

掃引型スペアナではゼロスパンの帯域幅をRBWで設定しますが、MDOはスパン幅 (10MHz) が時間軸の帯域幅になります。

自動車ワイヤ・ハーネスのノイズ対策事例

手順5: 137MHzの放射ノイズがどの部分から放出されているか探索します。

手順6: ノイズ発生源と推測される部品の電圧 vs 時間をMDOのオシロスコープで探索します。

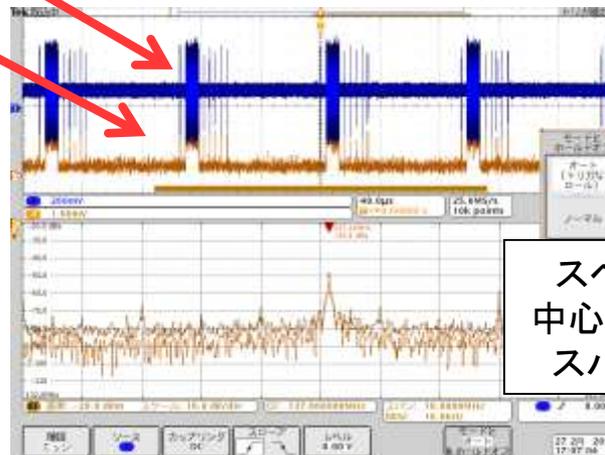


オシロスコープのch1測定

スペアナの振幅対時間測定

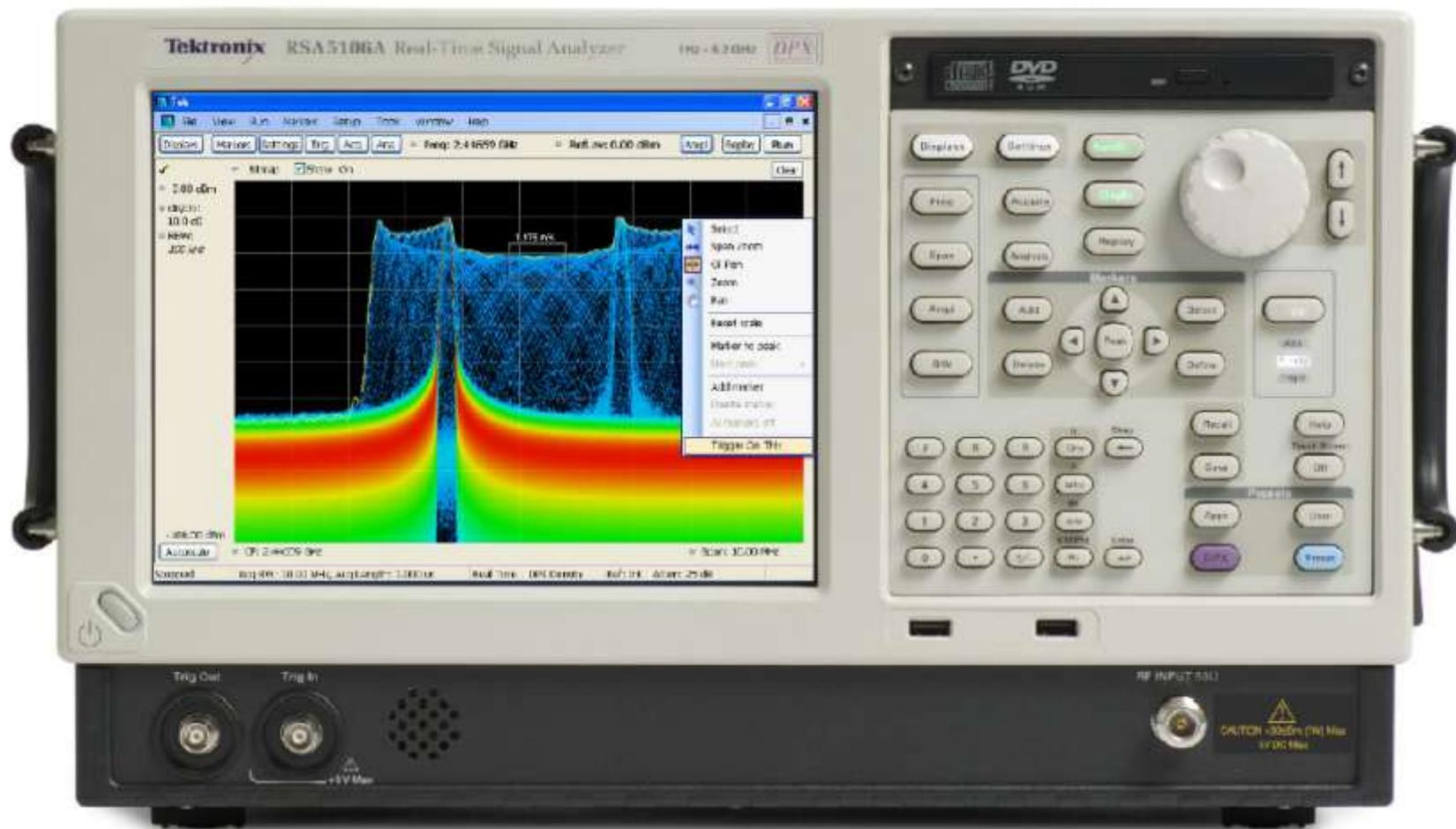
手順7: MDOでオシロとスペアの時間軸の挙動を同一タイミングで測定表示し原因特定します。

手順8: ノイズ源となる部品の近傍にパソコンを加える回路変更を行ないます。



スペアナの設定は
中心周波数: 137MHz
スパン幅: **10MHz**

Tektronixリアルタイム・シグナル・アナライザ RSA5000B/6000Bシリーズ



RFノイズの「可視化」

DPXライブ表示

Digital Phosphor Technology

- スwitching電源 間欠放射ノイズのDPX観測例

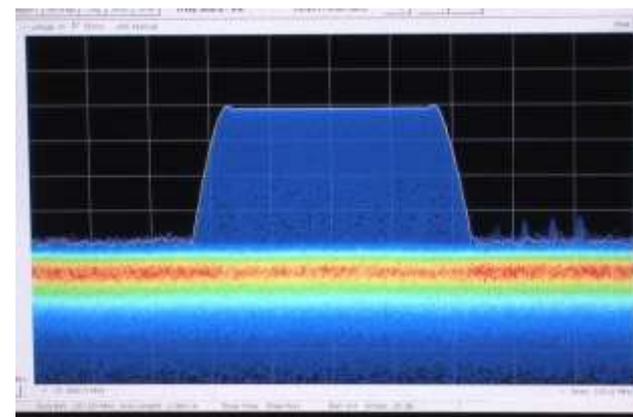
10MHz~120MHz スパン幅110MHz

色表示でスペクトラムの発生頻度を表す。

赤:高頻度 青:低頻度



FM波へ侵入する間欠ノイズ

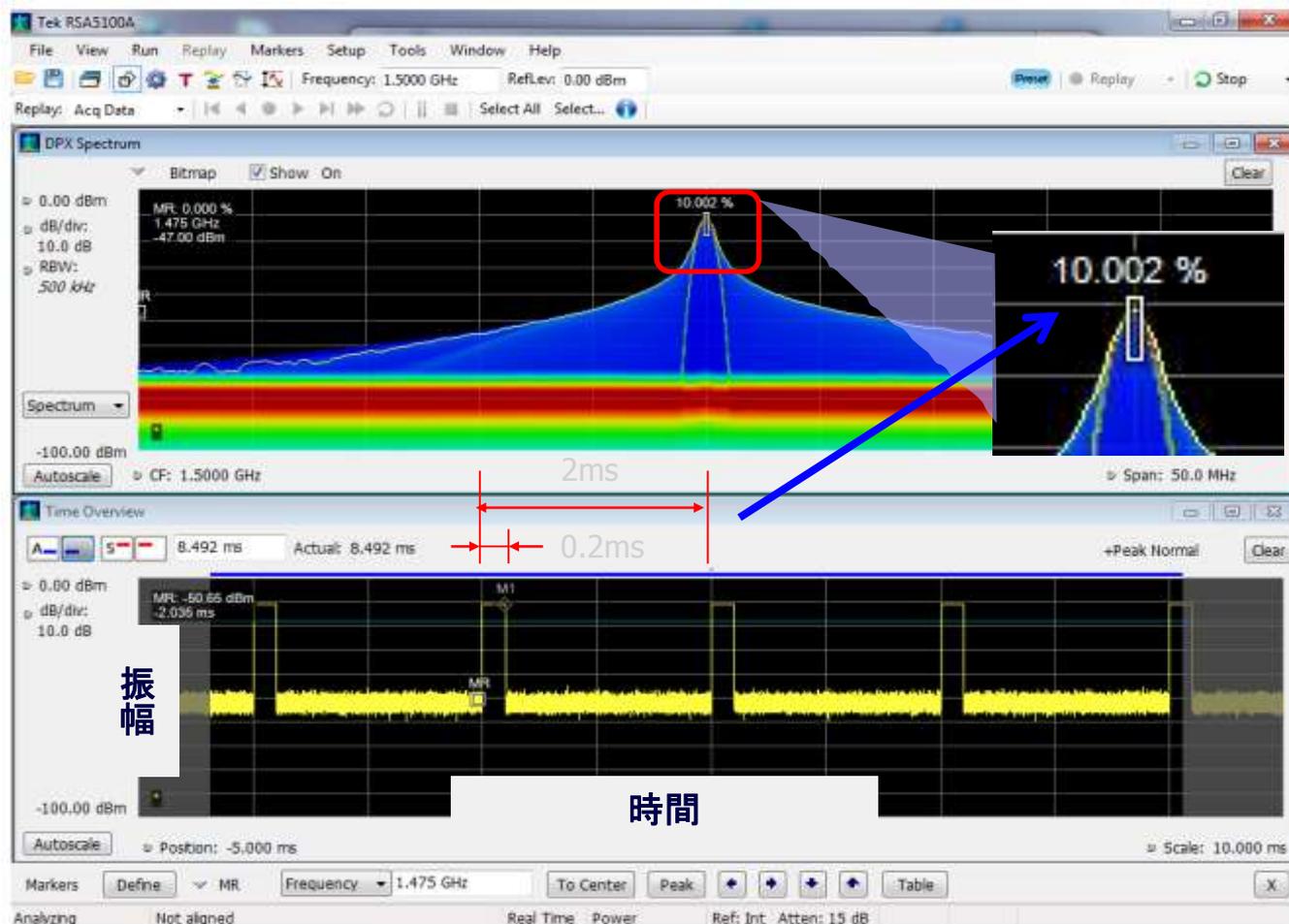


測定限界のノイズ成分が確認できる。

ノイズの電波密度%計測 (最大165MHz帯域幅)

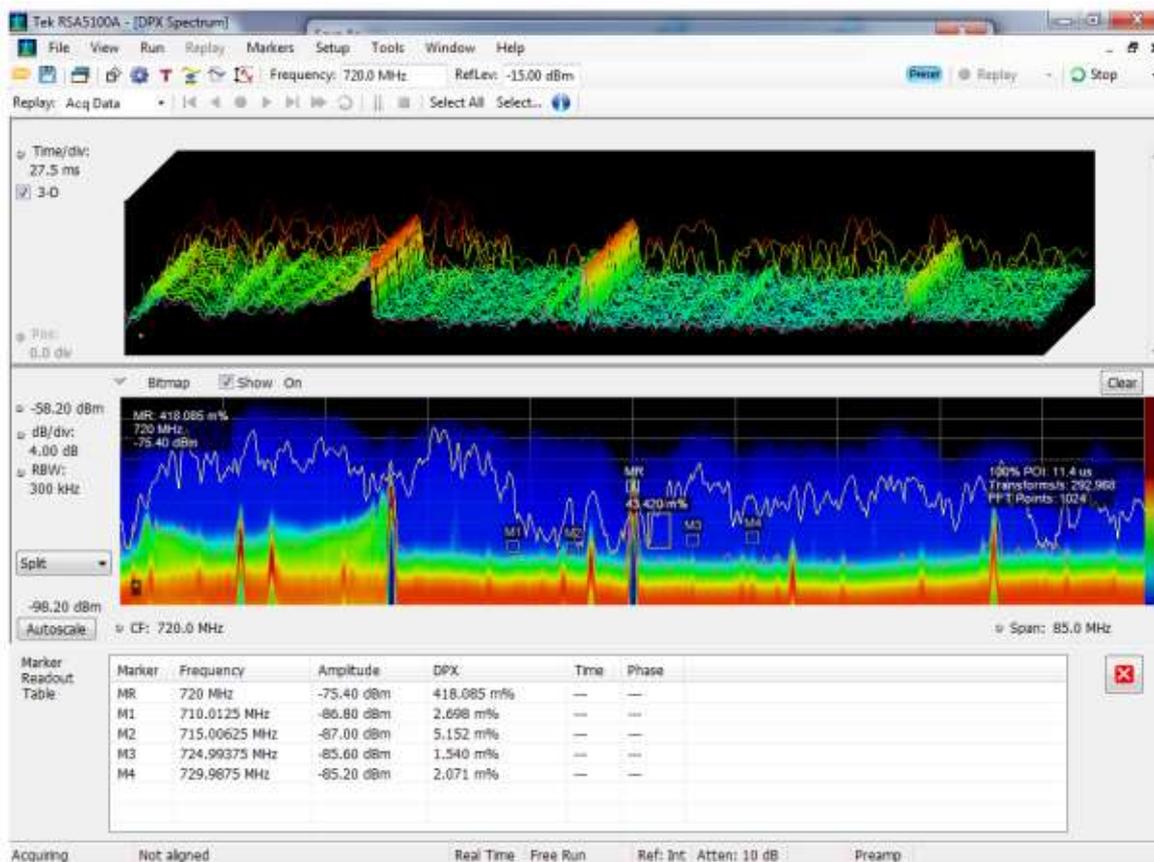
DPX表示の残光時間を「無限大」に設定

- 取りこぼしのない時間軸の存在確率%を計測(最大8時間)



DPXogram表示 (最大165MHz帯域幅)

- Max-Hold値をスペクトログラム化
- 取りこぼしのないスペクトログラム表示(最大4,444日間を記録)



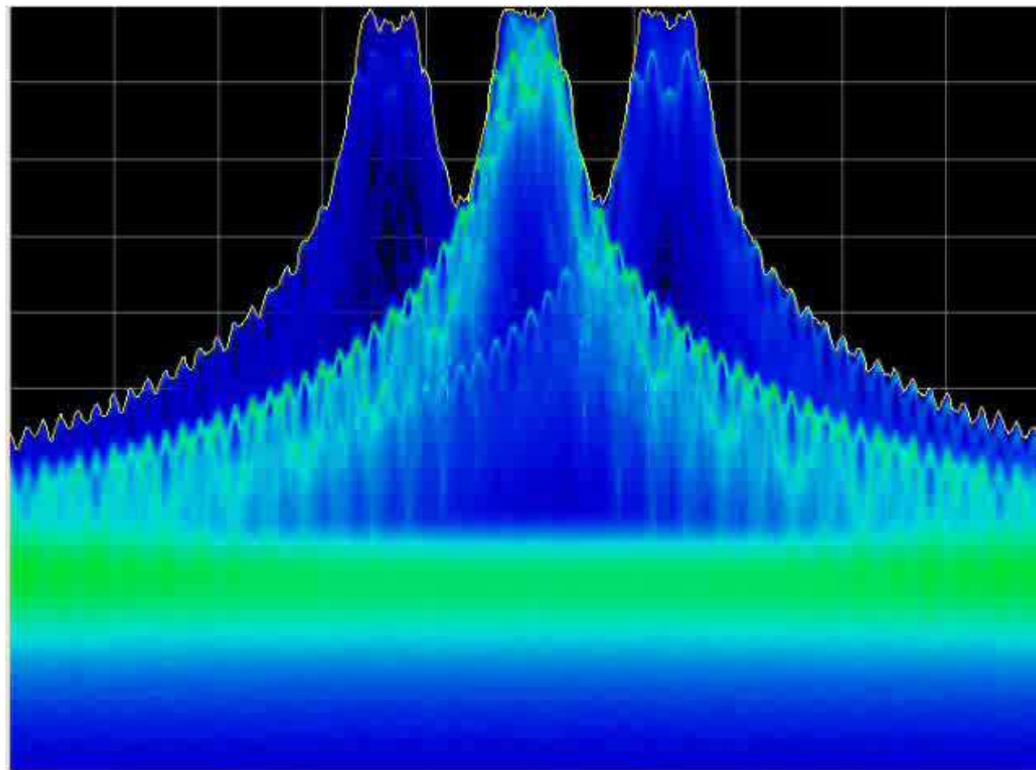
最大記録時間

Time Resolution	Trace Length: 801 pts Max: 60Ktraces
110 us	6.6 sec
220 us	13.2 sec
550 us	33 sec
1 ms	60 sec
5 ms	5 min
10 ms	10.0 min
100 ms	100 min
1 s	16.7 h
10	166.7 h
60	42 d
600	416.7 d
6400	4444.4 d

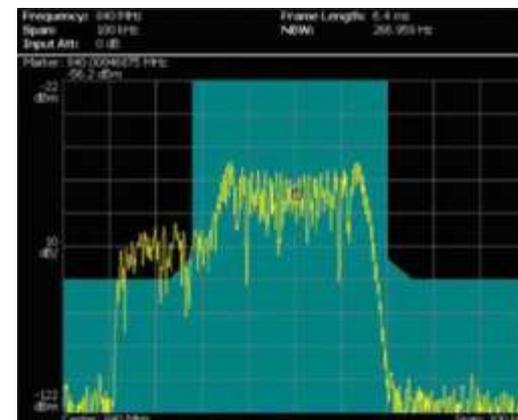
取りこぼしによるノイズの見過ごし、品質劣化の対策 革新的な DPX Density™ トリガ(動画)

* Tektronixパテント

- DPX表示上の電波密度(Density数値%)でトリガ
- 従来のアナライザでは不可能だった”**信号に埋もれたノイズ**”にトリガ
スペクトラムの外周ではなく、内側でトリガをかけられる。



従来の周波数マスク・トリガ



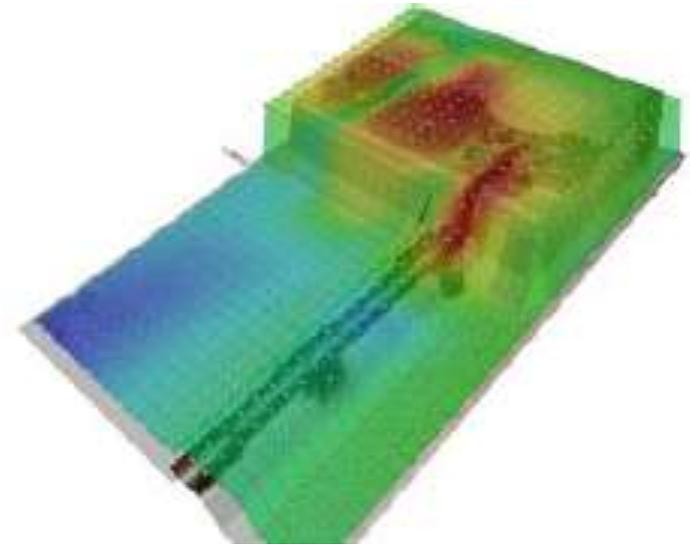
全自動ノイズ・スキャン・システム

- 6軸多関節ロボットによる全自動測定
- 0.02mmの位置決め精度
- SI・PI電磁界シミュレーションツール検証
- 3m法、10m法の近似計算ソフトウェア

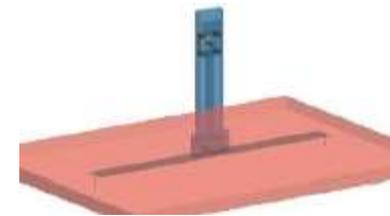


Tektronix RSA5100型

APREL社製 EM-ISight
国内連絡先: 林栄精器株式会社
<http://www.repic.co.jp/>



高精細 4Dプロット



10kHz~20GHz 広帯域探索プローブ
0.035mm厚のH(磁界)プローブ

EM-ISightの特徴

- 電波暗室/簡易シールド内での測定が可能
 - － 設計部門の近くで測定が可能
- 近傍界の測定結果から3m/10mサイトでの測定結果を予測
 - － 高精度の予測アルゴリズムを採用
- RSA5000/6000シリーズとの組み合わせによる高速スキャン
 - － 高分解能と測定時間の両立
- 10kHz～20GHzまで1本のプローブで対応
 - － 測定中のプローブ交換が不要
- 茨城県つくば市にデモ用の測定サイトを常設
 - － 実機を持ち込んで検証が可能

MDO4000Bシリーズ ミックスド・ドメイン・オシロスコープ ラインナップ

- 100MHz/350MHz/500MHz/1GHzの
アナログ周波数帯域
- 21チャンネルのシステム・
デバッグ
- スペアナ機能を統合
- アナログ、デジタル、RFの時間相関測定

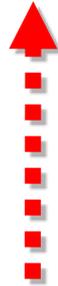
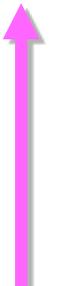
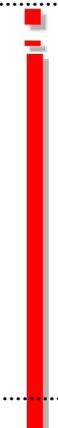
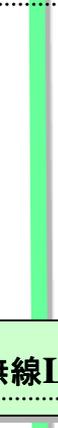


型名	アナログ チャンネル	アナログ 周波数帯域	デジタル チャンネル	RF チャンネル	RF周波数レンジ	価格 (税抜)
MDO4014B-3	4	100 MHz	16	1	9 kHz – 3 GHz	¥1,450,000
MDO4034B-3	4	350 MHz	16	1	9 kHz – 3 GHz	¥1,980,000
MDO4054B-3	4	500 MHz	16	1	9 kHz – 3 GHz	¥2,460,000
MDO4054B-6	4	500 MHz	16	1	9 kHz – 6 GHz	¥2,880,000
MDO4104B-3	4	1 GHz	16	1	9 kHz – 3 GHz	¥2,980,000
MDO4104B-6	4	1 GHz	16	1	9 kHz – 6 GHz	¥3,480,000

価格は2013年11月現在の価格です。

リアルタイム・スペクトラム解析技術を用いた 当社シグナル・アナライザー一覧

アプリケーション

<p>リアルタイム・シグナル・アナライザ RSA6100B型</p> <p>広帯域 DPX表示 (40 / 110MHz帯域解析)</p>	<p>RSA6106B型(6.2GHz) RSA6120B型(20GHz)</p> <p>RSA6114B型(14GHz)</p>  <p>878万円 958万円 998万円</p>	    <p>電波監視 SDR レーダー</p>
<p>リアルタイム・シグナル・アナライザ RSA5000B型</p> <p>(25/40/85/165MHz帯域解析)</p>	<p>RSA5115B型(15GHz) RSA5126B型(26.5GHz)</p> <p>RSA5103B型(3GHz) RSA5106B型(6.2GHz)</p>  <p>528万円 598万円 298万円 418万円</p>	    <p>ノイズ解析 電波干渉 PLL解析</p> <p>無線LAN</p>
<p>バッテリー内蔵 GPS内蔵 地図情報内蔵 可搬型</p> <p>フィールド・スペクトラム・アナライザ SA2500型、H500型</p> <p>(20MHz帯域解析)</p>	<p>SA2500型(6.2GHz) H500型(6.2GHz)</p>  <p>296万円 518万円</p>	    <p>RFID 近距離無線</p> <p>デジタル 携帯電話</p>

価格は2013年7月現在の価格です。

本テキストの無断複製・転載を禁じます。テクトロニクス/ケースレーインストルメンツ
Copyright © Tektronix, Keithley Instruments. All rights reserved.

www.tektronix.com/ja
www.keithley.jp/

 **Twitter** [@tektronix_jp](https://twitter.com/tektronix_jp)
 **Facebook** <http://www.facebook.com/tektronix.jp>

