B-3

最新のワイヤレス通信（IEEE802.11ac/ad）の測定課題と測定技術

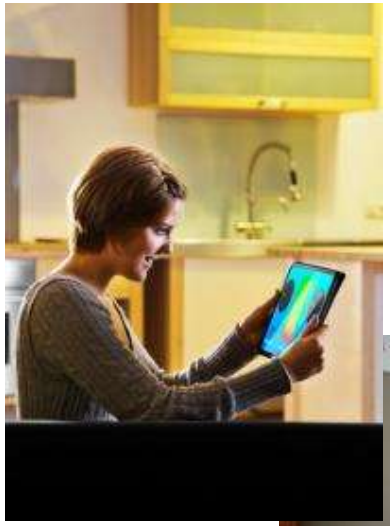
岡田 信孝

Tektronix®

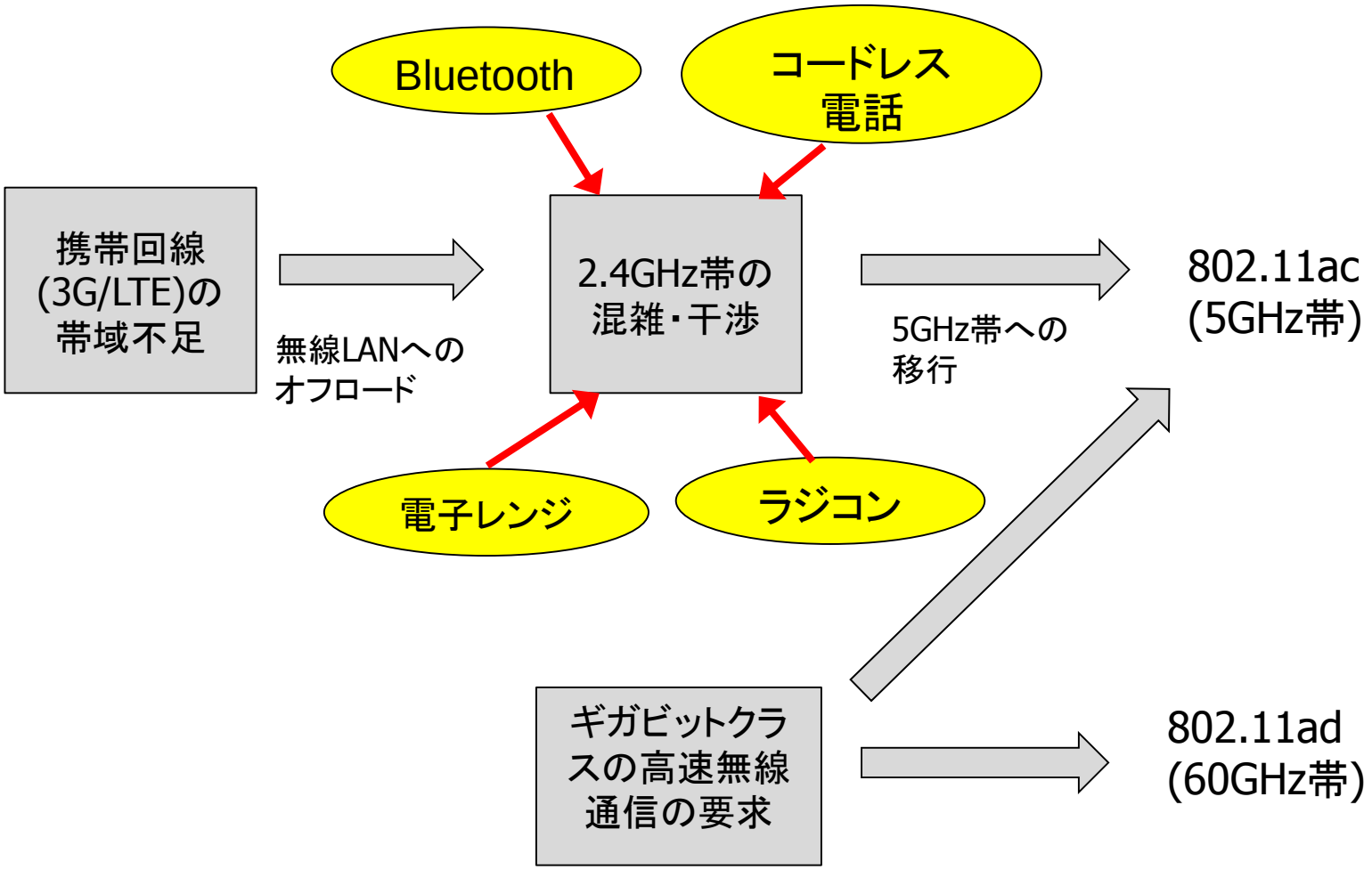
KEITHLEY
A Tektronix Company

普及が加速する次世代の無線LAN規格

- 2.4GHz帯無線LANが広く普及
- 今後、第5世代 WiFi、IEEE802.11ac（5GHz帯）及びIEEE802.11ad(60GHz帯)規格が普及する見込み
  - 携帯電話のトラヒック急増に伴い5GHz帯高速無線LAN通信網が本格的な普及
  - 家庭においても大容量の映像情報の高速通信への期待

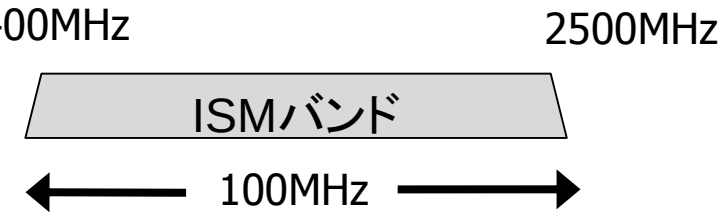


高速無線通信の要求

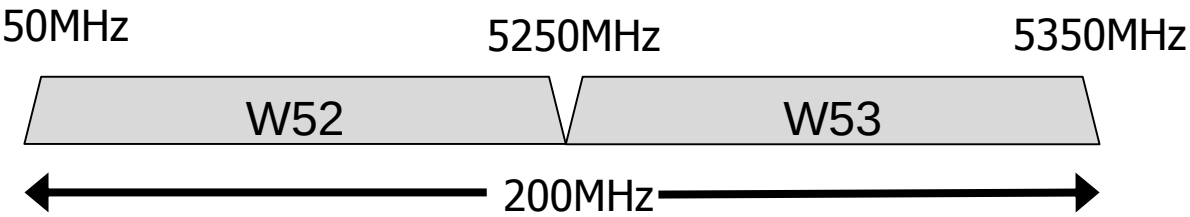

Bluetooth
コードレス
電話
携帯回線
(3G/LTE)の
帯域不足
無線LANへの
オフロード
2.4GHz帯の
混雑・干渉
5GHz帯への
移行
802.11ac
(5GHz帯)
電子レンジ
ラジコン
ギガビットクラ
スの高速無線
通信の要求
802.11ad
(60GHz帯)

2.4GHz帯と5GHz帯の周波数

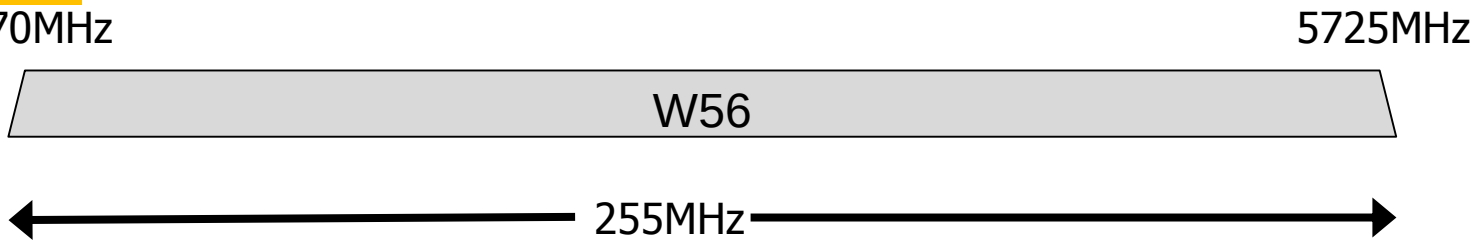
2.4GHz帯



5.2/5.3GHz帯



5.6GHz帯



2つの高速無線通信規格

- IEEE802.11ac
  - 5GHz帯を使用
  - 帯域は最大160MHz
  - 従来の無線LAN技術の拡張で高速通信に対応
  - 近距離通信(＜数100m)

- IEEE802.11ad
  - 60GHz帯を使用
  - 帯域は約2GHz
  - WiGig規格として規定されたが、WiFiアライアンスに統合
  - 超近距離通信(<10m)

無線LANの種類

802.11x	11b	11a	11g	11n	11ac	11ad
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	2.4/5GHz	5GHz	60GHz
最大帯域幅	20MHz	20MHz	20MHz	40MHz	160MHz	2.16GHz
変調方式	DSSS	OFDM	DSSS OFDM	OFDM	OFDM	DSSS OFDM
伝送レート (MIMO無)	11Mbps	54Mbps	54Mbps	150Mbps	867Mbps	6.8Gbps
MIMO	なし	なし	なし	4x4	8x8	なし
伝送レート (MIMO含)	11Mbps	54Mbps	54Mbps	600Mbps	6.9Gbps	6.8Gbps

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
MIMO: Multiple Input Multiple Output

IEEE802.11acの高速化技術

- IEEE802.11nからの変更
  - 伝送帯域　40MHz　→　160MHz　(4倍)
  - 変調方式　64QAM　→　256QAM　(1.33倍)
  - MIMO　4x4　→　8x8　(2倍)
  - 400ns　ショート・ガード・インターバル
- 現在販売されているのは第1世代(wave1)
  - 来年以降Wave2対応の製品がリリース予定

	Wave1　(2013)	Wave2　(2014～)
伝送速度	1.3Gbps	6.9Gbps
帯域	80MHz	160MHz or 80MHz+80MHz
MIMO	3x3	8x8
MU-MIMO	なし	あり

802.11acのMCS(Modulation Coding Scheme)

MCS	変調方式	コーディングレート	伝送レート(Mbps)			
			20MHz	40MHz	80MHz	160MHz
0	BPSK	1/2	7.2	15.0	32.5	65.0
1	QPSK	1/2	14.4	30.0	65.0	130.0
2	QPSK	3/4	21.7	45.0	97.5	195.0
3	16QAM	1/2	28.9	60.0	130.0	260.0
4	16QAM	3/4	43.3	90.0	195.0	390.0
5	64QAM	2/3	57.8	120.0	260.0	525.0
6	64QAM	3/4	65.0	135.0	292.5	585.0
7	64QAM	5/6	72.2	150.0	325.0	650.0
8	256QAM	3/4	86.7	180.0	390.0	780.0
9	256QAM	5/6	N/A	200.0	433.3	866.7

IEEE 802.11acの設計課題

- RF周波数の上昇
  - 2.4GHz帯と比較して5GHz帯はRF周波数が高いので設計が難しい
  - 2.4GHz帯と5GHz帯を共存する必要有り
  - アンテナ設計、アンテナの配置にも考慮が必要
- 帯域の拡大
  - 変調帯域が最大160MHzに
  - 80MHz＋80MHzの場合は5.2/5.3GHz帯と5.6GHz帯を同時に制御
- 変調方式が256QAM
  - ノイズ性能、位相特性、振幅特性など、高い波形品質が要求される

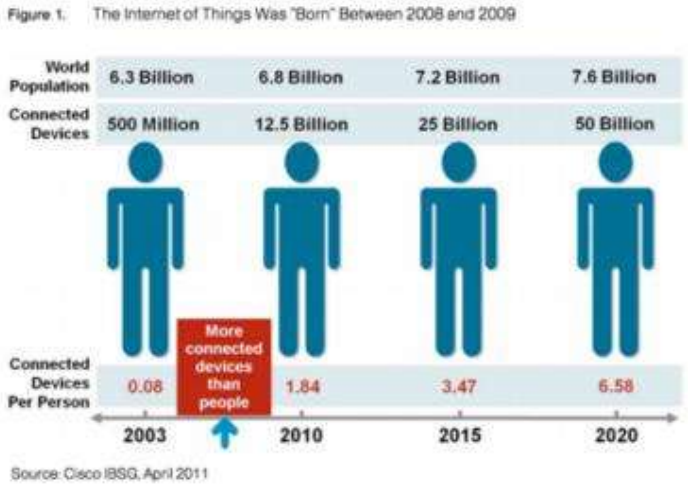
IEEE 802.11acの測定課題

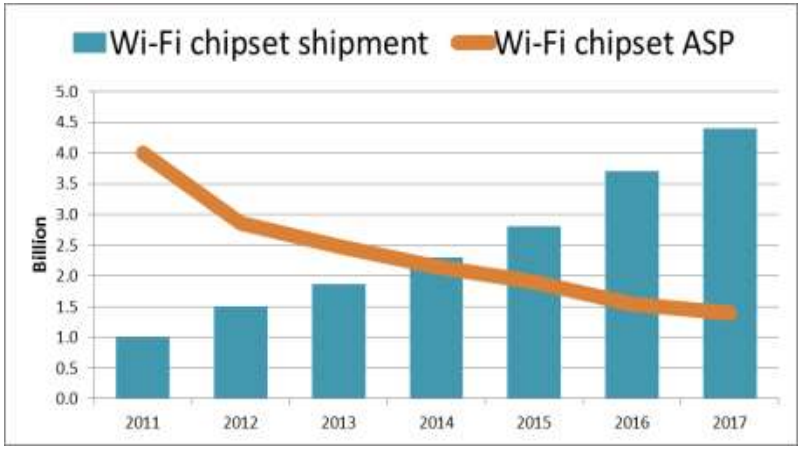
- スペクトラム・アナライザ(ベクトル・シグナル・アナライザ)
  - 要求される解析帯域幅が40MHzから160MHzに拡大
  - 広帯域解析に対応できるアナライザは高価
  - 広帯域解析のオプションも高価

- オシロスコープ
  - 周波数帯域が6GHz以上のオシロスコープであれば解析帯域は満足
  - ダイナミックレンジ、感度が不足
  - 6GHz以上の広帯域オシロスコープは高価

RF信号/マイクロ波測定のトレンド

- ワイヤレス・デバイス組込み機器の普及
  - WiFiは最も普及が進む無線規格の一つ
- 無線LANの高速化への対応と開発コストの低減が課題
  - 無線チップセットの低価格化により、無線通信モジュールの普及が加速
  - 無線LANの通信規格は広帯域化が進み、高度な測定が要求される。測定器のコストへの影響

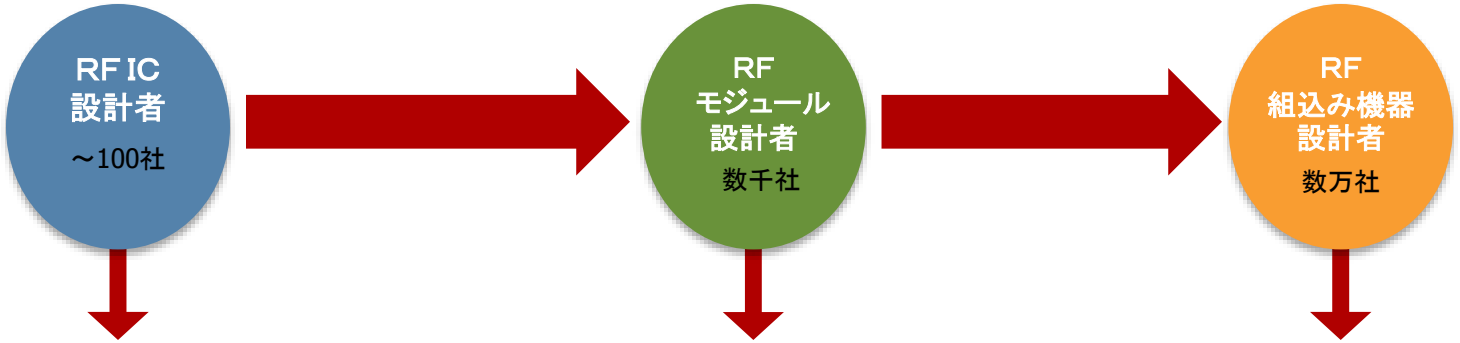




Tektronix

KEITHLEY
A Tektronix Company

WiFi 組込みのエコシステム
シリコンから組込み機器まで



WiFi 用チップセット の性能テスト

テスト時の課題:

- 高いRF測定性能を必要とするテスト

WiFiモジュールのテスト

テスト時の課題:

- デジタル・コントロール部とRF部の同期測定

組込み機器のWiFiの通信機能テスト

テスト時の課題:

- 迅速化かつ効果的なシステム・レベルのトラブル・シューティング

技術的にベストな RFパフォーマンスを要求

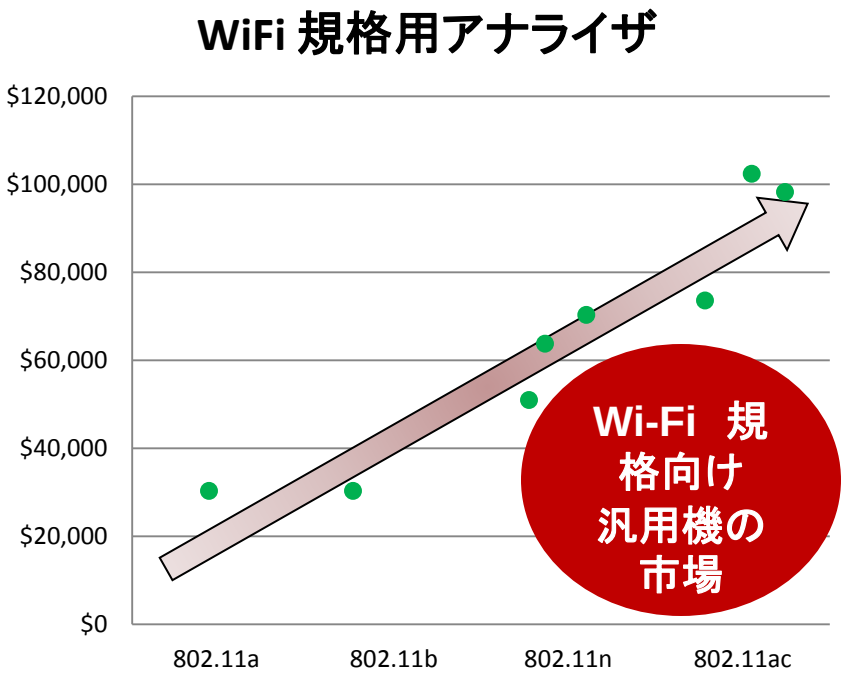
コスト・パフォーマンスに優れた システムレベルのデバッグ

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

市場におけるWiFiテスト・ソリューションとお客様のニーズのギャップ

- 機能検証がテストには不可欠
  - より多くの無線規格が1台の機器に搭載
  - GPSのような微弱電波への感度も確保しなくてはならない
- 広帯域化への対応
  - IEEE802.11a/b/g = 20 MHz
  - IEEE802.11n = ～ 40 MHz
  - IEEE802.11ac = ～ 160 MHz
- 必要とされる計測器の高性能化
  - より良いRFスペックが必要に
    - 広帯域、低位相ノイズ、広ダイナミックレンジ
  - それに伴い計測器のコストは高まる一方
- 市場では、WiFiテストのための広帯域化に対応した汎用ソリューションの需要が高まっている



Tektronix

KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronixの
組み込みデザイン・エンジニア向け
Wi-Fi 802.11acテスト・ソリューション

Tektronix

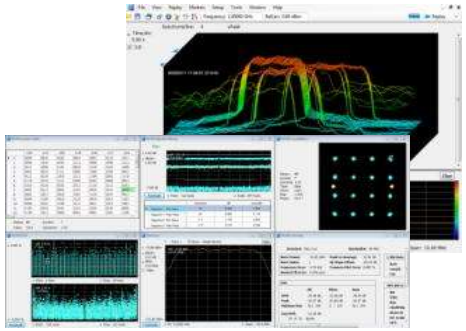
KEITHLEY
A Tektronix Company

IEEE802.11ac テスト・ソリューション

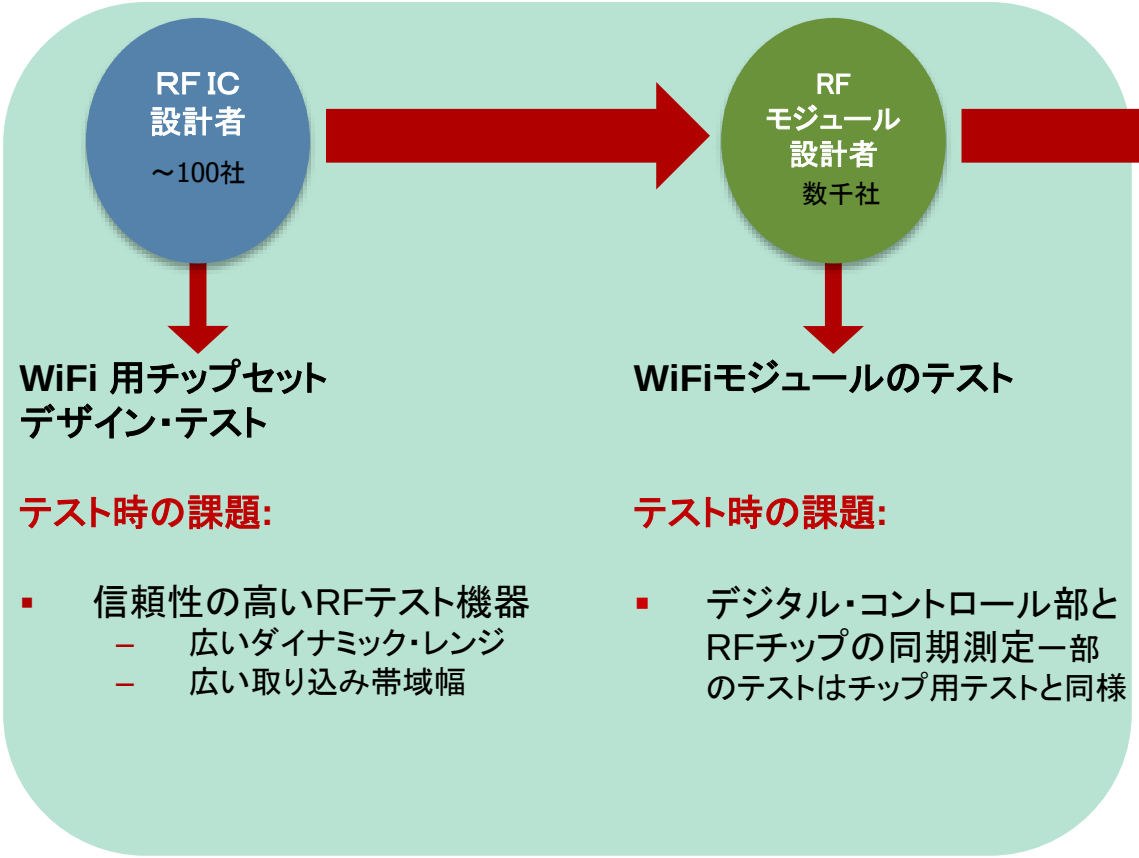
- RSA5000Bシリーズ リアルタイム・シグナル・アナライザ
  - 世界で最も広いリアルタイム取込帯域幅 をもつリアルタイム・シグナル・アナライザ

- MDO4000Bシリーズ ミックスド・ドメイン・オシロスコープ
  - Wi-Fi測定に対応した、業界で最も低コストな広帯域幅ソリューション

- SignalVu-PC ソフトウェア
  - 複雑なRF信号の綿密な解析が可能
  - Wi-Fi 802.11a/b/g/j/n/p/ac テストをサポート
  - スペクトラムアナライザ、オシロスコープの信号解析にも対応



WiFi 組込み設計のエコシステム
シリコンから組込み機器まで



WiFi 用チップセット
デザイン・テスト

テスト時の課題:

- 信頼性の高いRFテスト機器
  - 広いダイナミック・レンジ
  - 広い取り込み帯域幅

WiFiモジュールのテスト

テスト時の課題:

- デジタル・コントロール部とRFチップの同期測定ー部のテストはチップ用テストと同様

組込み機器のWiFi
通信機能のテスト

テスト時の課題:

- アンテナ・マッチング
- 高調波による放射雑音
- 電源のオン／オフ時の動作
- システム・レベルのトラブル・シューティング

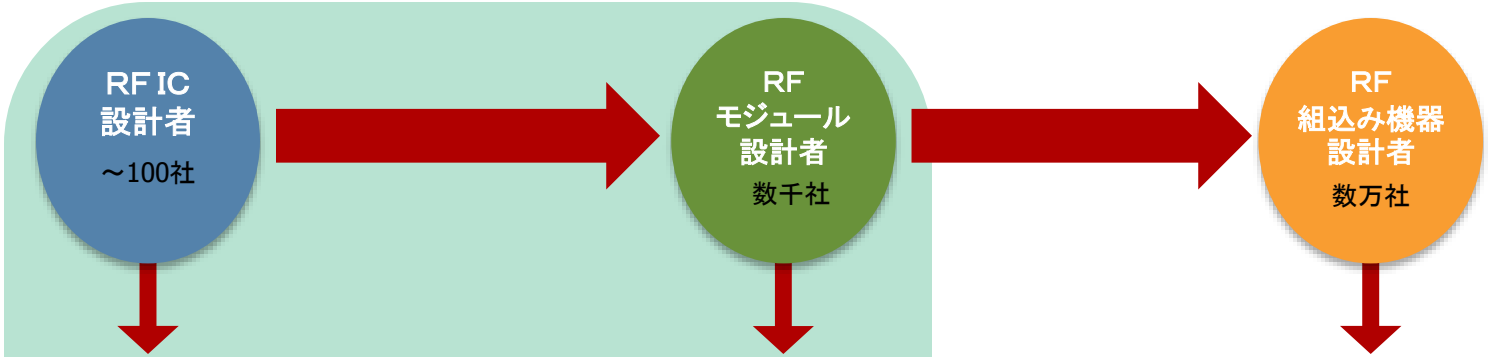
技術的にベストな
RFパフォーマンスを要求

コスト・パフォーマンスに優れた
システムレベルのデバッグ

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

WiFi用RF IC と モジュール設計における課題



新しいテスト・ソリューション

- ベストなRFパフォーマンスが要求される
  - 高いEVM測定確度
  - 広いSFDR
- 広いリアルタイム帯域幅
- 高いリアルタイム解析能力

RSA5000Bシリーズ

技術的にベストな
RFパフォーマンスを要求

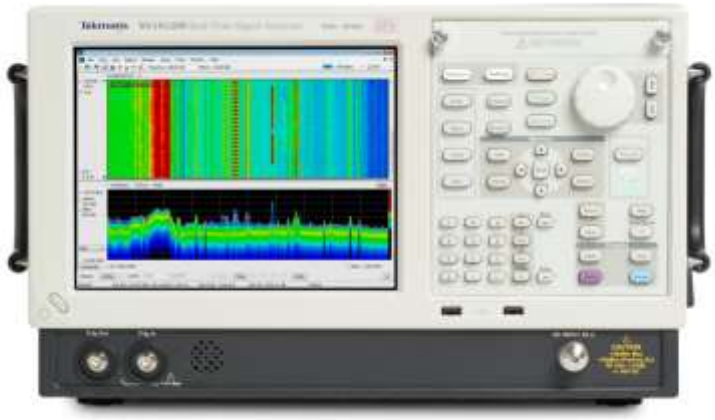
コスト・パフォーマンスに優れた
システムレベルのデバッグ

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

NEW! RSA5000B
パフォーマンス・リアルタイム・スペクトラム・アナライザ

- ***NEW!*** 165MHzの取込帯域幅（業界で最高水準を達成）
- ***NEW!*** Wi-Fi IEEE 802.11 a/b/g/j/n/p/ac測定をサポート
- 世界で最も進んだリアルタイム・スペクトラム測定性能
  - DPX掃引, 振り幅／周波数／位相 vs. 時間
    DPX、デンシティ（信号密度）・トリガ、タイム・クオリファイド・トリガを標準で装備
    - 業界で最も迅速に、最も高い確率でターゲットとする信号やノイズを捕捉可能
- ベクトル・シグナル・アナライザ機能をも搭載
- ハイパフォーマンスなリアルタイム・スペアナをミッド・パフォーマンスのスペアナの価格から利用可能
  - エントリーモデル：298万円



RSA5126Bの主な仕様:

周波数レンジ: 1 Hz ～ 26.5 GHz

EVM for 802.11ac 160 MHz: -42 dB*

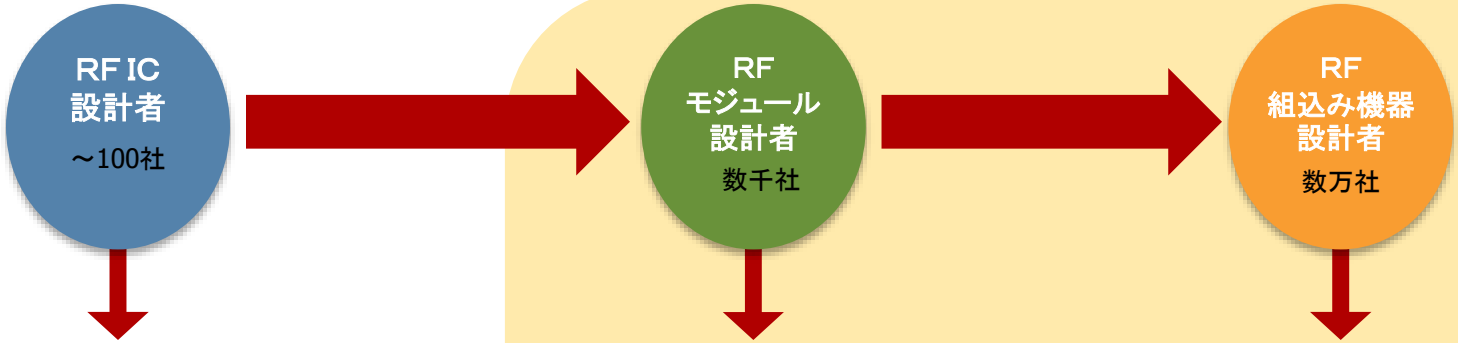
26.5 GHzまで対応の内蔵プリアンプ

最高165 MHzの取込帯域幅

** Preliminary, subject to change*

Tektronix Confidential

WiFi 組込み設計のエコシステム
シリコンから組込み機器まで



WiFi 無線LAN用チップセット
デザイン・テスト

テスト時の課題:

- 信頼性の高いRFテスト機器
  - 広いダイナミック・レンジ
  - 広い取り込み帯域幅

WiFiモジュールのテスト

テスト時の課題:

- デジタル・コントロール部と
  RFチップの同期測定

組込み機器のWiFi
通信機能のテスト

テスト時の課題:

- アンテナ・マッチング
- 高調波による放射雑音
- 電源のオン／オフ時の動作
- システム・レベルのトラブル・シューティング

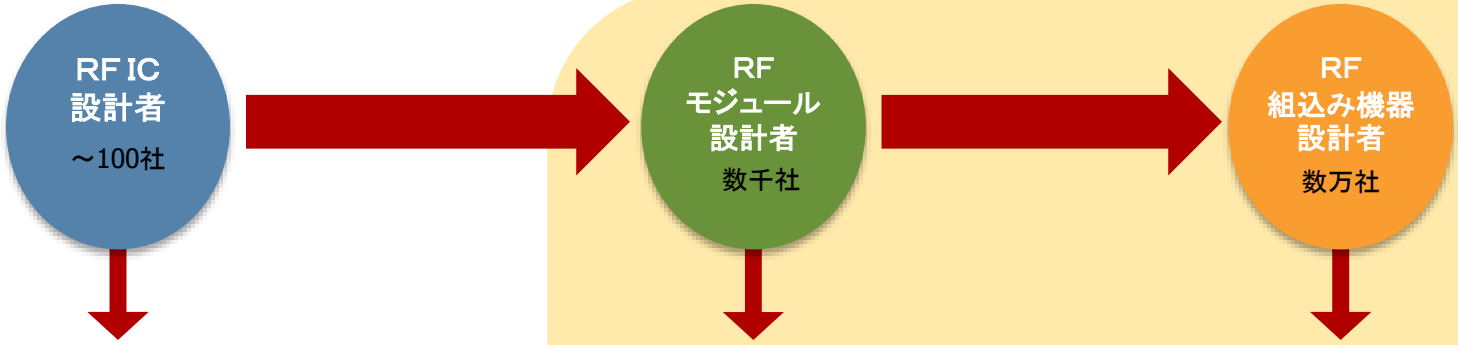
技術的にベストな
RFパフォーマンスを要求

コスト・パフォーマンスに優れた
システムレベルのデバッグ

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

WiFi 組込み回路＆モジュール・デザイン



新しいテスト・ソリューション

- 広帯域でのWiFi信号測定
- システム・レベルのトラブルシュート
  - マルチ・ドメイン間の時間相関解析
- オシロ・ロジアナ・スペアナ機能を1台に統合
  - 卓越した測定・解析効率と、コスト・パフォーマンスを実現

MDO4000Bシリーズ

技術的にベストな
RFパフォーマンスを要求

コスト・パフォーマンスに優れた
システムレベルのデバッグ

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

NEW! MDO4000Bシリーズ

- 世界で唯一のスペクトラム・アナライザ統合オシロスコープ
  - 1台でアナログ・デジタル・RF信号の時間相関測定が可能
- ***NEW!*** スペクトラム・アナライザの重要なパフォーマンスを強化
  - RF測定、WiFi測定のために、位相ノイズを大幅に改善
  - WiFi解析、その他のベクトル解析のために、高精度での位相振幅校正を実施*
- ***NEW!*** 業界で最も広い取込帯域幅(1GHz)をもつベクトル・シグナル・アナライザ**

MDO4000B シリーズの主な強化点

- **SFDRを5dB改善し、65 dBc（代表値）に**
- **位相ノイズを10 - 20 dB改善し、111dBc/Hz（10kHz時 代表値）に**
- **周波数レンジの下限が9kHzに**
- **RF取込時間が2倍の158 msに**
- **チャネル・レスポンスの改善**

*：広帯域での高精度の実現に必要
**：SignalVu-PCとのライブ・リンクで実現

NEW! MDO4000Bシリーズ - IEEE802.11 a/b/g/j/n/p/ac テストソリューション

"MDO4000BとSignalVu-PC のコンビネーションは、ワイヤレスLAN向け無線モジュールを採用するRF組込み機器の設計者に、最適なコストで、システム・レベルのデバック用測定器器を提供し、さらに、複数の機器による複雑な操作の習得に時間を無駄にせずに済むでしょう。"

– オクトスコープ社　プレジデントCTO
Fanny Mlinarsky氏,

- SignalVu-PCと組み合わせることで、MDO4000Bシリーズは、世界で唯一の1GHz取込帯域幅をもつベクトル・シグナル・アナライザに
  - 高速なIEEE802.11 Spectral Emission Mask (SEM) テスト、掃引の必要なし
  - SEMと変調の測定が同時に可能
  - Error Vector Magnitude (EVM) (256QAM, 160MHz) < -37dB
- IEEE802.11acテスト・ソリューションとしては、他のミッドレンジ・スペクトラム・アナライザを用いた場合の約半分のコストで可能
- SignalVu-PCとのLive link機能で、更に幅広い解析機能が使用可能に
  - SignalVu-PC ソフトウェアから、直接MDO4000Bをコントロール

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

IEEE 802.11ac解析ソフトウェア

Standard: 802.11ac **Bandwidth:** 160 MHz **Guard Interval:** Auto from SIG

Burst Power:	0.01 dBm	**Peak-to-Average:**	11.87 dB
Burst Index:	1	**IQ Origin Offset:**	-92.44 dB
Frequency Error:	-121.38 mHz	**Common Pilot Error:**	0.132 %
Symbol Clk Error:	0.002 ppm		

EVM

	All	Pilots	Data
RMS	-41.59 dB	-41.97 dB	-41.58 dB
Peak	-26.15 dB	-33.14 dB	-26.15 dB
Pk@Sym/Sub	35 / -250	77 / 231	35 / -250
Avg RMS	-41.59 dB		
2 of 20	Bursts		
Max RMS	-41.59 dB		

Burst Format: VHT **Guard Interval:** 1/8

	Symbols	EVM	Avg Power
L-STF	2	-46.83 dB	0.00 dBm
L-LTF	2	-42.02 dB	0.00 dBm
L-SIG	1	-42.27 dB	0.12 dBm
VHT-SIGA	2	-41.98 dB	-0.06 dBm
VHT-STF	1	-46.97 dB	0.00 dBm
VHT-LTF	1	-43.54 dB	-0.01 dBm
VHT-SIGB	1	-41.41 dB	0.00 dBm
Data	100	-41.59 dB	0.01 dBm

L-SIG Data **Parity:** Pass

Rate	13	**Reserved**	0
Length	282	**Parity**	1
Tail	0		

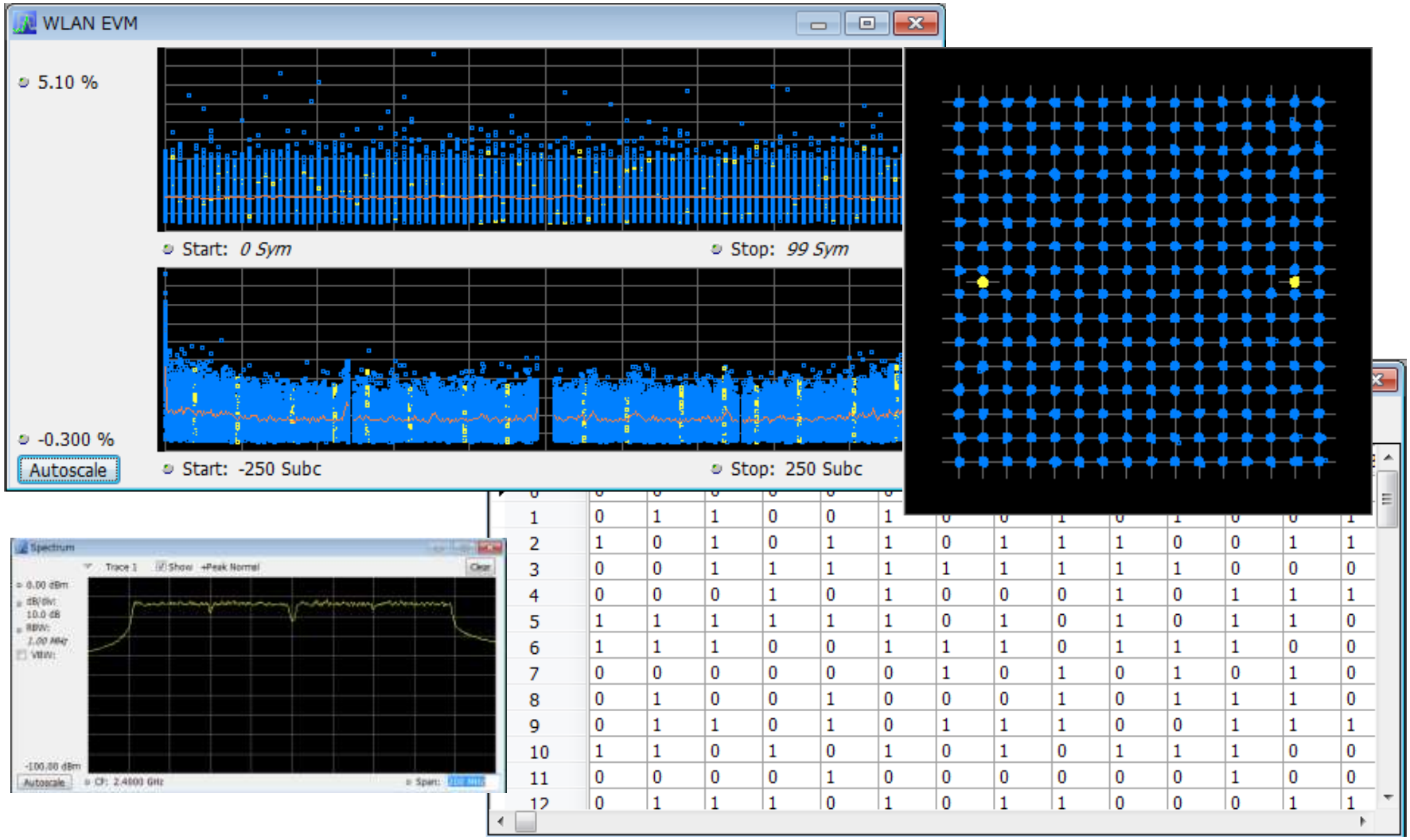
VHT-SIG A Data **CRC:** Pass

BW	3	**Reserved 1**	1
STBC	0	**Group ID**	0
Nsts	0	**Partial AID**	0
TXOPPSNA	1	**Reserved 2**	1
Short GI	1	**Short GI Dis**	0
FEC Coding	0	**LDPCEx**	0
MCS	9	**Beamform**	0
Reserved 3	1	**CRC**	8
Tail	0		

VHT-SIG B Data

Length	9750	**Reserved**	3
Tail	0		

IEEE 802.11ac解析例



1	0	1	1	0	0	1							
2	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0
6	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
8	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0
9	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
10	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1

TektronixのWi-Fiテスト・ソリューション

RFIC
設計者
～100社

RF
モジュール
設計者
数千社

RF
組込み機器
設計者
数万社

Wi-Fiコンポーネントのテスト

RSA5000Bシリーズ

Wi-Fiモジュールのテスト

MDO4000Bシリーズ
+
SignalVu-PC

Or

RSA5100Bシリーズ

最終製品のテスト MDO4000Bシリーズ
+
SignalVu-PC

技術的にベストな
RFパフォーマンスを要求

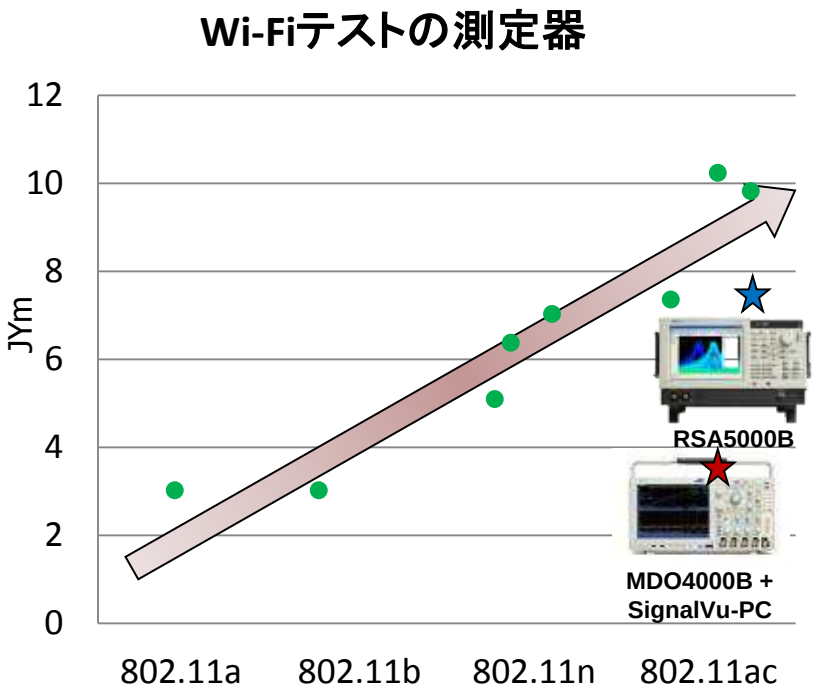
コスト・パフォーマンスに優れた
システムレベルのデバッグ

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

Wi-Fi対応のRF組込み設計のニーズに対応

- 機能検証テスト
  - IEEE802.11a/b/g/j/n/p/ac規格をサポート
- 規格の広帯域化（5GHz / 160MHz）
  - 1GHzの超広帯域取り込み幅（MDO4000Bシリーズ）
  - 160MHz以上のリアルタイム帯域幅（RSA5000Bシリーズ）
- 設計コストの削減
  - 業界で最もすぐれた費用対効果を実現
    - SignalVu-PCのライブリンク機能が、IEEE802.11無線LAN解析ソリューションを業界水準の半分程度のコストで提供
    - 超広帯域取り込み帯域幅 (1 GHz)のベクトル・シグナル・アナライザが実現
    - アナログ・デジタル・RFを1台で観測し時間相関解析を実現



Tektronix

KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix RF 信号解析用製品　ポートフォリオ

	リアルタイム・シグナル・アナライザ			MDO	オシロスコープ	SW
	RSA5000B	**RSA6000B**	**H500 / SA2500**	**MDO4000B**	**DPO/DSA/MSO & SignalVu**	**SignalVu-PC**
周波数レンジ	1 Hz ～ 26.5 GHz	9 kHz ～ 20 GHz	10 kHz ～ 6.2 GHz	9 kHz ～ 3 / 6 GHz	～33 GHz	～33 GHz
取込み帯域幅	～165 MHz	～110 MHz	20 MHz	～3 GHz	～33 GHz	～33 GHz
DPX ライブ表示	✓	✓	✓			
DPX 100% POI	5.8 ～ 2.8 µs	5.8 ～ 3.7 µs	125 ～ 500 µs	DPX（オシロスコープ）	DPX（オシロスコープ）	
DPX掃引、マルチ・ドメインDPX、DPXデンシティ・トリガ™	✓	✓				
周波数ドメイン・トリガ	✓	✓	DPX マスク			
1台でアナログ・デジタル・RF時間相関解析				✓		
Vector Signal 解析、パルス測定	✓	✓	✓	SignalVu-PC ライブリンク	✓	✓

MDO4000Bシリーズ と SignalVu-PC
製品ラインナップ

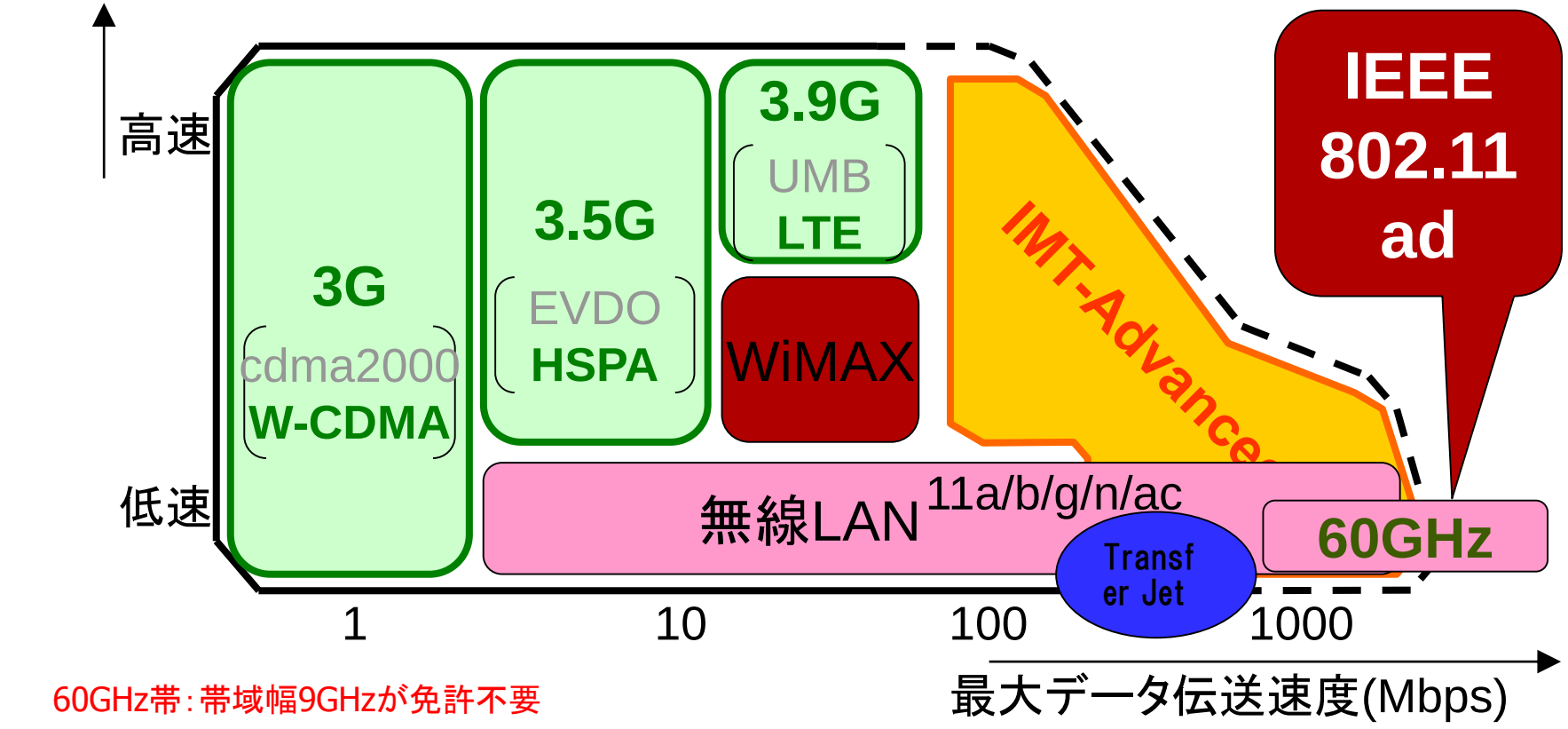
型名	アナログ チャンネル	アナログ 帯域幅	デジタル チャンネル	RF チャンネル	RF 周波数幅
MDO4014B-3	4	100 MHz	16	1	9 kHz – 3 GHz
MDO4034B-3	4	350 MHz	16	1	9 kHz – 3 GHz
MDO4054B-3	4	500 MHz	16	1	9 kHz – 3 GHz
MDO4054B-6	4	500 MHz	16	1	9 kHz – 6 GHz
MDO4104B-3	4	1 GHz	16	1	9 kHz – 3 GHz
MDO4104B-6	4	1 GHz	16	1	9 kHz – 6 GHz

オプション名	概要	構成
SignalVu-PC-SVE	ベクトル・シグナル解析ソフトウェア	
SignalVu-PC-SVE option SV23	IEEE802.11a/b/g 測定用アプリケーション・ソフト	
SignalVu-PC-SVE option SV24	IEEE802.11n測定用アプリケーション・ソフト	（option SV23 が別途必要）
SignalVu-PC-SVE option SV25	IEEE802.11ac測定用アプリケーション・ソフト	（option SV24 が別途必要）
SignalVu-PC-SVE option CON	MDO4000B用SignalVu-PC ライブ・リンク	

IEEE802.11ad規格と評価方法

高速無線システムのトレンド

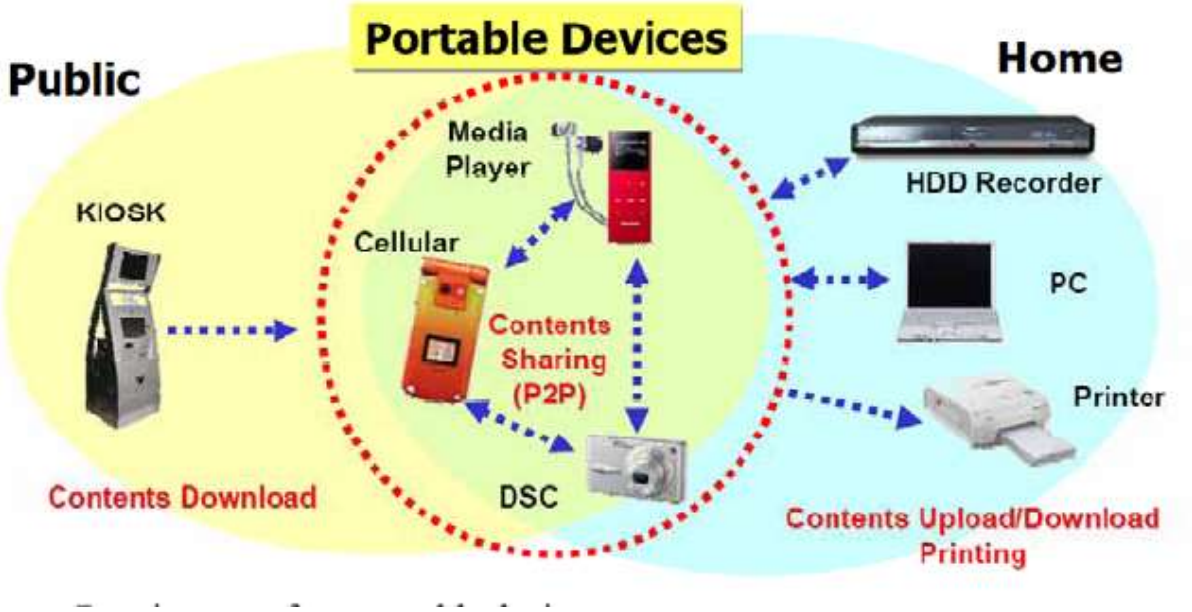
- Gb/s超の無線通信： 未利用周波数帯域の有効利用
  広帯域を活用する（ミリ波）→IEEE 802.11ad



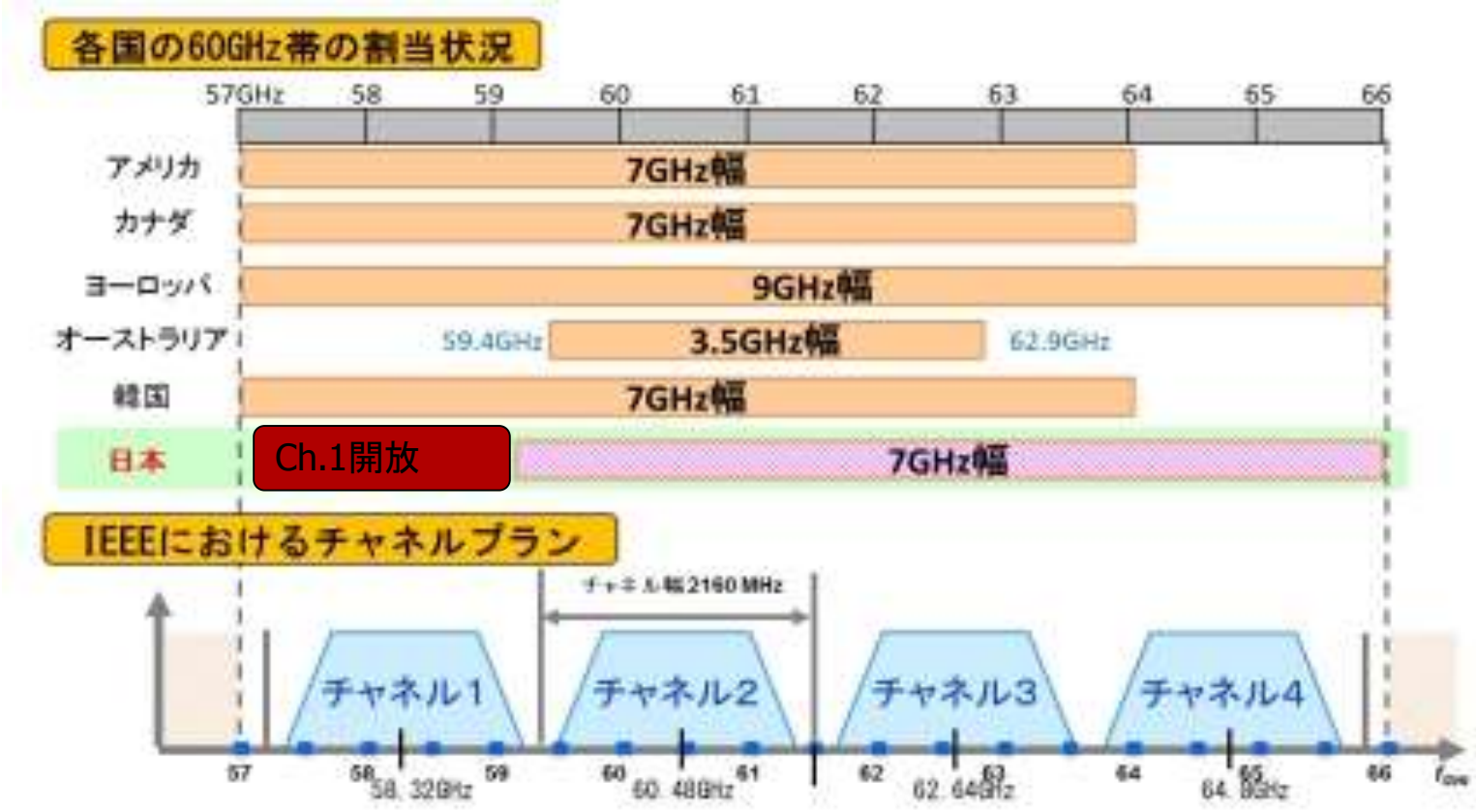
60GHz帯：帯域幅9GHzが免許不要

ミリ波通信　応用例

- 近距離限定(～10m)
- 広帯域利用(60GHz帯に7～9GHz幅のUnlicensed band)
- 数Gb/sの超高速伝送を実現



60GHz帯の割り当て状況



15.3c、11ad、WiHD、ECMAなどで共通化
国内でもCh.1が開放

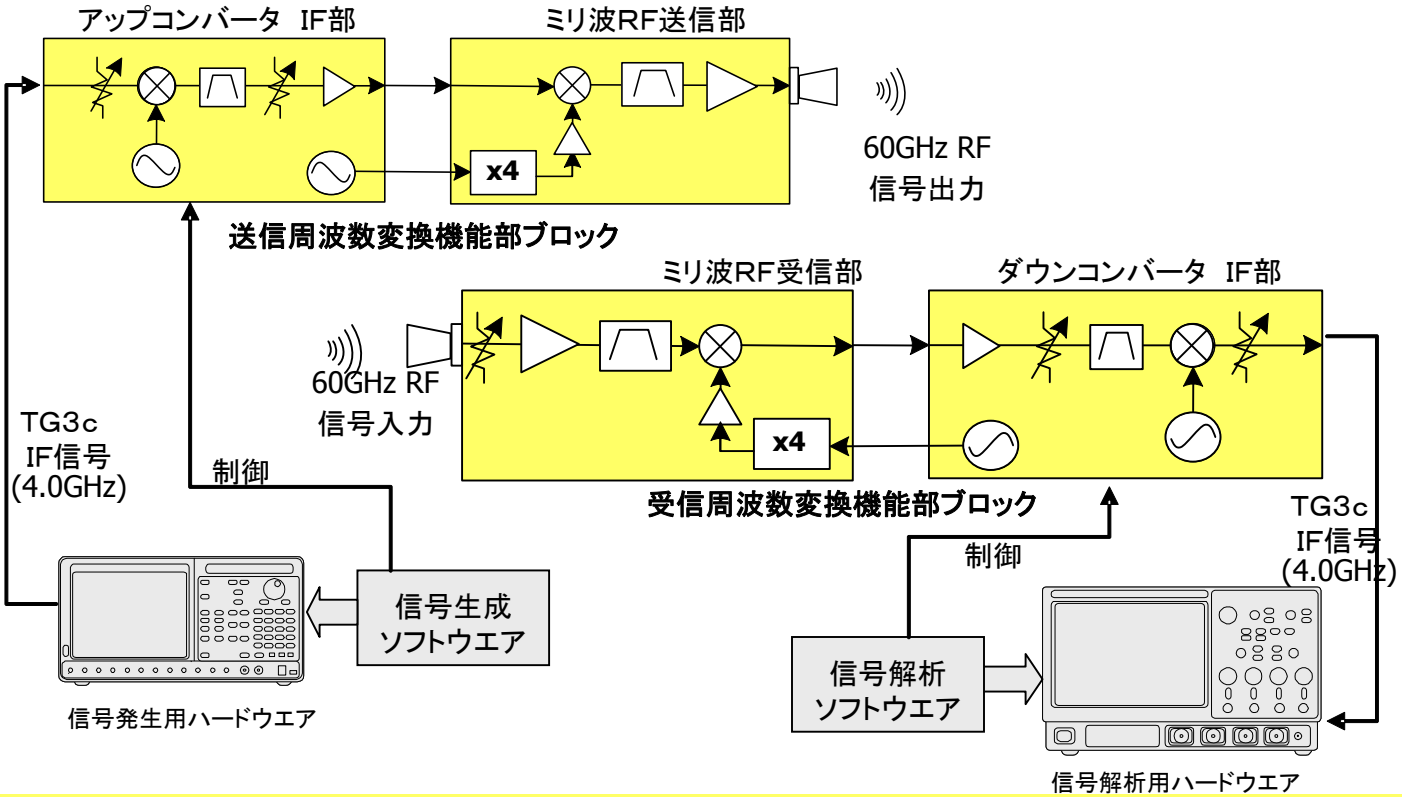
IEEE 802.11ad MCS(Modulation Coding Scheme)の一例

MCS Index	Modulation	NCBPS	Repetition	Code Rate	Data Rate (Mbps)
1	π/2-BPSK	1	2	1/2	385
2	π/2-BPSK	1	1	1/2	770
3	π/2-BPSK	1	1	5/8	962.5
4	π/2-BPSK	1	1	3/4	1155
5	π/2-BPSK	1	1	13/16	1251.25
6	π/2-QPSK	2	1	1/2	1540
7	π/2-QPSK	2	1	5/8	1925
8	π/2-QPSK	2	1	3/4	2310
9	π/2-QPSK	2	1	13/16	2502.5
10	π/2-16QAM	4	1	1/2	3080
11	π/2-16QAM	4	1	5/8	3850
12	π/2-16QAM	4	1	3/4	4620

NCPBS：Coded Bits Per Symbol

RF/PHY評価装置(RFコンバータ)

試験信号生成・解析用 ミリ波RFシステム

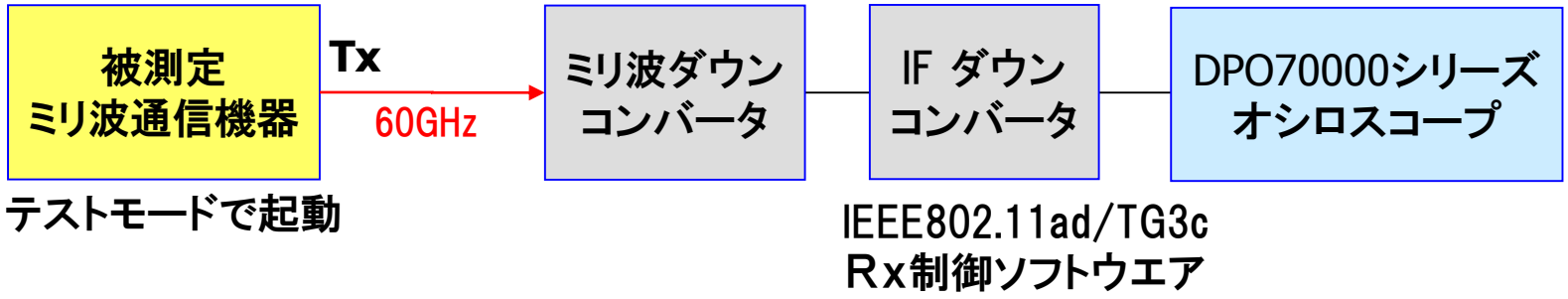


・任意波形発生装置(AWG)からの高品質な広帯域変調信号を利用可能なダブルIF方式を選択
・新規デバイスやコンポーネントのキャラクタライゼーションのみでなくコンフォーマンステスト用標準機として使用可能

Tektronix

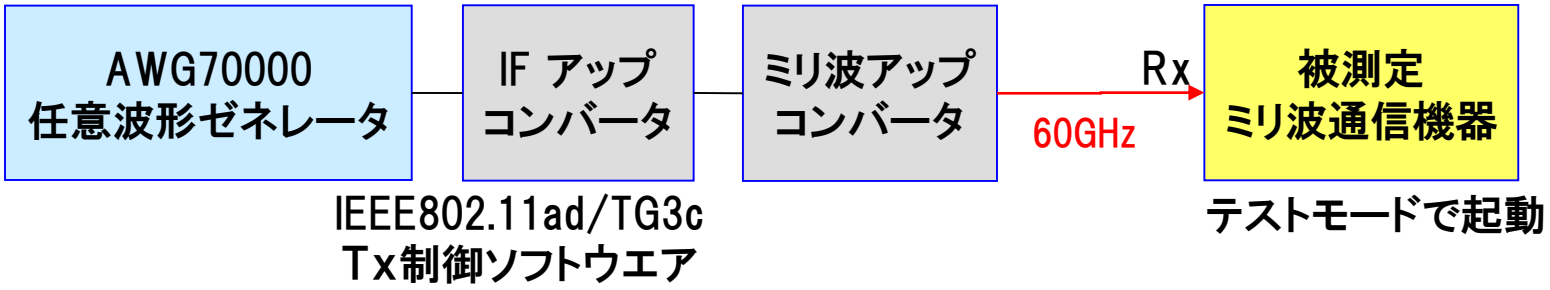
KEITHLEY
A Tektronix Company

ミリ波通信機器の送信性能評価 (Txテスト)



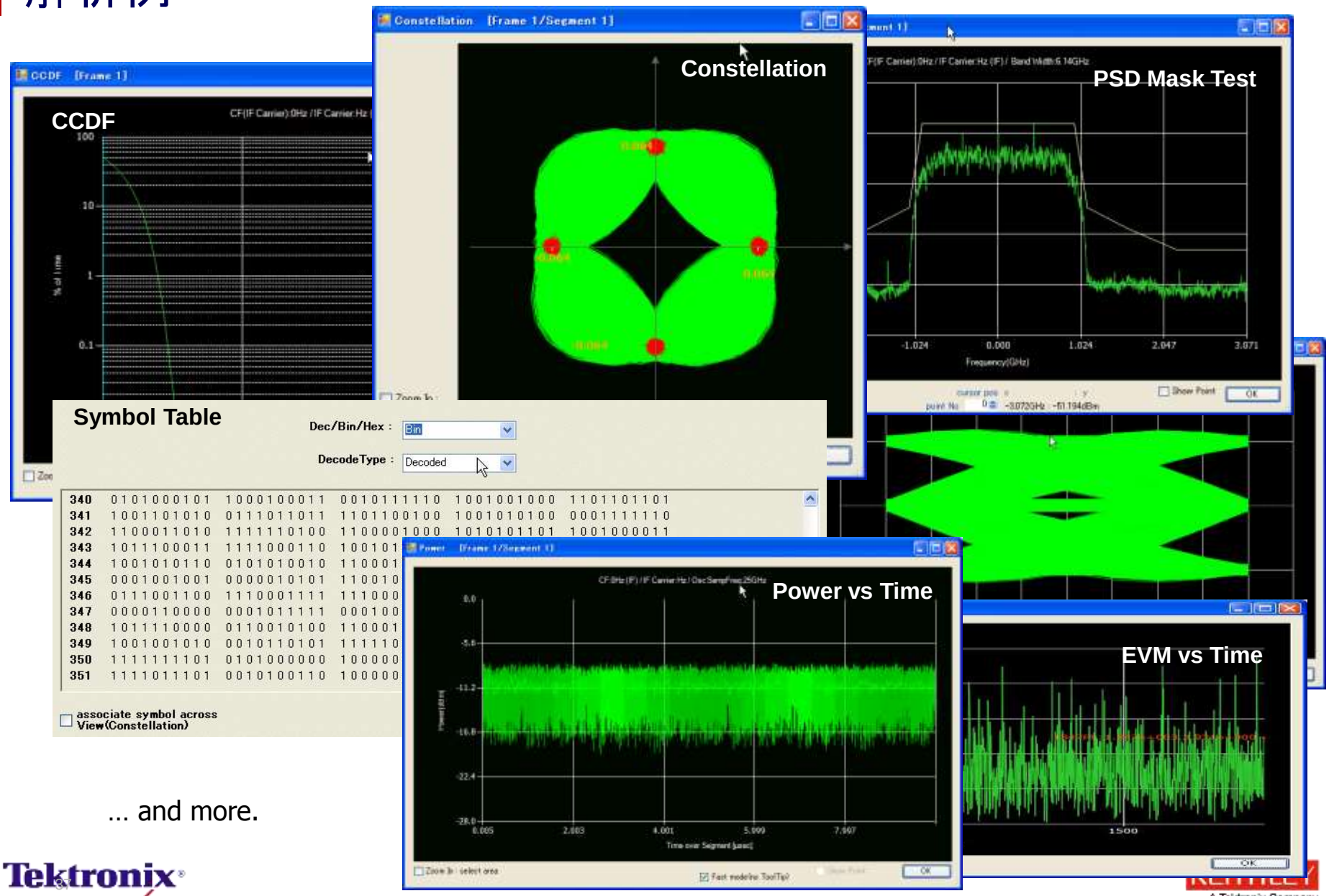
- ダウンコンバータおよびオシロスコープをRx制御ソフトウエアで駆動する
- 規格で定められる受信性能のテストは次の2種類であるが項目は多数
  - 規格で定められた PSD mask, EVM値, タイミング関連の確認
  - パケットフォーマット／シンタックスの規格適合性の確認
- IFダウンコンバータに付属するステップ・アッテネータで 1dB ステップで最大 50dB まで減衰量を可変(オシロスコープ入力の感度調整)

ミリ波通信機器の受信性能評価（Rxテスト）



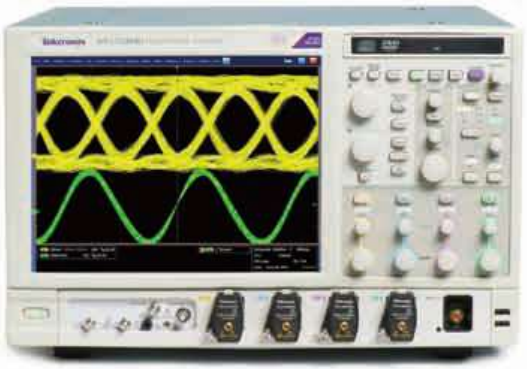
- AWGおよびアップコンバータをTx制御ソフトウエアで駆動する
- 規格で定められている受信性能のテストは次の3種類
  - 受信最小感度の測定
  - 受信入力レベル最大値の測定
  - パケット／フレームの受信能力
- 上記の最小感度と受信最大入力レベルの測定は、規格に定められたBER／PER／FER値を満足する範囲を測定する。
- ステップ・アッテネータで減衰比を可変しながら測定

解析例


CCDF
Constellation
PSD Mask Test
Symbol Table
Dec/Bin/Hex :
Bin
DecodeType :
Decoded
associate symbol across View(Constellation)
Power vs Time
EVM vs Time

... and more.

テクトロニクスの802.11ad測定ソリューション

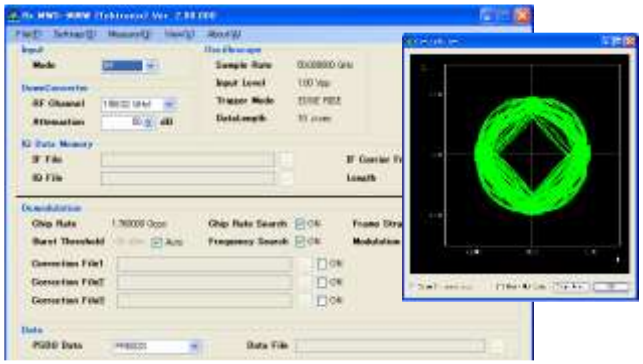


DPO70000シリーズ
リアルタイム・オシロスコープ

コンバータ(IF部)

コンバータ(RF部)

AWG7000C/70000Aシリーズ
任意信号発生器



解析ソフトウェア

注:コンバータ及び解析ソフトウェアは
標準品ではありません。
詳細は別途お問い合わせください。

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

ご清聴いただきありがとうございました

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

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

Twitter @tektronix_jp
Facebook http://www.facebook.com/tektronix.jp

Tektronix® KEITHLEY A Tektronix Company