



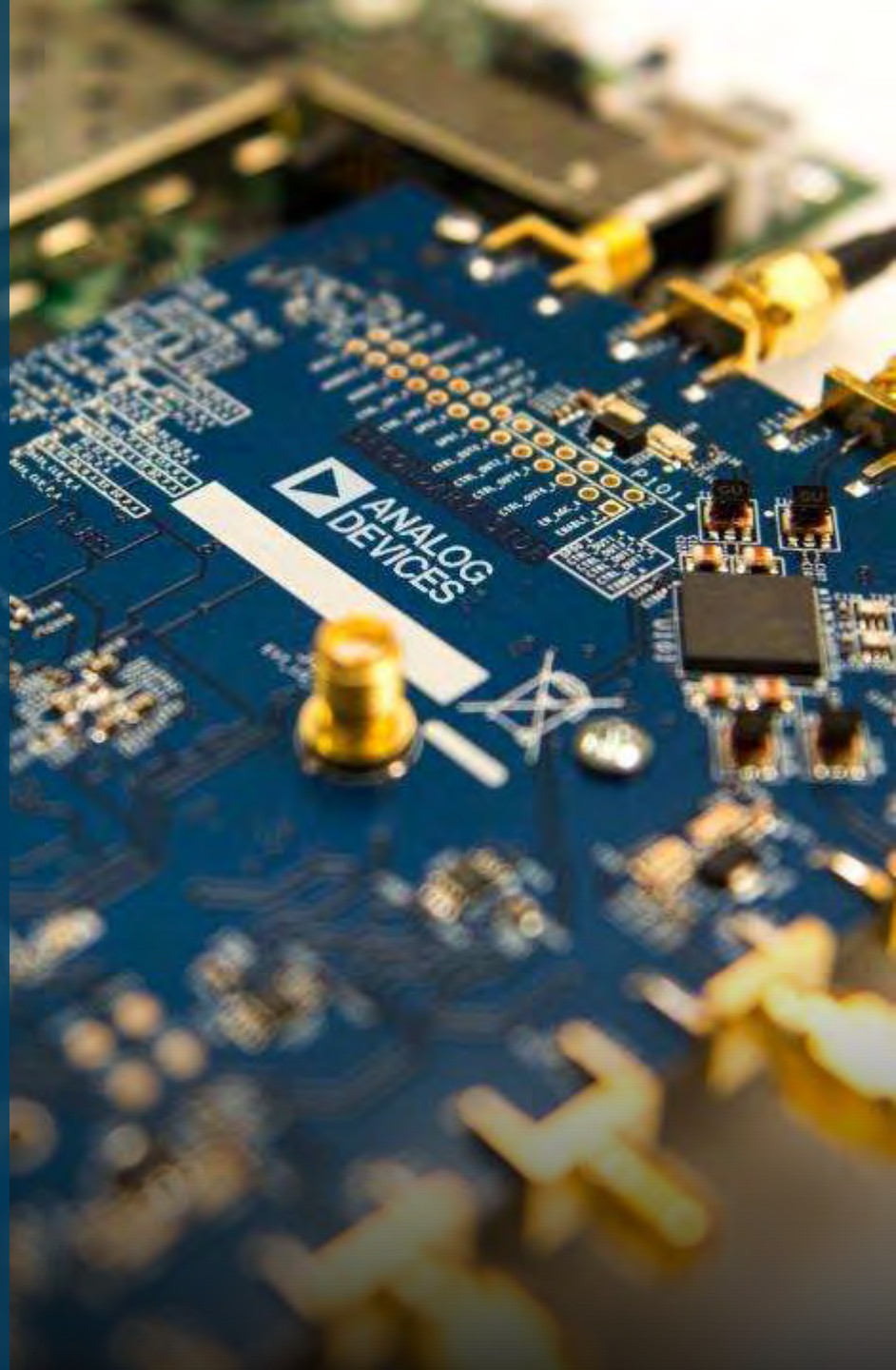
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

24GHzレーダーチップセット 使いこなし ～先進のMIMOレーダー技術への応用～

サクラテック株式会社

代表取締役 酒井 文則

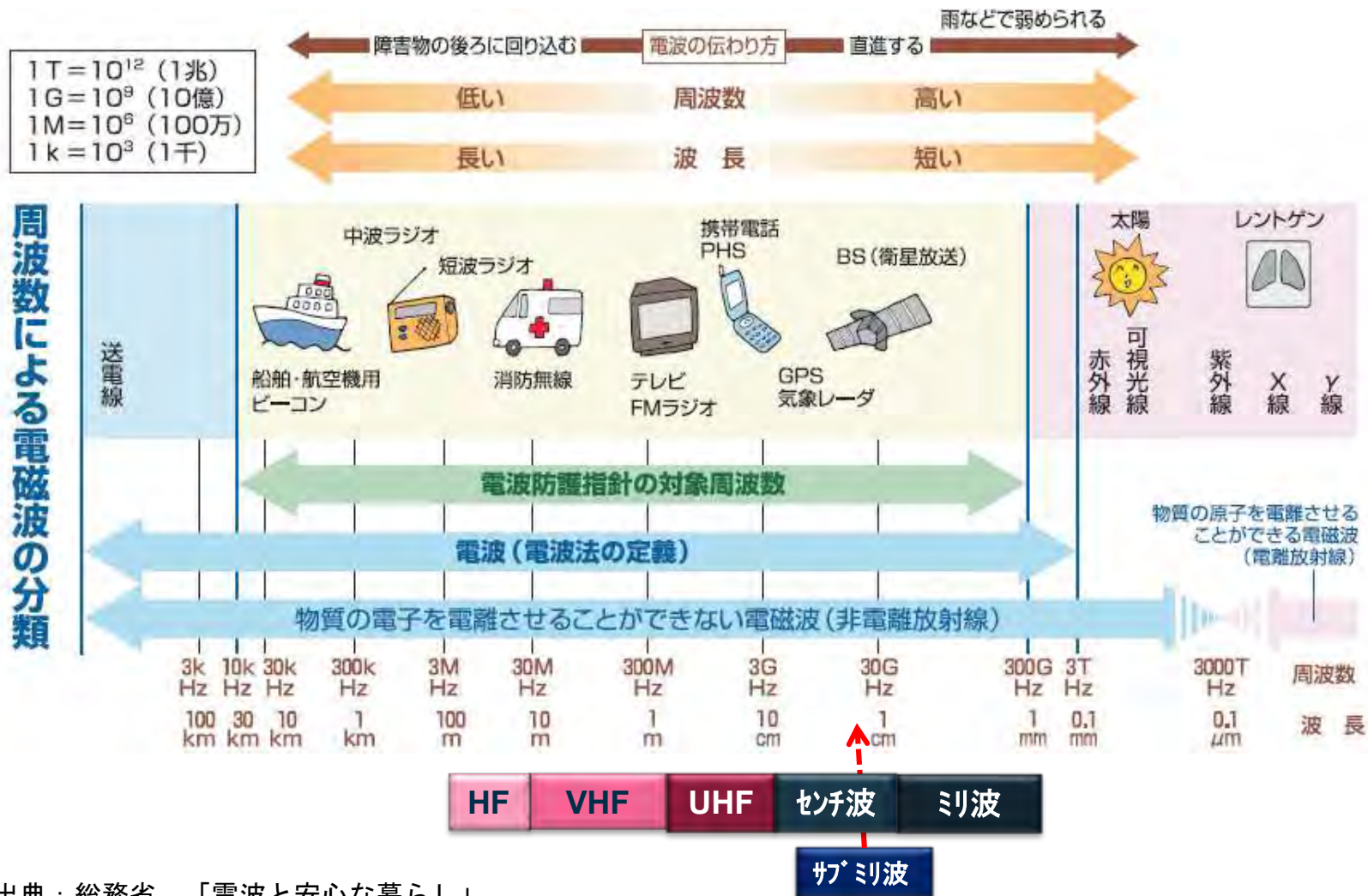
<http://www.sakuratech.jp/>



本日の内容

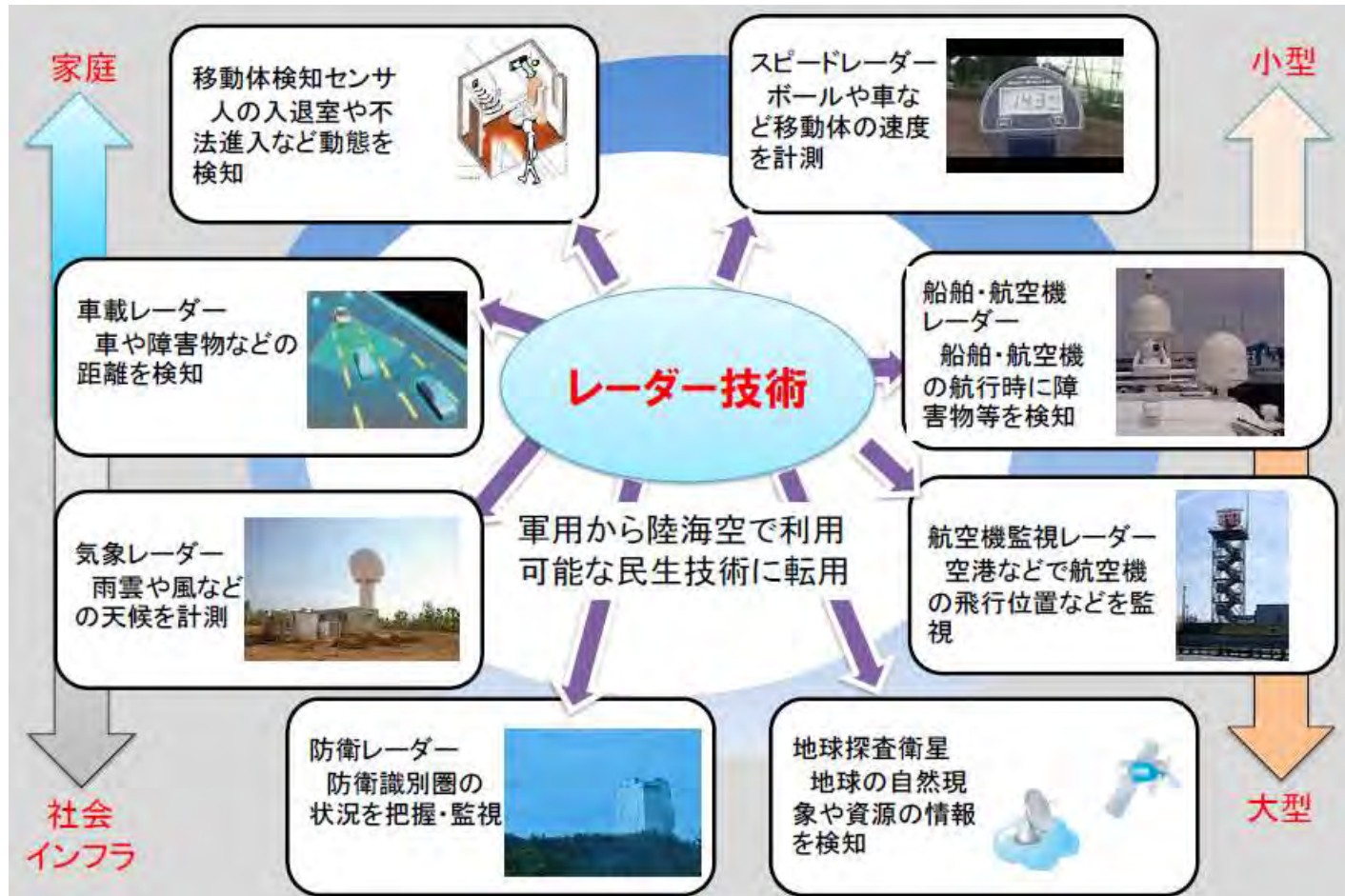
1. 電波全般について
2. レーダーについて
FMCWレーダー
Fast ramp レーダー
MIMOレーダー
3. 24GHz レーダーチップセットについて
レーダーチップセットチェーン
チップセットの特徴
4. miRadarについて
コンセプト
アプリケーション
フィールド試験
5. まとめ

私たちの暮らしと電波



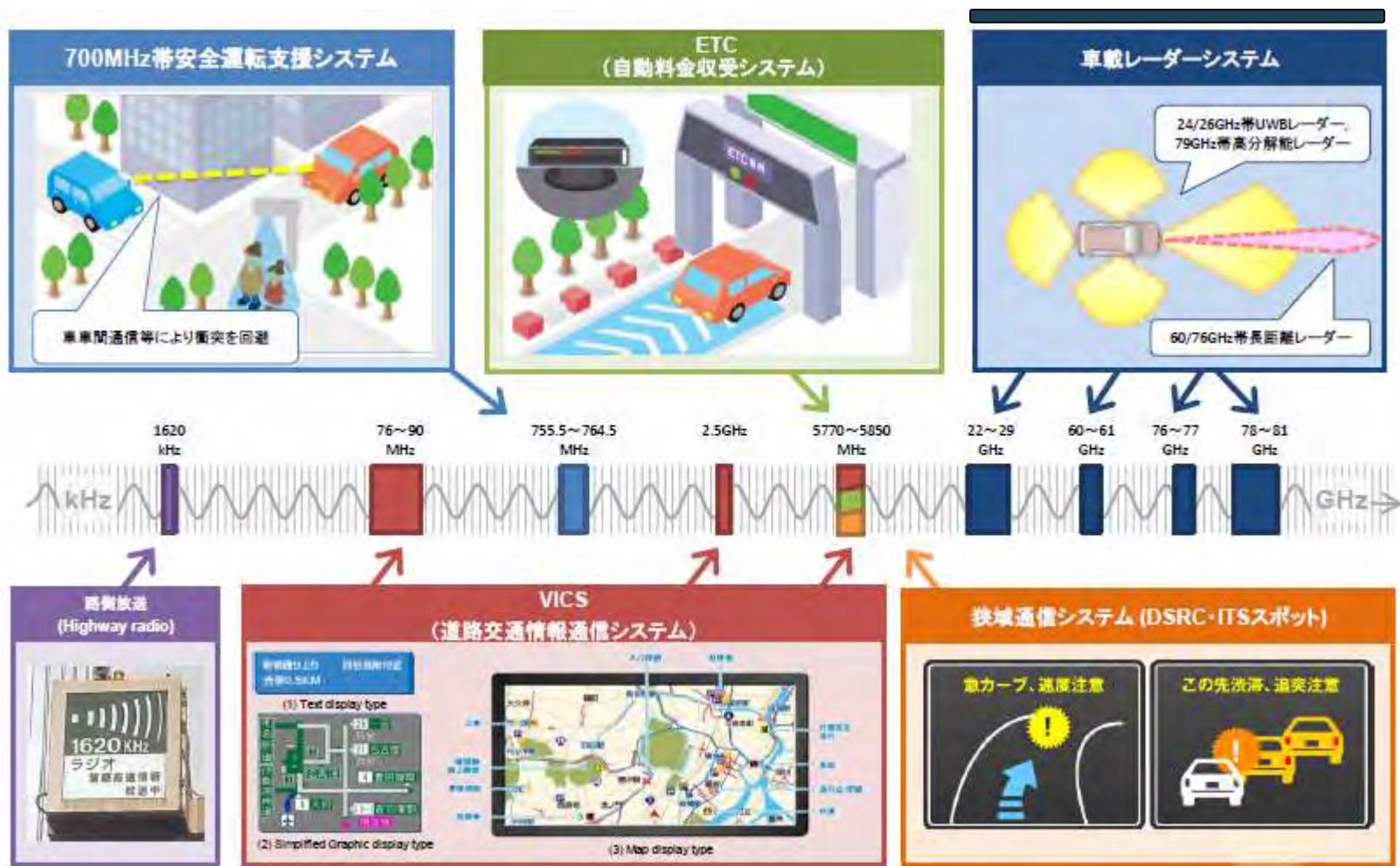
出典：総務省 「電波と安心な暮らし」

レーダーアプリケーション



出典：総務省 「サービスワーキンググループ取りまとめ 概要 平成28年6月3日」

ITSにおいて利用している周波数



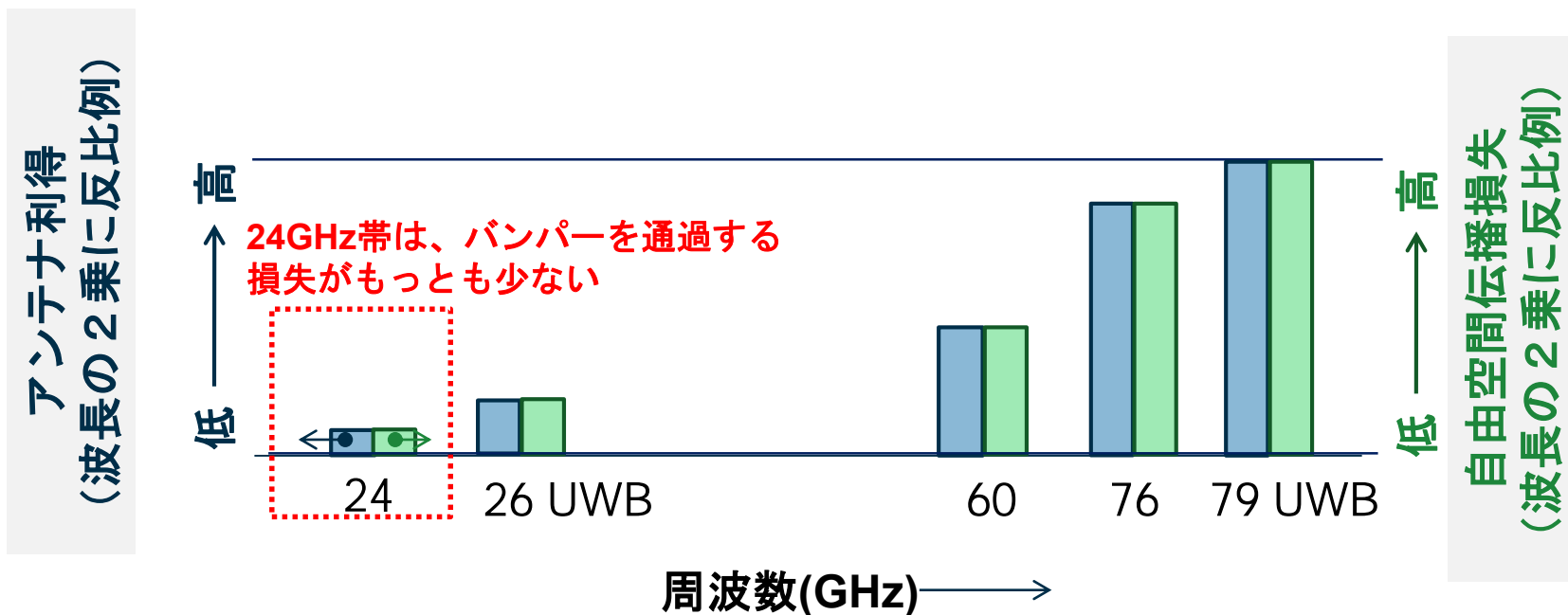
出典：総務省 「サービスワーキンググループ取りまとめ 概要 平成28年6月3日」

特定小電力レーダーの周波数の特性比較

- アンテナ利得は、アンテナの開口面積が同じときは周波数が高いほど利得が高い。
- 自由空間伝搬損失は、周波数が高いほど損失が大きい。



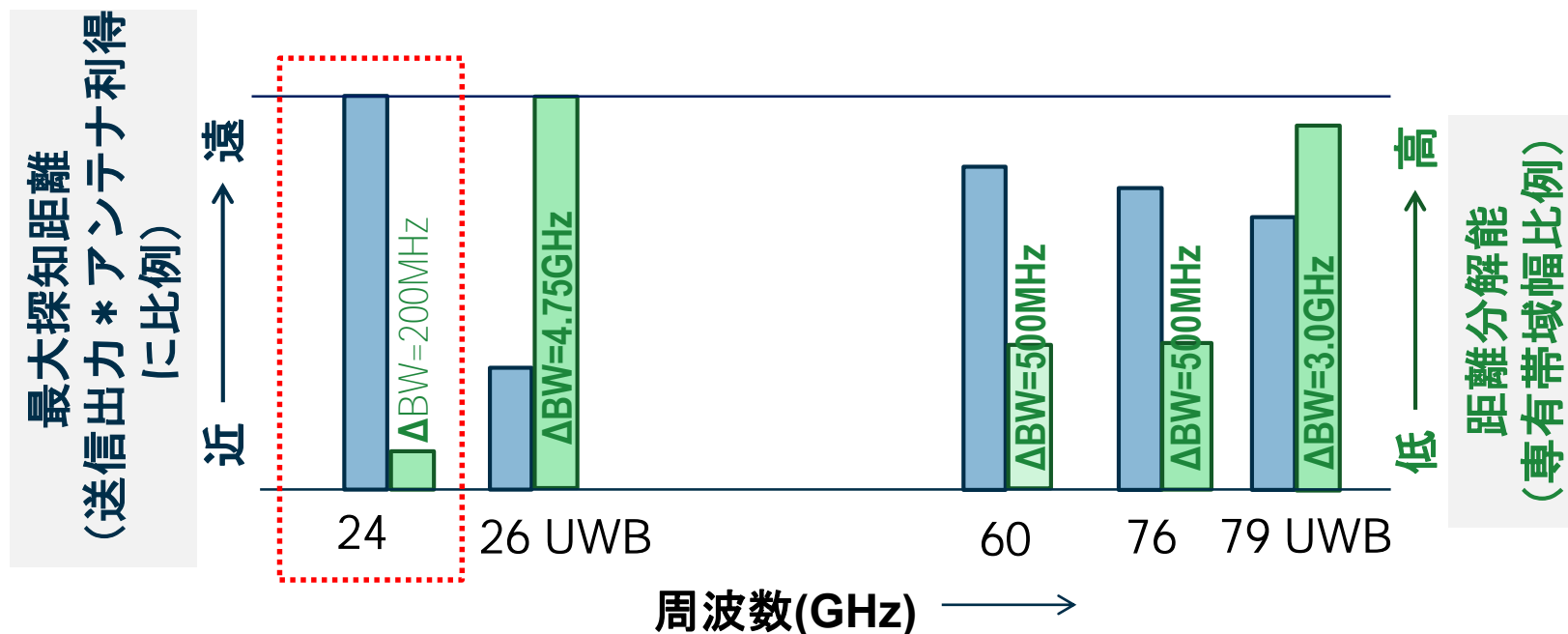
- アンテナの開口面積が同じときは、周波数に関係なく目標を検出する距離は同じ。



自由空間伝播損失 $L_b = (4\pi d / \lambda)^2$ 、 d : 距離、 λ : 波長 ΔBW : 専有帯域幅

特定小電力レーダーの周波数の特性比較

- アンテナの利得が同じときは、周波数が高いほど目標を検出する距離は短い。
- 占有帯域幅が広いほど距離分解能が高い。



条件：アンテナ利得が同じとき

距離分解能 $\Delta R = 0.5 c / \Delta BW$ d:距離、 λ :波長 ΔBW :専有帯域幅

センサー比較

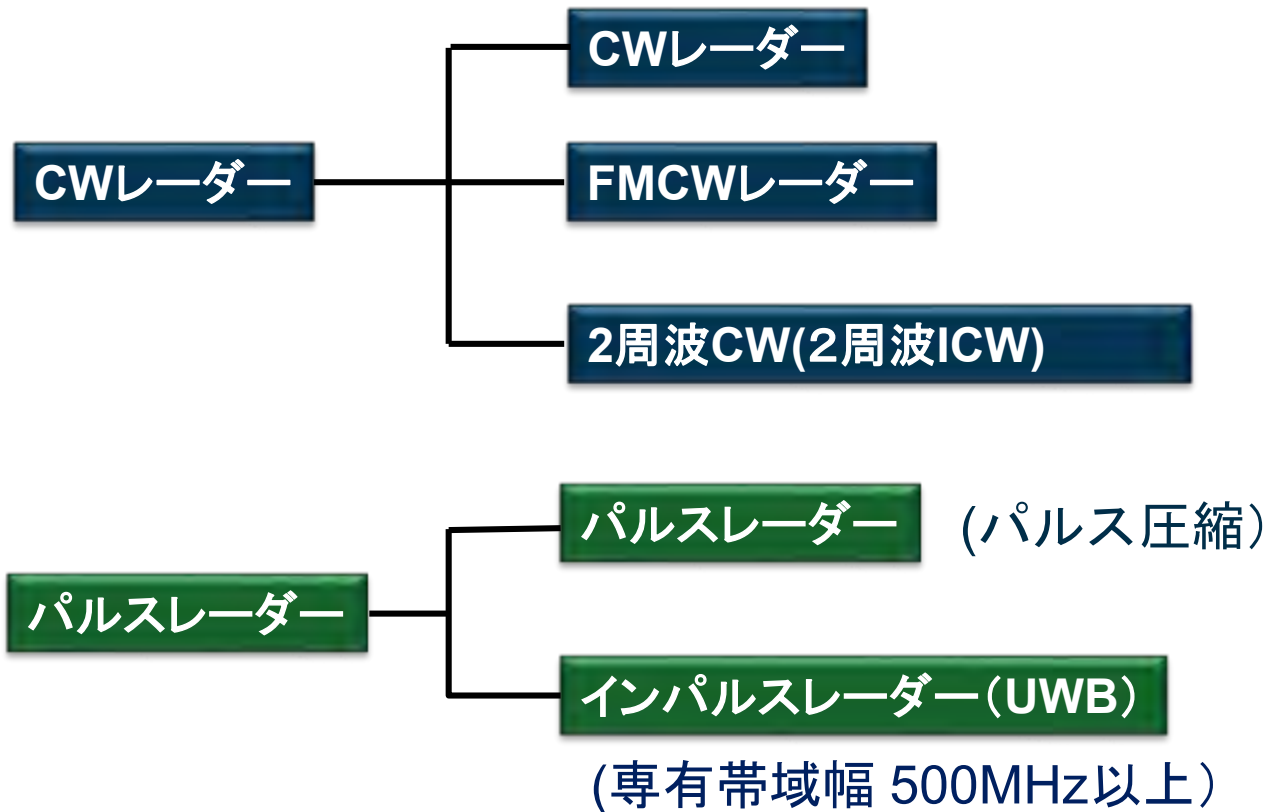
24GHzレーダー

性能/方式	ミリ波レーダー	UWBレーダー	レーザーレーダー	超音波センサー	ステレオカメラ	赤外線カメラ
極近距離検出 (～2 m)	△	○	○	○	○	○
近・中距離検出 (～30 m)	○	○	○	×	○	○
遠距離 (～150 m)	○	×	△	×	×	○
距離分解能 (30cm未満)	×	○	○	×	×	×
角度検出範囲 (+/-30°以上)	×	○	×	△	○	○
相対速度直接検出	○	○	×	×	×	×
耐天候性 (霧・雨)	○	○	×	×	×	○
夜間 (暗闇での検出)	○	○	○	○	×	○

○:適している △:利用可能 ×:利用不可能

レーダーは天候や昼夜の影響を受けにくく、継続的に、かつ瞬時に対象物との距離、速度、角度および相対的な加速（接近/離れる）変化を計測可能。

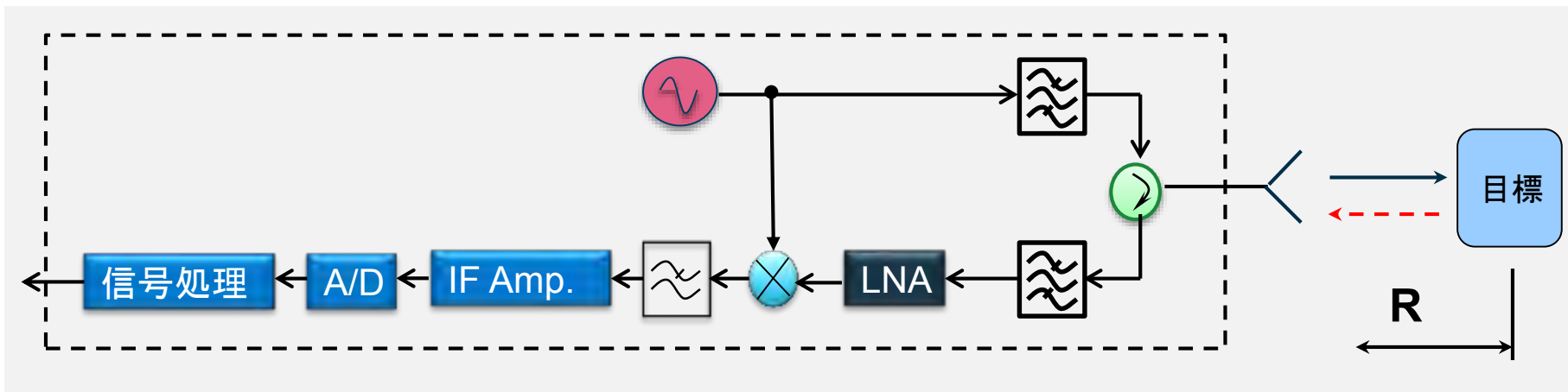
レーダー方式分類



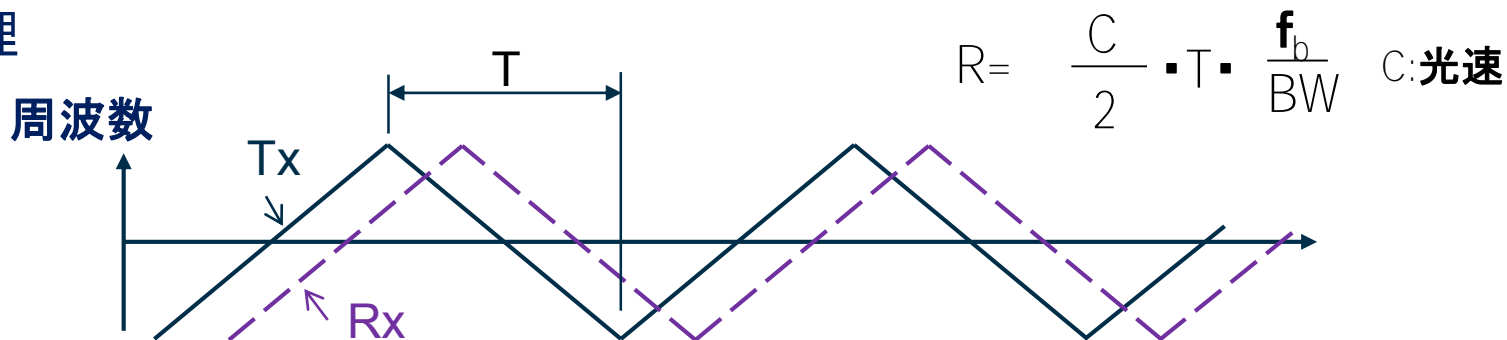
Radar : Radio Detecting and Ranging (電波探知測距)

FMCWレーダー動作原理

ブロック図



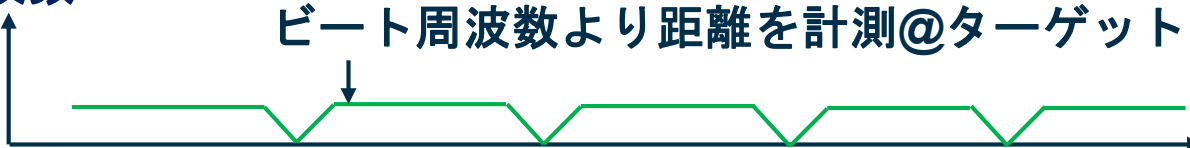
動作原理



IF 周波数

ビート周波数
 $f_b = |Tx - Rx|$

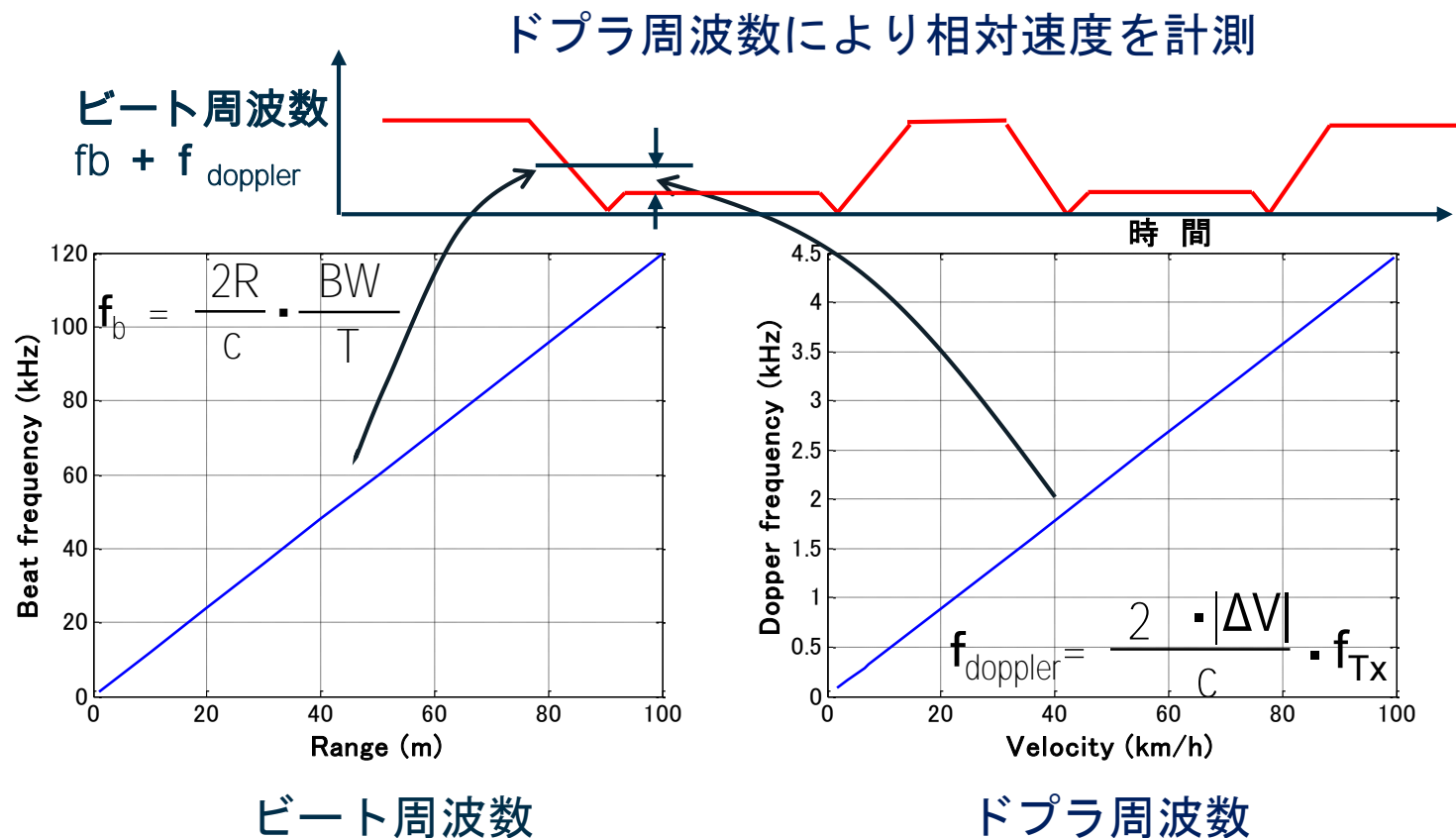
ビート周波数より距離を計測@ターゲット固定



FMCWレーダー

ビート周波数及びドプラ周波数

Tx Frequency (f_{Tx}) = 24.15GHz, Chirp bandwidth(BW) = 180MHz, Chirp time(T)=1ms

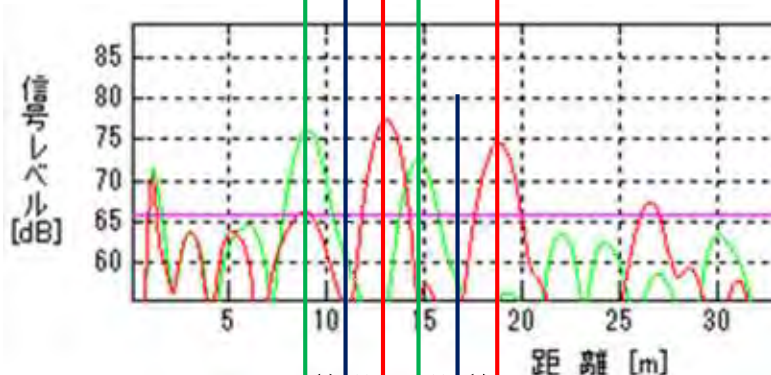
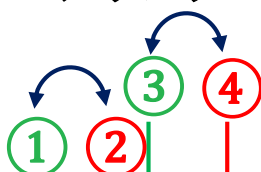


R:ターゲットまでの距離、 $|\Delta V|$ =相対速度、c:光速、BW:チャープ帯域

FMCWレーダー ペアリング

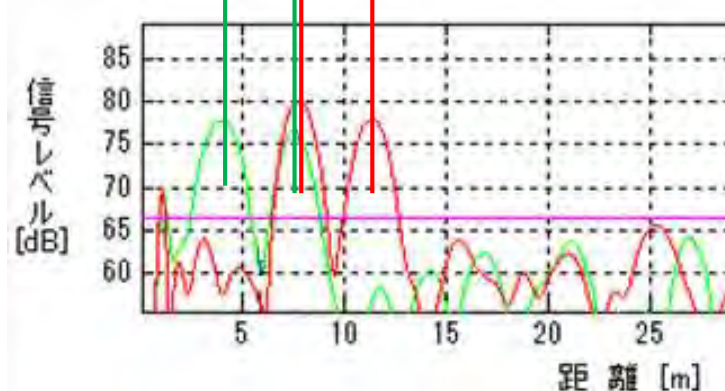
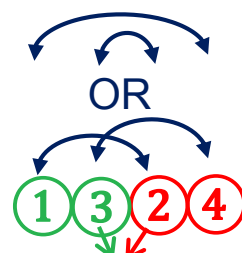
- ▶ ドプラ周波数の周波数偏移量が大きいので、
- ▶ 近接目標と重なりペアリングを間違える場合がある。

ペアリング



ドプラ周波数

ペアリング??

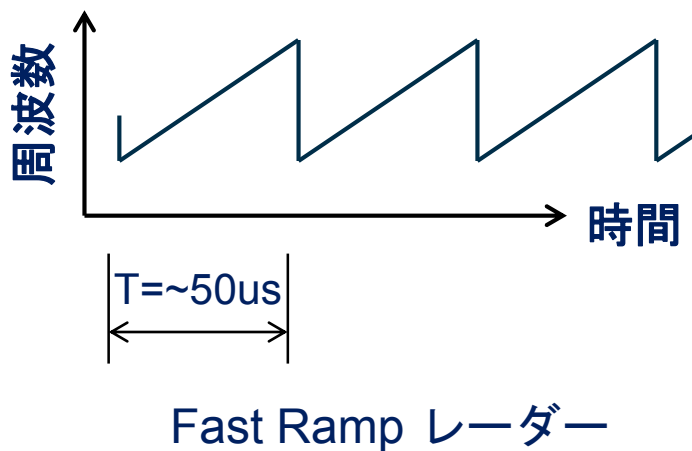


判定基準

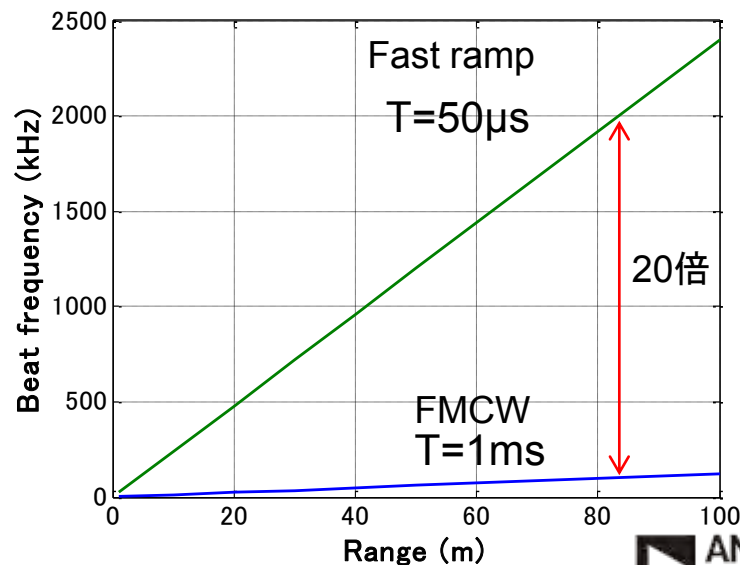
- ・ 受信レベルが等しい
- ・ ドプラ周波数の範囲内

Fast Rampレーダー

- Fast ramp 方式は、ビート周波数が大きくドプラ周波数の影響を無視できる。
- ビート周波数のペアリングから相対速度を求めないため信号処理が軽減できる。
- 相対速度は、チャープ間の受信信号の角度より求める。
- 多数回サンプリングによりS/Nが向上する。



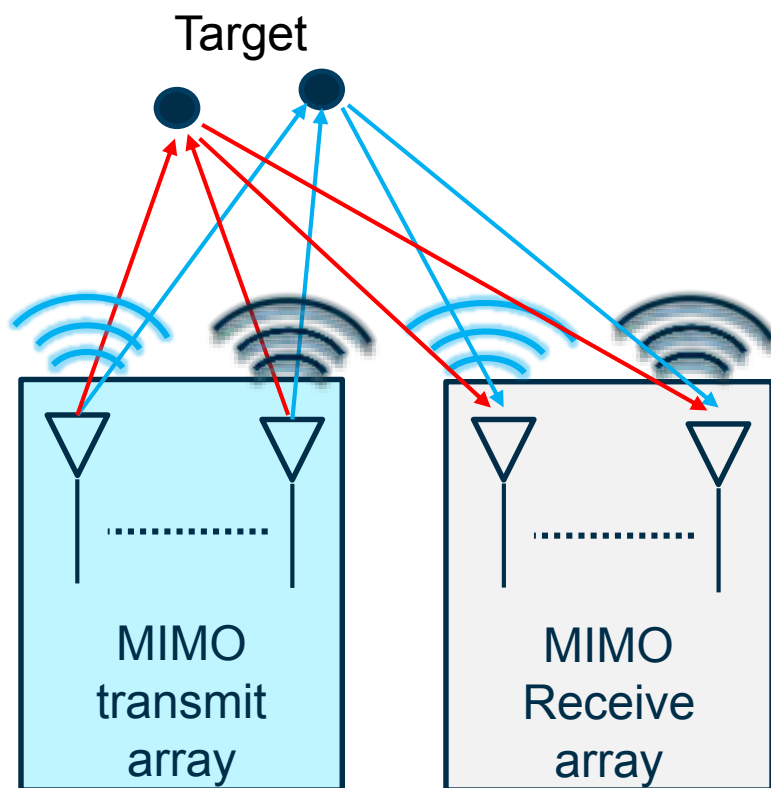
Tx Frequency (f_{Tx}) 24.15GHz
Chirp bandwidth(BW) 180MHz
Chirp time(T) 1ms (FMCW)
50 μ s (FasrFMCW)



MIMO Radar と Phased array radar の構成比較

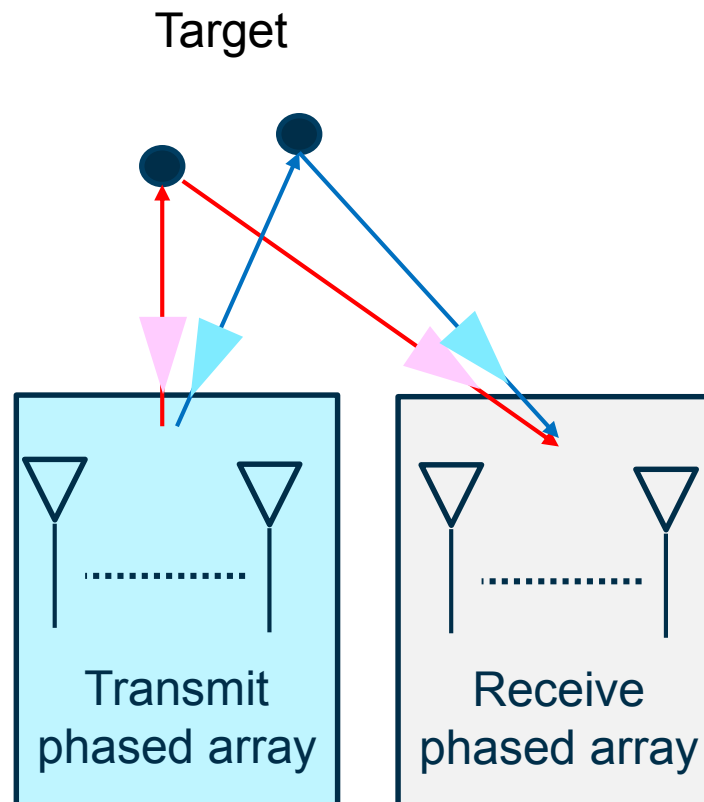
MIMO Radar
(Multi-Input Multi-Output Radar)

無指向性アンテナ



Phased array radar

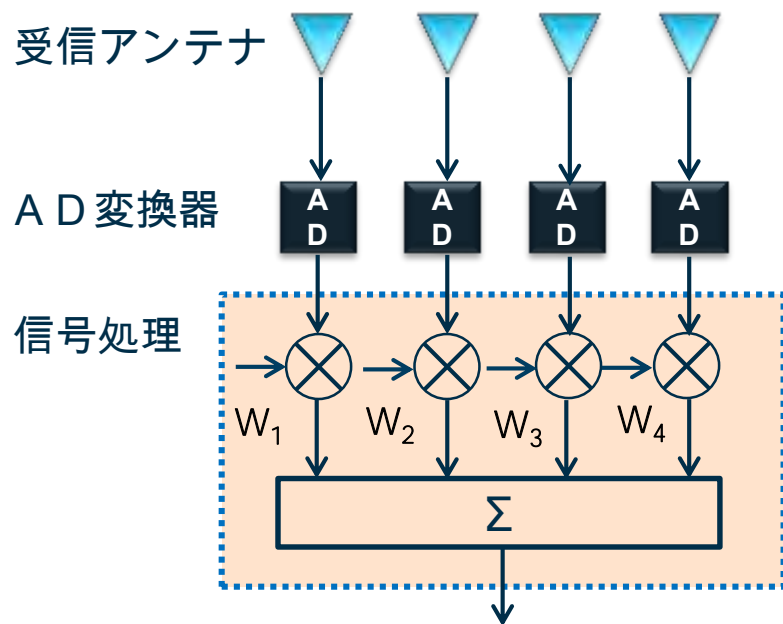
指向性を持ったアンテナ



MIMO Receive array と Receive phased arrayの構成比較

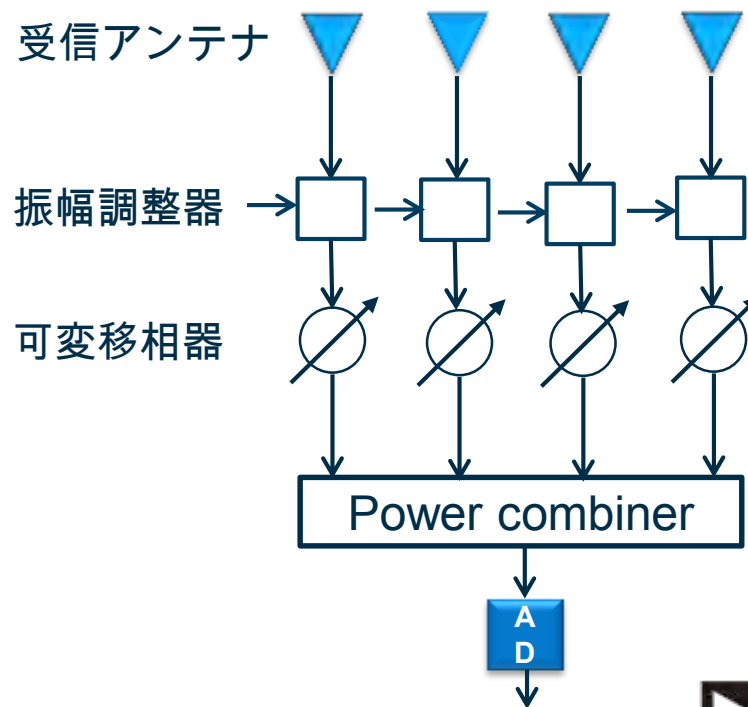
MIMO Receive array

各受信信号をAD変換した後、演算でウェディング（振幅、位相）を掛けビームの指向性を得る。



Receive phased array

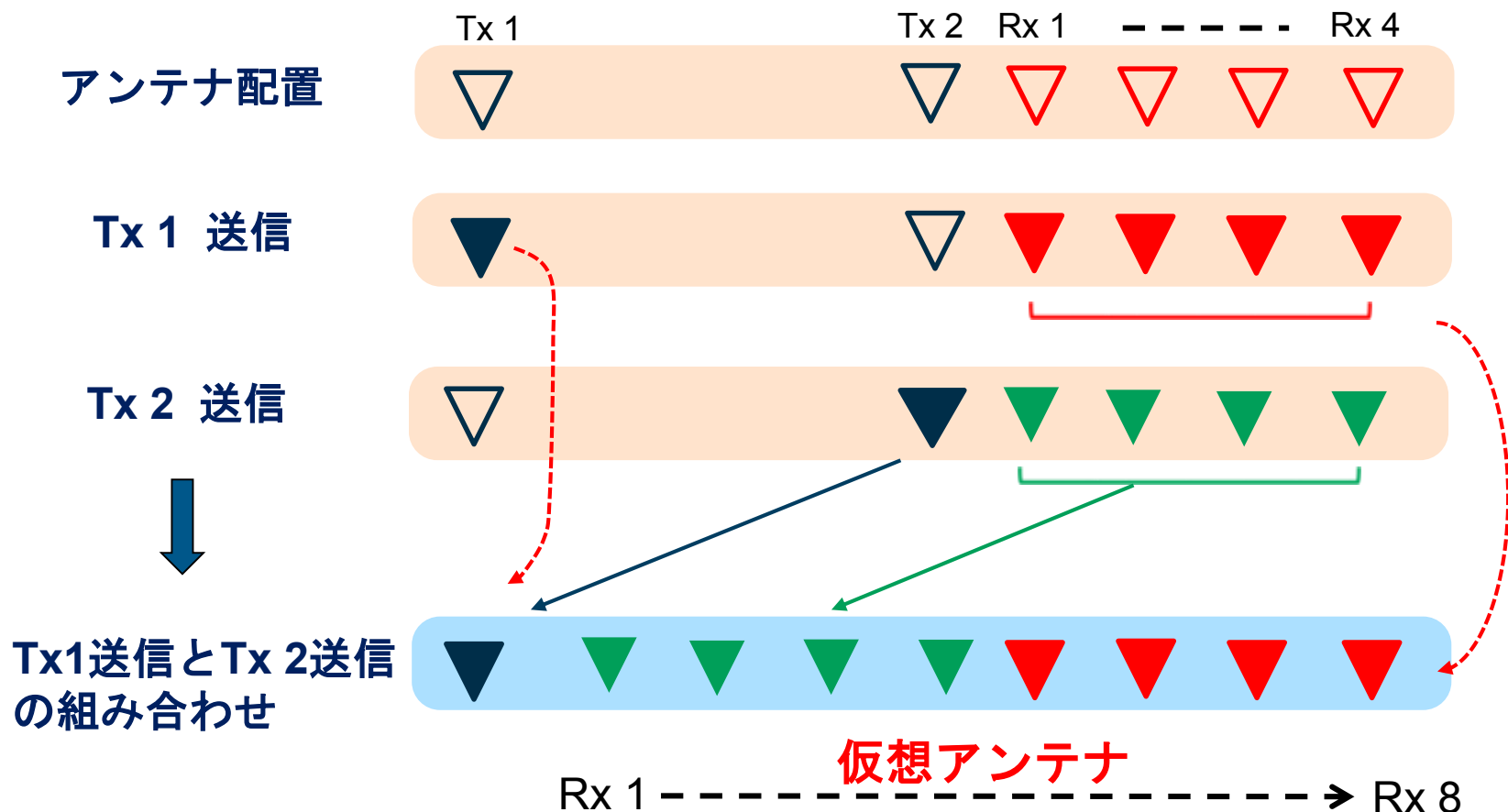
各受信信号の振幅調整器と可変位相器を設定しビームの指向性を得る。



MIMOアレーアンテナの特徴

仮想的にRx素子数が増える ⇒ 方位分機能が向上する。

$$\text{Tx } 2\text{個} \times \text{Rx } 4\text{素子} = 8\text{素子}$$

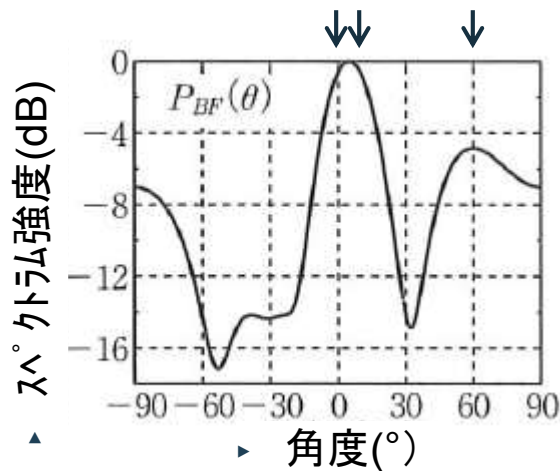


MIMOアレーアンテナの特徴

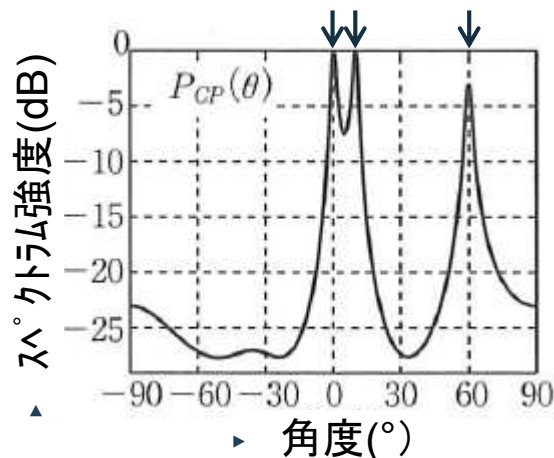
アダプティブ処理により高分解能な電波到来方向推定が可能

ビームフォーマ法とCapon法及び線形予測法の推定例

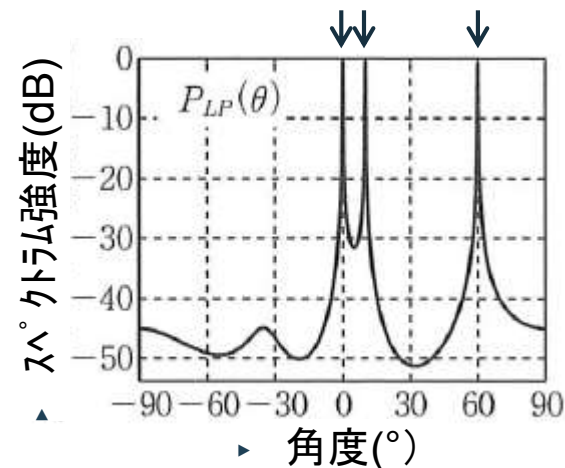
到来波	1	2	3
到来方向	0°	10°	60°
電力	1.0	1.0	0.5



ビームフォーマ法



Capon法



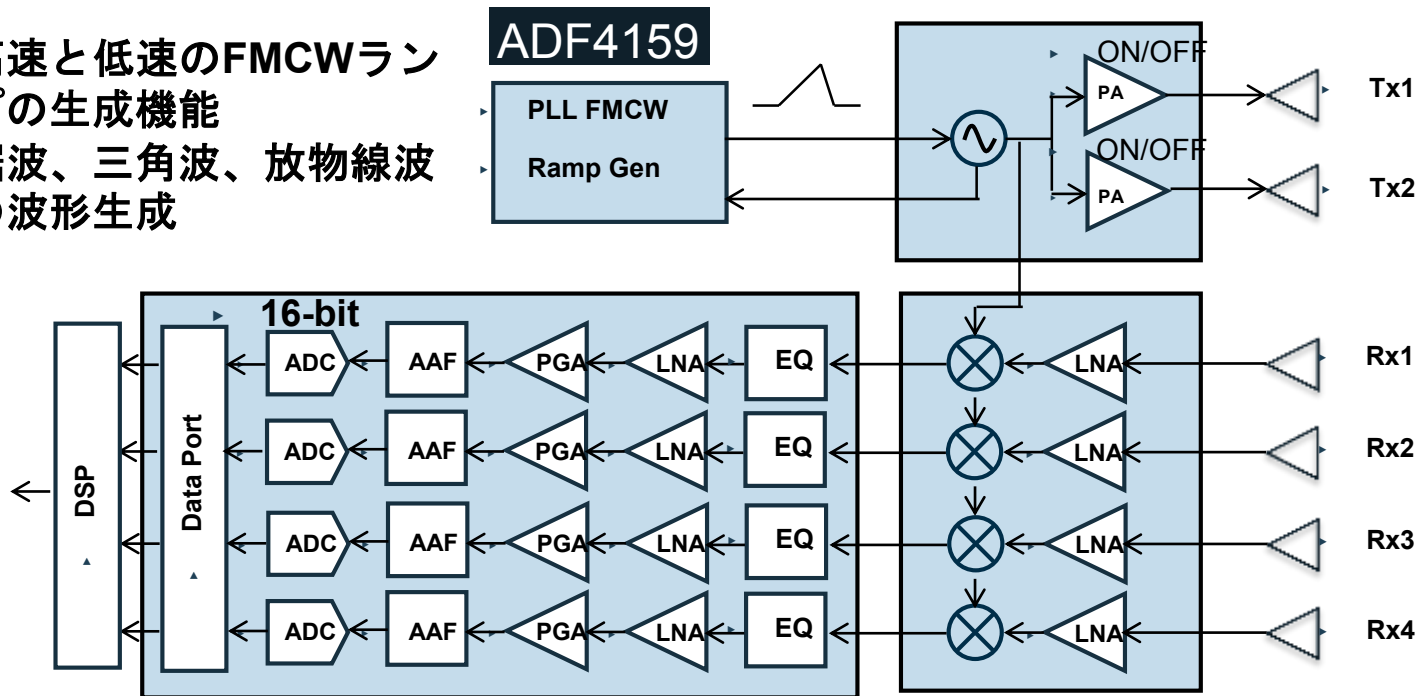
線形予測法

24GHzレーダーチップセット チェーン

FMCW Tx 2ch Rx 4ch

4個のICでFMCWレーダーのRF部を構成可能

- 高速と低速のFMCWラン
プの生成機能
- 鋸波、三角波、放物線波
の波形生成



ADAR7251 (1.2MHz/1ch)

- 4つの差動同時サンプリング・チャンネル
- LNAとPGAの利得を6dBステップ可変
- 1.2MSPSサンプル・レート、16ビット分解能
- 選択可能なイコライザ

ADF5904

- 4チャンネル入力
- アナログ出力の温度センサー

24GHzレーダーチップセット チェーン

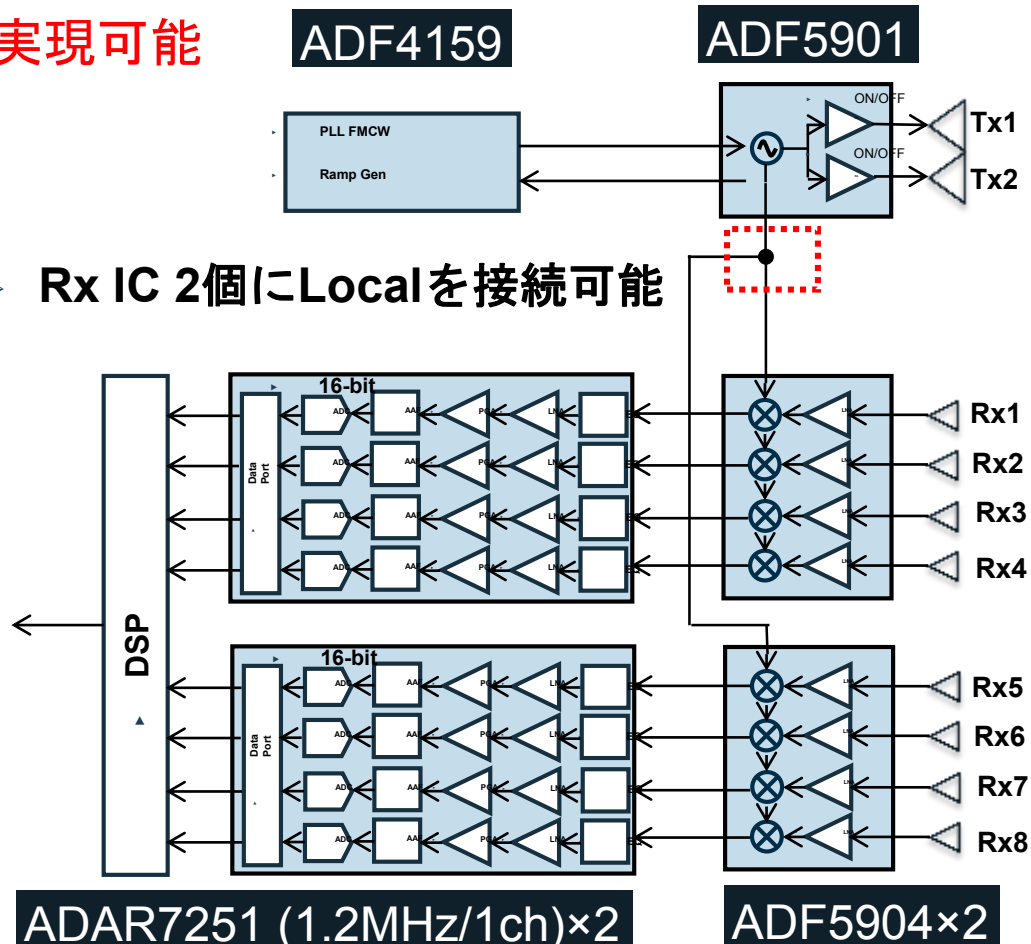
FMCW Tx 2ch Rx 8ch

容易にRx 8ch化が実現可能



方位分解能の向上

➤ Rx IC 2個にLocalを接続可能



➤ マスター、スレーブの設定により同期させることが可能

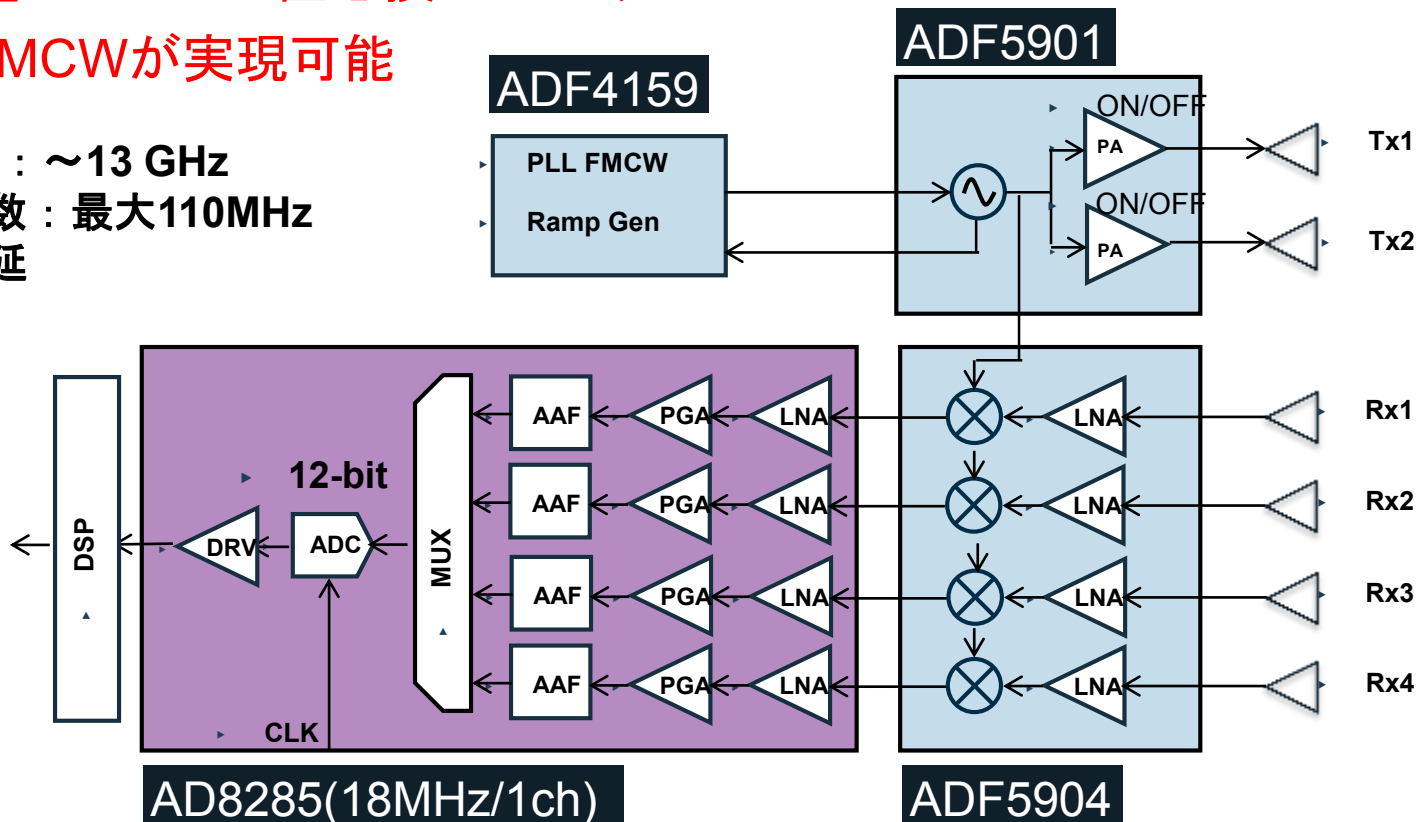
24GHzレーダーチップセット チェーン

Fast ramp Tx 2ch Rx 4ch

ADAR7251をAD8285に置き換えにより

Fast ramp FMCWが実現可能

- RF帯域幅 : ~13 GHz
- PFD周波数 : 最大110MHz
- ランプ遅延

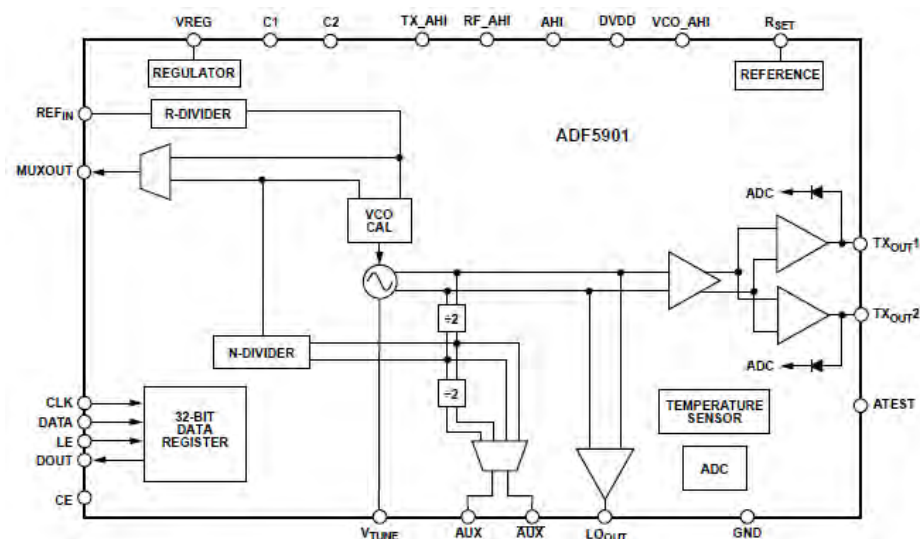


- 4チャンネルのLNA,PGA,AAFと1チャンネルのADC直接入力
- プログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA)
- 折り返し防止フィルタ (AAF)

ADF5901: 2チャンネル トランスミッタと VCO トランスミッタ MMIC、24 GHz FMCW レーダー向け

特長

- 電圧制御発振器 (VCO) :
24 GHz ~ 24.25 GHz
- 出力 8 dBm の 2 チャンネル 24GHz
パワーアンプ (PA)
- シングルエンド出力
- ミュート機能付き 2 チャンネル・
マルチプレクス出力
- プログラマブルな出力パワー
- N 分周器出力 (周波数弁別器)
- 24 GHz 局部発信器 (LO) の
出力バッファ
- 信号帯域幅: 250 MHz
- パワー制御検出器
- 補助用 8 ビット ADC
- $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 温度センサー
- 4線式SPIインターフェース

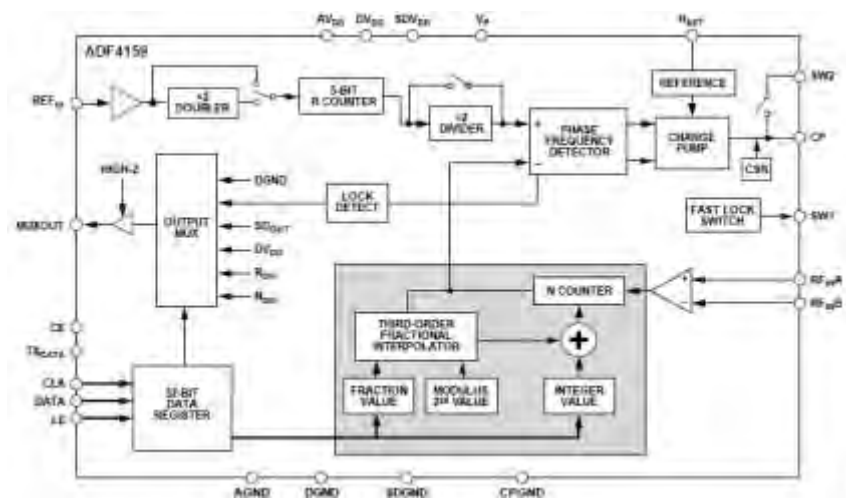


FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

ADF4159:周波数シンセサイザ、フラクショナル-N、13 GHz、ダイレクト・モジュレーション/高速波形発生 ランプ発生機能付きPLL 24 GHz FMCW レーダー向け

特長

- RF帯域幅：～13 GHz
- 高速と低速のFMCWランプの生成機能
- サブヘルツの周波数分解を可能にする
25ビット固定対数係数
- PFD周波数：最大110MHz
- 正規化位相ノイズ・フロア：-224 dBc/Hz
- FSKとPSK機能
- 鋸波、三角波、放物線波の波形生成
- FSKでの多重傾斜
- 2つの異なるスイープ・レートでの上昇傾斜
- ランプ遅延、周波数リードバックおよび
割り込み機能
- プログラマブルな位相制御
- アナログ電源電圧：2.7～3.45 V
- デジタル電源電圧：1.8 V
- プログラマブルなチャージ・ポンプ(CP)電流
- デジタル・ロック検出機能

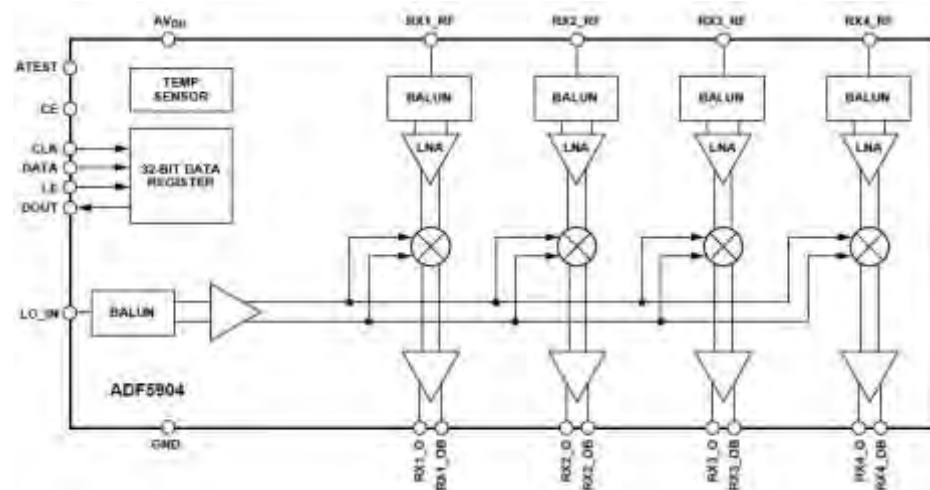


FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

ADF5904 : レシーバ・ダウンコンバータ、4チャンネル、24GHz

特長

- シングル・エンド・レシーバ (Rx) 入力と
局部発信器 (LO) 入力にバランを内蔵
- Rxチャンネルのゲイン : 22dB
- ノイズ指数 (NF) : 10dB
- P1dB: -10 dBm
- LO入力範囲 : -8dBm ~ +5dBm
- RxとIFの間のアイソレーション : 30dB
- RF信号帯域 : 250MHz
- Rx出カインピーダンス : 900Ω差動
- LO入力バッファ : 24GHz
- 50ΩでのRFとLOのS11 : -5dB
- アナログ出力の温度センサー: $\pm 5^\circ$

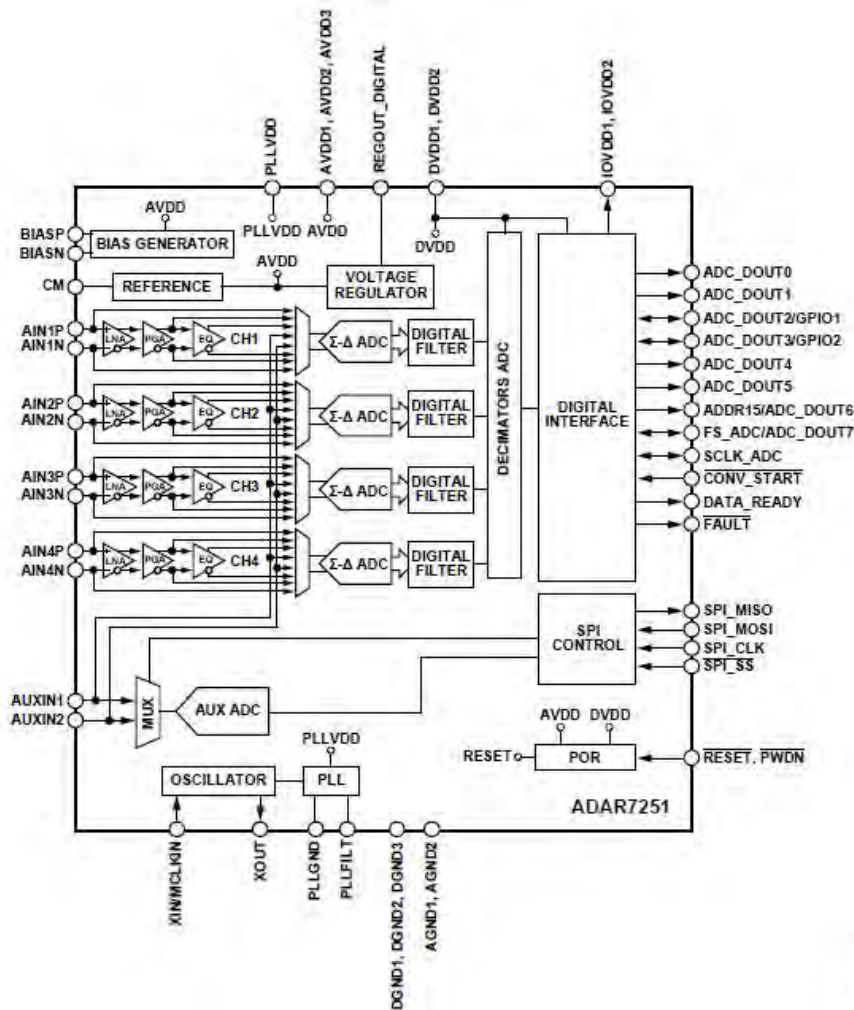


FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

ADAR7251 : 4チャンネル、低速、Ramp、AFE 連続時間シグマデルタコア

特長

- 低ノイズ : 入力換算電圧ノイズ : $2.4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
(最大ゲイン設定にて)
- 広い入力信号帯域幅 : $500\text{kHz}@1.2\text{MSPS}$ サンプル・レート、16ビット分解能
- 対応する他のサンプル・レート : 300kSPS 、 450kSPS 、 600kSPS 、 900kSPS 、 1.8MSPS
- 4つの差動同時サンプリング・チャンネル
- アクティブ・アンチエイリアシング・フィルタは必要なし
- ゲイン範囲45dBで6dBステップのLNAとPGA
- 選択可能なイコライザ
- シリアル又はパラレル・モードに対応する柔軟なデータ・ポート
- FMCWレーダー・システム向けにFSKモードをサポート
- 1.5Vのリファレンス電圧を内蔵
- 内蔵発振器 / PLL入力 : $16\text{MHz}\sim 54\text{MHz}$ の高速シリアル・データ・インターフェース



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

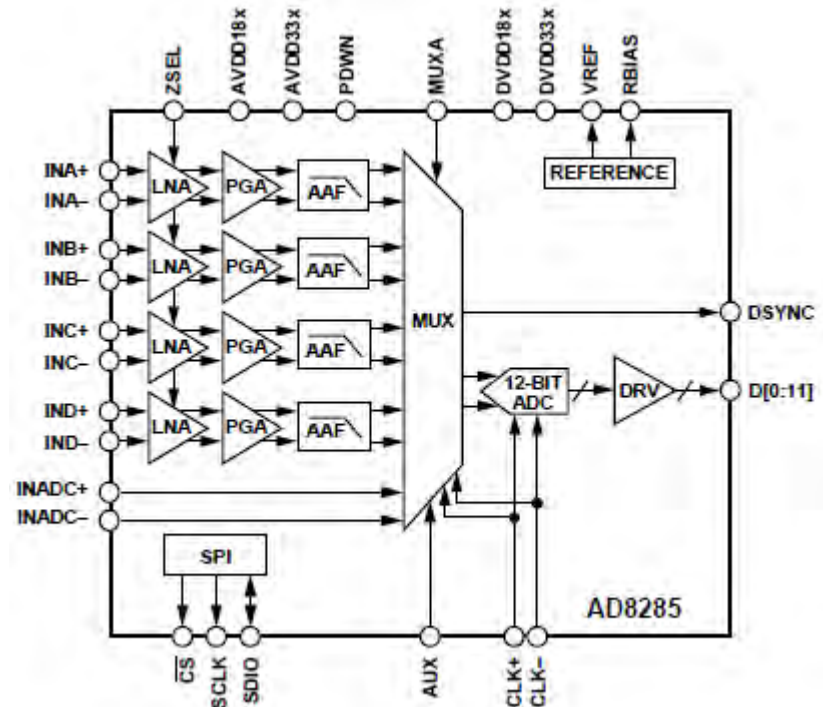
AD8285 : レーダー受信経路のAFE

4チャンネルLNA/PGA/AAF、ADC内蔵

特長

- 4チャンネルのLNA、PGA、AAFと1チャンネルのADC直接入力
- プログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA)
 - 低ノイズ・プリアンプ(LNA)を内蔵
 - シリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI)を介したプログラマブル・ゲイン 16 dB ~ 34 dB@6 dBステップ
- 折り返し防止フィルタ (AAF)
 - 1.0 MHz ~ 12.0 MHzのプログラマブル3次楕円関数ローパスフィルタ
- A/Dコンバータ(ADC)
 - 72MSPSまで12ビット精度
 - S/N比 (SNR): 68.5 dB
 - スプリアスフリー・ダイナミック・レンジ(SFDR): 68 dB @ゲイン = 16 dB
- 低消費電力 : 185 mW/チャンネル@12ビット、72 MSPS
- 低ノイズ : 入力換算電圧ノイズ : 3.5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ max

Fast ramp用



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

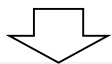
24GHzレーダーチップセット（まとめ）

Part Number	Function	Description	Merit
ADF5901	Tx MMIC	24GHz,ISMバンド2 ch ・FMCWトランスミッター	・Tx 2チャンネル出力が1パッケージに実装され MIMOレーダーに最適
ADF4159	Ramp generator	13GHz、フラクショナルN FMCWランプ発生PLL	・1トリガでチャープが発生 ・チャープの上りと下りを個別設定可能。(非対称のこぎり) ・24GHzの1/2が入力可能
ADF5904	Rx MMIC	24GHz, 4ch・ レシーバ・ ダウンコンバータ	・LNA,PGA,AD 4チャンネルが1パッケージ
ADAR7251	AFE	4ch 16-bit 連続時間 ΣΔアキュイジションADC	・ 16-bit 4ch ・ 4ch 1.2MHz (1.8MHz)input bandwidth ・ 8チャンネル化に容易に拡張可能 ・ チャープ設定に応じてIFのハイパスフィルタを選択可能
AD8285	AFE	4ch 12-bit パイプライン ADC	・ 12-bit 4ch ・ 4ch 18MHz input bandwidth

mi Radarとは

名前の由来

MIIMO



mi Radar

My

Multi function

Millimeter Imaging

" *mi* Radar 8 "



▶ 外観写真 (サクラック株式会社製)

mi Radar 開発コンセプト

高性能

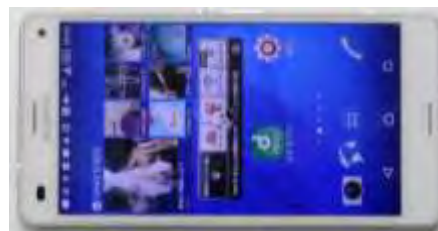
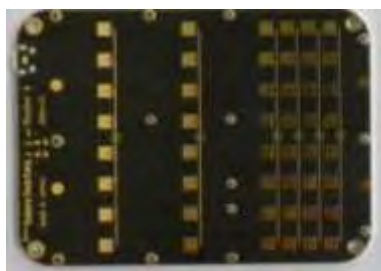
MIMOレーダー方式
(アダプティブアンテナ)

だれでも簡単に使える

1本のケーブル接続で動作
(Micro USB バスパワー)

小型軽量

104mm×76mm×6mm
70g



- ▶ 70 g
- ▶ 104mm×76mm×6mm
- ▶ 47.4cc
- ▶ 消費電力 約2.5W

- ▶ 130 g
- ▶ 127mm×65mm×9mm
- ▶ 83.4cc

自動車用レーダー

近接障害物監視レーダー 検出範囲

方位	±	45°	
距離	人	20m	以上
	車	60m	以上



ドローン用レーダー

近接障害物監視レーダー/高度計

検出範囲 方位 $\pm 6^\circ$ ($\pm 45^\circ$)

仰角 $\pm 45^\circ$ ($\pm 6^\circ$)

高度/距離 50m 以上



侵入監視レーダー

人感センサー

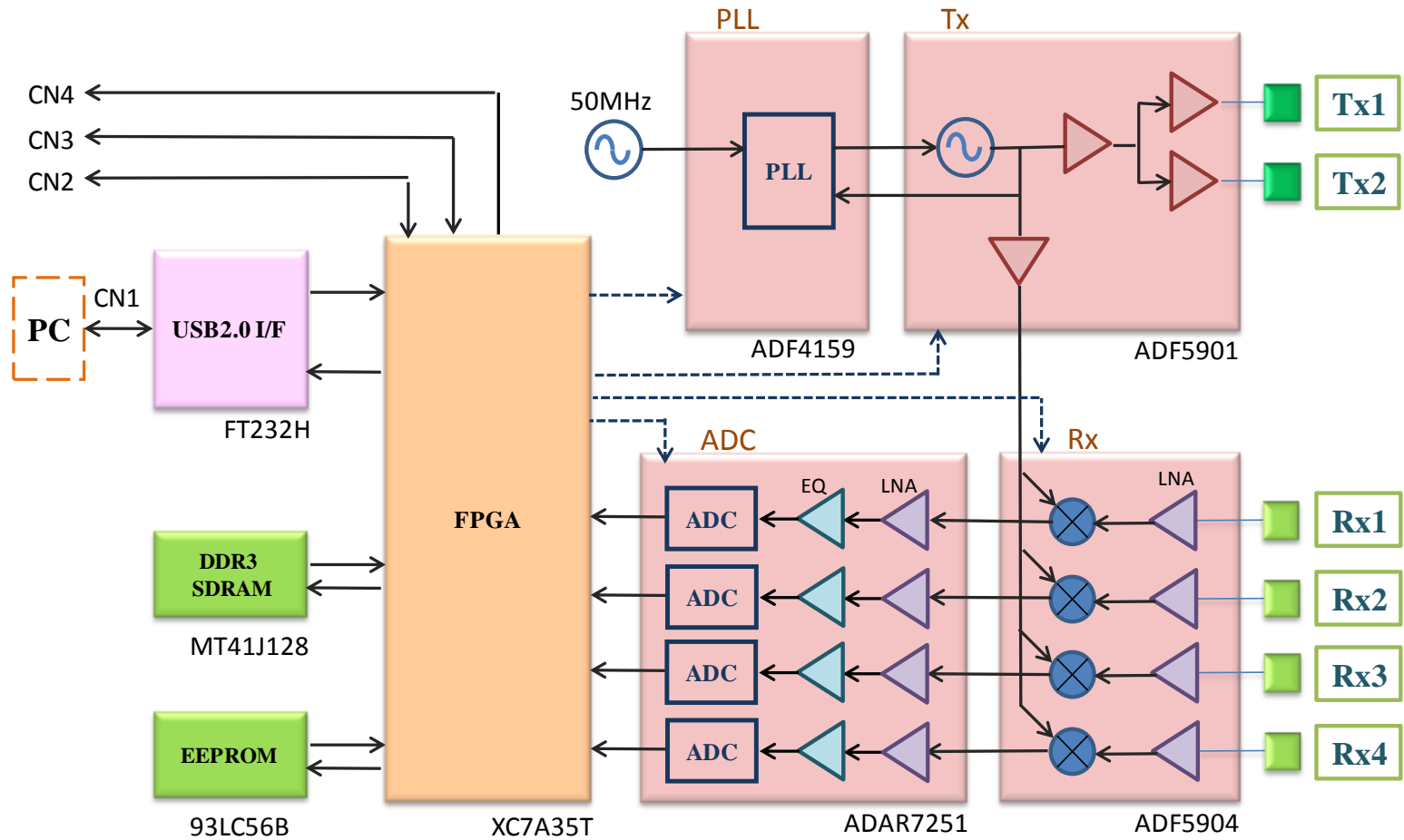
検出範囲（移動体）

方位 $\pm 45^\circ$

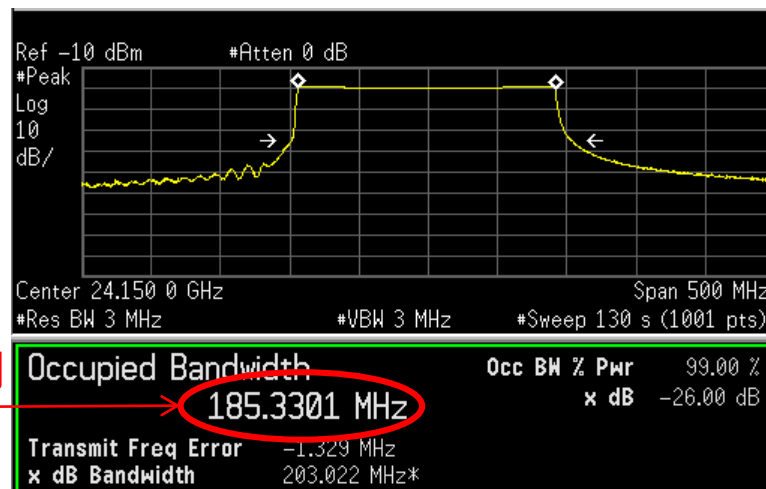
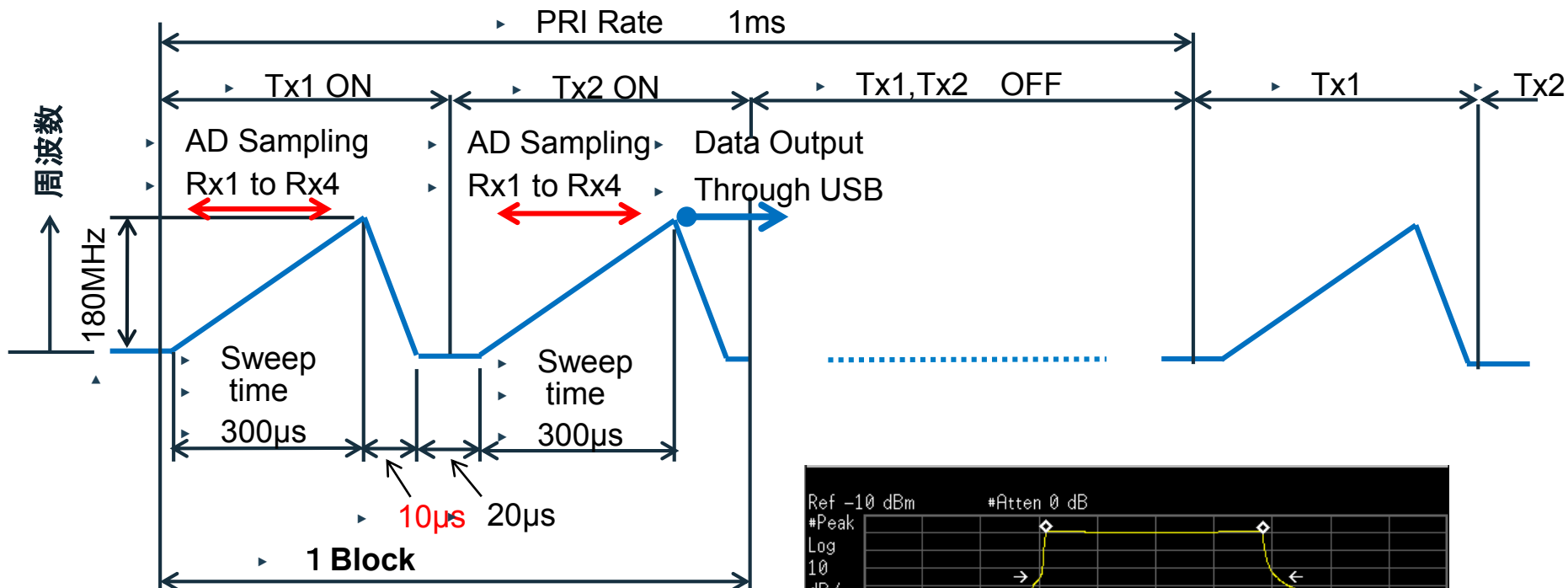
距離 人 30m以上（目標）



mi Radarブロック図



送信波基本タイミングチャート



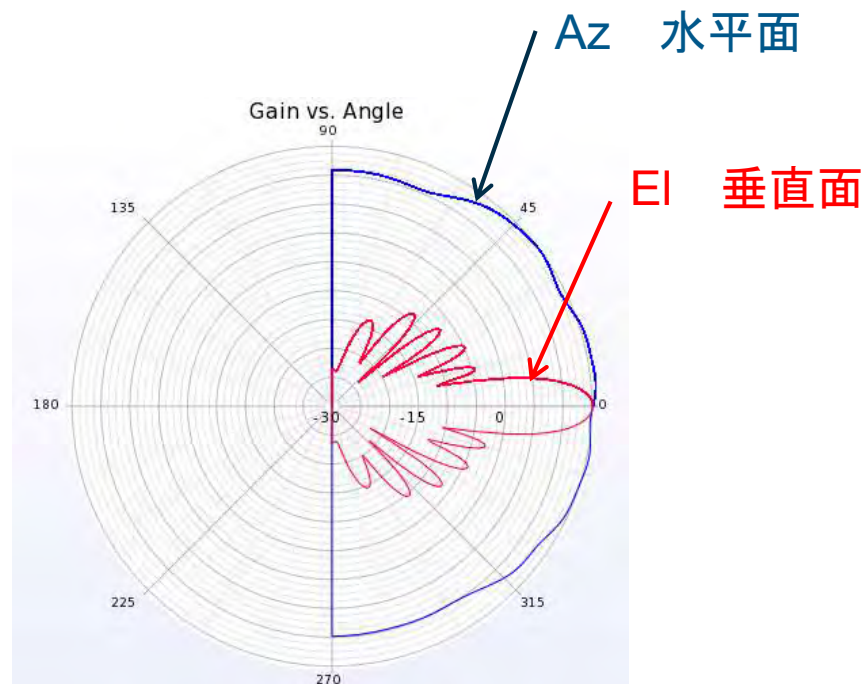
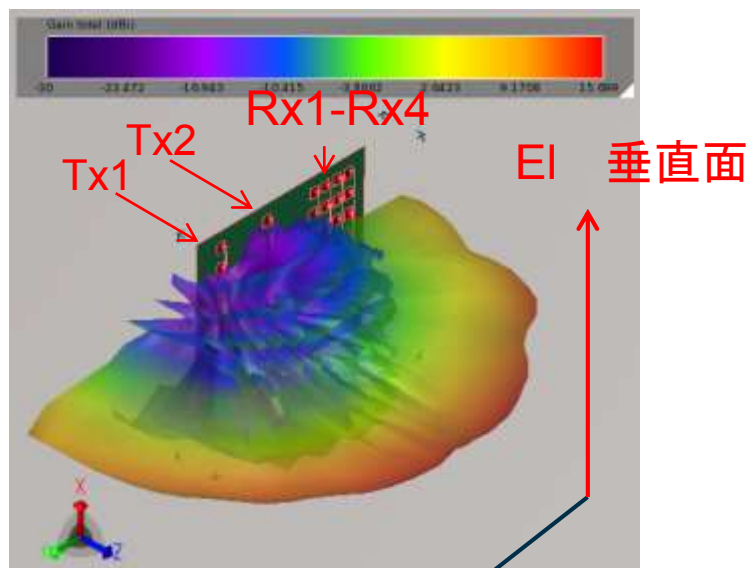
規格 占有帯域幅 200MHz

規格内

185.3301 MHz

アンテナパターンシミュレーション

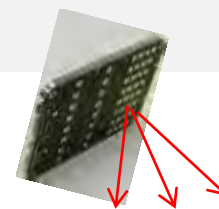
Tx 2ch 及び Rx 4ch のビームパターン



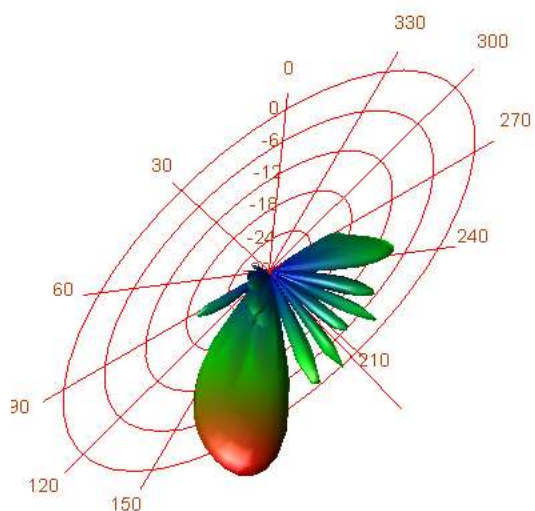
Az 水平面

受信デジタルビームフォーミング

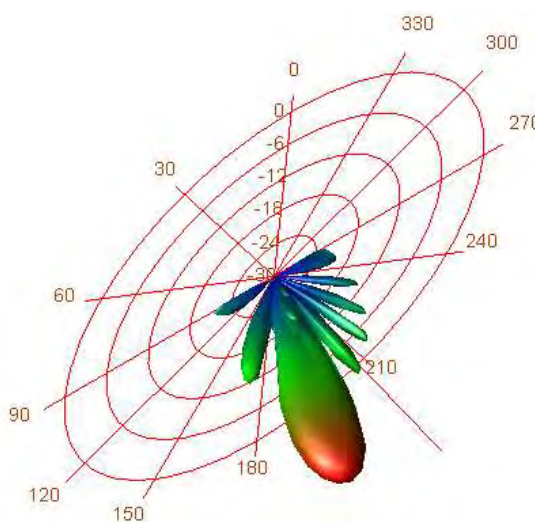
- ▶ バーチャルアレー8エレメントの受信データをビームフォーマ法でシミュレーションしたアンテナパターンを示す。



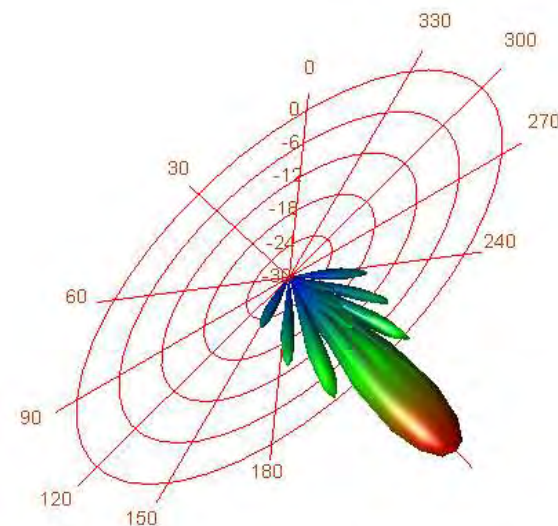
▶ +45°



▶ 22.5°



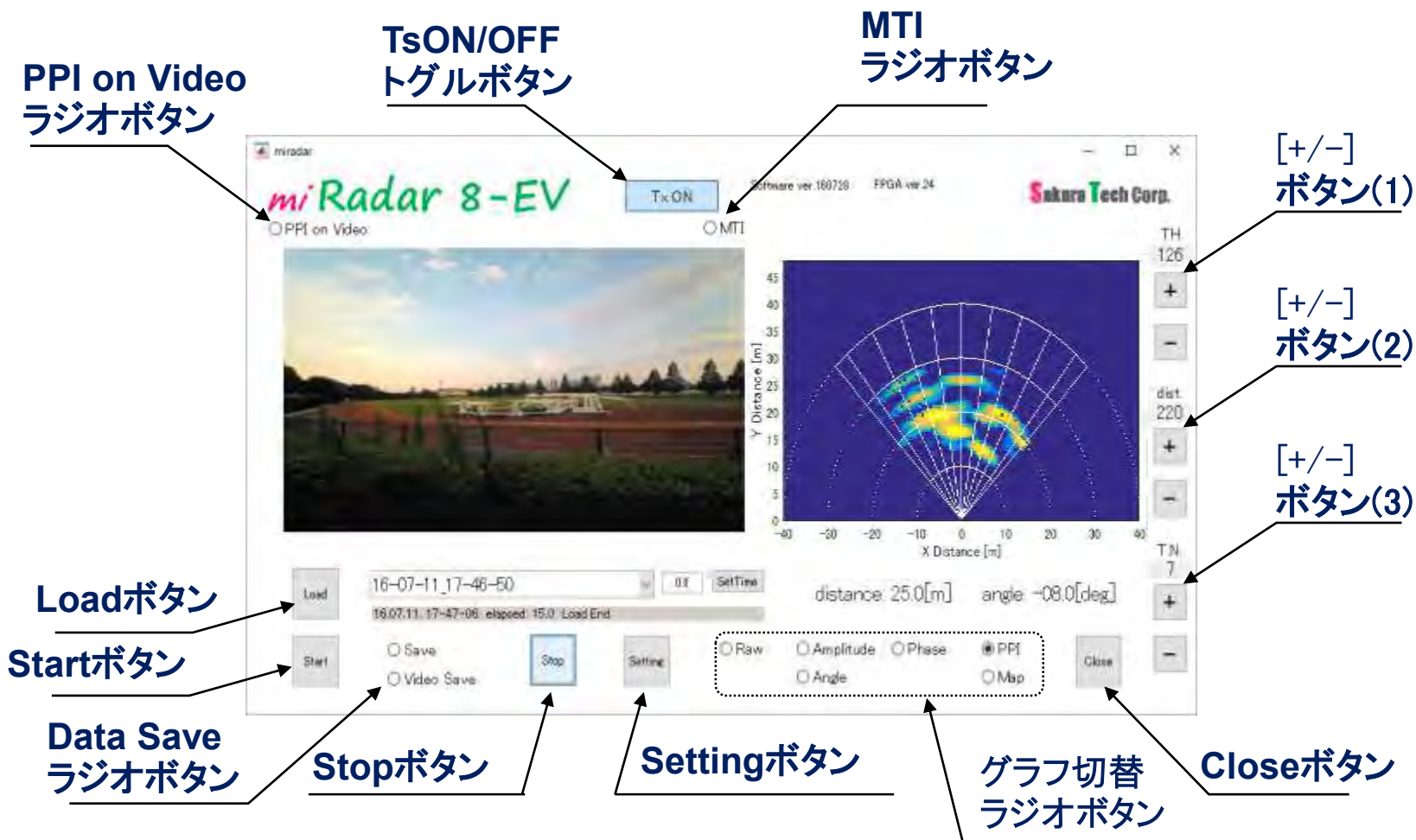
▶ 0°



mi Radarの主な特性

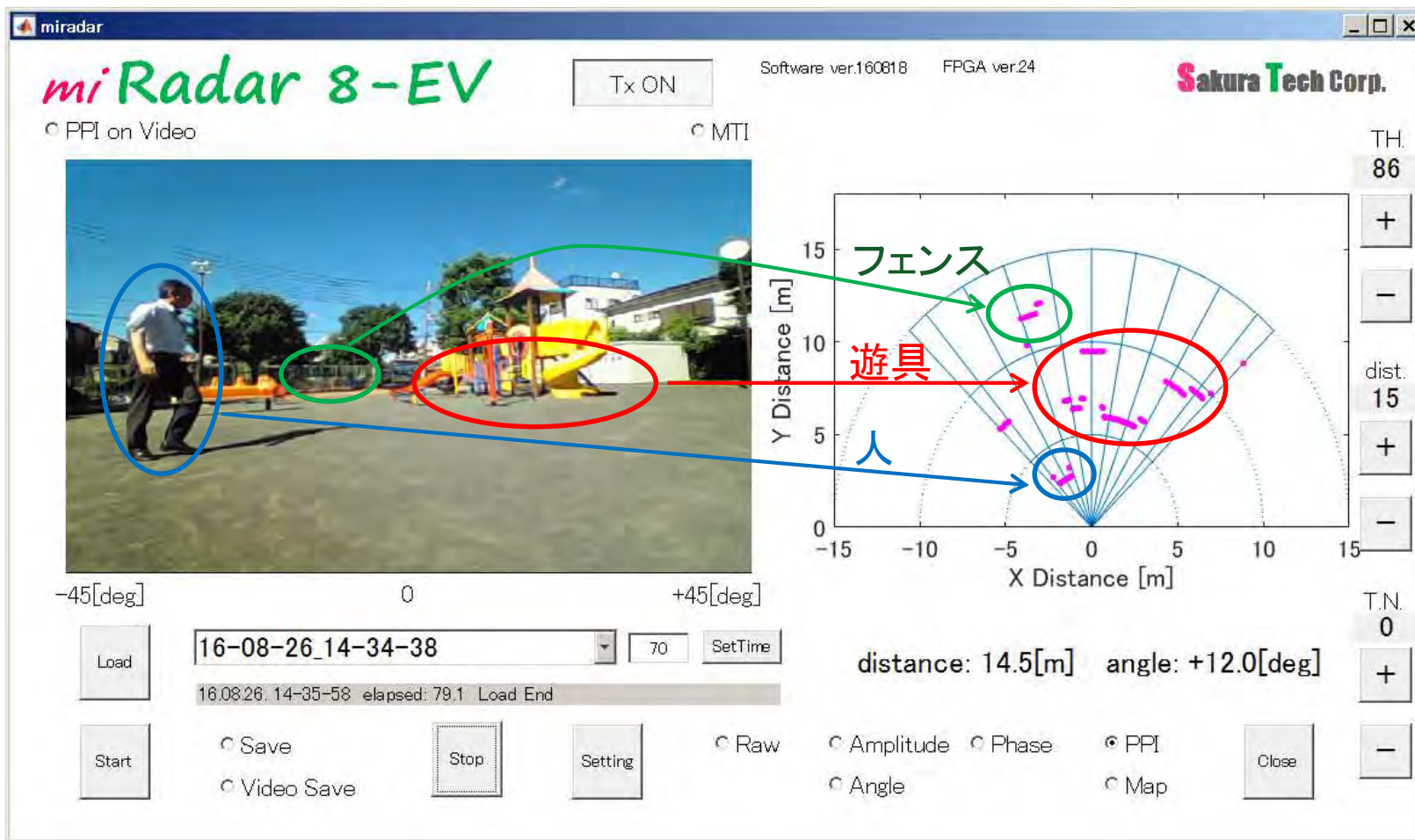
- Radar type MIMO FMCW 24GHz (ARIB-STD-T73)
- Antenna 2 Tx and 4 Rx
- Azimuth cover range ±45 degrees
- Scan speed 0.16s (max), @Microsoft Surfece3
- Detection range 60m (min), @Car detection case
- Output power 3steps -4/2/8dBm
- Module size 104mm(W)×76mm(H)×6mm(D),
inc. MIMO antenna
- Interface USB2.0, micro USB connector
- Power supply DC+5V, 1.5A (max), via micro USB connector
- Operation temperature -20 to 60 °C

評価用ソフトGUI (Standard)



フィールド試験 (1)

人及び障害物を検知可能



フィールド試験 (2)

約20m離れた2人をトラッキング可能。

"miRadars 8"

● PPI on Video

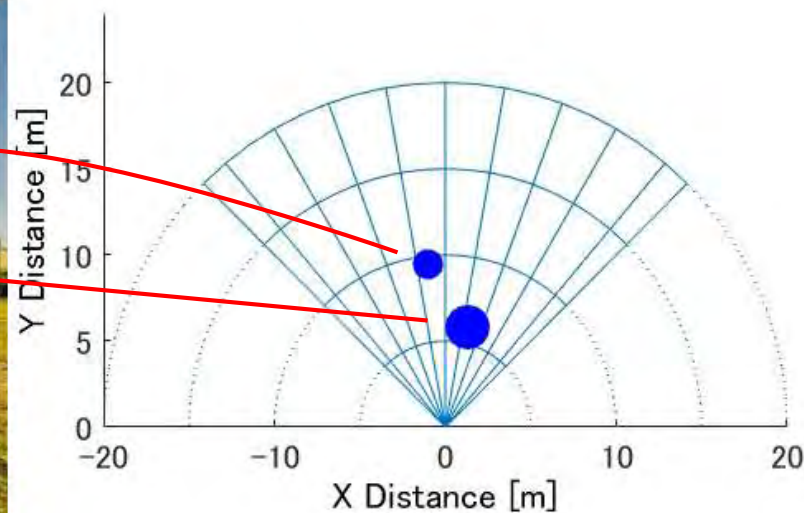
distance: 05.5[m]

angle: +13.0[deg]



距離表示

カメラ映像との重ねあわせ画面



レーダー検出表示

フィールド試験 (3)

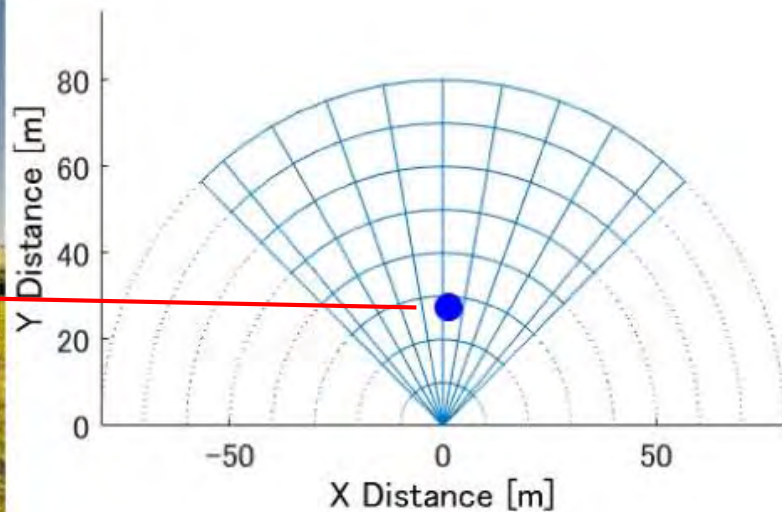
60m以上離れたクルマをトラッキング可能。

"miRadar 8"

◎ PPI on Video

distance: 27.9[m]

angle: +02.0[deg]



検出距離

評価ボード紹介 mi Radar 8-EV

概要

- mi Radar 8センサーモジュール、及び、Windows10タブレットPCを用いたレーダー評価キット
- レーダーアプリケーションソフトウェアとUSBドライバがインストール済み
- カメラ画像にレーダー検出イメージをオーバーレイするソフトウェアの提供

Evaluation Kit miRadar 8-EV



Tablet PC

miRadar 8

Wide Lens

Evaluation Kit GUI



Camera Image

Radar Image

複数台動作

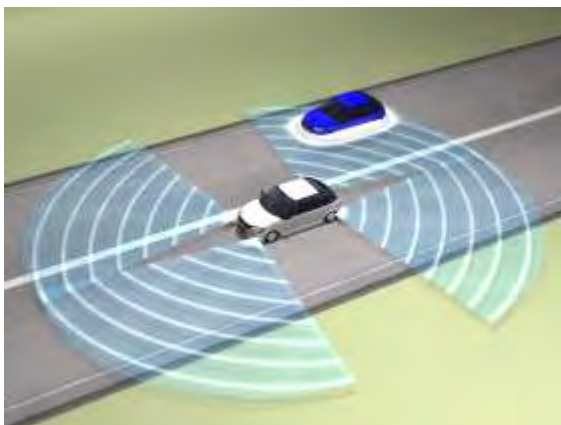
1. 応用評価用ソフトProfessional version

(Standard Versionに 次の機能が追加になります。
PC上のソフトのバージョンアップのみ、ハードの変更なし)

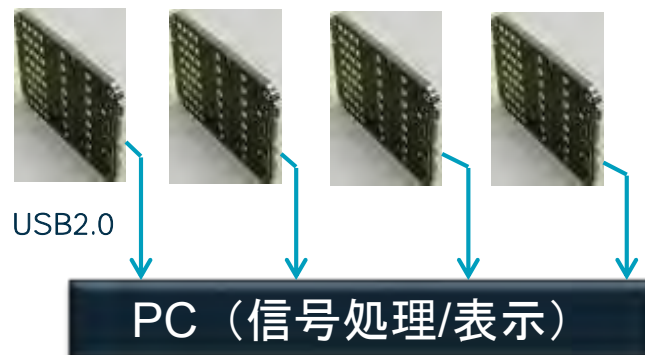
複数台の同期制御

複数台のデータ取得

複数台のデータ表示



使用イメージ miRadar 4台



構成(4台まで)

販売オプション 2016年12月発売予定

まとめ

- 24GHzレーダーチップセットにより小型、省電力の24GHzレーダーが実現可能です。今後、多くの工業製品に適用できます。
- 送信2ch チップセットによりMIMOレーダーが容易に実現できます。
- RF bandwidth to 13 GHzのPLLによりFast Ramp FMCWレーダーが構成可能です。
- 24GHz帯は、バンパー内への実装の容易性及び価格メリットが大きいため、当面24GHz帯が使われるとされます。
- miRadarは、評価キットが充実しているため自動車、セキュリティ分野、ロボット及びドローン分野等において評価が容易です。また、プラットフォームとして使用できます。