



マイクロ波およびミリ波帯の 定在波を利用したレーダ

～ 定在波レーダ ～

近畿大学 生物理工学部

上保徹志

講演項目

- 定在波レーダ開発の経緯
- 定在波レーダの特徴と測距原理
- 位相情報を利用した新たな距離推定法
- 技術評価用 レーダの紹介
- 応用例
- 24GHz帯微弱電波, および
60GHz帯特定小電力 定在波レーダの紹介

定在波レーダ開発の経緯

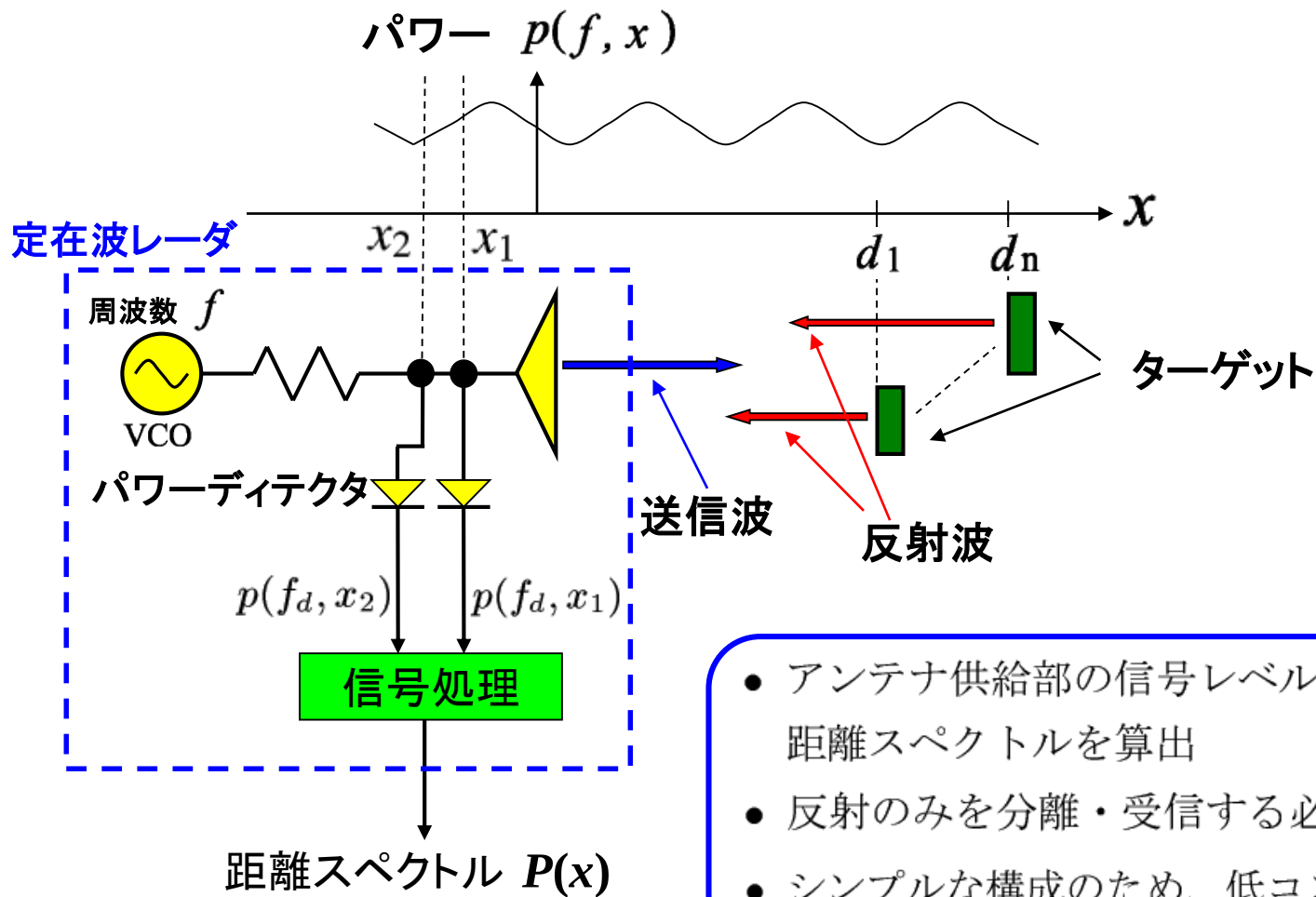
- '98 定在波を用いた距離・変位センサの特許出願
- '01 定在波レーダの特許出願
- '03~'04
経産省地域新生コンソーシアム,
定在波レーダ実用化プロジェクト
- '05 新型定在波レーダの特許出願
- '06 新型定在波レーダ, 試作機完成
- '07 微小変位測定手法の確立. 変位計測分解能: 10 μ m
- '08 技術評価用24GHz定在波レーダ提供開始
- '09 新型定在波レーダの特許査定(特許第4293194号)
位相を用いた距離推定法の特許出願

新型定在波レーダの特徴

- 非常にシンプルな構成 ⇒ 低コスト化
 - 0mまでターゲット検知
 - 相対変位の計測分解能が高い ⇒ $10\mu\text{m}$
 - 複数の移動物体の測距・測速

 - 周波数を連続的に変化させる
 - 周波数の異なる波が干渉
 - 厳密な意味では定在波は立たない
- } ⇒ FMCWレーダ的
- 送信波と反射波を分離しない ⇒ 従来型定在波レーダ的

構成と測距原理



- アンテナ供給部の信号レベルから距離スペクトルを算出
- 反射のみを分離・受信する必要なし
- シンプルな構成のため、低コスト化が可能

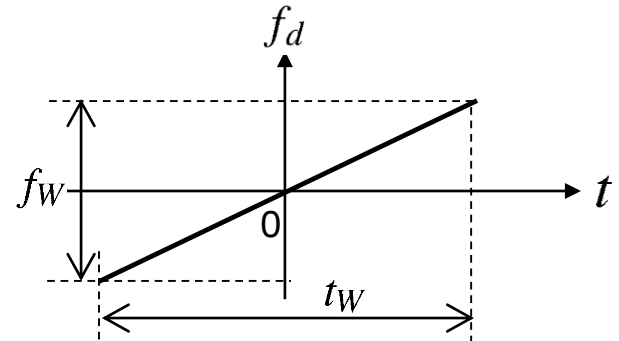
送信波と反射波

◆ 送信波 $V_T = A e^{j2\pi \int f(t - \frac{x}{c}) dt}$ (1)

A : 信号源の振幅

c : 光速

f : 周波数 $\Rightarrow \begin{cases} f(t) = f_0 + f_d \\ f_d = \frac{f_W}{t_W} t \end{cases}$



◆ 反射波 $V_{Rk} = A \gamma_k e^{j\phi_k} e^{j2\pi \int f(t - \frac{2d-x}{c}) dt}$... (2)

γ_k : 反射係数の大きさ

ϕ_k : 反射係数の位相

◆ 合成波のパワー

$$p(f_d, x) = \left| V_T + \sum_{k=1}^n V_{Rk} \right|^2 \quad \dots\dots (3)$$

送信波と反射波の合成

◆ $x = x_s$ で観測される合成波のパワー

$\gamma_k \ll 1$ のとき

$$p(f_d, x_s) \approx$$

$$A^2 \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n \gamma_k^2 + 2 \sum_{k=1}^n \gamma_k \cos \left(\frac{4\pi f_d}{c} (d_k - x_s) + \frac{4\pi f_0}{c} (d_k - x_s) - \phi_k \right) \right\} \cdots (4)$$

送信波のパワー

全反射波のパワー

干渉によるパワーの変化分

各ディテクタの出力信号

◆ $x_1 = 0$ の位置に置かれたディテクタの出力

$$p(f_d, 0) = A^2 \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n \gamma_k^2 + 2 \sum_{k=1}^n \gamma_k \cos \left(\frac{4\pi(f_0 + f_d)d_k}{c} - \phi_k \right) \right\}$$

◆ $x_2 = -\frac{\lambda}{8}$ (ただし、 $\lambda = \frac{c}{f_0}$) の位置に置かれたディテクタの出力

$$p(f_d, -\frac{\lambda}{8}) = A^2 \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n \gamma_k^2 - 2 \sum_{k=1}^n \gamma_k \sin \left(\frac{4\pi(f_0 + f_d)d_k}{c} - \phi_k \right) \right\}$$

解析信号

◆ f_d で微分

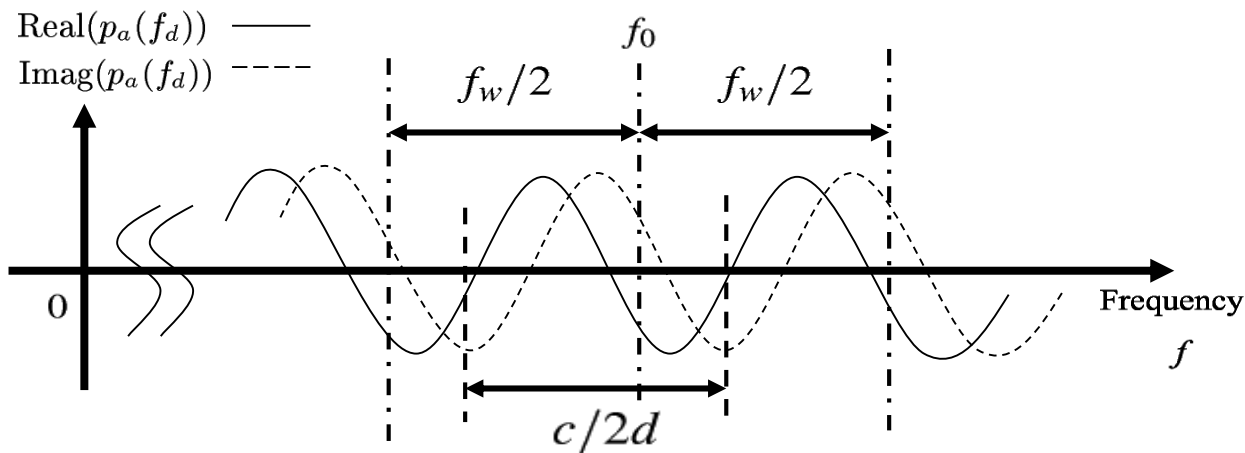
$$- p_{diff}(f_d, 0) = 2A^2 \sum_{k=1}^n \gamma_k \frac{4\pi d_k}{c} \sin\left(\frac{4\pi(f_0 + f_d)d_k}{c} - \phi_k\right)$$

$$- p_{diff}\left(f_d, -\frac{\lambda}{8}\right) = 2A^2 \sum_{k=1}^n \gamma_k \frac{4\pi d_k}{c} \cos\left(\frac{4\pi(f_0 + f_d)d_k}{c} - \phi_k\right)$$

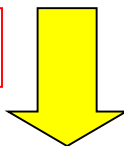
◆ 解析信号

$$\begin{aligned} p_a(f_d) &= - p_{diff}\left(f_d, -\frac{\lambda}{8}\right) - j p_{diff}(f_d, 0) \\ &= 2A^2 \left\{ \sum_{k=1}^n \gamma_k \frac{4\pi d_k}{c} e^{j\left(\frac{4\pi(f_0 + f_d)d_k}{c} - \phi_k\right)} \right\} \end{aligned}$$

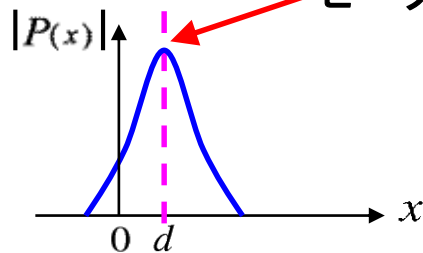
解析信号と距離スペクトル



フーリエ変換



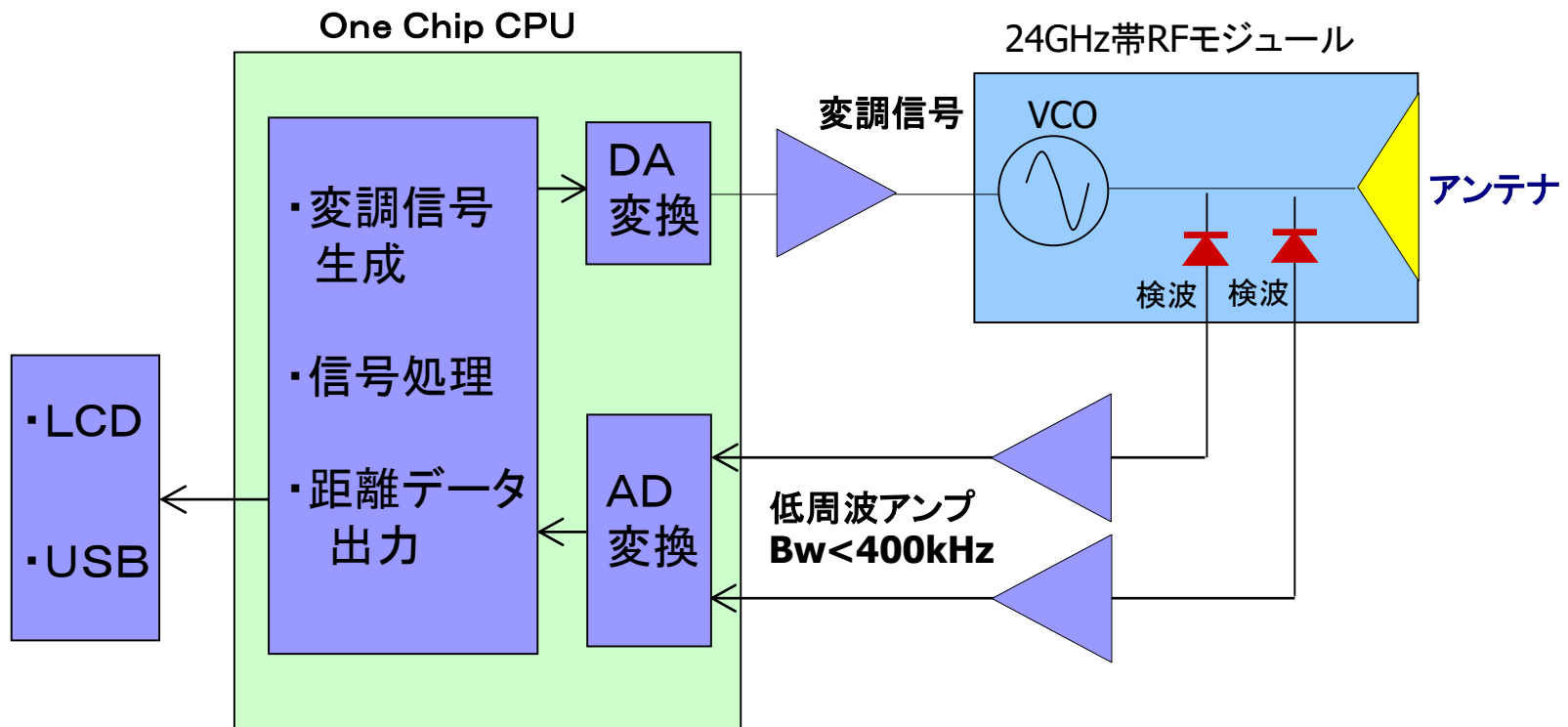
距離スペクトル



ピーク位置=ターゲットの距離

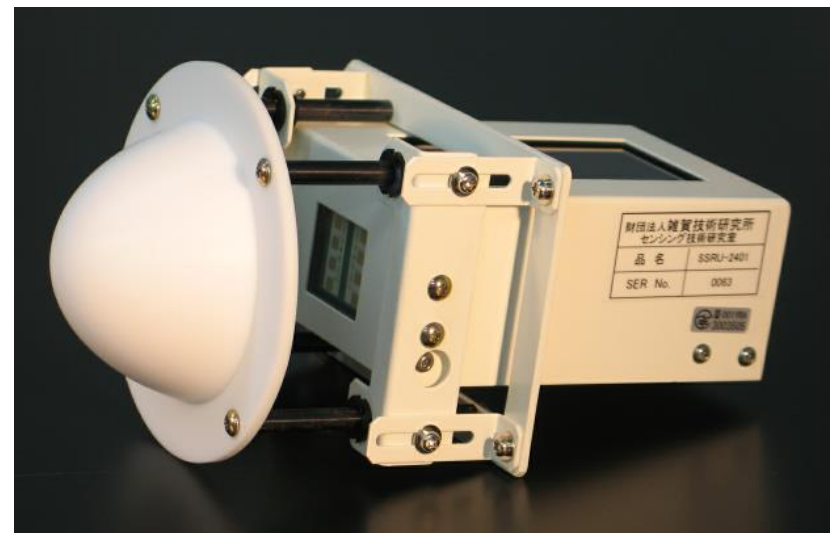
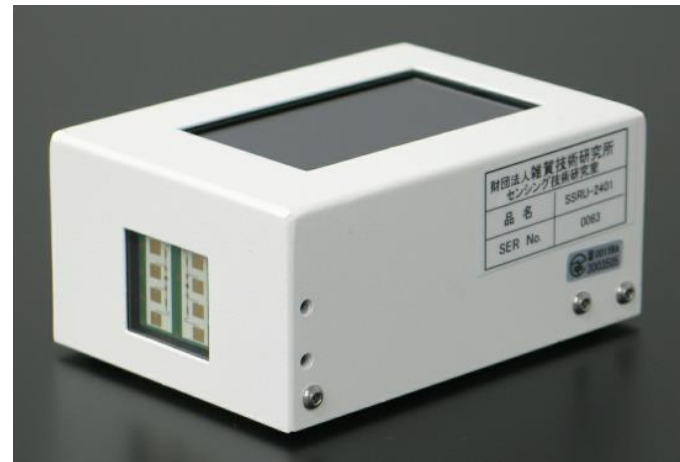
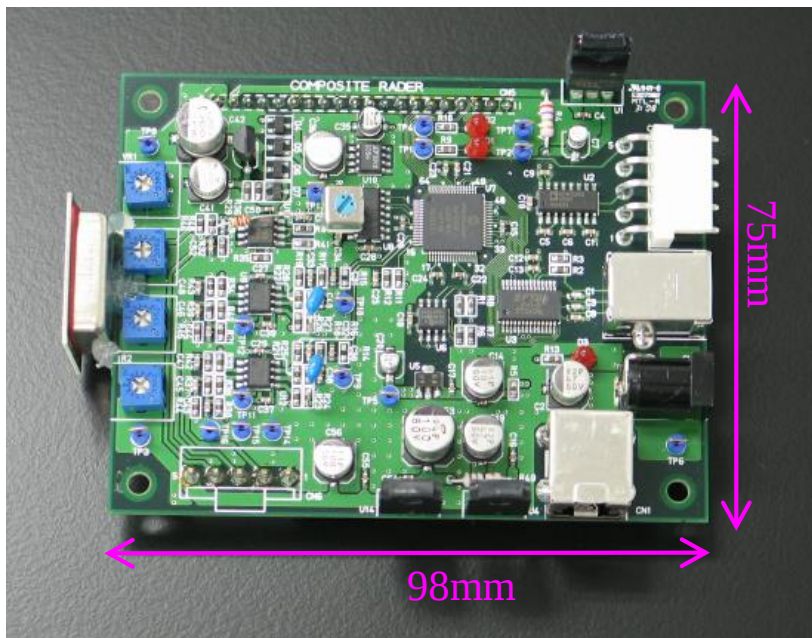
$$P(x) = \int_{-f_w/2}^{+f_w/2} p_a(f_d) e^{-j \frac{4\pi x f_d}{c}} df_d = 2A^2 f_w \sum_{k=1}^n \gamma_k \frac{4\pi d_k}{c} e^{-j\phi_k} e^{j \frac{4\pi f_0}{c} d_k} Sa\left(\frac{2\pi f_w}{c}(x - d_k)\right) \quad \text{ただし、} Sa(z) = \frac{\sin(z)}{z}$$

技術評価用定在波レーダの構成



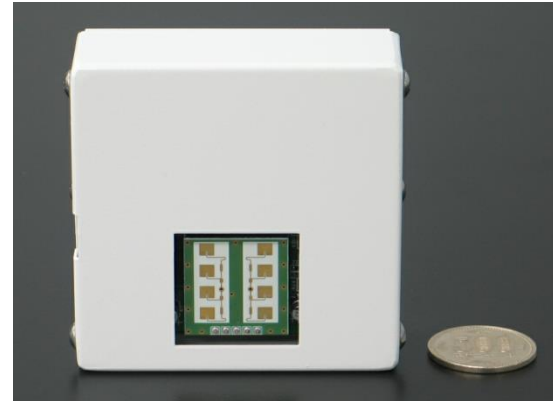
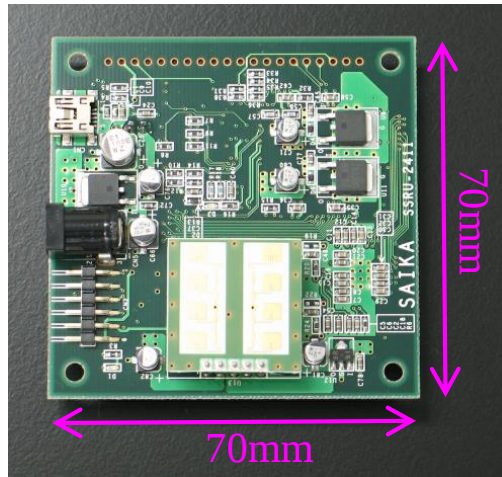
24GHz帯特小 技術評価用レーダ

- SSRU-2401



24GHz帯特小 定在波レーダ(新基板)

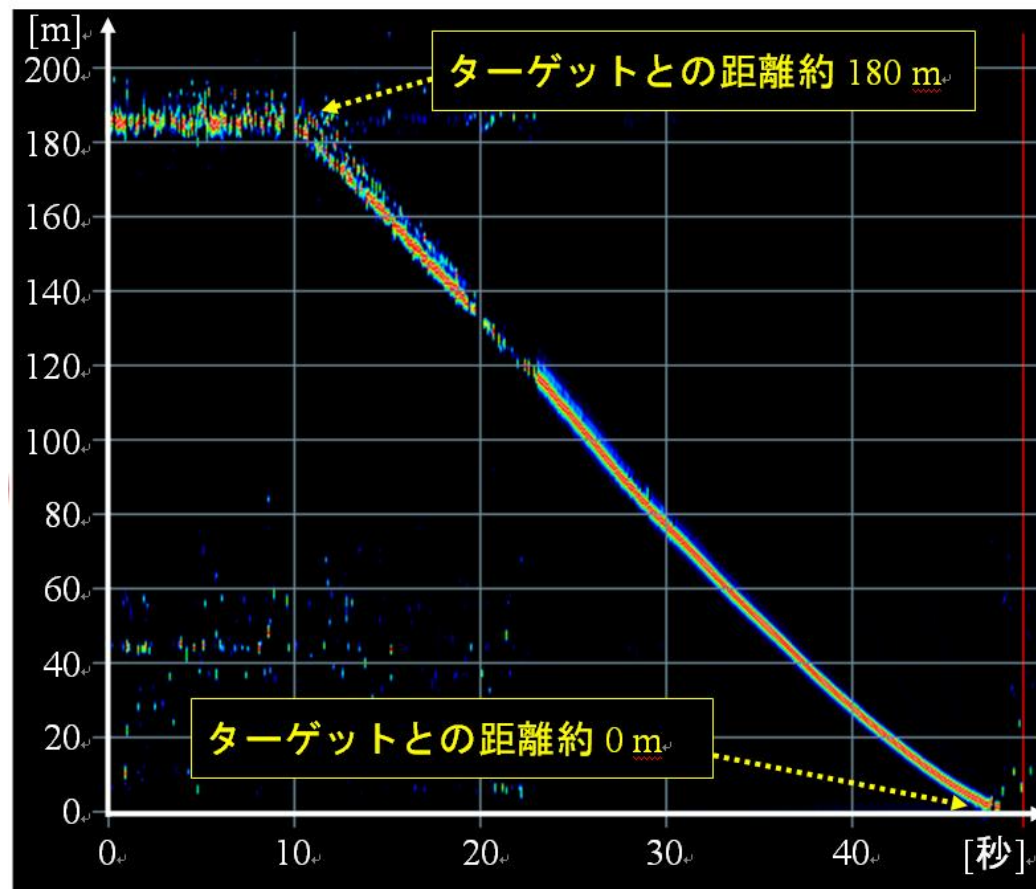
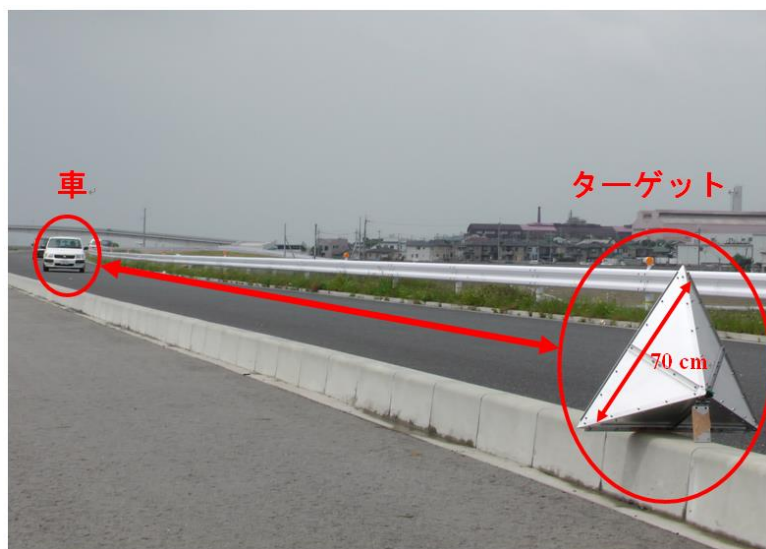
■ SSRU-2411



技術評価用レーダ仕様

- 周波数 : 24GHz帯
- 占有帯域 : 75MHz
- 出力 : 3mW
- 測距範囲 : 0~200m
- 測距値分解能 : 0.01m
- 目標分離分解能 : 4m
- 相対変位測定範囲 : $\pm 3.11\text{mm}$
- 相対変位分解能 : $10\mu\text{m}$
- 速度測定範囲 : $\pm 300\text{km/h}$
- 速度分解能 : 1km/h
- 測定周期 : 50ms以下

距離測定例



応用が期待される分野

交通・安全

- 対人物, 車両検知
(衝突事故防止)
- 道路設備からの車両検知
(カーブミラーの付加機能等)
- 踏切内への侵入者検知

環境・省エネ

人の検知による省電力化

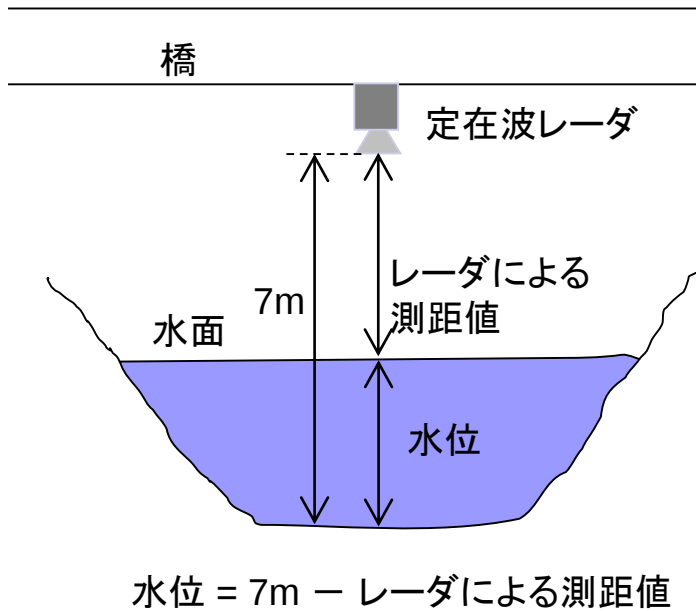
- 夜間照明の制御
- 自動ドア
- エスカレータ等の制御
- 水洗トイレの洗浄制御

災害・セキュリティ

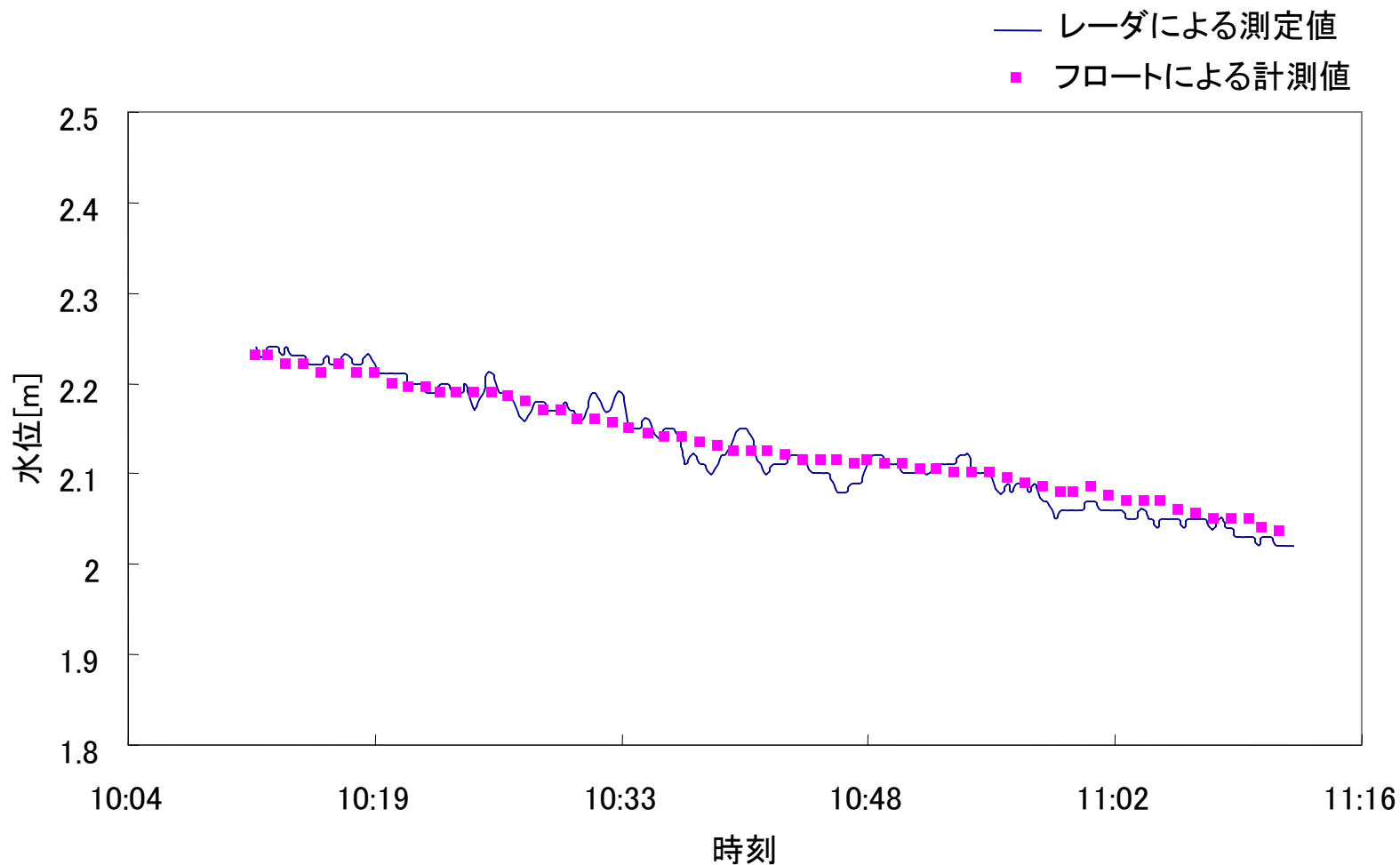
- 生存者の検知
(人体の心拍・呼吸の検出)
- 独居老人の風呂・トイレ・寝室
における生存確認
- 侵入者検知

- 火災現場での人検知
- 地滑り, 雪崩 の監視
- 河川水位監視
- 建造物 の歪み監視

水位計測

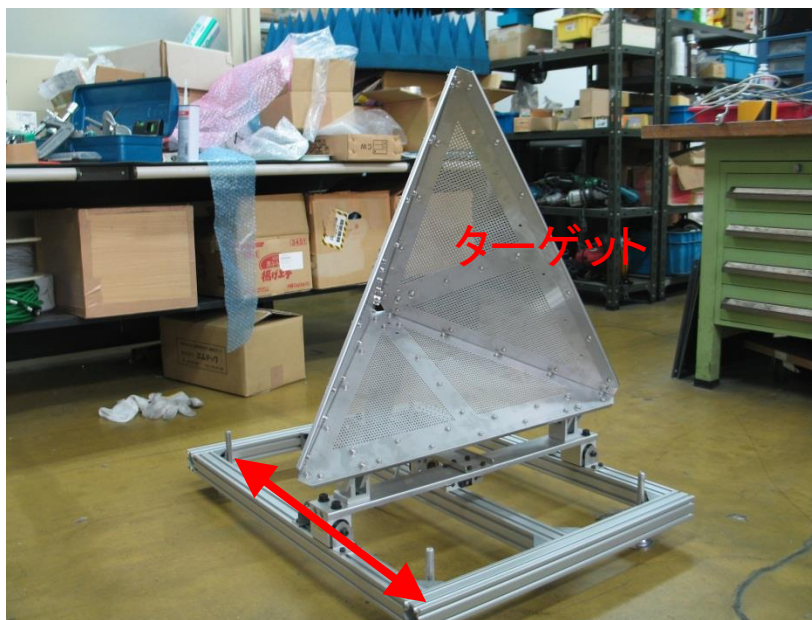


水位の実測結果

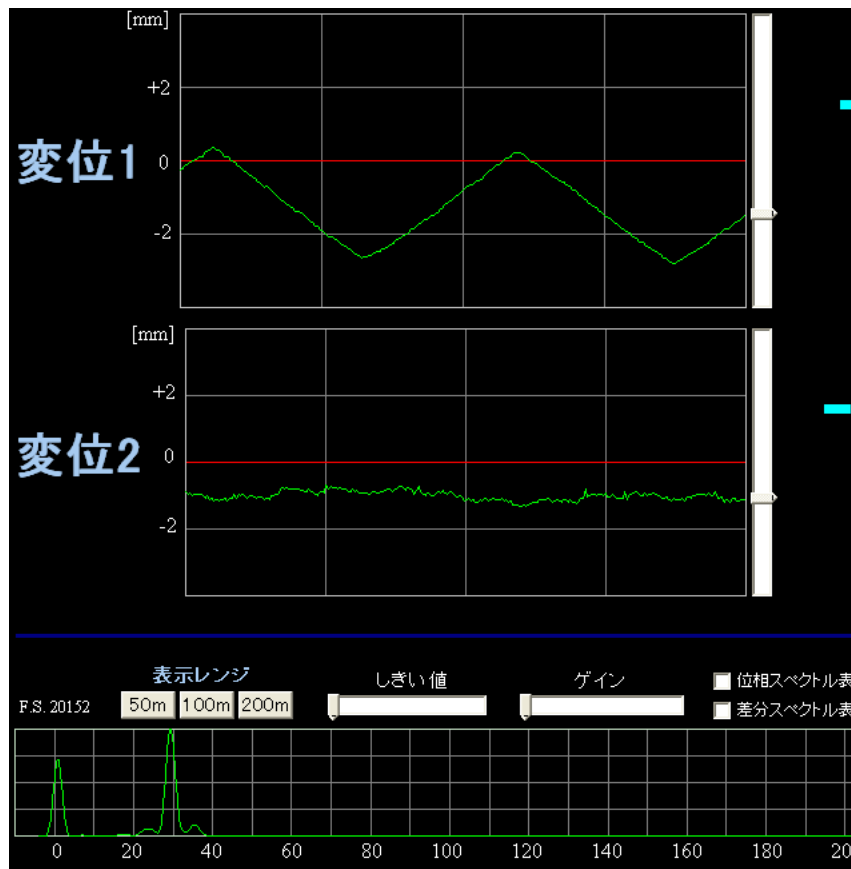


微小変位の計測

- レーダから30m, 100m, 200mの位置にターゲットを設置
- 各位置において, ターゲットを3mmの幅で往復させる.



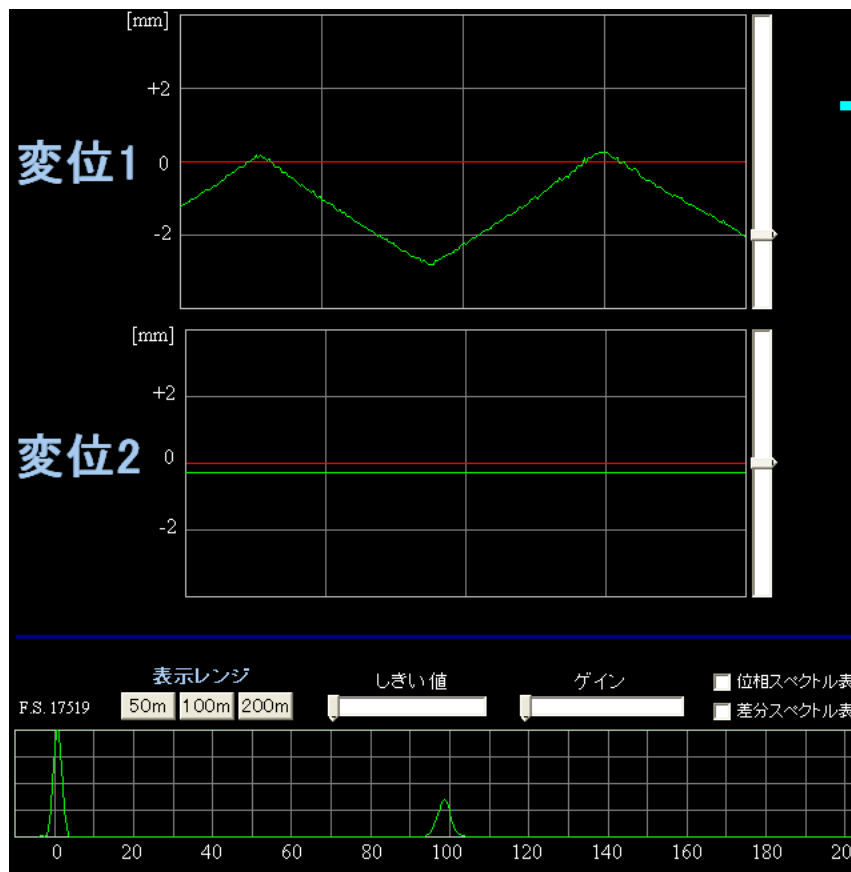
レーダ～ターゲット間 30m



-1.51 mm
29.26 m



レーダ～ターゲット間 100m

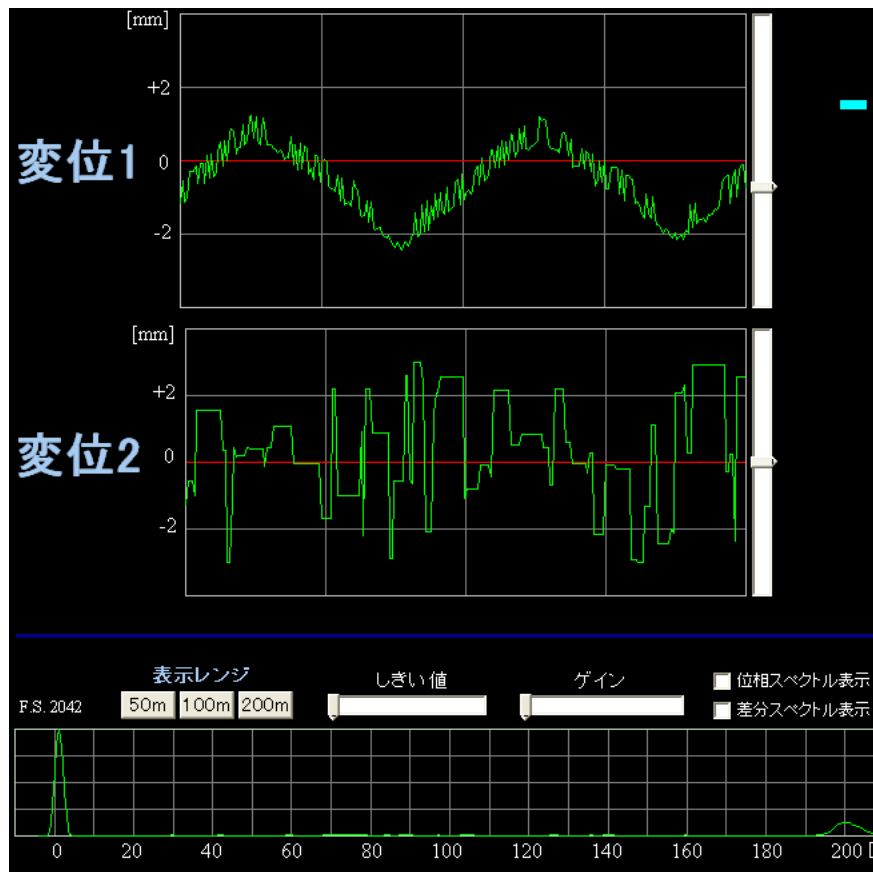


-2.07 mm

98.60 m



レーダ～ターゲット間 200m



-0.75 mm

200.10 m

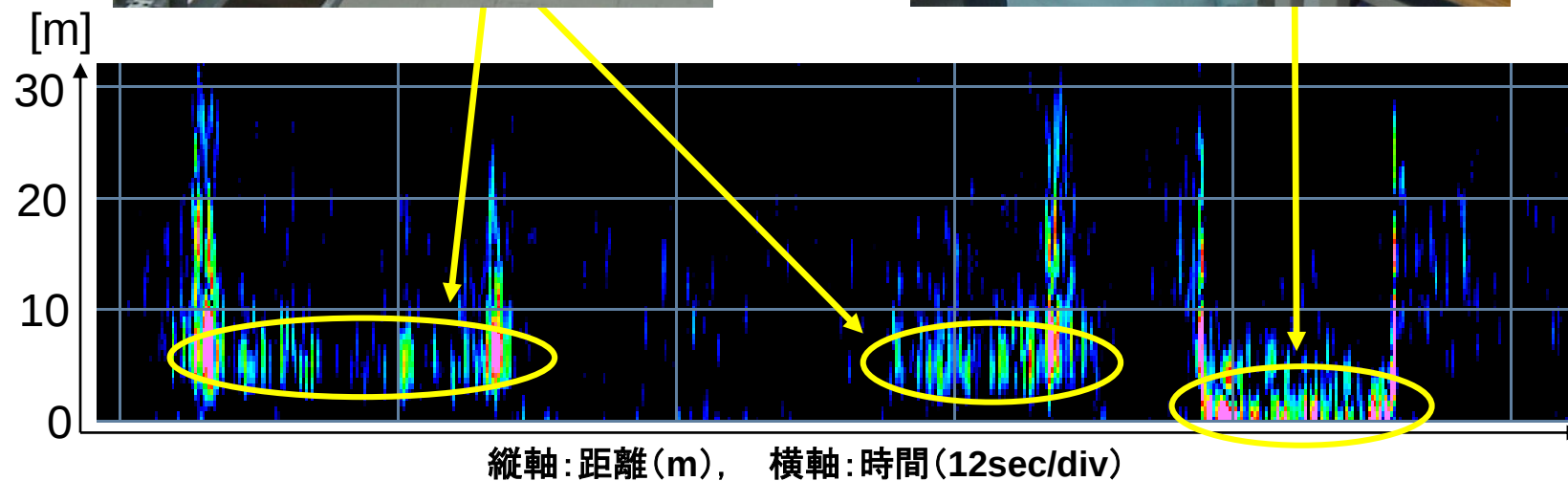


車載レーダ

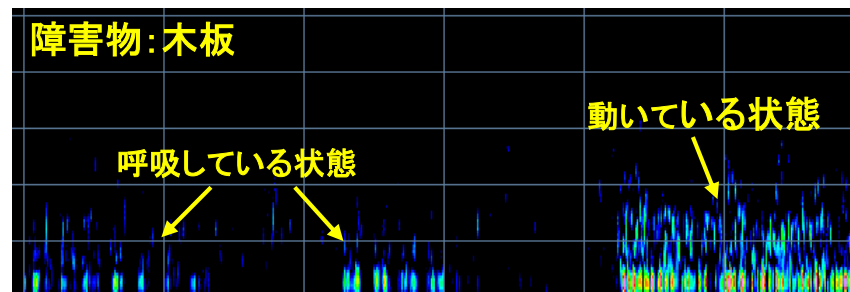
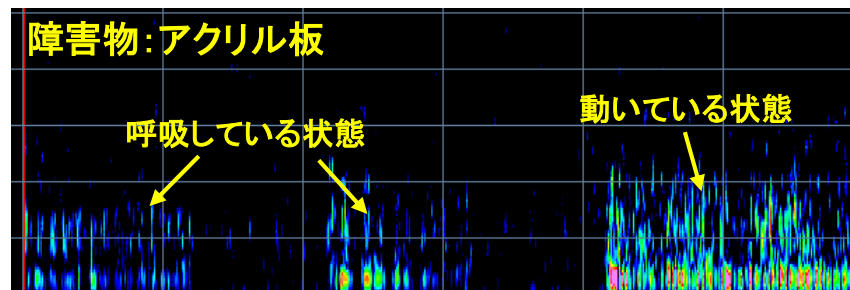
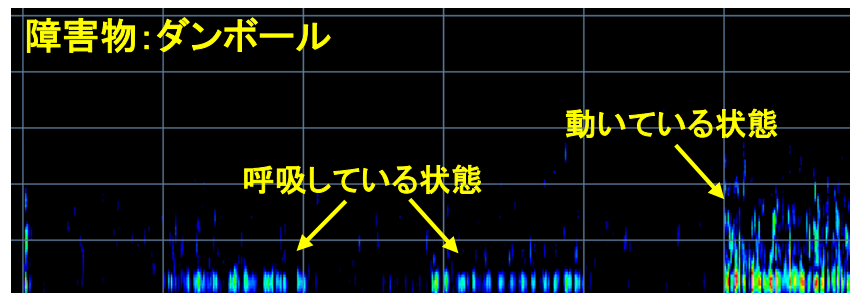
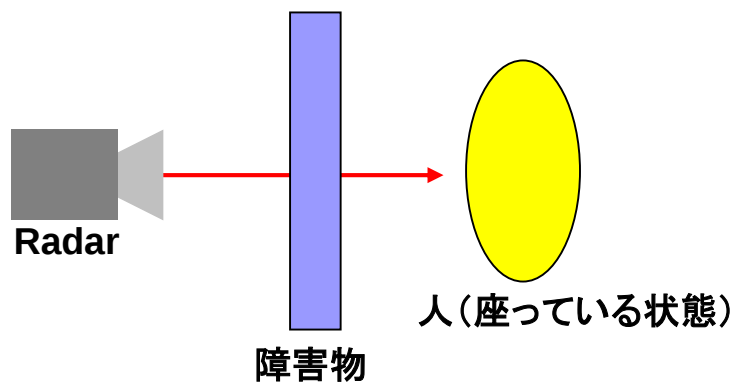
- 東京大学先端科学技術研究センター 西成活裕教授 が実施した、「渋滞解消走行実験」において、
車間距離監視のために用いられた定在波レーダ （2009年8月9日）



人の検知

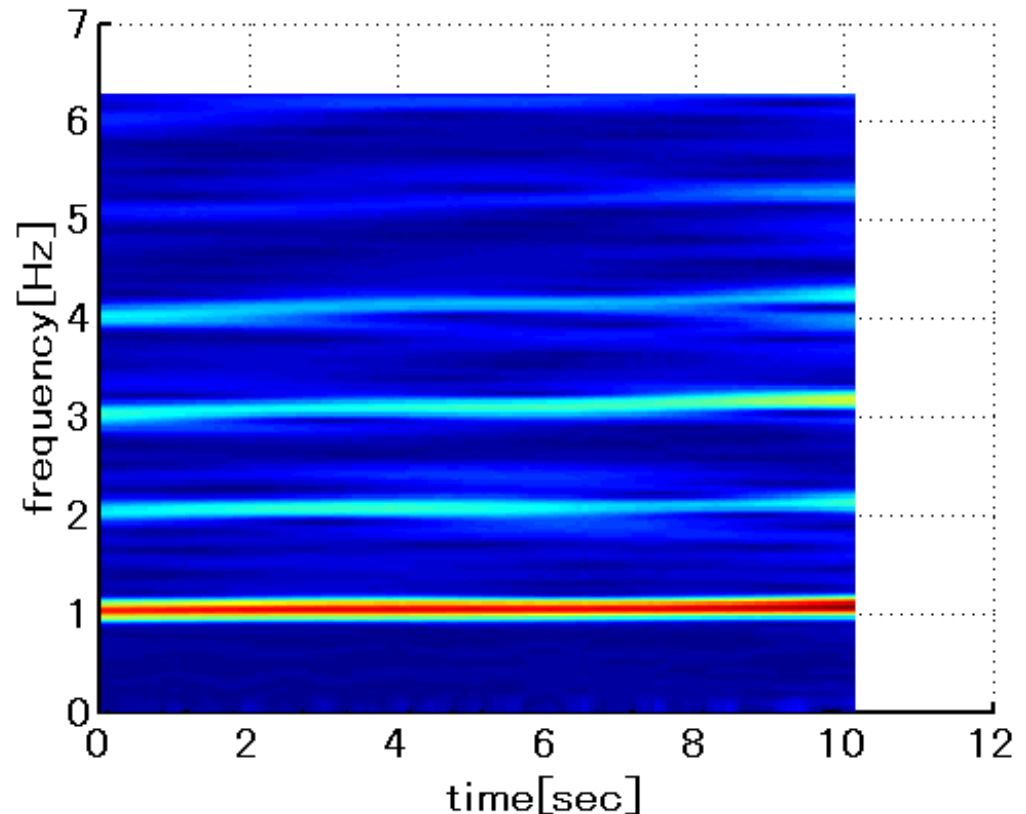
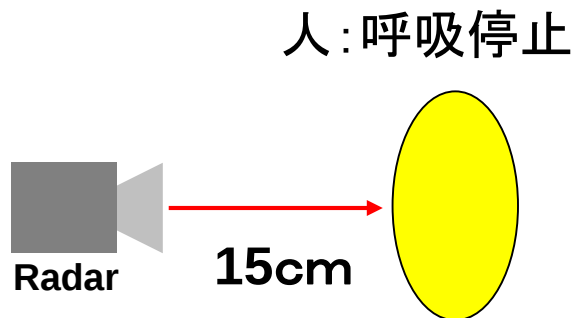


呼吸の検知



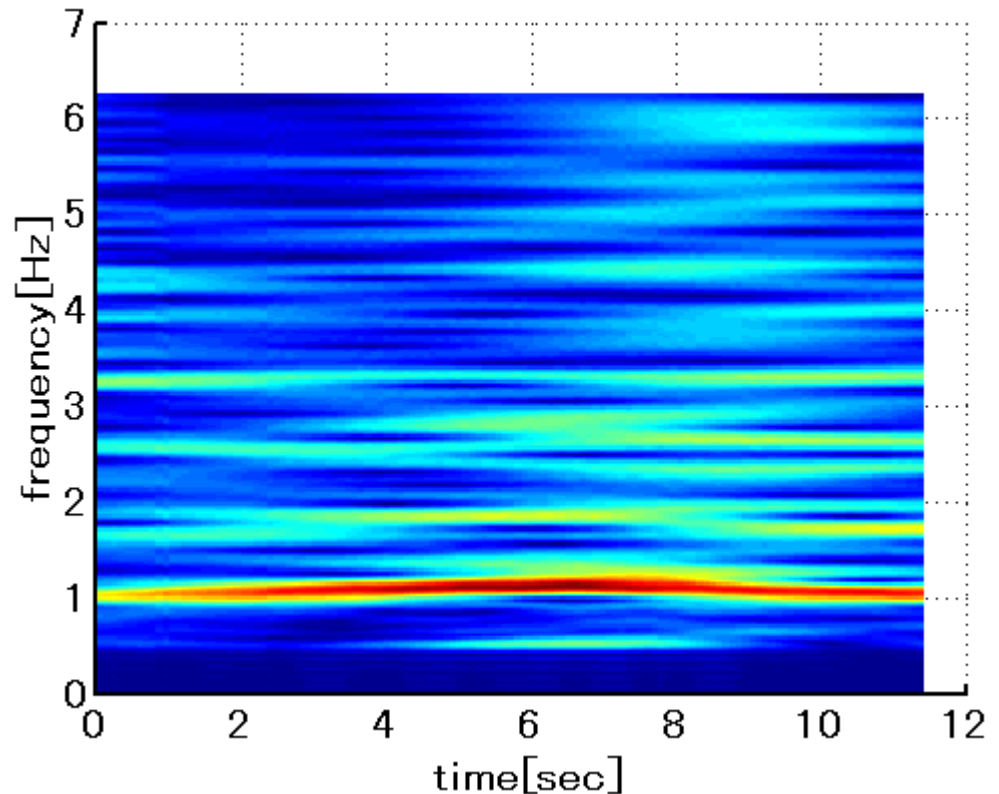
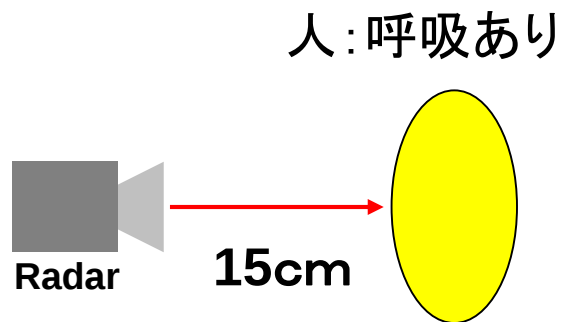
心拍の検知

- 変位の時間微分を ST-FFTし,
時間-周波数スペクトルを求める



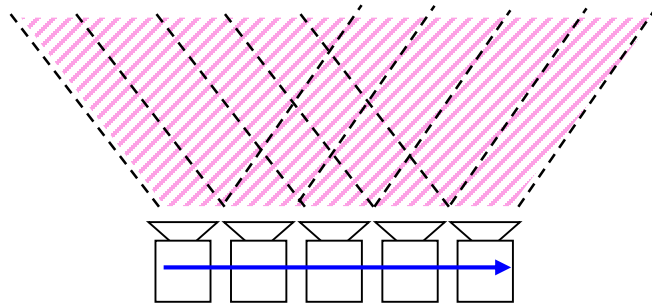
心拍の検知(呼吸あり)

- 0.8Hz以下の主要な成分を除去

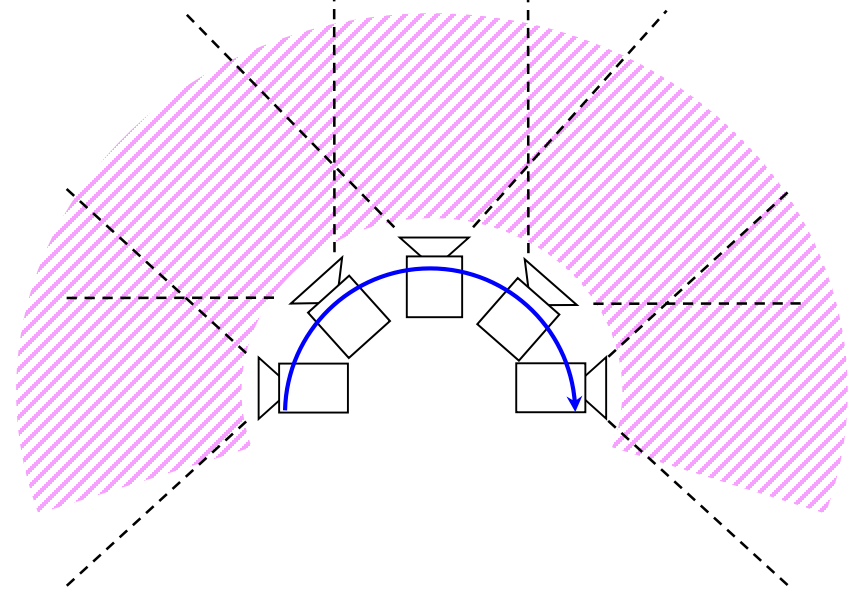


合成開口イメージング

合成開口レーダ

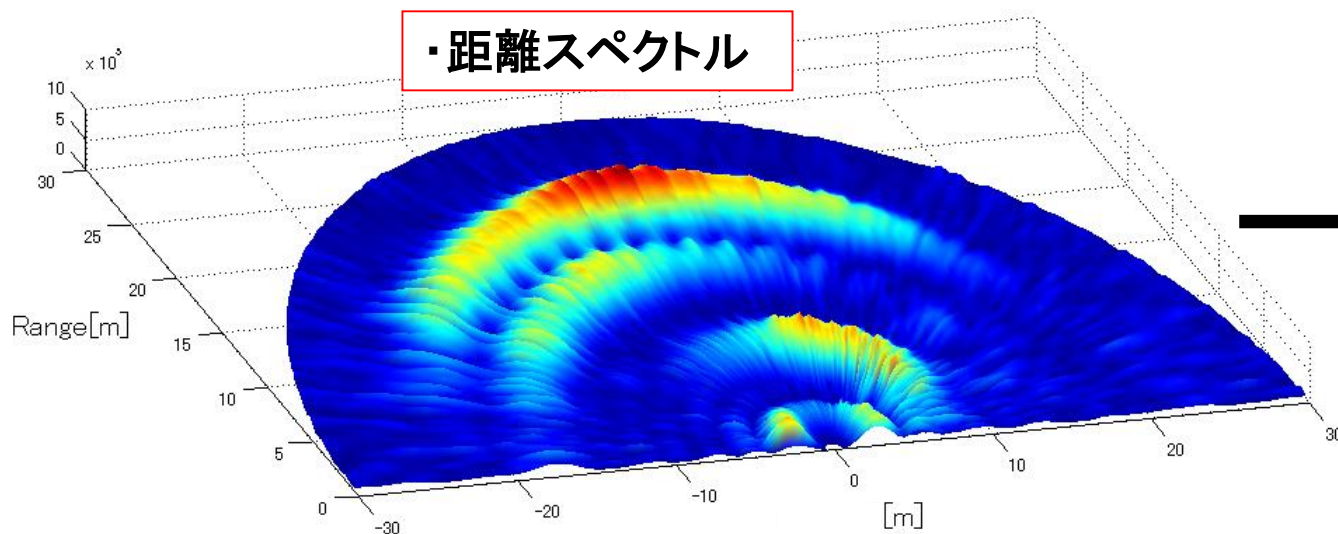
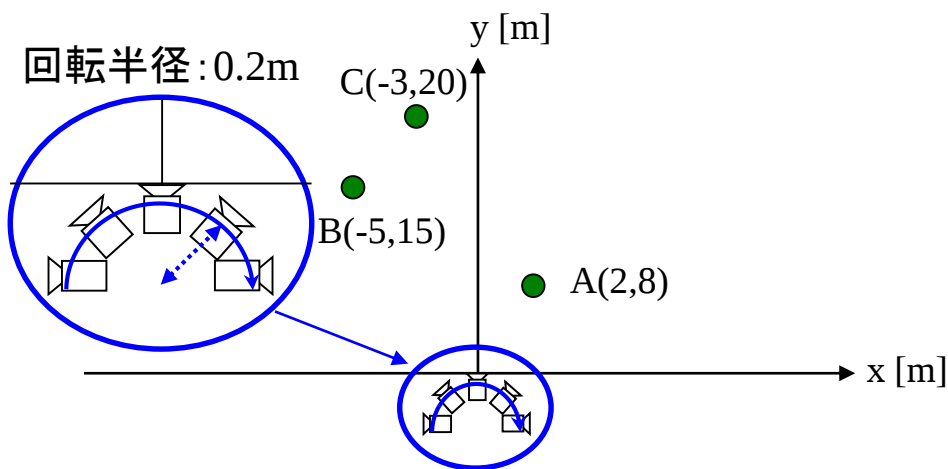


回転合成開口レーダ



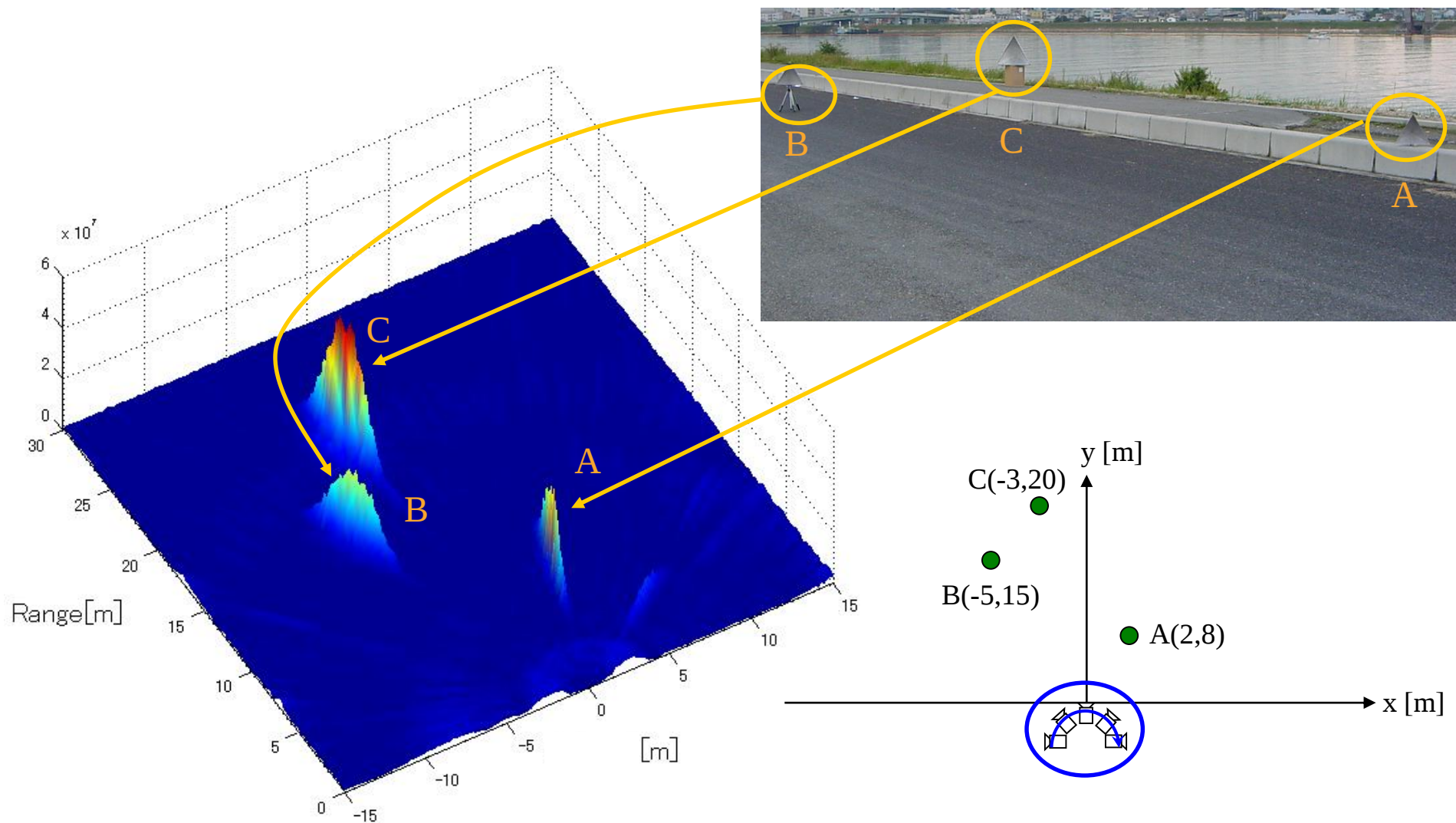
回転的に動作することで、直線時と比較してより広範囲でのイメージングが可能.

実測例1（距離スペクトル）

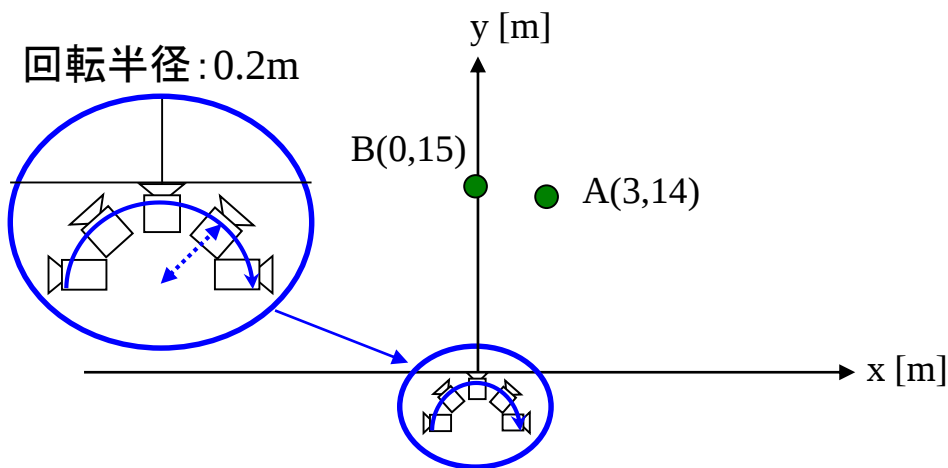


合成開口処理

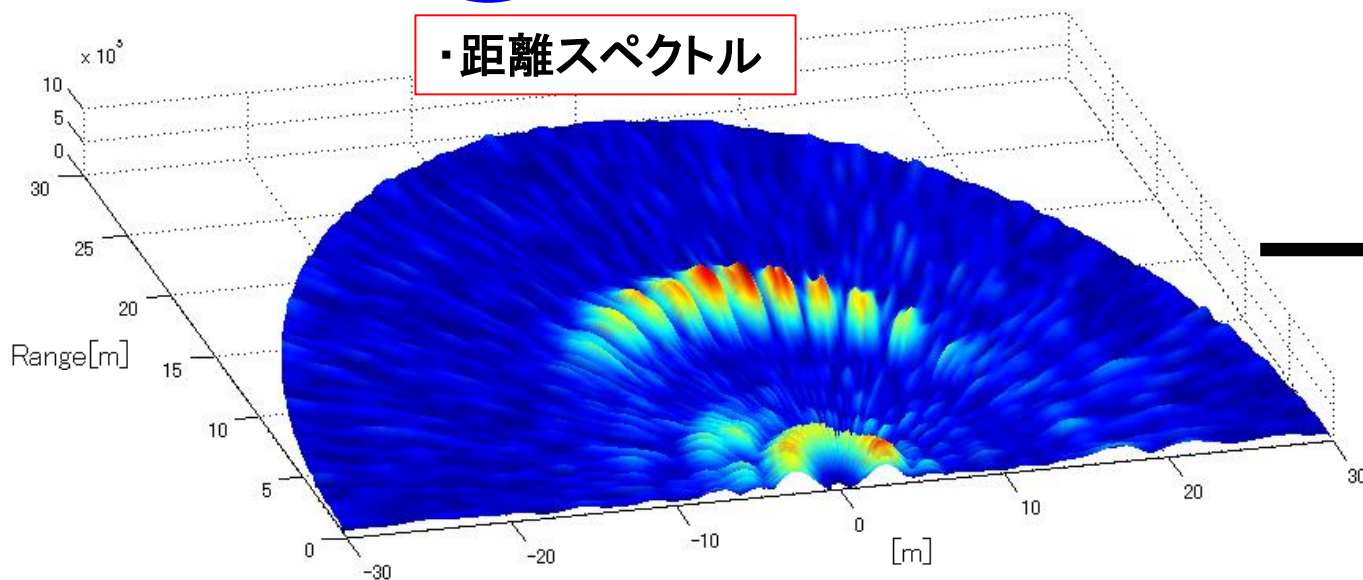
実測例1（合成開口処理）



実測例2（距離スペクトル）

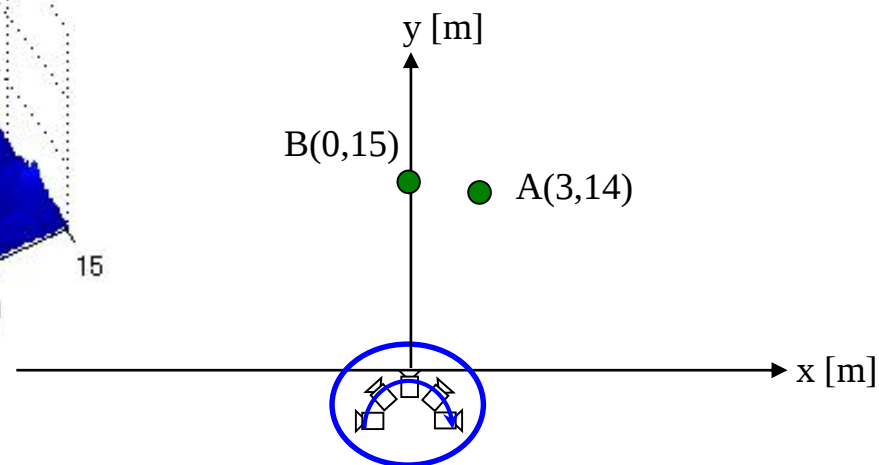
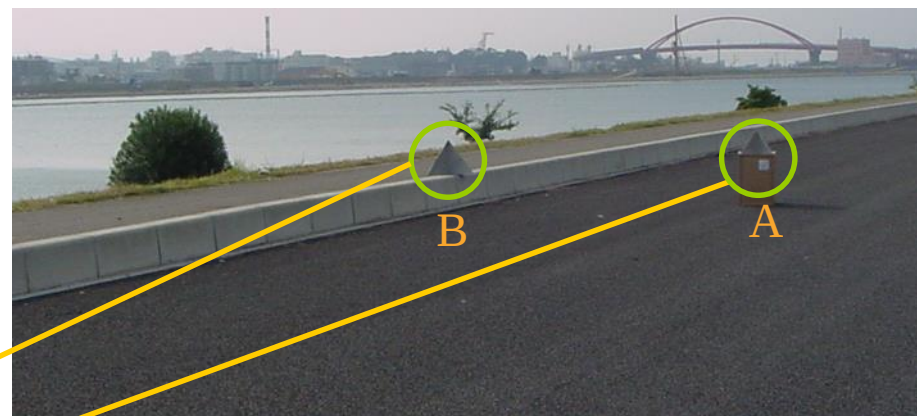
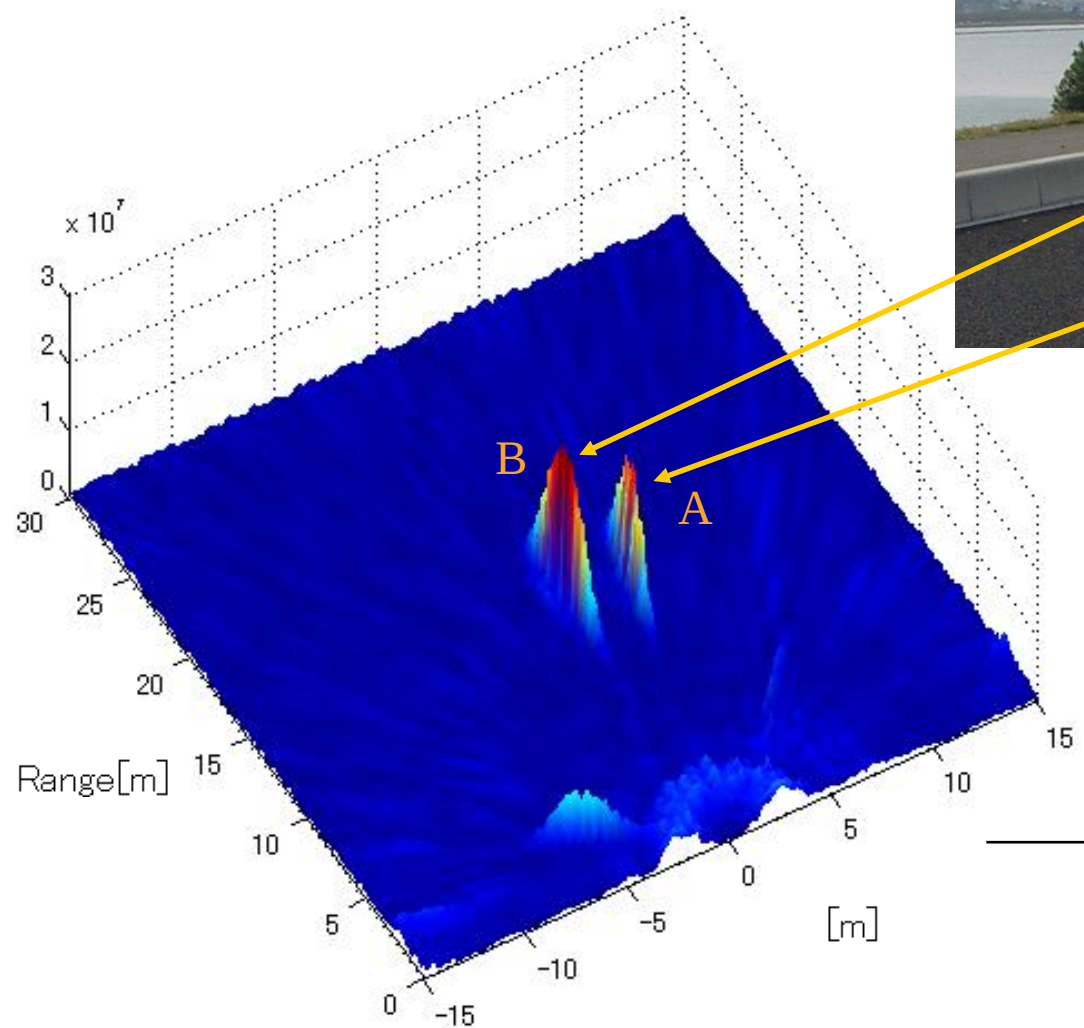


・距離スペクトル



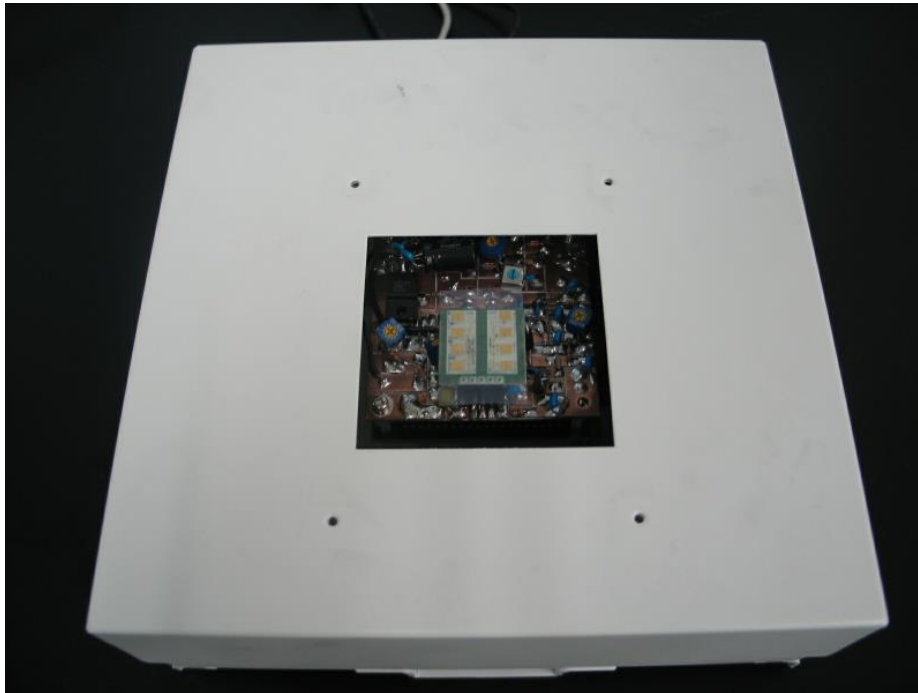
合成開口処理

実測例2（合成開口処理）



24GHz帯微弱電波 定在波レーダ

- 試作機



24GHz帯微弱電波 定在波レーダ

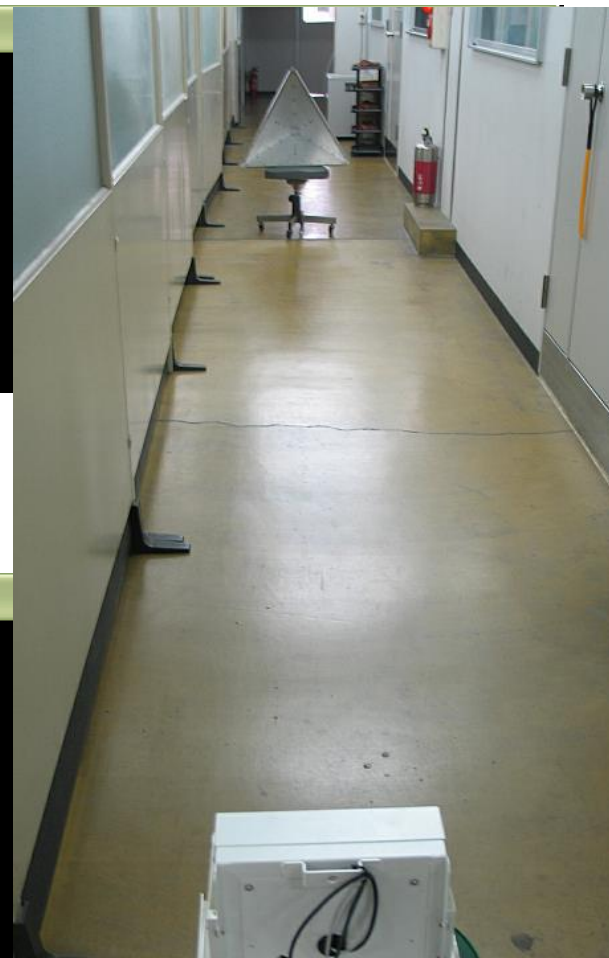
■ 測定例

24GHz帯微弱電波定在波レーダ ($f_w=375\text{MHz}$)



比較:

24GHz帯特定小電力定在波レーダ ($f_w=75\text{MHz}$)

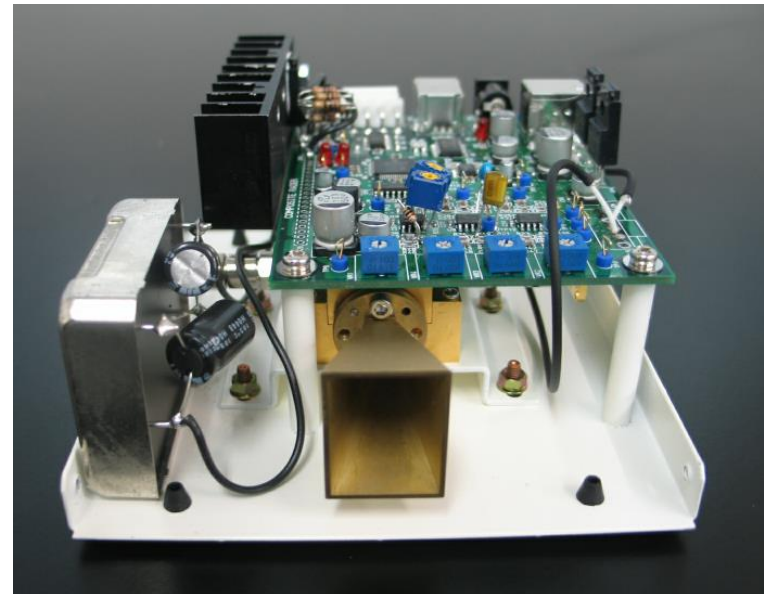
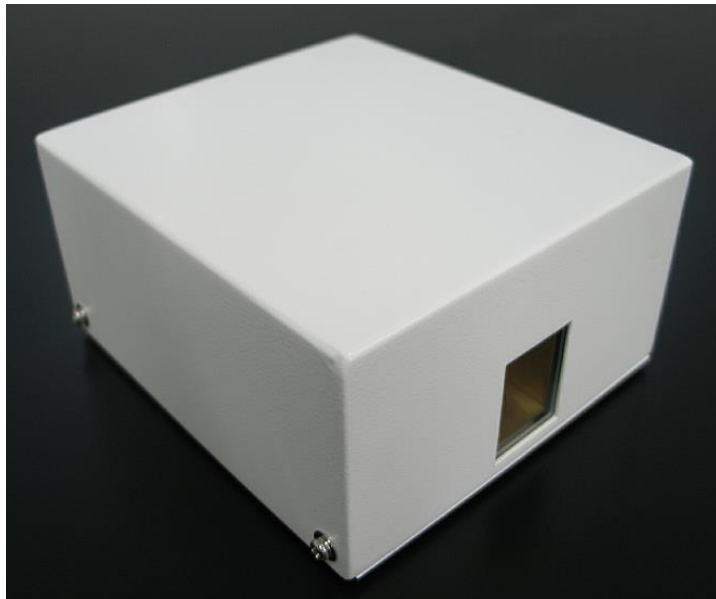


試作機仕様

- 周波数 : 24GHz帯
- 占有帯域 : 375MHz
- 出力 : 微弱電波
- 測距範囲 : 0~10m以上
- 測距値分解能 : 0.01m
- 目標分離分解能 : 0.8m
- 相対変位測定範囲 : $\pm 3.11\text{mm}$
- 相対変位分解能 : $10\mu\text{m}$
- 速度測定範囲 : N.A.
- 速度分解能 : N.A.
- 測定周期 : 50ms以下

60GHz帯特定小電力 定在波レーダ

■ 試作機



試作機仕様

- 周波数 : 60GHz帯
- 占有帯域 : 300MHz
- 出力 : 1mW
- 測距範囲 : 0~40m 以上
- 測距値分解能 : 0.01m
- 目標分離分解能 : 1m
- 相対変位測定範囲 : N.A.
- 相対変位分解能 : N.A.
- 速度測定範囲 : N.A.
- 速度分解能 : N.A.
- 測定周期 : 50ms以下

参考文献

1. 上保 徹志, 他
“定在波を用い数10cmから測定可能な高分解能レーダ”,
電子情報通信学会技術研究報告, IT2000-70, pp.161-166, March 2001
2. T. Uebo, et al.,
“Short Range Radar Utilizing Standing Wave of Microwave or Millimeter Wave”,
Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, pp.95-99, May 2001
3. S. Fujimori, T. Uebo, et al.,
“Measurement of Distance and Velocity of a Moving Target by Short-Range High-Resolution Radar Utilizing Standing Wave”,
Proc. of the IEEE International Symposium MWSCAS 2004, vol.1, pp.361-364, July 2004
4. T. Uebo, et al.,
“Standing Wave Radar Capable of Measuring Distances Down to Zero Meters”,
IEICE TRANS. COMMUN., vol.E88-B, no.6, pp.2609-2615, June 2005
5. 上保 徹志,
“0mから測距可能な定在波レーダ”,
電気学会論文誌C, vol.125-C, no.11, pp.1646-1651, Nov. 2005
6. 大窪 義博, 上保 徹志,
“距離0mから測距可能な定在波レーダの測定原理の実験的検証”,
電子情報通信学会論文誌, vol.J89-B, no.7, pp.1141-1150, July 2006

特許

- 特許第4293194号
「距離測定装置、及び距離測定方法」
- 特許第3461498号
「距離測定装置、距離測定設備および距離測定方法」
- 特開2004-325085
「距離測定方法、及びそれを適用した距離測定装置、
並びにそれを適用した距離測定設備」
- 特願2004-146358
「距離測定装置、距離測定方法および距離測定プログラム」