

24GHz 帯 FM-CW レーダの設計と特性

宮坂 浩平[†] 齋藤 光正^{††} 山口 一弘^{†††} 松江 英明^{†††}

[†] 諏訪東京理科大学大学院 工学・マネジメント研究科

^{††} 株式会社 CQ-S ネット

^{†††} 諏訪東京理科大学 システム工学部 電子システム工学科

[†], ^{†††} 〒391-0292 長野県茅野市豊平 5000-1

^{††} 〒221-0064 神奈川県横浜市神奈川区鳥越 7-8

E-mail: [†] jgh12613@ed.tus.ac.jp ^{††} saitoh@cq-snet.com ^{†††} {yamaguchi, matsue}@rs.suwa.tus.ac.jp

あらまし 本稿では、24GHz 帯を使用した FM-CW 方式レーダを用い、反射物が複数存在する環境下にて被測定物の微小変位を検出し表示する差分検出方式を提案する。具体的には、FM-CW 方式レーダ装置について、動作原理を示した後、計算機シミュレーションおよび実験によりその基本特性を明らかにした。そして提案方式を用いることで、被測定物以外の反射物が存在する環境において、レーダ装置から被測定物までの距離および被測定物の微小変位の検出が可能であることを確認した。

キーワード FM-CW レーダ, 差分検出方式, 距離分解能, 微小変位計測, 距離スペクトル

Design and Performance of a FM-CW Radar using 24GHz band

Kohei Miyasaka[†] Mitsumasa Saito^{††} Kazuhiro Yamaguchi^{†††} Hideaki Matsue^{†††}

[†] Graduate school of Tokyo University of Science, Suwa ^{†††} Tokyo University of Science, Suwa

[†], ^{††} 5000-1, Toyohira, Chino, Nagano, 391-0292, Japan

^{††} CQ-S net Inc. 7-8, torikoshi, kanagawa-ku, yokohama, kanagawa, 221-0064, Japan

E-mail: [†] jgh12613@ed.tus.ac.jp ^{††} saitoh@cq-snet.com ^{†††} {yamaguchi, matsue}@rs.suwa.tus.ac.jp

Abstract This paper describes a design and performance of a FM-CW radar system using 24GHz band. The operational principle, computer simulation and the experiment of the distance spectra for distance resolution and a small variation measurement of the radar system based on the differential detection method were described. It was clarified that the proposed differential detection method is very effective for multiple objects environment.

Keyword FM-CW radar, Differential detection method, Distance resolution, Small variation measurement, Distance spectra

1. まえがき

準ミリ波帯を用いたレーダとして特定小電力 ARIB STD T-173 に準拠した 24GHz 帯レーダがあり、屋内外で使用できるため広く適用されている。その中には、移動速度や変動などを図るドップラーレーダ、移動体の距離などを測る 2 周波ドップラーレーダ、静止物体または低速移動体の距離を測る FM-CW レーダなどがある。これらは装置構成が簡易であり小型化が可能のため実装上広い適用範囲が期待できる。今回、静止または準静止物体の距離を計測するため FM-CW

レーダを取り上げ、微小変位量 $\pm 3.1\text{mm}$ まで計測可能でかつ、複数の物体が存在する環境下においてターゲットとする微小変位の変位量を精度よく計測可能なよう変動成分のみ抽出可能な画像処理方法を提案している。そして、計算機シミュレーションおよび実験により基本動作を明らかにしその有効性を示している。

最後に、この FM-CW レーダを人体の移動や呼吸などの計測への適用性について、電波防護指針の立場から検討している。

2. FM-CW レーダの動作原理

図1にFM-CW レーダの基本構成図を示す。FM-CW レーダでは、VCOにより周波数変調した電波を送信アンテナ Tx から発射し、対象物に反射した電波をアンテナ Rx により受信し、送信波とのミキシングによりビート信号を得る。得られたビート信号をFFTし解析することで、対象物までの距離を算出することができる。

送信信号周波数を f 、振幅を A 、送信機からの距離を x とすると、送信信号 $V_T(f, x)$ は次式で表される。

$$V_T(f, x) = Ae^{j\frac{2\pi f}{c}x} \quad (1)$$

K 個の物体による x 点における反射波の信号 $V_R(f, x)$ は、

$$V_R(f, x) = \sum_{k=1}^K A \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{2\pi f}{c}(2d_k - x)} \quad (2)$$

となる。ここで、 γ_k 、 φ_k はそれぞれ k 番目の物体の反射による振幅および位相係数、 α_k は k 番目の物体 X_k に反射した信号の伝搬損による振幅係数である。 d_k は送信点から k 番目の物体までの距離とすると、受信機位置 $x=0$ の点における反射波の信号は(2)式で $x=0$ とおき、

$$V_R(f, 0) = \sum_{k=1}^K A \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{2\pi f}{c}2d_k} \quad (3)$$

送信信号と反射波の信号を乗算し、LPF を通すと次式を得る。

$$V_{out}(f, 0) = \sum_{k=1}^K A^2 \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{4\pi f}{c}d_k} \quad (4)$$

ここでフーリエ変換による距離スペクトルを求めると、

$$\begin{aligned} P(x) &= \int_{f_0 - \frac{f_w}{2}}^{f_0 + \frac{f_w}{2}} V_{out}(f, 0) e^{-j\frac{4\pi f}{c}x} df \\ &= \int_{f_0 - \frac{f_w}{2}}^{f_0 + \frac{f_w}{2}} \sum_{k=1}^K A^2 \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{4\pi f}{c}d_k} e^{-j\frac{4\pi f}{c}x} df \\ &= A^2 \sum_{k=1}^K \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} \int_{f_0 - \frac{f_w}{2}}^{f_0 + \frac{f_w}{2}} e^{j\frac{4\pi f}{c}(d_k - x)} df \\ \text{ここで } f &= f_0 + f_\Delta \text{ とおき、} \\ &= A^2 \sum_{k=1}^K \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} \int_{-\frac{f_w}{2}}^{\frac{f_w}{2}} e^{j\frac{4\pi(f_0 + f_\Delta)(d_k - x)}{c}} df_\Delta \\ &= A^2 \sum_{k=1}^K \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{4\pi f_0}{c}(d_k - x)} f_w \frac{\sin\left\{\frac{2\pi f_w}{c}(d_k - x)\right\}}{\frac{2\pi f_w}{c}(d_k - x)} \quad (5) \end{aligned}$$

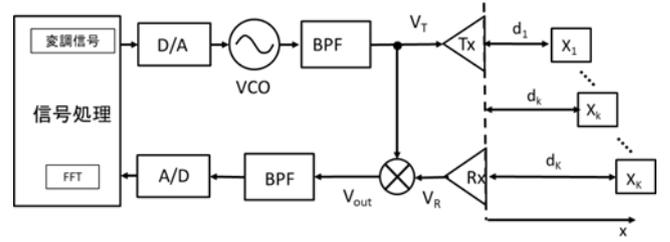


図1.FM-CW レーダの構成

となる。次に距離スペクトルの振幅成分 $|P(x)|$ は

$$\begin{aligned} |P(x)| &= A^2 \left| \sum_{k=1}^K \alpha_k \gamma_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{4\pi f_0}{c}(d_k - x)} f_w \frac{\sin\left\{\frac{2\pi f_w}{c}(d_k - x)\right\}}{\frac{2\pi f_w}{c}(d_k - x)} \right| \\ &\leq A^2 f_w \sum_{k=1}^K \alpha_k \gamma_k \left| \frac{\sin\left\{\frac{2\pi f_w}{c}(d_k - x)\right\}}{\frac{2\pi f_w}{c}(d_k - x)} \right| \quad (6) \end{aligned}$$

として得られる。

ここで(6)式の等号が成り立つのはすべての k について $\varphi_k + \frac{4\pi f_0}{c}(d_k - x)$ が等しい場合である。

ここで $K=1$ すなわち対象物の数が1として、

$$P(x) = A^2 \alpha_1 \gamma_1 e^{j\varphi_1} e^{j\frac{4\pi f_0}{c}(d_1 - x)} f_w \frac{\sin\left\{\frac{2\pi f_w}{c}(d_1 - x)\right\}}{\frac{2\pi f_w}{c}(d_1 - x)} \quad (7)$$

その振幅成分は

$$|P(x)| = A^2 \alpha_1 \gamma_1 f_w \left| \frac{\sin\left\{\frac{2\pi f_w}{c}(d_1 - x)\right\}}{\frac{2\pi f_w}{c}(d_1 - x)} \right| \quad (8)$$

となり、位相成分を求めると、

$$\angle P(x) = \frac{4\pi f_0}{c}(d_1 - x) + \varphi_1 = \theta_1(x) \quad (9)$$

とおくと、 $-\pi \leq \theta_1(x) \leq \pi$ として

$$-\frac{c(-\pi - \varphi_1)}{4\pi f_0} \leq d_1 \leq \frac{c(\pi - \varphi_1)}{4\pi f_0} \quad (10)$$

$\varphi_1 = 0$ とすれば $f_0 = 24.15\text{GHz}$ において $-3.11 \leq d_1 \leq 3.11$ [mm] となり、距離スペクトルの位相特性から $\pm 3.11\text{mm}$ の範囲で微小変位を測定可能となる。

FM変調における掃引時間を t_w 、サンプル時間 t_s とすると周波数ステップ幅 Δf および測距可能最大距離 d_{max} が次のように求められる。

$$\Delta f = \frac{f_w}{t_w/t_s} \text{ [Hz]} \quad (11)$$

$$d_{max} = \frac{c}{4\Delta f} \text{ [m]} \quad (12)$$

例えば、 $t_s = 1\mu\text{s}$ 、 $t_w = 1024\mu\text{s}$ のとき、測距可能な最大距離 $d_{max} = 384\text{m}$ となる。

3. FM-CW レーダのシミュレーション評価

3.1 FM-CW レーダの基本特性

24GHz FM-CW レーダについて、その基本特性を把握するため計算機シミュレーションを行った。表 1 にシミュレーション諸元を示す。図 2 に距離 10m 点にある対象物に対する距離スペクトルを示す。ここで距離スペクトルはハミング窓関数を用いて信号処理をし、振幅成分について正規化を行っている。掃引周波数幅を 50MHz, 100MHz, 200MHz, 400MHz としてシミュレーションを行った。図より、距離スペクトルの分解能は掃引周波数幅 f_w に依存しており、 f_w が大きいほど分解能が高く、例えば掃引周波数幅 200MHz の場合、距離分解能は約 $\pm 1m$ 程度となることがわかる。

図 3 に、距離 10m 点の対象物について掃引サンプル時間 t_s を $0.1\mu s$, $1\mu s$, $10\mu s$ と変化させた場合の距離スペクトルを示す。帯域幅 200MHz, 掃引時間 $1024\mu s$ において、 $t_s=0.1\mu s$, $1\mu s$, $10\mu s$ に対する周波数ステップ幅 Δf はそれぞれ 19.5kHz, 195kHz, 1950kHz となる。図 3 から、掃引サンプル時間が大となると測定誤差が大きくなり、例えば $10\mu s$ では誤差は約 $0.5m$ 程度となる。

図 4 に、対象物の距離を 10m から 20m まで $0.5m$ ステップで可変させたときの距離スペクトルを示す。レーダのパラメータは $f_w=200MHz$, 掃引サンプル時間 $1\mu s$ とした。図 4(a) は実距離 d に対する距離スペクトルの変化を $|P(x)|$ の 3 次元表示を示す。図 4(b) は 3 次元表示を上からの視点で表示し、色が $|P(x)|$ の大きさを示している。図から、距離の変化に対応して測定結果も 1 対 1 に対応して変化している。

図 5 に、10m 点においた対象物の微小変位を $-5mm$ から $+5mm$ まで $0.1mm$ ステップで変化させた場合の変位測定結果を示す。図より、中心周波数 $f_0=24.15GHz$ において $\pm 3.1mm$ の範囲で被測定物の相対的な微小変位を測定できることが確認できた。しかし、 $\pm 3.1mm$ 以上の変位に対しては位相の不確定が存在し、完全に 1 対 1 に対応していないことに注意する必要がある。

表 1. シミュレーション諸元

中心周波数 f_0	24.15GHz
占有帯域幅 f_w	50,100,200,400MHz
掃引時間	1024 μs
掃引サンプル時間 t_s	0.1,1,10 μs
FFT点数	4096
窓関数	hamming

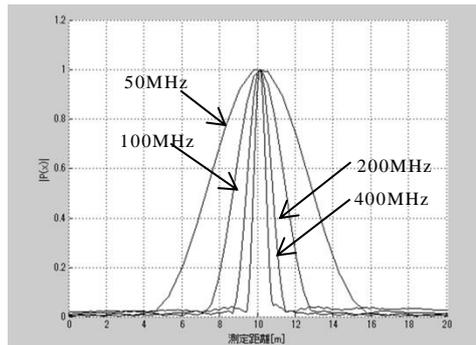


図 2. 掃引幅を変化させた場合の距離スペクトルの分解能

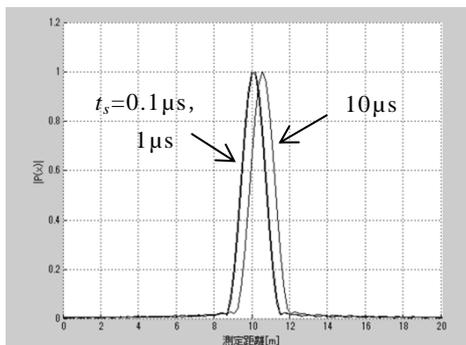
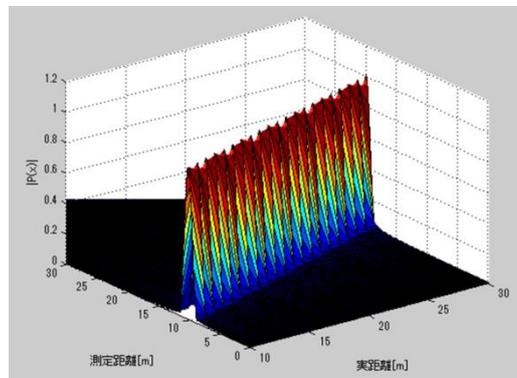
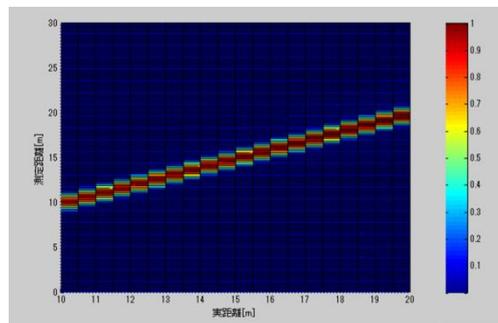


図 3. 掃引サンプル時間を変化させた場合の距離スペクトルの誤差



(a) 距離スペクトル 3 次元表示



(b) 実距離 - 測定距離特性

図 4. $f_w=200MHz$, $t_s=1\mu s$ における距離スペクトルの例

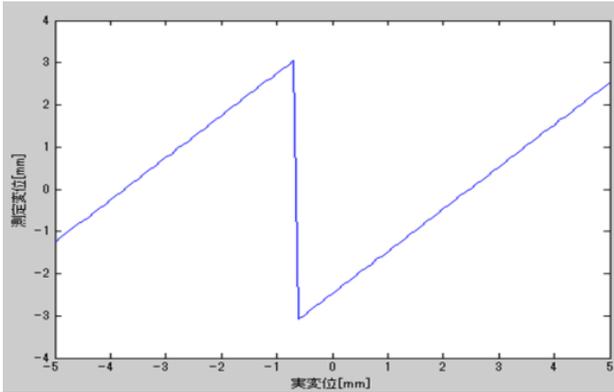


図 5. 位相特性による微小変位のシミュレーション

3.2 提案法

図 6 に、15m と 20m 地点に測定対象と別の反射物がある環境にて、測定対象物を 10m から 20m まで移動させた場合の距離スペクトルを示す。ただし $f_w=200\text{MHz}$ 、掃引サンプル時間 $1\mu\text{s}$ とし、対象物は 1 秒ごとに 0.5m ステップでの移動とした。図 (a) に示すように、測定対象物以外の反射物が存在する環境においては、不要な距離スペクトルに測定対象物のスペクトルが埋もれ識別困難となる。特に、測定対象物からの反射係数がそれ以外の反射物の反射係数に比べて小さい場合には表示結果が悪くなる。そこで図 (b) に示す提案手法では、あらかじめ測定対象物以外のみのが存在する状態のスペクトル $P_0(x)$ を求めておき、測定対象物を含むスペクトル $P(x)$ から $P_0(x)$ を減算することにより対象外の距離スペクトルを除去し表示を行う差分検出法を用いている。

図 6 から、差分検出を用いない場合では対象物の動きが不要反射波によりわかりにくく表示されているが、差分検出を行った場合では反射係数が小さい場合でも測定対象物の動きのみが明確に表示されており、提案法の有効性を確認することができた。

4. 実験による特性評価

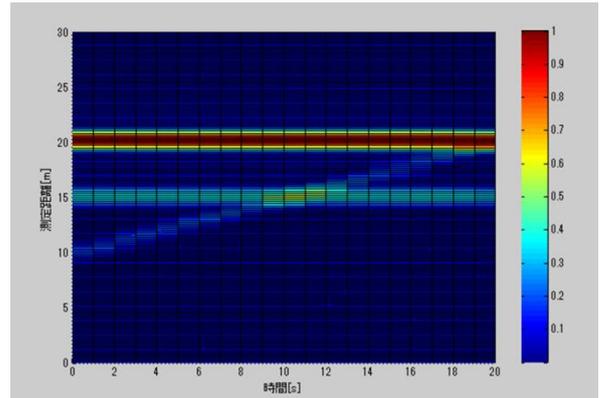
提案法を用いた距離測定および微小変位測定の有効性を確認するため、実験による特性評価を行った。

表 2 に実験に用いた機器の諸元を示す。

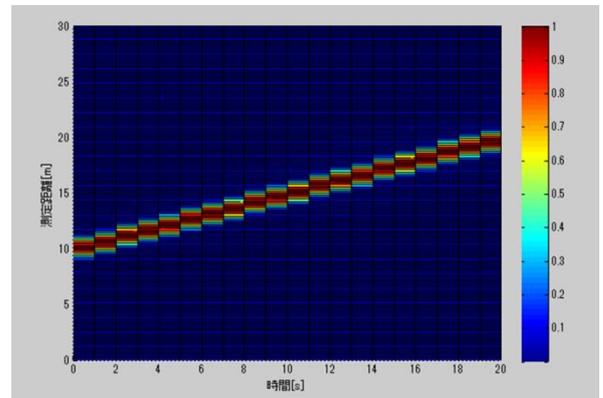
図 1 の構成の FM-CW レーダ装置について特定小電力無線設備の技術適合証明を取得し、その装置を用いて実験を行った。

4.1 差分検出を用いた距離スペクトル表示

図 7 にレーダ機器からの距離 2m から 10m の範囲で人間が歩いて遠ざかり、再び近づく様子を測定し表示した結果を示す。ここで、図は測定した距離スペクトルを表示しており、正規化後スペクトルの大きさに合わせ色分け表示を行っている。図 (a) では対象となる人



(a) 差分検出なし



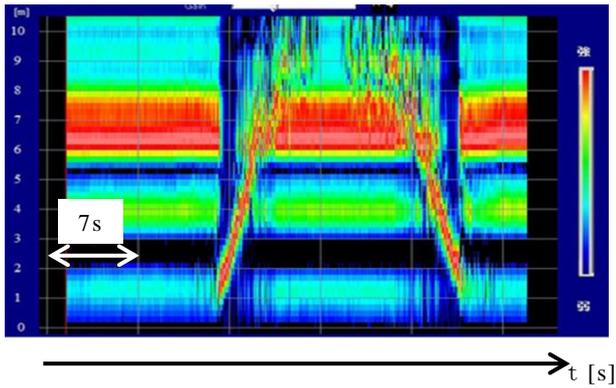
(b) 差分検出あり (提案法)

図 6. 距離スペクトルの従来法と提案法比較

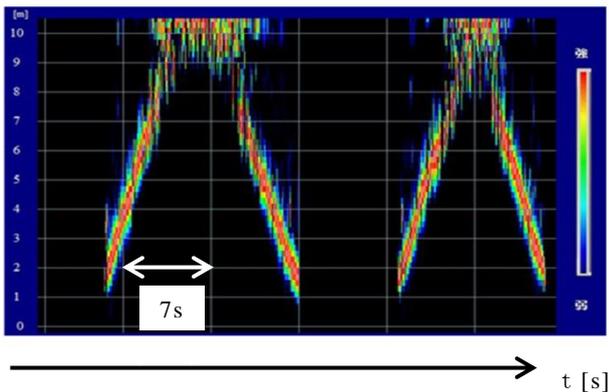
表 2. レーダ機器諸元

中心周波数 f_0	24.15GHz
占有帯域幅 f_w	200MHz
掃引時間	1024 μs
掃引サンプル時間 t_s	1 μs
空中線電力	0.007W
アンテナ利得	11dBi
計測距離範囲	0-100m
相対変位測定範囲	$\pm 3.11\text{mm}$

間以外の環境物の反射が検出されている。そこで、図 (b) に示す差分検出を用いた提案手法では無人の静止状態で測定された信号を測定結果から減算する差分検出表示を行うことで、対象である人間の動きのみを明確に表示している。図 8 に、人間の呼吸状態を測定し表示した結果を示す。相対変位測定範囲の $\pm 3.11\text{mm}$ 内において、人間の呼吸による胸の上下動が計測されている。図 8 においては呼吸の周期が約 4s、上下の動



(a) 差分検出なし



(b) 差分検出あり

図 7. 距離スペクトル表示例

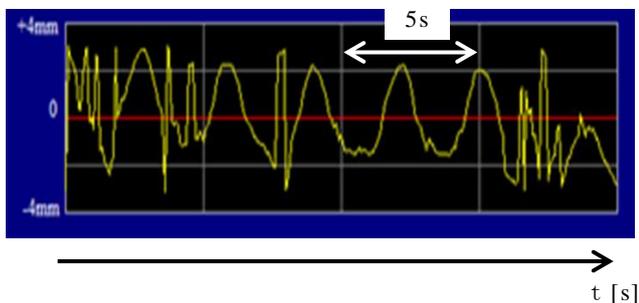


図 8. 呼吸状態の変位計測例

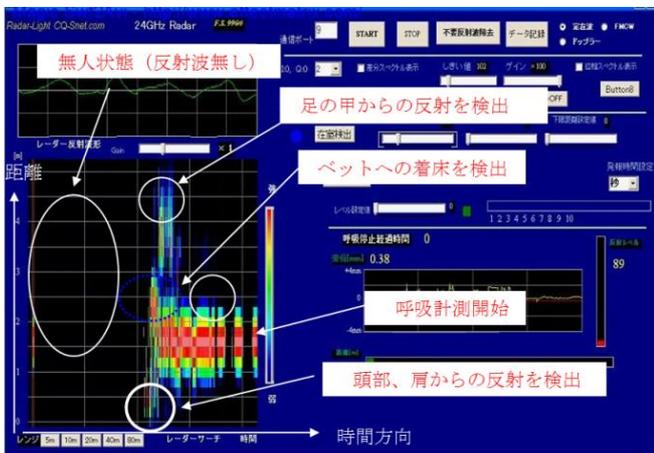


図 9. 一連の移動状況と呼吸状態の変位計測例

きが士約 2mm として測定されていることがわかる。

図 9 に、人間のベッドへの着床から呼吸計測を開始するまでの一連の動作を差分検出を用いて記録した結果を示す。計測開始時点ではベッドは無人状態であるため反射波は検出されていない。人間がレーダの検知範囲に入ると反射波が検出され、頭部、胴体、足の各部分による反射波が表示されている。横たわった状態から微小変位計測を開始し、動体のみを表示することで胸の上下動をとらえ計測できていることが確認できた。

5. まとめ

24GHz 帯を使用した FM-CW 方式レーダ装置について、動作原理を示した後、計算機シミュレーションおよび実験によりその基本特性を明らかにした。そして提案方式を用いることで、被測定物以外の反射物が存在する環境において、レーダ装置から被測定物までの距離および被測定物の微小変位の検出が可能であることを確認した。

今後は、人体の移動距離の計測や呼吸の有無の検出に応用すべく装置の小型化を実現する。

謝辞

本研究は神奈川県平成 25 年度エネルギー関連等ベンチャー事業化促進事業において「明日を担うかながわベンチャープロジェクト」採択され、その一環で行った。また、本 FM-CW レーダを人体に適用する場合の電波防護指針からの検証については北海道大学野島俊雄教授に貴重なご教示をいただいたことに感謝する。

文 献

- [1] 上保徹志, “0m から測距可能な定在波レーダ,” 電学論 C, 125 巻 12 号, pp.1641-1651, 2005 年
- [2] 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,” 信学論(B), vol.J89-B No.7 pp.1141-1150, 2006 年
- [3] T.Ihara and K.Fujimura, “Research and development trends of millimeter-wave short-range application systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E79-B, no.12, pp.1741-1753, Dec.1996.
- [4] T.Saito, T.Ninoyama, O.Isaji, T.Watanabe, H.Suzuki, and N.Okubo, “Automotive FM-CW radar with heterodyne receiver,” IEICE Trans. Commun., vol.E79-B, no.12, pp.1806-1812, Dec.1996
- [5] H.Rohling and E.Lissel, “77GHz radar sensor for car application,” IEEE 1995 International Radar Conference, pp.373-379, May 1995.
- [6] 三本雅, 上原直久, 稲常茂穂, 藤坂貴彦, 桐本哲郎, “同窓信号だけを検波する FMCW レーダの目標距離・速度計測方式,” 信学論(B), vol.J82-B, no.12, pp2355-2363, Dec.1999.
- [7] 小川勝, 城殿清澄, 浅野孔一, 田中雄一, 西川訓利, “車載用ミリ波デュアルモードレーダ(1)構成,” 2004 信学ソ大(通信) B-2-1, Sept. 2004.
- [8] 藤森新五, 上保徹志, 入谷忠光, “移動体の位置と速度が検出可能な定在波を用いた近距離高分解能レーダ,” 信学論 (B) vol.J87-B, no.3, pp.437-445, March 2004.
- [9] <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/material/dwn/guide38.pdf>
- [10] <http://standards.ieee.org/findstds/standard/C95.1-2005.html>
- [11] <http://www.icnirp.de/>

付録

一般に電波を人体に照射する場合, 各機関で定められた基準を満たす必要があり, 国内においては総務省が定める電波防護指針[9]に, 同様に米国においては IEEE C95.1[10]に, また, 欧州においては ICNIRP[11]にその基準がそれぞれ定められている.

本 FM-CW レーダを人体に照射して人体の偏移量を計測する場合の人体に対する影響については電波防護指針に基づいて基準を満たしているか否かを検証する必要がある.

今回使用する 24GHz 帯 FM-CW レーダでは付図に示す環境において, 7mW, 送信アンテナ利得=11dBi, 実行放射電力=88mW, 送信アンテナのビーム幅約 50 度, 送信点から 2.5[m]離れた人体表面上の電界強度 E[V/m]および放射電力密度 P[mW/cm²]を算出すると, レーダ方程式より

$$E = \sqrt{\frac{30 \times 0.088}{2.5}} = 0.65 \quad [\text{V/m}]$$

$$P = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{0.65^2}{120\pi} = 1.12 \times 10^{-4} \quad [\text{mW/cm}^2]$$

となる.

一方, 電波防護指針によれば, 条件 G に該当する場合, すなわち, 利用者が電波利用の実情が認識されない場合に相当する厳しい条件下において, 基準では許容電界強度:61.4[V/m]以下, 許容放射電力密度 1[mW/cm²]以下であり, 基準を十分に満たしているといえる.



付図 1. 想定される FM-CW レーダの使用環境