

十字型 9 素子アレイレーダによる人体計測と呼吸部位イメージング技術 Noncontact Vital Measurement and Respiration Imaging Using Nine-Element Cross-Shaped Array Radar

京都大学 ○ 香田 隆斗, 阪本 卓也

T. Koda and T. Sakamoto

Kyoto University

Abstract We developed a 2.4-GHz 2-dimensional cross-shaped array radar system for monitoring human respiration. The designed array system consists of nine omnidirectional antennas and discrete microwave components. We demonstrate the performance of the array radar by monitoring a participant who is breathing and lying down on a bed. Our proposed radar imaging method was able to produce a clear radar image that is highlighting the body part with a respiratory motion. The accuracy of the proposed system was evaluated by comparing the radar image with a 3-D video recorded using a depth camera. The results suggest the promising performance of the proposed system that has a potential for long-term respiration monitoring.

1 はじめに

医療・ヘルスケア分野では生体情報の計測に注目が集まっている。生体情報の中でも呼吸の計測は、様々な呼吸器疾患の経過観察やモニタリングといった応用可能性を有し、極めて重要である。電波を用いた非接触生体計測は、不快感を伴うセンサの装着なしに長期のモニタリングに適しており、ここ数年で多くの研究成果が報告されている。従来の研究の多くでは送受信素子を一對のみ用いる単チャネルのレーダが用いられているが、これでは生体信号を示す人体部位の位置が特定できない。そこで、Wang ら [1] や Peng ら [2]) は 5.8 GHz 帯レーダの機械的回転機構を導入し、Chen ら [3] は 1.5 GHz 帯レーダの機械的走査を提案したが、機械的な回転・走査の導入は装置の大型化を伴い、ヘルスケア等への応用には適さない。

複数の素子を用いるアレイアンテナを用いた生体計測も報告されている。Islam ら [4] は 24 GHz 帯の 2 素子アレイレーダにより 2 人の呼吸を同時測定した。Walterscheid ら [5] は 24 GHz 帯 16 チャネルおよび 77 GHz 帯 32 チャネルの MIMO (multiple-input multiple-output) アレイレーダを用いて複数人の呼吸を測定した。我々は 60 GHz 帯の 8 チャネル MIMO アレイレーダを用いて睡眠中の被験者の心拍計測を行った [6]。これらのミリ波レーダと異なり、低周波のマイクロ波レーダは衣服や布団をよく透過し、対象者の皮膚変位を高精度に計測できるという利点がある。Hsu ら [7] は 2.4 GHz 帯 4 素子アレイを用いた自己注入同期レーダを開発した。Mostafanezhad ら [8] は 2.4 GHz 帯の 4 素子アレイレーダにより呼吸測定を行った。Hall ら [9] と Boothby ら

[10] は 2.4 GHz 帯 3 素子アレイレーダによる生体計測を行った。我々 [11] は 8.4 GHz 帯 4 素子単一周波数 (Continuous Wave: CW) アレイレーダを用いて 2 人の心拍を同時測定した。

このように、生体計測を目的としたアレイレーダは多く報告されているが、呼吸などの生体情報を示す人体部位（胸部や腹部など）を特定できるシステムは未だ存在しない。もし呼吸部位を非接触で特定することができれば、睡眠時無呼吸症候群などの呼吸器疾患の検査や長期の経過観察を不快感なく実施できることになり、そのインパクトは大きい。本稿では、これまでに報告例のない 2.4 GHz 帯の 9 素子 2 次元アレイレーダを開発し、非接触での呼吸部位特定を可能にするレーダイメージングを実現する。開発システムの性能を定量的に評価し、その有効性を明らかにする。

2 十字型 9 素子アレイレーダシステム

本研究では 2.4 GHz 帯の連続波 (continuous wave: CW) レーダシステムの開発を行った。2.4 GHz 帯マイクロ波を用いた生体計測用の多素子 2 次元アレイレーダの報告例はこれまでに無い。本レーダは単一の送信アンテナと 8 素子の受信アレイアンテナの計 9 素子を有する。受信アレイの各素子は 8 ポートの GaAs 半導体スイッチに接続される。アレイの素子配置は図 1 に示すとおり十字形とする。十字形の中央に送信素子、その周囲に受信素子が配置されている。素子間隔は全て 7.0 cm であり、これは λ を波長として 0.57λ に相当する。3 次元直交座標系において送信素子は原点、 i 番目の受信素子は $(x_i, y_i, 0)$ に位置する。

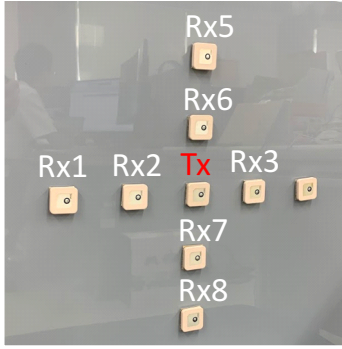


図 1: 本研究で設計および試作したアンテナアレイ

送信信号はマイクロ波信号発生器により生成し、電力分配器および電力増幅器を経由して送信素子に送られる。一方、信号分配器の出力の一方は 90 度ハイブリッドを経由して一対の乗算器に入力される。受信素子はスイッチを経由して一対の乗算器によりダウンコンバートされ、低域通過フィルタを経由して同相成分と直交成分となる。これらの信号は低雑音増幅器を経由して AD 変換器によりデジタルデータとしてパソコンに保存される。このデータを解析し、所望のスイッチング周波数を維持するようにスイッチの切り替えタイミングを自動制御する処理を実装した。受信 8 素子の各々のサンプリング周波数は 100.0 Hz とした。

3 アレイレーダによる呼吸計測実験

前節で説明したアレイレーダを用いて被験者（健康な 20 代男性）の呼吸を測定した。被験者にベッドに横たわって安静にし、自然に呼吸をするよう指示した。アレイアンテナはベッド上面から 1.25 m の高さに下向きに設置し、60 秒間測定した。受信信号ベクトルを $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_N(t)]$ とする。ただし、 $N = 8$ は受信素子の数である。事前に測定した背景信号 $\mathbf{s}_0$ を $\mathbf{s}'(t) = \mathbf{s}(t) - \mathbf{s}_0$ に従って減算し、 $\mathbf{s}'(t)$ を得る。

次に、受信信号ベクトルを用いて呼吸運動を伴う部位のイメージングを行う。呼吸運動に対応する周波数成分をバンドパスフィルタで抽出し、レーダ画像 $I(x, y)$ を次式のビームフォーミングにより得る。

$$I(x, y) = \int_0^T \left| \mathbf{w}(x, y)^H \int_0^T h(t - \tau) \mathbf{s}'(\tau) d\tau \right|^2 dt \quad (1)$$

ただし、 $h(t)$ は呼吸周波数成分を通過させるバンドパスフィルタ $H(\omega)$ のインパルス応答である。また、ビームフォーミングの重みベクトルは $\mathbf{w}(x, y)$ は $\mathbf{w}(x, y) =$

$[w_1(x, y), w_2(x, y), \dots, w_N(x, y)]^T$ とし、各要素は

$$w_i(x, y) = e^{jk\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+z_0^2}} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (2)$$

として伝播位相補償を行う。ビームフォーミングにより、目標位置 $(x, y, -z_0)$ に対応するレーダ画像が生成される。ただし、 $z_0 = 1.25$ m はアンテナアレイとベッド上面の距離である。最後に、呼吸運動が最大となる部位の座標をレーダ画像の極大 $(x_0, y_0) = \arg \max_{(x, y)} I(x, y)$ により求め、呼吸に伴う皮膚変位

$$r_0(t) = (\lambda/4\pi) \angle (\mathbf{w}(x_0, y_0)^H \mathbf{s}'(t)) \quad (3)$$

を求める。変位 $r_0(t)$ を用いて呼吸数や呼吸器疾患の情報を得ることができる。

4 アレイレーダによる呼吸イメージング性能検証

開発したアレイレーダおよび呼吸イメージング手法の性能検証を行う。測定データを前節で述べた手順で処理し、式 (1) によりレーダ画像に変換した。図 2 および 3 に被験者の写真とレーダ画像をそれぞれ示す。これらの図では被験者の位置や向きが異なる。ただし、バンドパスフィルタ $H(\omega)$ は、被験者の平均呼吸周波数である 0.17 Hz の成分を強調するよう設計した。平均呼吸周波数は、式 (3) で得られる時系列の周波数スペクトルを用いて決定した。いずれの図でも、被験者の胸部や腹部に強い応答が見られる。これらの結果から、提案する十字型 9 素子アレイレーダにより生体情報のレーダイメージングが実現されることが示された。

次に、イメージングの精度評価を行うため、レーダ計測と同時に距離カメラ Intel RealSense (Intel Corporation, Santa Clara, CA, USA) による撮影を実施した。距離カメラは赤外線を用いて皮膚変位を動画として記録する。赤外線はマイクロ波と異なり衣服を透過しないため、着衣の状態では実験ができない。そのため、この測定に限って、被験者は薄手の下着のみで測定を行った。距離カメラによる呼吸部位のイメージング結果と比較した結果、呼吸部位位置の平均推定誤差は 13 cm であった。また、呼吸数（呼吸間隔）の平均推定誤差は単素子レーダの場合に 89 ms であったのに対し、開発レーダの全素子を用いた場合は 37 ms であった。本計測は精度検証のみを目的としており、実際のレーダによる呼吸イメージングでは着衣で掛け布団を被った状態でも測定可能であることに注意されたい。

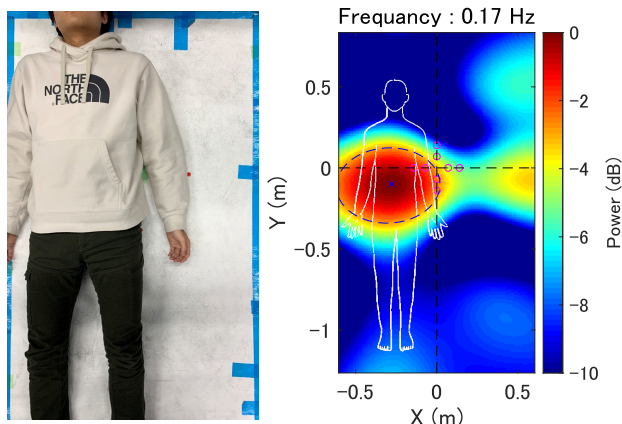


図 2: ベッド西側に位置する被験者 (左図) および呼吸運動に対応するレーダ画像 (右図)

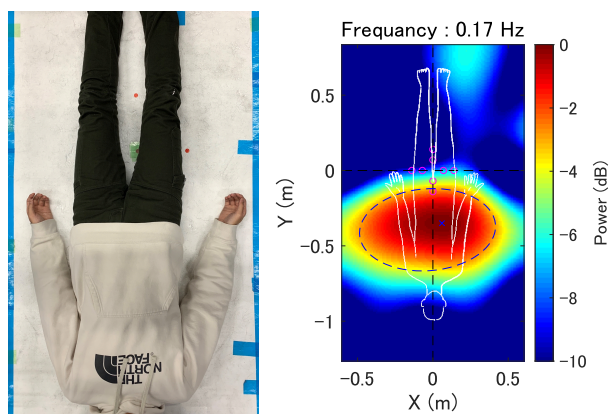


図 3: ベッド南側に位置する被験者 (左図) および呼吸運動に対応するレーダ画像 (右図)

5 おわりに

本稿では 2.4 GHz 帯の 9 素子十字型アレイレーダを開発し、ベッドに横たわる被験者の測定を通じて、非接触生体計測およびレーダイメージングの性能を明らかにした。提案レーダイメージング法では、スペクトル解析によって対象者の平均呼吸周波数を推定し、その周波数に対応したバンドパスフィルタにより呼吸変位を伴う人体部位のみを選択的にイメージングすることに成功した。得られたレーダ画像は、距離カメラにより撮影された 3 次元画像と定量的に比較し、平均推定誤差 13 cm と、十分な精度のイメージング性能が確認された。また、呼吸数は平均推定誤差 37 ms と高精度で推定されることが確認された。今後、開発したレーダシステムの性能を多くの被験者が参加する大規模な実験により検証する予定である。開発技術は睡眠時無呼吸症候群をはじめとする多くの呼吸器疾患の長期モニタリングへの応用可能性を

有し、本研究の社会的意義は大きい。

謝辞

本研究の一部は学振科研費 19H02155、JST さきがけ JPMJPR1873、JST COI JPMJCE1307 の助成により実施された

参考文献

- [1] G. Wang, C. Gu, T. Inoue, and C. Li: A hybrid FMCW-interferometry radar for indoor precise positioning and versatile life activity monitoring, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 62, no. 11, pp. 2812–2822, Nov. 2014.
- [2] Z. Peng, J. M. Muñoz-Ferreras, Y. Tang, C. Liu, R. Gómez-García, L. Ran, and C. Li: A portable FMCW interferometry radar with programmable low-IF architecture for localization, ISAR imaging, and vital sign tracking, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 65, no. 4, pp. 1334–1344, Apr. 2017, DOI: 10.1109/TMTT.2016.2633352.
- [3] T.-C. Chen, J.-H. Liu, P.-Y. Chao, and P.-C. Li: Ultrawideband synthetic aperture radar for respiratory motion detection, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 7, pp. 3749–3763, Jul. 2015, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2382672.
- [4] S. M. M. Islam, E. Yavari, A. Rahman, V. M. Lubecke, and O. Boric-Lubecke: Separation of respiratory signatures for multiple subjects using independent component analysis with the JADE algorithm, in *Proc. 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Honolulu, HI, USA, 2018.
- [5] I. Walterscheid, O. Biallawons, and P. Berens: Contactless respiration and heartbeat monitoring of multiple people using a 2-D imaging radar, in *Proc. 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Berlin, Germany, 2019, DOI: 10.1109/EMBC.2019.8856974.

- [6] T. Sakamoto and K. Yamashita: Noncontact measurement of autonomic nervous system activities based on heart rate variability using ultra-wideband array radar, *IEEE J. Electromagn., RF, Microw. Med. Biol.*, Oct. 2019, DOI: 10.1109/JERM.2019.2948827.
- [7] C.-Y. Hsu, C.-Y. Chuang, F.-K. Wang, T.-S. Horng, and L.-T. Hwang: Detection of vital signs for multiple subjects by using self-injection-locked radar and mutually injection-locked beam scanning array, in *Proc. 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, HI, USA, 2017.
- [8] I. Mostafanezhad, E. Yavari, and O. Boric-Lubecke: A low cost simple RF front end using time-domain multiplexing for direction of arrival estimation of physiological signals, in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Seattle, WA, USA, 2013.
- [9] T. Hall, B. T. Nukala, C. Stout, N. Brewer, J. Tsay, J. Lopez, R. E. Banister, T. Nguyen and D. Y. C. Lie: A phased array non-contact vital signs sensor with automatic beam steering, in *Proc. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Phoenix, AZ, USA, 2015.
- [10] A. Boothby, V. Das, J. Lopez, J. Tsay, T. Nguyen, R. E. Banister, and D. Y. C. Lie: Accurate and continuous non-contact vital signs monitoring using phased array antennas in a clutter-free anechoic chamber, in *Proc. 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Osaka, Japan, 2013.
- [11] T. Sakamoto, P. J. Aubry, S. Okumura, H. Taki, T. Sato, and A. G. Yarovoy: Noncontact measurement of the instantaneous heart rate in a multi-person scenario using X-band array radar and adaptive array processing, *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 280–293, Jun. 2018.