

超広帯域レーダーによるバイタルモニタリング

阪本 卓也[†] 今坂 良平[†] 前原 勝利[†] 瀧 宏文[†] 佐藤 亨[†]
吉岡 元貴^{††} 井上 謙一^{†††} 福田 健志^{†††} 酒井 啓之^{†††}

[†] 京都大学 情報学研究科 通信情報システム専攻

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

^{††} パナソニック株式会社 先端研究本部 知能研究室

〒 619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3-4

^{†††} パナソニック株式会社 先端研究本部 デバイス研究室

〒 570-8501 大阪府守口市八雲中町 3-1-1

あらまし 本稿では超広帯域レーダを用いた遠隔でのバイタル信号測定実験の結果を報告する。本測定では26GHz帯のマイクロ波を擬似雑音系列で変調した超広帯域信号を送信し、被験者の胸部からのエコーを測定した。受信信号は胸部の微小な変位により位相変調を受けるため、直交検波した受信信号の位相から被験者のバイタル信号を得ることができる。本研究では接触型心電図測定装置と超広帯域レーダによる同時測定を実施し、レーダによる心拍数の推定値を従来の心電図による推定値と比較することで精度を定量評価する。その結果、レーダによる遠隔測定により心拍数を1.1%の高精度で測定できることを明らかにした。

キーワード 超広帯域, レーダ, バイタル信号, 心拍数, マイクロ波, センシング

Vital monitoring using ultra-wideband radar

Takuya SAKAMOTO[†], Ryohei IMASAKA[†], Katsutoshi MAEHARA[†], Hirofumi TAKI[†], Toru SATO[†], Mototaka YOSHIOKA^{††}, Kenichi INOUE^{†††}, Takeshi FUKUDA^{†††}, and Hiroyuki SAKAI^{†††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University

Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

^{††} Intelligence Research Laboratory, Advanced Research Division, Panasonic Corporation

Hikaridai 3-4, Seika-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0237, Japan

^{†††} Device Research Laboratory, Advanced Research Division, Panasonic Corporation

Yagumonakamachi 3-1-1, Moriguchi, Osaka 570-8501, Japan

Abstract This paper presents a study on the remote measurement of heart rates using an ultra-wideband radar system. The radar system transmits a 26GHz-band microwave signal modulated by a pseudo noise sequence. The signal is transmitted towards the chest of a subject, and the echo is received and demodulated using the same pseudo noise sequence as in performing pulse-compression. The echo signal is phase-modulated by the minute displacement of the subject's chest surface. Thus, the phase of the output signal of a quadrature detector contains the vital signal of the subject. We measured the subject's vital signal using ultra-wideband radar and an electrocardiography device simultaneously and evaluated the accuracy in estimating the heart rates using the ultra-wideband radar. The results demonstrate that the remote measurement using the radar can estimate heart rates with a relative error of 1.1%.

Key words ultra-wideband, radar, vital signal, heart rate, microwave, sensing

1. はじめに

超高齢社会を迎えるわが国では、国家的医療費の増加や病院の病床数の不足といった状況から自宅での病気療養や介護を拡充させる必要に迫られている。しかし、多くの場合、自宅療養者の健康状態は間欠的にしかモニタリングされておらず、緊急時の対応に遅れが生じる懸念がある。このため、自宅での安全確保のためにはバイタル信号の自動モニタリングの導入が強く求められる。特に、バイタル信号に含まれる呼吸や心拍の情報からは呼吸器疾患や心疾患を早期に発見できるため、重要な情報を含んでいる。従来、バイタル信号の測定には、皮膚表面に電極を貼り付ける心電位計測、あるいは腹部にバンドを巻きつける呼吸計測といった接触型の測定法が一般的であったが、かぶれや不快感などが避けられず、特に長期間の測定を行う場合には簡便であるとはいえない。

一方、マイクロ波を用いたバイタル信号の遠隔測定技術についての研究が多数報告されている [1]- [5]。マイクロ波は衣服を容易に透過し、遠方から胸部の皮膚表面の変位を測定することができる [6]- [13]。対象者にとって簡便であり、長期間の測定でも不快感がないという利点がある。心拍数の測定に着目すると、心電図は心臓の電気的信号を測定するのに対し、マイクロ波による測定では心臓の機械的運動に伴って生じる皮膚表面の変位を測定するという点で両者の測定原理は根本的に異なる。このため、(1) 心電図の解析手法とは別の心臓の機械的信号に特化した信号処理が必要となる。さらに、心拍に伴う胸部の変位は約 100 ミクロン程度と微小であるため、(2) 測定システムには高い位相安定度が求められる。さらに、(3) 受信信号に含まれる不要エコーであるクラッターにより受信信号のダイナミックレンジが制限され、非静止クラッターの場合には干渉により生じた位相回転によりバイタル信号の測定自体ができなくなる。以上の理由により、マイクロ波による測定は接触型センサと比べて精度が低くなることが知られており、大きな課題であった。

本稿では、心臓の機械的信号に特化して近年開発されたトポロジー法 [14] を用いることで課題 (1) を、高い位相安定度を有する 26GHz 帯レーダシステム [15] を用いることで課題 (2) を、さらに帯域幅約 730MHz、距離分解能約 20.5cm の超広帯域信号を用いることで対象者からのエコーのみをレンジゲートで選択的に取り出すことで課題 (3) をそれぞれ解決する。これらの技術を用いた測定システムを用いて被験者の参加する実験を実施する。超広帯域レーダによる測定と同時に接触型的心電図測定装置を用いた心電位測定を行い、レーダによる推定心拍数の精度を定量評価する。

2. 実験条件

使用するレーダシステム [15] は 26.4GHz のマイクロ波を 500Mbps の 2 値擬似雑音系列で振幅変調した信号を増幅し、鉛直下向きに設置されたホーンアンテナより送信する。送信電力は -11.7dBm であり送受信共にアンテナゲインは 15.0dBi である。図 1 に示すとおり被験者は床に仰向けに横たわり、アンテナの最大ゲインとなる場所へ胸部位置を合わせる。偏波方向は



図 1 仰向けに横たわった被験者と超広帯域レーダによる測定環境

被験者の身長方向である。受信アンテナは送信アンテナと近接させて設置し、受信信号は変調に用いたものと同じ系列を乗じ、低域通過フィルタを通すことでパルス圧縮を行う。受信信号は直交検波することで I 成分と Q 成分を得る。サンプリング間隔は 2.0 ns であるため、レンジゲート幅は 30.0cm となる。一方、レンジ測定のサンプリング間隔は 1.3 ms である。測定時間は 50 秒間であった。

受信された I 成分と Q 成分をそれぞれ実部および虚部として構成した複素信号を $s_0(t, \tau)$ としてデジタルデータとして保存し、オフラインで信号処理を行う。ただし、 t および τ は slow-time および fast-time と呼ばれ、fast-time は $r = c\tau/2$ によりレンジ r に換算することができる。まず、被験者のエコーが含まれるレンジに対応する fast-time を $\tau_0 = \arg \max_{\tau} \int |s_0(t, \tau)|^2 dt$ により求め、該当するレンジの位相を $s_p(t) = \angle s_0(t, \tau_0)$ により得る。

被験者は 23 歳の健康な男性であり、測定中は自然に呼吸をしていた。このため、 $s_p(t)$ には心拍以外に呼吸に起因する変位が含まれる。呼吸による低周波の変動を除去するためにカットオフ周波数 7.7Hz のハイパスフィルタを $s_p(t)$ に適用した。ハイパスフィルタの出力 $s_r(t)$ を用いて、次節で説明するとおり対象者の心拍数を推定する。

3. 測定データによる心拍数推定精度の評価

図 2 に同時測定により得られた心電位 $s_e(t)$ (上図) およびレーダにより得られた信号 $s_r(t)$ (下図) を示す。ただし、詳細を表示するために最初の 10 秒間のみ示している。心電位には R 波と呼ばれる鋭いピークが見られ、比較的単純な処理により心拍間隔を計算できる。一方、レーダ信号の位相には鋭いピークは見られず、波形はサイクル毎に大きく変化する非周期信号であることがわかる。このため、心拍間隔を求めるための処理は容易ではない。

図 3 に $s_p(t)$ から計算したピリオドグラム [16] と、 $s_r(t)$ から計算したピリオドグラムとをそれぞれ破線および実線により示す。ハイパスフィルタにより $s_p(t)$ に含まれる低周波成分が抑圧され、 $s_r(t)$ のピリオドグラムには $1.0\text{Hz} < f < 1.5\text{Hz}$ に心拍に起因すると考えられる成分が見られる。しかし、50 秒の間

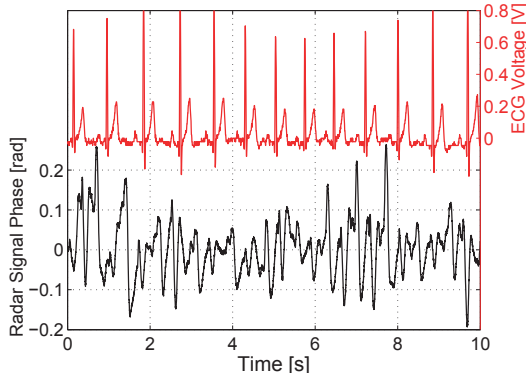


図2 同時に測定された心電位(上)とレーダ受信信号の位相(下)

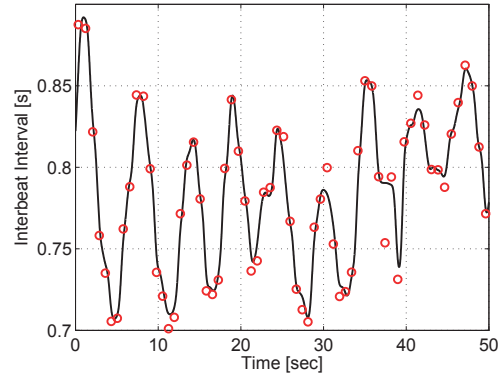


図4 心電位から得られた心拍間隔(丸印)とレーダから推定された心拍間隔(実線)の時系列

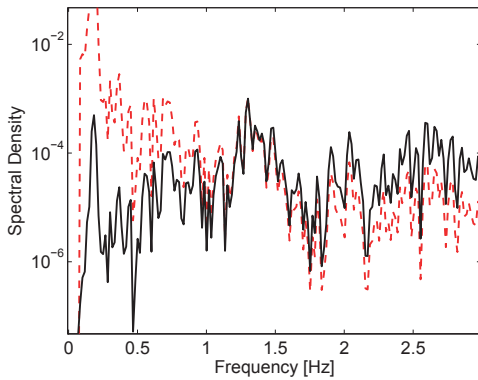


図3 受信信号位相のピリオドグラム(破線)とハイパスフィルタを通じた後の時系列のピリオドグラム(実線)

の心拍数の変動やサイクル毎の波形変化などの影響によりピークは複数生じており、平均の心拍数の推定ですら容易ではない。

次に、 $s_r(t)$ にトポロジー法 [14] を適用して得られた心拍間隔 $h_r(t)$ (実線) と心電位 $s_e(t)$ から得られる心拍間隔 $h_e(t)$ (丸印) を図 4 にて比較する。心電位による心拍間隔の値は隣接する R 波の間隔から算出した。同図より、トポロジー法により心拍数が高い精度で推定されることがわかる。さらにピリオドグラムと異なり、トポロジー法により得られる心拍数は瞬時値であり、平均値ではない。このことから、同手法により高い時間分解能も得られることがわかる。 $h_r(t)$ と $h_e(t)$ の RMS (root mean square) 誤差は 8.7ms であり、 $h_r(t)$ と $h_e(t)$ の相関係数は 0.98 である。測定時間中の被験者の平均心拍数は 74.1 bpm であり、最長および最短心拍間隔は 0.89s および 0.70s であった。平均心拍間隔は 0.81s であることから、RMS 相対誤差は 1.1% となる。以上より、本システムにより高精度な瞬時心拍数の測定が実現されることが示された。

4. まとめ

本論文では 26GHz 帯の超広帯域レーダによる提案システムを用いて遠隔での瞬時心拍数測定実験の結果を報告した。提案システムは超広帯域レーダによる測定、およびトポロジー法による信号処理によって構成される。接触型の心電図測定装置と超広帯域レーダの双方を用いた同時測定を実施し、測定データ

を用いて提案システムの性能を定量評価した。本システムにより 1.1% の RMS 誤差が実現され、心電位により推定される心拍間隔との相関係数は 0.98 であることが示された。以上の結果により、提案システムにより遠隔にて高い精度での瞬時心拍数の推定が可能であることが実験的に確認された。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省 革新的イノベーション創出プログラム COI (Center Of Innovation STREAM) 「活力ある生涯のための Last 5X イノベーション」、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (A)25249057 「UWB レーダドップラー分離干渉計法による人体の高次モニタリング」、ならびに総務省 電波資源拡大のための研究開発 「140GHz 帯高精度レーダの研究開発」の助成を受けて実施された。関係各位に心より感謝申し上げます。本研究における臨床試験は京都大学 大学院医学研究科・医学部及び医学部附属病院 医の倫理委員会により承認 (第 1112 号) を受けたプロトコールに従って実施された。本研究の測定は京都大学 生存圏研究所 マイクロ波エネルギー伝送実験装置 (METLAB) にて実施された。測定へのご協力、ご助言を賜りました京都大学 生存圏研究所 篠原真毅教授、三谷友彦准教授、および石川峻樹氏に深く感謝申し上げます。

文 献

- [1] A. D. Droitcour, O. Boric-Lubecke, V. M. Lubecke, J. Lin, and G. T. A. Kovacs, "Range correlation and I/Q performance benefits in single-chip silicon Doppler radars for noncontact cardiopulmonary monitoring," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 52, no. 3, pp. 838–848, 2004.
- [2] C. Lee, C. Yoon, H.-J. Kong, H. C. Kim, and Y. Kim, "Heart rate tracking using a Doppler radar with the reassigned joint time-frequency transform," *IEEE Antenn. Wirel. Pr.*, vol. 10, pp. 1096–1099, 2011.
- [3] C. Li, Y. Xiao, and J. Lin, "Experiment and spectral analysis of a low-power Ka-band heartbeat detector measuring from four sides of a human body," *IEEE Trans. Microwave Theory*, vol. 54, no. 12, pp. 4464–4471, 2006.
- [4] J.-H. Lee, J. M. Hwang, D. H. Choi, and S.-O. Park, "Non-invasive biosignal detection radar system using circular polarization," *IEEE Trans. Inf. Technol. B.*, vol. 13, no. 3, pp. 400–404, 2009.
- [5] M. Zakrzewski, H. Raittinen, and J. Vanhala, "Comparison

- of center estimation algorithms for heart and respiration monitoring with microwave Doppler radar," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 627–634, 2012.
- [6] J. Wang, X. Wang, Z. Zhu, J. Huangfu, C. Li, L. Ran, "1-D Microwave Imaging of Human Cardiac Motion: An Ab-Initio Investigation," *IEEE Trans. Microw. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2101–2107, 2013.
- [7] J. Kranjec, S. Begus, J. Drnovsek, and G. Gersak, "Novel Methods for Noncontact Heart Rate Measurement: A Feasibility Study," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 4, pp. 838–847, 2014.
- [8] I. V. Mikhelson, S. Bakhtiari, T. W. Elmer II, and A. V. Sahakian, "Remote sensing of heart rate and patterns of respiration on a stationary subject using 94-GHz millimeter-wave interferometry," *IEEE Trans. Bio-med. Eng.*, vol. 58, no. 6, pp. 1671–1677, 2011.
- [9] S. Bakhtiari, S. Liao, T. W. Elmer, N. S. Gopalsami, and A. C. Raptis, "A real-time heart rate analysis for a remote millimeter wave I-Q sensor," *IEEE Trans. Bio-med. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 1839–1845, 2011.
- [10] B.-K. Park, O. Boric-Lubecke, and V. M. Lubecke, "Arctangent demodulation with DC offset compensation in quadrature Doppler radar receiver systems," *IEEE Trans. Microw. Theory*, vol. 55, no. 5, pp. 1073–1079, 2007.
- [11] W. Massagram, V. M. Lubecke, A. Høst-Madsen, and O. Boric-Lubecke, "Assessment of heart rate variability and respiratory sinus arrhythmia via Doppler radar," *IEEE Trans. Microw. Theory*, vol. 57, no. 10, pp. 2542–2549, 2009.
- [12] D. Nagae and A. Mase, "Measurement of heart rate variability and stress evaluation by using microwave reflectometric vital signal sensing," *Rev. Sci. Instrum.*, no. 81, 094301, 2010.
- [13] W. Hu, Z. Zhao, Y. Wang, H. Zhang, and F. Lin, "Non-contact accurate measurement of cardiopulmonary activity using a compact quadrature Doppler radar sensor," *IEEE Trans. Bio-med. Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 725–735, 2014.
- [14] T. Sakamoto, R. Imasaka, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda and H. Sakai, "Accurate heartbeat monitoring using ultra-wideband radar," *IEICE Electronics Express* (in press).
- [15] T. Fukuda, N. Nagoro, S. Ujita, S. Nagai, M. Nishijima, H. Sakai, T. Tanaka, and D. Ueda, "A 26GHz short-range UWB vehicular radar using 2.5cps spread spectrum modulation," *Proc. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 1311–1314, 2007.
- [16] A. Schuster, "On the investigation of hidden periodicities with application to a supposed 26 day period of meteorological phenomena," *Terrestrial Magnetism*, vol. 3, pp. 13–41, 1898.