

超広帯域 MIMO アレイレーダによる夜間睡眠中の心拍高精度推定

Accurate heartbeat monitoring during sleep using ultra-wideband MIMO array radar

渡辺 恭¹ 阪本卓也^{2,3} 今西亮介³ 奥村成皓³ 佐藤 亨³
 Kyo Watanabe Takuya Sakamoto Ryosuke Imanishi Shigeaki Okumura Toru Sato
 吉岡元貴⁴ 井上謙一⁴ 福田健志⁴ 酒井啓之⁴
 Mototaka Yoshioka Kenichi Inoue Takeshi Fukuda Hiroyuki Sakai

兵庫県立大学 工学部¹

School of Engineering, University of Hyogo
 京都大学 大学院情報学研究科³

Graduate School of Informatics, Kyoto University

兵庫県立大学 大学院工学研究科²

Graduate School of Engineering, University of Hyogo
 パナソニック株式会社 先端研究本部⁴

Advanced Research Division, Panasonic Corporation

1 はじめに

心拍の測定には電極を皮膚に装着する心電計 (ECG) が広く用いられている。また、光学的手法を用いた腕時計型の心拍測定装置にも注目が集まっている。しかし、これら接触型測定は不快感や皮膚のかぶれなどの問題により長期間の連続測定には適さない。そこで、我々は超広帯域レーダによる遠隔での心拍測定技術を開発してきたが [1], これまでは対象者がほぼ静止した理想的な条件でのみ測定が行われてきた [2]。本研究では、レーダと ECG の同時測定を夜間睡眠中に実施した。対象者のアンテナとの相対位置が寝返り等で変化するために高 S/N が保証されない問題を解決するべく、MIMO アレイレーダによる最適アレイ処理を提案し、心拍の高精度推定を実現する。

2 最適化アレイ合成による心拍推定

健康な 20 代成人男性の夜間睡眠中に超広帯域アレイレーダと ECG による 10 時間同時測定を実施した。対象者の寝返り等による運動に追従するため、送信鉛直アレイ 2ch と受信水平アレイ 4ch の計 8ch の信号を最適 MIMO 合成し、S/N を改善する。レーダは中心周波数 60.5GHz、帯域幅 1.25GHz、測定周期 1.285ms、素子間隔は 4.5mm、各素子は開口 3.5mm × 1.7mm のゲイン 3.9dB の垂直偏波ホーンである。ベッド側面から 60cm の位置にアレイアンテナを設置した。

8ch の信号を要素とする列ベクトル $\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_8(t)]^T$ を 6 秒毎に円でフィッティングし、直流成分除去を行った後の共分散行列 $R_{xx} = \langle \mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t) \rangle$ を固有値展開する。なお、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_8$ とする。

$$R_{xx} = \mathbf{V}\Sigma\mathbf{V}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 & \dots & \mathbf{v}_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^H \\ \vdots \\ \mathbf{v}_8^H \end{bmatrix} \quad (1)$$

最大固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{v}_1 を重みとして $y(t) = \mathbf{v}_1^H \mathbf{X}(t)$ と信号を合成することで S/N を改善する。この合成信号の位相 $\angle y(t)$ にトポロジー法 [1] を適用することで、隣接心拍の間隔 (IBI: Interbeat Interval)

を求める。図 1 に 1ch のみを用いた場合、図 2 に提案する MIMO アレイ合成を用いた場合の IBI 推定値を ECG と比較して示す。従来法および提案法の IBI 推定誤差は各々 0.20 秒および 0.03 秒であり、提案法により推定精度が約 6.9 倍改善された。

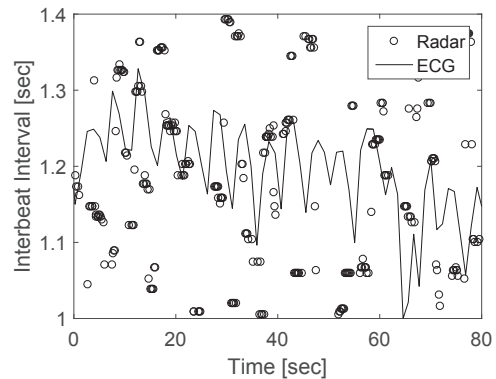


図 1 従来手法 (RMS 誤差 0.20s)

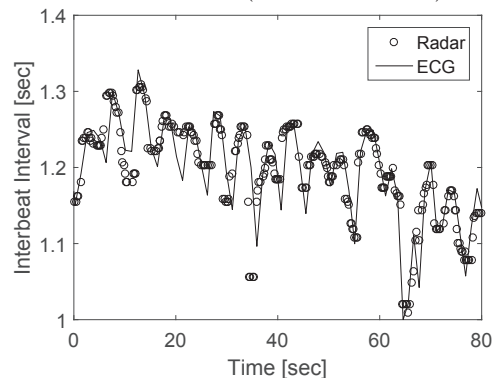


図 2 提案手法 (RMS 誤差 0.03s)

謝辞

本研究の一部は兵庫県立大学特別研究助成金、京都大学 SPIRITS プログラム、COI プログラム、科学研究費補助金 基盤研究 (A)25249057・若手研究 (B)15K18077 および総務省受託研究 電波資源拡大のための研究開発の助成により実施された。

参考文献

- [1] Sakamoto et al., IEEE Trans. Bio-med. Eng., 2015.
- [2] Sakamoto et al., IEICE Electron. Express., 2015.