

HAR 不確実度に基づく BLE 広告間隔の適応制御に関する研究

萩原 丰島 木村 秀明

中部大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

1. はじめに ウェアラブル等のエッジ端末における行動認識 (Human Activity Recognition; HAR) では、推論と通信が電力消費を支配しやすい. Bluetooth Low Energy (BLE) 広告 [1] は簡便なブロードキャスト手段だが、スマートフォン受信 (スキャン) が非理想であるため、固定広告間隔では遅延分布の裾が悪化し得る [2]. 本研究は、HAR の不確実度に応じて BLE 広告間隔を適応させ、QoS 制約 $P_{\text{out}}(\tau) \leq \epsilon$ ($\tau = 1 \text{ s}$, $\epsilon = 0.1$) の下で送信側消費を抑えることを目的とする [3][4].

本稿では、意思決定に基づく省電力ピーコニング [5] に着想を得つつ、広告間隔 100 ms / 500 ms の 2 値切替を実装し、TX/TXSD/RX の三ノード計測により電力と QoS を同一試行で評価した。

2. 提案手法 不確実度の指標にはエントロピー [6] 等が知られるが, 実装上は計算量や確率の校正 (calibration) [7] の影響が重要である. 本研究では HAR モデルの出力確信度と時系列安定度から通信信頼度指標 CCS (Communication Confidence Score) を構成する. CCS に基づいて広告間隔を切り替え, 本アプストでは実装の最小構成として 100 ms と 500 ms の 2 値切替方策を扱う. CCS が低い (遷移・不確実) 区間では短間隔へ寄せて QoS を守り, それ以外は長間隔へ寄せて平均消費を下げる. 評価指標は, 送信イベント当たり電荷 q_{event} ($\mu\text{C}/\text{event}$) と遅延指標 TL および期限超過率 $P_{\text{out}}(\tau)$ とし, 平均電力は補助的に用いる.

2.1 CCS と 2 値切替

CCS は、モデル出力の確信度と、推定ラベルの時間的一貫性（安定度）を合成して定義する。具体例として、確信度と安定度の加重和を用い、閾値とヒステリシスにより状態（ACTIVE/QUIET 等）を切り替える。これにより、遷移が多い区間ほど短間隔に滞在し、定常区間は長間隔に滞在する設計とする。

切替が閾値のみに依存すると振動し得るため、ヒステリシスに加えて最小滞在時間を設ける。さらに、受信側の QoS 悪化が観測された場合は強制的に短間隔へ退避するフェイルセーフを導入し、制約違反を抑制する。

3. 実験 計測は TX (DUT), TXSD (電力ログ), RX (受信ログ) の三ノード構成とし, 同期信号で試行区間を揃える. TXSD は電流・電圧をログ化し, 試行ごと

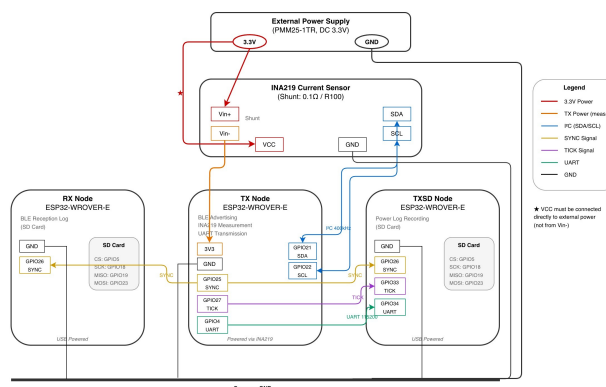


図 1 計測系の信号関係

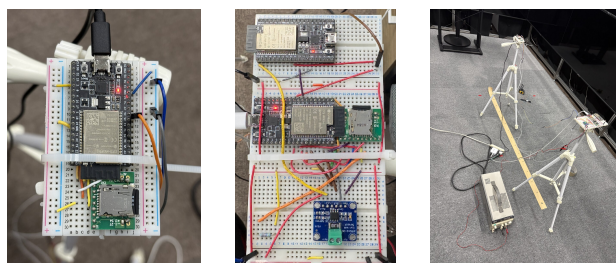


図 2 実験装置 (左:RX, 中央:TX + TXSD, 右:測定環境)

に総エネルギーと平均電力を算出する。RX は受信時刻とタグを記録し、truth (100 ms 格子) と定数オフセットで時間同期した上で、遷移に対する TL と $P_{\text{out}}(\tau)$ を算出する。

scan90 (scan duty 90%) で S1/S4 の 2 条件について固定 100 ms, 固定 500 ms, 方策を比較した (各条件 $n = 6$). さらに, 受信条件悪化として scan70 (scan duty 70%) を設定し, S4 で同様の比較を行った (各条件 $n = 3$). 加えて, 制御入力 of 寄与を切り分けるため, U-shuffle (不確実度 U の時間整合を破壊) および CCS-off (U のみ) のアブレーションを scan90/S4 で実施した (各条件 $n = 3$).

4. 結果 図3に、固定 100 ms / 固定 500 ms と方策の関係を、scan90/scan70 およびアブレーションを含めて示す(横軸: 平均電力, 縦軸: $P_{\text{out}}(1\text{s})$). scan90 の D2b (S1/S4, 各条件 $n = 6$) では、方策は固定 100 ms より低電力であり、固定 500 ms より低い $P_{\text{out}}(1\text{s})$ を示す運用点になり得た. 受信条件を悪化させた scan70 では、固定 500 ms が $P_{\text{out}}(1\text{s})$ で崩れる一方、方策 (および D4B の CCS-off 追試) は $\epsilon = 0.1$ を満たしつつ固定 100 ms

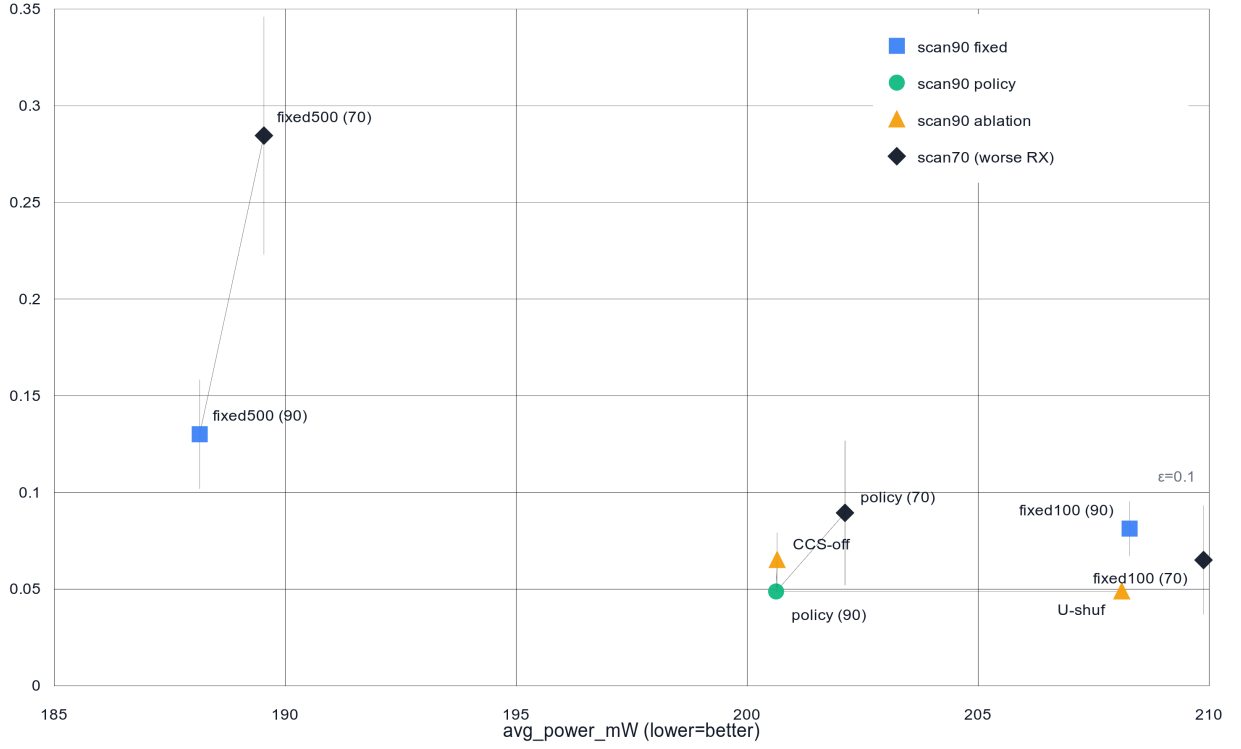


図3 U/CCS の役割分離 (S4)

より低電力の運用点になり得た (D4B 追試, scan70/S4, $n = 3$: Fixed500 $P_{\text{out}}(1\text{s}) = 0.228 \pm 0.037$, $P = 187.6\text{mW}$; Policy 0.016 ± 0.014 , $P = 201.4\text{mW}$; U-only 0.008 ± 0.014 , $P = 202.2\text{mW}$). さらに scan90/S4 のアブレーション (各条件 $n = 3$) では, U-shuffle により短間隔張り付き (高電力) へ崩れ, CCS-off では同程度の平均電力のまま $P_{\text{out}}(1\text{s})$ が悪化した.

5. 考察 U-shuffle (D4, scan90/S4) では短間隔への張り付きが増加し, 平均電力が固定 100 ms 近傍まで戻ったことから, 不確実度 U の時間整合が短間隔滞在量 (電力) を規定することが示唆される. 一方で CCS-off (D4B, scan90/S4) では, 平均電力がほぼ同一のまま $P_{\text{out}}(1\text{s})$ が悪化したことから, CCS は短間隔滞在量ではなく「短間隔を使うタイミング」により QoS を改善すると解釈できる.

ただし受信条件が悪化すると, Policy と U-only で $\hat{\rho}_{100}$ が僅かにずれ, CCS の寄与が見えにくい場合がある. 本稿では「同電力で QoS 改善」は scan90/S4 の同滞在比率条件で示し, scan70 は頑健性の補強として扱う.

固定条件の平均電力を P_{100}, P_{500} とすると, 方策の短間隔滞在比率 $\hat{\rho}_{100}$ は平均電力 P から

$$\hat{\rho}_{100} = \frac{P - P_{500}}{P_{100} - P_{500}} \quad (1)$$

と推定できる. この推定により, 省電力効果の支配要因

を「sleep 設定」ではなく「短間隔滞在量」に帰着できる.

6. まとめ HAR 不確実度に基づく 2 値広告間隔制御が, 固定間隔の中間的電力で QoS 制約 $P_{\text{out}}(\tau) \leq \epsilon$ を満たす運用点になり得ることを実機で示した. さらに, U と CCS のアブレーションにより, U は短間隔滞在量 (電力), CCS は同電力での QoS 改善を担うことを示唆した. 今後は, 制約下で広告間隔を選択する多腕バンディットへ展開する.

参考文献

- [1] Bluetooth SIG. *Core Specification 5.2*. 2019. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-2/> (visited on 09/11/2023).
- [2] B. Luo, Y. Yao, and Z. Sun. “Performance analysis models of BLE neighbor discovery: a survey”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 8.11 (2021), pp. 8734–8746.
- [3] R. Schrader et al. “Advertising power consumption of Bluetooth Low Energy systems”. In: *2016 3rd International Symposium on Wireless Systems Within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*. 2016, pp. 62–68.
- [4] D.-C. Chen et al. “Online power management for latency-sensitive Bluetooth Low-Energy beacons”. In: *IEEE Systems Journal* 14.2 (2020), pp. 2411–2420.
- [5] M. Fujisawa et al. “An efficient beaconing of Bluetooth Low Energy by decision making algorithm”. In: *Discover Artificial Intelligence* 4, 26 (Apr. 2024).
- [6] C. E. Shannon. “A Mathematical Theory of Communication”. In: *Bell System Technical Journal* 27 (1948), pp. 379–423, 623–656.
- [7] C. Guo et al. “On Calibration of Modern Neural Networks”. In: *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*. 2017.
- [8] Y.-R. Tsai and H.-Y. Liu. “On the Feasibility and Optimization of Providing Delay Sensitive Services Based on Bluetooth Low Energy Advertising Technology”. In: *IEEE Access* 13 (2025), pp. 149010–149018.