

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 圭島 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ビーコニング [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

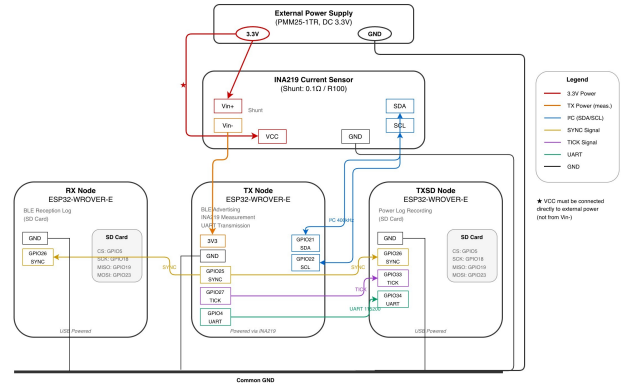


図1 計測系の信号関係

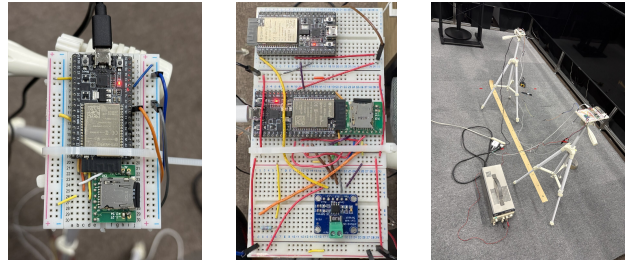


図2 実験装置 (左: RX, 中央: TX + TXSD, 右: 測定環境)

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、制御入力への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 7.9 mW to 12.6 mW 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 (例: S4 で固定 500 が 0.146 に対し方策は 0.069)。

受信条件を悪化させた scan70 の D3 (S4, 各条件

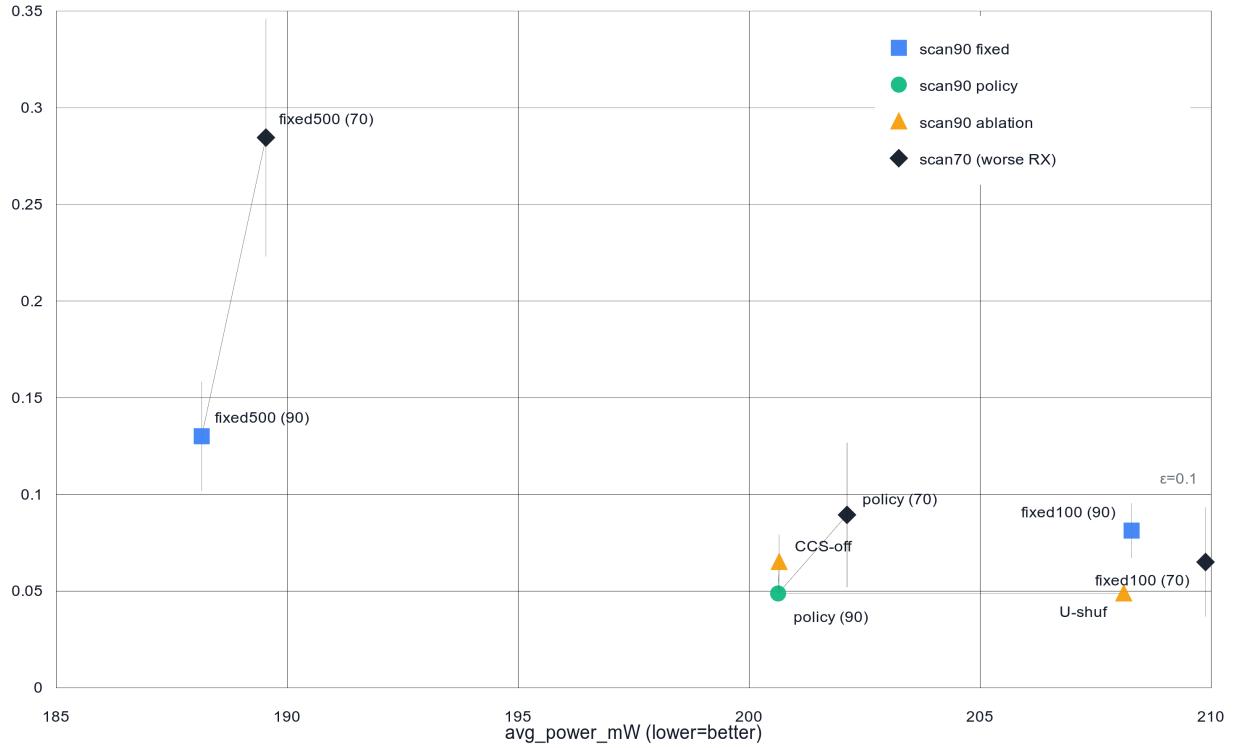


図3 U/CCS の役割分離 (S4)

$n = 3$) では、固定 500 ms が $P_{\text{out}}(1\text{s}) = 0.285 \pm 0.061$ と大きく悪化した一方、方策は 0.089 ± 0.037 に抑え、固定 100 ms ($209.9 \pm 0.5\text{mW}$) より低い平均電力 ($202.1 \pm 0.1\text{mW}$) で $\epsilon = 0.1$ を満たした。

さらに scan90/S4 のアブレーション (各条件 $n = 3$) では、U-shuffle は平均電力が $208.1 \pm 0.3\text{mW}$ と固定 100 ms 近傍まで増加し、短間隔への張り付きが増える挙動が確認された。一方で CCS-off は平均電力が方策とほぼ同一 (約 200.6mW) にもかかわらず、 $P_{\text{out}}(1\text{s})$ が方策の 0.0488 に対して 0.065 ± 0.014 へ悪化した。

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。

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{p}_{100} は平均電力 P から

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

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、

制御則設計や学習 (Bandit) への拡張時の目的関数設計にも接続できる。

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、広告間隔候補の多段化と、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 [8]。

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 (2024), p. 26.
- [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] P. Auer, N. Cesa-Bianchi, and P. Fischer. “Finite-time analysis of the multiarmed bandit problem”. In: *Machine Learning* 47 (2002), pp. 235–256.