

NFCにおけるパケット位置変調を用いた多重化手法のモデル化

Modeling of Multiplexing Techniques Using Packet Position Modulation in NFC

井戸 智斗志¹, 石田 繁巳¹, 稲村 浩¹

Satoshi Ido¹, Shigemi Ishida¹, Inamura Hiroshi¹

¹ 公立はこだて未来大学

¹Future University Hakodate

1 はじめに

ヘルスケアやライフログを目的としたウェアラブル機器の普及が進んでいる。ウェアラブル機器は装着感を損なわないように小型・軽量であり、搭載可能な電池容量の制限から消費電力の大きなセンサやアクチュエータを動作させることは難しい。

これに対し、高橋らは、液体金属 (eGaIn) を用いた低損失な導電糸と、人体への影響を最小限に抑える構造を組み合わせた「メアンダコイル++」を提案している [1]。メアンダコイル++を用いれば上半身の約 70% という広範囲で最大 2.5W の電力を供給可能であり、従来の技術では困難だったスマートウォッチやスマートフォンへの高出力給電を実現している。

しかしながら、ウェアラブルデバイスを用いた生体データのリアルタイム収集システムでは、限られた通信帯域内での収容台数が課題となる。電力を供給しながら通信を行う方式として NFC (Near Field Communication) が存在する。NFC では Tag と呼ばれるノードが NFC リーダから供給される磁界信号から電力を得るとともに通信を行う。NFC は通信範囲が短いことから 1 対 1 の通信を想定して設計されており、多数のノードとの通信は考慮されていない。

これに対し、本研究では 1 対多の NFC 通信を実現するパケット位置変調方式を示す。NFC 通信で直接データを送るのではなく、短いパケット、具体的には Tag の ID を 2 回送信し、その送信間隔によってデータを表現する。本稿では、パケット位置変調による NFC 多重化手法をモデル化し、シミュレーションによってデバイスの収容台数に対するパケット衝突確率および平均通信速度を評価して、大規模な多重接続環境における有効性を明らかにする。

2 関連研究

Feng らは、エネルギー制約の厳しい極低デューティサイクルネットワークにおいて、追加の送信エネルギーを消費せずに情報伝送容量を向上させるデータパケット位置変調 (DPPM) を提案した [2]。本手法は、パケットの送信間隔を動的に変化させることで、物理的なパケット

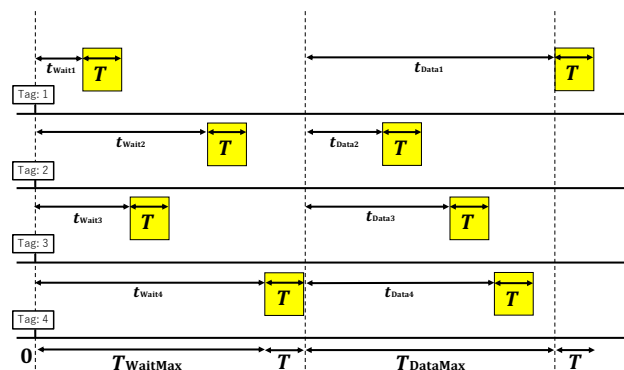


図 1: パケット位置変調による NFC 多重化における送信動作

容量に加えて追加の情報を符号化した。エネルギー収穫状況に基づき送信タイミングを早める (Preponing) あるいは遅らせる (Deferring) 対称型 DPPM (SDPPM) を導入することで、エネルギー収支の均衡と低遅延化を実現した。さらに、多ノードアクセス環境におけるパケット衝突を考慮した数学的モデルを構築し、容量を最大化するためのパラメータ最適化手法を確立した。評価の結果、提案手法は実効情報伝送容量を最大で約 65% 向上させることを実証した。

Sangar らは、情報を「プリアンブル」と「ポストアンブル」という 2 つの短いアンカーシンボル間の時間間隔にエンコードする変調方式「WiChronos」を提案した [3]。本方式の最大の特徴は、電波占有時間をデータ量から切り離して極小化した点である。通信中の大部分をスリープ状態で過ごすため、従来の LPWA (Low Power Wide Area) と比較して電力効率を劇的に向上させた。さらに、占有時間の短縮は衝突確率の低減にも直結しており、1000 台規模のデバイスが共存する環境においても衝突率を約 1.2% に抑える極めて高いスケールビリティを実証した。

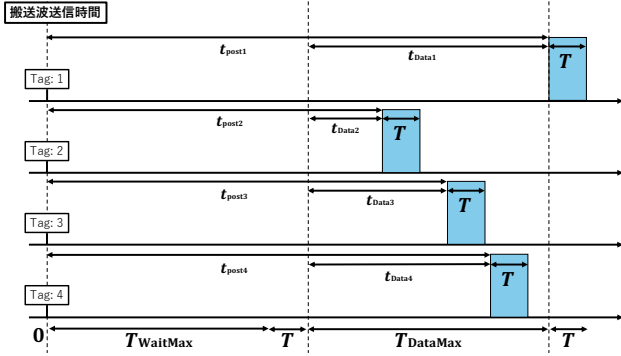


図 2: パケット位置変調による NFC 多重化における受信動作

3 パケット位置変調による NFC 多重化

3.1 キーアイデア

本研究のキーアイデアは、WiChronos [3] を基本とし、NFC にパケット位置変調 (PPM: Pulse Position Modulation) を用いることである。一定の区間内に位置変調によってパケットを分散配置することで、衝突を物理的な「重なり」の確率論として制御する。これにより、数百台規模の大量の Tag が同時に存在する状況でも個々の Tag が平均的な通信速度を維持できる堅牢な多重アクセスを可能にする。

図 1 に、パケット位置変調を用いた NFC 多重化における送信動作の概要を示す。送信側である各 Tag が搬送波を検出すると、パケットの同時衝突を回避するためランダムな待機時間 t_{Wait} ($0 \leq t_{\text{Wait}} < T_{\text{WaitMax}}$) だけ待機してから Tag ID のプリアンブルを送信する。その後、ネットワーク内のすべてのデバイスがプリアンブル送信を完了する固定時間 ($T_{\text{WaitMax}} + T$) まで待機状態を維持する。ここで、 T は Tag ID の送信に要する時間である。つづいて、送信データに対応する時間 t_{Data} ($0 \leq t_{\text{Data}} \leq T_{\text{DataMax}}$) だけ待機した後、Tag ID のポストアンブルを送信する。

図 2 に、パケット位置変調による NFC 多重化における受信動作の概要を示す。受信機、すなわちリーダ側では、プリアンブルの Tag ID からどの Tag が応答しているのかを特定する。搬送波送出開始時刻を $t = 0$ とし、ポストアンブル受信時刻 t_{post} を記録する。そして、 t_{Data} を以下の式によって算出することでデータを受信する。

$$t_{\text{data}} = t_{\text{post}} - (T_{\text{WaitMax}} + T) \quad (1)$$

ここで、 $(T_{\text{WaitMax}} + T)$ はネットワーク全体で共通の固定待機時間であり、差し引くことで個々の Tag が選択

したデータ依存の遅延時間を抽出できる。

本方式の利点は、データの送出を「沈黙」へと置き換えることで、受信機が複数の Tag のタイマーを並行してバックグラウンドで管理できる点にある。

3.2 理論モデル

無線ネットワークにおける媒体アクセス制御の最も基本的なモデルである純粋 ALOHA において、パケットの衝突確率は指数分布を用いたポアソン到着プロセスとしてモデル化される [3]。一般的な ALOHA におけるパケットの衝突確率 P_{coll} は、以下の式 (2) で定義される。

$$P_{\text{coll}} = 1 - e^{-2\lambda T_A} \quad (2)$$

ここで、 T_A は単位時間、 λ は単位時間あたりのネットワーク全体の平均累積パケット数である。このモデルにおいて、あるパケットが衝突しないためには、そのパケットの送信時間の前後 T 、すなわち合計 $2T$ の脆弱期間に他の送信が重ならないことが条件となる。

提案する NFC 多重化本手法では、プリアンブルとポストアンブルがそれぞれ独立した時間窓内で送信される。そのため、全体の衝突確率はそれぞれの時間窓における衝突確率を統合した形式となり、以下の式 (3) のようにモデル化される。

$$P_{\text{collision}} = 1 - \exp \left\{ -2T \cdot \lambda N \left(\frac{1}{T_{\text{WaitMax}}} + \frac{1}{T_{\text{DataMax}}} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 N は Tag の台数である。式 (3) 中の $2T$ はプリアンブルとポストアンブルの 2 つ分の通信時間を表しており、それぞれのパケット持続時間に対して前後での重なりを許容しない ALOHA の性質に基づく。 λN は、ネットワーク全体の総パケット発生率を指すが、本評価モデルにおいては単位時間あたりの送信回数 $\lambda = 1$ であることから、 $\lambda N = N$ 、すなわち Tag 数に相当する。 T_{WaitMax} および T_{DataMax} は、それぞれプリアンブルとポストアンブルが送信される時間窓の幅であり、その逆数 $1/T_{\text{WaitMax}}$ および $1/T_{\text{DataMax}}$ は各時間窓におけるパケットの出現密度を規定する。

4 衝突確率モデルの評価

4.1 評価方法

提案する衝突確率モデルの妥当性および通信性能を評価するため、以下の 2 つの手法を用いて検証を行った。

1 つ目に、NFC 多重化環境における衝突確率の理論モデルの正確性を検証するため、PC を用いた離散時間系シミュレーションを実施した。本評価では、複数の Tag が同一チャンネルに存在する環境を構築し、各 Tag が搬

送波検出後にランダムな待機時間 ($[0, T_{\text{WaitMax}}]$) を経てプリアンプを送信し、さらにデータ依存の沈黙時間 ($[0, T_{\text{DataMax}}]$) の後にポストアンプを送信するプロセスを再現した。シミュレーションにおいては、プリアンプ/ポストアンプの持続時間 (T) を1パケットの脆弱期間として扱い、時間軸上の行列を用いてパケットの重複を検出する手法を採用した。シミュレーションにおける衝突判定および衝突確率の算出は、以下の手順で行った。各タグ $i \in \{1, \dots, N\}$ のプリアンプおよびポストアンプの送信開始時間をそれぞれ $s_{\text{pre},i}, s_{\text{post},i}$ とし、パケット長を L クロックサイクルとする。あるタグ i が通信に成功する条件は、全試行において他のすべてのタグ j ($j \neq i$) と時間的重複がないこと、以下の論理式 (4) を充足することと定義した。

$$\text{Success}_i \iff \forall j \neq i: (|s_{\text{pre},i} - s_{\text{pre},j}| \geq L) \wedge (|s_{\text{post},i} - s_{\text{post},j}| \geq L) \quad (4)$$

評価手順として、Tag 数を2から256まで段階的に増加させ、各条件下で10000回のモンテカルロ試行を実施した。第 m 回目の試行における衝突確率 P_m は、成功条件を満たさないタグの割合として次式 (5) で算出される。

$$P_m = \frac{N - \sum_{i=1}^N X_{i,m}}{N} \quad (5)$$

ここで、 $X_{i,m}$ はタグ i が成功条件を満たす場合に1、それ以外の場合に0をとる二値変数である。最終的な平均衝突確率は、全試行 M 回の算術平均 $\bar{P} = \frac{1}{M} \sum P_m$ によって得た。得られたシミュレーション結果と、式 (3) で示される理論モデルを比較することで、タグ数の増大に対するモデルの予測精度および追従性を評価した。

2つ目に、構築した衝突確率モデルの実行効率を評価するため、個々のTagが実効的に享受可能な平均通信速度 R を算出した。本評価では、NFCの物理層における通信速度および送信データビット数 d が、システム全体のスループットに与える影響を定量化することを目的とする。

評価パラメータとして、動作クロック周波数を $f_c = 13.56$ MHz、NFCのビットレートを424 kbpsと設定した。プリアンプおよびポストアンプを構成するパケット長は8 bitとし、その物理的な占有時間 T は $T = 8/\text{Bitrate}$ によって算出した。プリアンプの最大待機時間を T_{WaitMax} 、データを符号化するためのポストアンプの最大待機時間を $T_{\text{DataMax}} = 2^d/f_c$ と定義した。Tag 1台あたりの平均通信速度 R は、1回の通信シーケンスに要する総時間 T_{cycle} を分母とし、式 (6) を用いて算出した。分母となる T_{cycle} は、プリアンプ待機時間、パケット送信時間 T 、およびデータ依存の待機時間

t_{data} の総和であり、通信1周期における期待値を秒単位で表したものである。

$$R = \frac{P_{\text{success}}(N) \cdot d}{T_{\text{WaitMax}} + 2T + E[t_{\text{data}}]} \quad (6)$$

ただし、 $E[t_{\text{data}}]$ は0から T_{DataMax} までの一様分布における待機時間の期待値 ($(2^d - 1)/2f_c$) である。評価手順として、Tag 数 N を2から256まで段階的に増加させ、各条件下で10,000回のモンテカルロ試行を実施した。さらに、送信データ長 d を4, 8, 12, 16, 20 bitと変化させることで、ペイロードの増大に伴う転送効率を評価した。各試行では、各Tagのプリアンプ開始位置を乱数により決定し、ポストアンプの位置をデータの値に応じてプリアンプとの相対距離で配置した。時間軸上での占有時間重複を検知し、両フェーズで衝突を回避した割合を成功確率 $P_{\text{success}}(N)$ とした。これにより、Tag 密度およびデータ長が個々の通信路の占有効率および実効通信速度に与える影響を明らかにした。

3つ目に、システムの実効通信速度 R を最大化する最適な送信データ長 d について検討した。理論上、データ長 d を増大させることは、1回の通信シーケンスで転送可能な情報量を増加させる一方で、指数関数的に増大するデータ待機時間 $T_{\text{DataMax}} = 2^d/f_c$ による通信周期の延長を招く。加えて、パケットの送信間隔が広がることで衝突確率は低減するものの、単位時間あたりの通信機会自体が減少するというトレードオフが存在する。本評価では、Tag 数 N を固定した条件下において、データ長 d を1 bit から24 bitまで段階的に変化させ、理論値およびモンテカルロシミュレーションによる実測値を用いてスループット R の推移を観測した。実効通信速度 R が極大となる条件を探索した結果、本ネットワーク環境下における最適なデータ長 d_{opt} を特定した。

以上により、ネットワークのTag密度が個々の通信路の占有効率および実行速度に与える影響を定量的に明らかにした。

4.2 評価結果

図3に、シミュレーション結果を示す。シミュレーション (simulation) と衝突確率モデル (Model) は、評価した全範囲 ($N = 2$ から256) において極めて高い精度で一致した。提案した衝突確率モデルである式 (3) が、NFCにおけるパケット位置変調の衝突挙動を正確に記述できていることが確認された。

衝突確率はTag 数 N に対してほぼ線形に上昇しており、Tag 数が250個の条件下においても、衝突確率は約0.27 (27%) 程度に抑えられていることが読み取れる。一般に、指数関数 $\exp(-x)$ は x が十分に小さい場合、 $1 - x$ と近似できる。本評価環境では時間窓幅

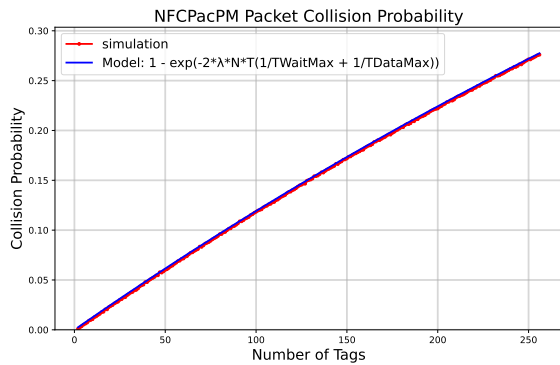


図 3: シミュレーションと衝突確率モデルの比較

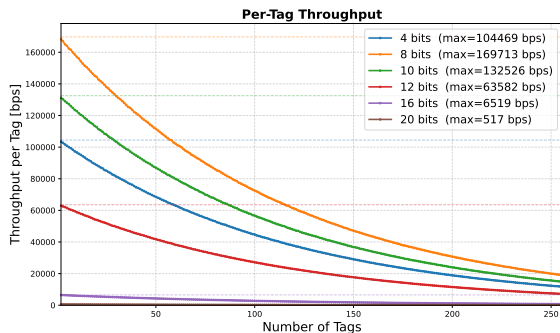


図 4: 平均通信速度

$(T_{\text{WaitMax}}, T_{\text{DataMax}})$ がパケット長に対して十分に大きく設定されているため、指数関数内のトラフィック密度が低い状態に保たれた。その結果、グラフ上では指数的な挙動ではなく、Tag 数に比例した直線的な衝突確率の上昇として現れていると考えられる。

図 4 は、Tag 数 N およびデータビット数 d を変化させた際の、Tag 1 台あたりの平均実効通信速度 R の推移を示している。シミュレーションの結果、データビット数 d によってスループットの特徴が大きく異なることが確認された。本評価環境において、 $d = 8$ bit の場合に最も高い通信速度が得られ、最大で約 169.7 kbps に達した。次いで $d = 10$ bit では最大 132.5 kbps、 $d = 4$ bit では最大 104.5 kbps となり、ペイロード長と通信周期のバランスによって最適なスループットが決定されることが明らかとなった。一方で、 d を 16 bit および 20 bit まで増加させた場合、最大通信速度はそれぞれ約 6.5 kbps および 517 bps まで急激に低下した。データ長の増大に伴い待機時間 T_{DataMax} が指数関数的に増加し、1 周期あたりの時間占有率が極大化したことで、単位時間あたりのデータ転送効率が著しく損なわれたためと考えられる。

さらに、いずれのデータビット数においても、Tag 数 N の増加に伴いスループットが単調減少する傾向が確認された。例えば、 $d = 8$ bit においては、 $N = 2$ 時の

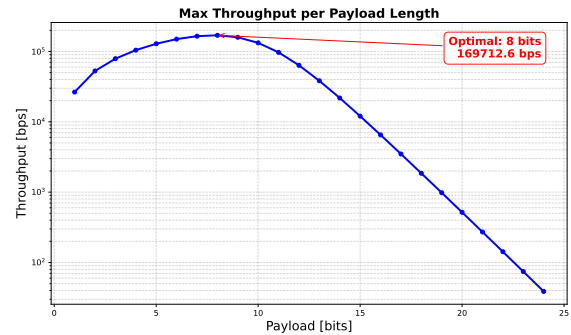


図 5: 送信データ長の最適化

約 170 kbps に対し、 $N = 250$ 時には約 20 kbps まで低下している。これは、ネットワーク内の Tag 密度の増大に伴いパケットの衝突確率 $P_{\text{collision}}$ が上昇し、プリアンブルおよびポストアンブルの両フェーズを正常に完了できる確率が低下したことを反映している。特に、低ビットレートの条件下では高密度環境下での通信成功率の低下がより顕著であり、本手法におけるパラメータ設計の重要性を裏付ける結果となった。

図 5 は、送信データ長 ([bits]) の変化に伴う理論上の最大通信速度の推移である。

本手法における通信速度 R は送信データ長 d に対して強い依存性を持ち、特定の条件下で極大値をとることが確認された。具体的には、 $d = 8$ bit において最大通信速度 169,712.6 bps (約 170 kbps) を記録し、本ネットワーク構成における最適な送信データ長であることが明らかとなった。

通信速度の挙動に着目すると、 $d < 8$ の領域ではデータ長を増加させることで転送効率が向上する傾向が見られる。プリアンブル送信時間や T_{WaitMax} といった固定的な時間コストに対し、1 回の通信で送れる情報量 d の増加による寄与が大きいためである。一方で、 $d = 8$ を超える領域ではスループットが急激に減衰し、対数スケール上で直線的な低下を示している。待機時間 T_{DataMax} が 2^d に比例して指数関数的に増大するため、分母となる通信周期 T_{cycle} の延伸が分子の情報量増加を圧倒し、ビットあたりの時間効率を著しく低下させていることを示唆している。

以上の結果より、パケット位置変調を用いることで、多数の Tag が混在する環境下においても衝突の発生を統計的に予測・制御可能であることを示している。特に、衝突確率モデルと実測値の一致は、通信環境の設計段階において、目標とする成功率 $(1 - P_{\text{collision}})$ を確保するために必要な時間窓幅を、計算によって理論的に導出できることを意味しており、本手法のシステム設計における有用性を実証するものである。さらに、送信データ

長 d の最適化プロセスを通じて、スループットと待機時間の間に明確なトレードオフが存在することが確認された。本評価で得られた $d = 8 \text{ bit}$ におけるスループットの極大化は、時間符号化方式における情報の密度と占有周期の均衡点を示しており、システムの要求条件に応じた柔軟なパラメータチューニングが可能であることを裏付けている。

5 おわりに

本研究では、ウェアラブルデバイスの持続的な運用を目的とし、給電とデータ伝送を同一プラットフォームで統合可能な NFC において、パケット位置変調を用いた多重化手法を提案し、その理論モデルを構築した。

評価の結果、提案した衝突確率モデルは離散時間系シミュレーションの結果と極めて高い精度で一致し、NFC におけるパケット位置変調の挙動を正確に記述できることが確認された。適切な時間窓幅を設定することで、Tag 数が 250 個の過密な環境においても衝突確率を約 27% に抑え、平均通信速度の低下を直線的な範囲に留めることができるなど、高いスケーラビリティが確認された。

さらに、システムの実効通信速度を最大化する送信データ長 d の最適化に取り組み $d = 8 \text{ bit}$ が本構成における最適解であることを明らかにした。最適条件下では最大約 170 kbps の通信速度を達成しており、データ長の増大が指数関数的な周期延伸を招くという時間符号化特有の制約を考慮したパラメータ設計の重要性を提示した。

今後は、このモデルを指針として、現実の環境下での通信要件や電力供給効率との両立に関する最適化の検討を進める。

謝辞

本研究の一部は、JST CRONOS (JPMJCS25N4) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Takahashi, R., Yukita, W., Yokota, T., Someya, T. and Kawahara, Y.: Meander Coil++: A Body-Scale Wireless Power Transmission Using Safe-to-Body and Energy-Efficient Transmitter Coil, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New Orleans, LA, pp. 1–12 (2022).
- [2] Feng, D., Das, S. and Biswas, S.: Packet Position Modulation: A Technique for Enhancing Information Transfer Capacity in Ultra-Low Duty Cycle Networks, *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing and Networking*, ICDCN'20, pp. 1–10 (2020).
- [3] Sangar, Y. and Krishnaswamy, B.: WiChronos: Energy-Efficient Modulation for Long-Range, Large-

Scale Wireless Networks, *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom'20, pp. 1–14 (2020).