

センサーネットワークにおける高信頼・低消費電力の空中計算技術に関する研究



湯 素華 (Suhua TANG, Ph. D.)

電気通信大学 情報・ネットワーク工学専攻 教授

(Professor, University of Electro-Communications, Department of Computer and Network Engineering)

IEEE 電子情報通信学会 情報処理学会

受賞: ACM GIS Cup 準優勝 (2013 年). 情報処理学会 DICOMO 大会最優秀論文賞 (2018 年) 他

研究専門分野: 情報ネットワーク

あらまし

超スマート社会では、環境やモノを観測・検知するために、数多くのセンサノードが設置される見込みである。しかし、センサノードの大規模設置を前提として設計されていない従来の IoT 技術は、そのリアルタイム性や信頼性を十分に満足できない。本研究では、データ収集と処理を電波の重ね合わせ（以降：空中計算）によって効率的に行い、ノード数の急増に対応できる、スケーラブル IoT ネットワークの実現とその高信頼化を目的とする。空中計算は、通信と処理を融合する破壊的革新技術であり、数多くのノードからのデータ通信と計算を、空中でノード一台分の通信時間で完了できることが大きなメリットであるが、無線チャネルの減衰によって性能が劣化する。本研究では、無線通信路の多様化を利用して、中継方式、複数のスロットへの拡張、複数のアンテナの利用などにより、空中計算の信頼性を向上させる。また、理論解析やシミュレーション評価によって、送信電力を抑えながら計算誤差を大幅に削減できることを示す。

1. 研究の目的

本研究で検討する、スケーラブル IoT ネットワークを実現する空中計算技術[R1]は、通信・処理を効率的に融合する破壊的革新技術であり、将来の IoT 基盤技

術になる見込みである。多くの IoT タスクでは、ノードごとのセンシング値ではなく、その平均や分散などの統計値が得られれば実用には十分である。これらのタスクに対して空中計算を導入することで、数多くのノードからのデータ通信と計算を、空中でノード一台分の通信時間で完了できる。また、これにより送信衝突の問題も、幹線ネットワーク上のトラフィック混雑問題も同時に解消できる。しかし、電波強度の減衰による計算誤差は、大きな課題となる。これに対して、既存研究[R2][R3]は主に送信電力制御で対応するが、性能は限られている。

本研究では、様々な方面から空中計算の高信頼化を図る。中継方式は、ゲートウェイ (GW) との間の距離が長くて減衰が大きいノードに対して、その信号を増幅してから GW に転送する。空中計算において、全てのノードが一斉に送信するが、通信リンク品質が低いノードも存在する。チャネルの時系列変化に着目して、空中計算を複数のスロットに拡張し、送信スロットを選択できるようにする。また、GW に複数のアンテナを搭載し、アンテナ制御によって性能をさらに向上させる。これらの方法により、空中計算の高効率を保ちながら、信頼性を向上できるので、スケーラブル IoT ネットワークの実現に大きく寄与できる。

2. 研究の背景

超スマート社会では、環境やモノを観測・検知するために、数多くのノードが設置され、GW 経由で IoT クラウドに接続される (図 1(a))。既存の IoT では、ノードからのデータ収集と処理が分かれている。データ収集では、ノード数が増大すると、ノードから GW への無線チャネル上で、送信衝突が頻発する (図 1(b))。これにより、再送を含めてノード台数分以上の時間がかかり、リアルタイム性を確保できないという問題が発生する。また、GW からクラウドへの幹線ネットワーク上のトラフィック量や、クラウドでのデータ処理時間も、ノード数と共に増加する。一方、多くの IoT タスクでは、ノードごとのセンシング値の代わりに、統計値（平均、分散、またはより複雑な処理結果）が得られれば実用には十分である。これらのタスクに対して、空中計算では、ノードは一斉にデータを送信し、

センサーネットワークにおける高信頼・低消費電力の空中計算技術に関する研究

GW のアンテナで物理層において電波を重ね合わせる (図 1(c))。これにより、すべての送信・処理が、ノード一台分の通信時間で効率的に完成できるとともに、ノードごとのデータを区別しないため、無線チャネルにおける送信衝突の問題も解消できる。また、幹線ネットワークでは処理結果のみをクラウドへ送信するため、トラフィック混雑問題も解消される。

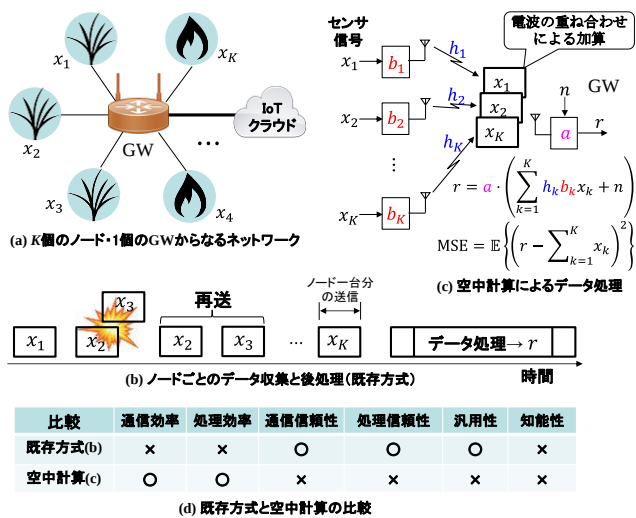


図 1 IoT におけるセンサデータの取集・処理の比較

3. 研究の方法

図 1(c)に示すように、一般的に、空中計算の結果は、各信号に重みを付けた和となる。送信信号の和を求める上で、各信号の重みがすべて 1 になるようにする、信号整列という送受信制御を行う必要がある。

減衰が大きいノードからの信号は、他の信号と同じ重みを取るために、送信側では、事前に信号を増幅して送信することが必要である。最大電力で送信しても、重みが他の信号よりも低い場合、計算結果は実際の和と異なってしまう、計算誤差が生じる。また、計算結果はノイズの影響も受ける。

本研究では、通信路の多様性によって空中計算の計算誤差を低減させる。

3.1 増幅転送による中継方式[1]–[3]

ノードと GW の間に距離が長くて、減衰が大きい場合、中継ノードでの増幅転送によってこの問題を解消する。図 2(b)に示すように、直接リンクによる信号の

大きさが目標値まで届かない場合、中継リンクの使用によってそれを補う。中継を利用するノードは 2 回送信し、GW で直接信号と中継信号が同位相で増強できるように、各ノードは送信制御を行う。中継を行う際、中継ノードでの送信電力が、中継する信号数に比例して増加する。中継ノードの最大送信電力の制限を受け、一部分のノードしか中継を使えない。そこで、ノードを二つのグループに分ける (図 2(a))。GW に近いノードは直接 GW に送信するが、GW から遠いノードは、中継ノードを利用する。各ノードでの送信制御、中継ノードと GW での受信制御によって、計算誤差を最小化する手法を提案・評価した[1]。

上記のノードグループの分け方によって計算誤差が変わる。このグループ分けをノードのスケジューリングと呼ぶ。各ノードの、中継を使用する際の、計算誤差の削減量と中継ノードの消費電力増加量の比に基づいて、効率の良いノードを選出する手法を提案・評価した[2]。

また、専用中継ノードは導入・使用コストが大きいいため、センサノードを中継として利用し、電池残量などを考慮して中継ノードを動的に選択する手法を検討・評価した[3]。

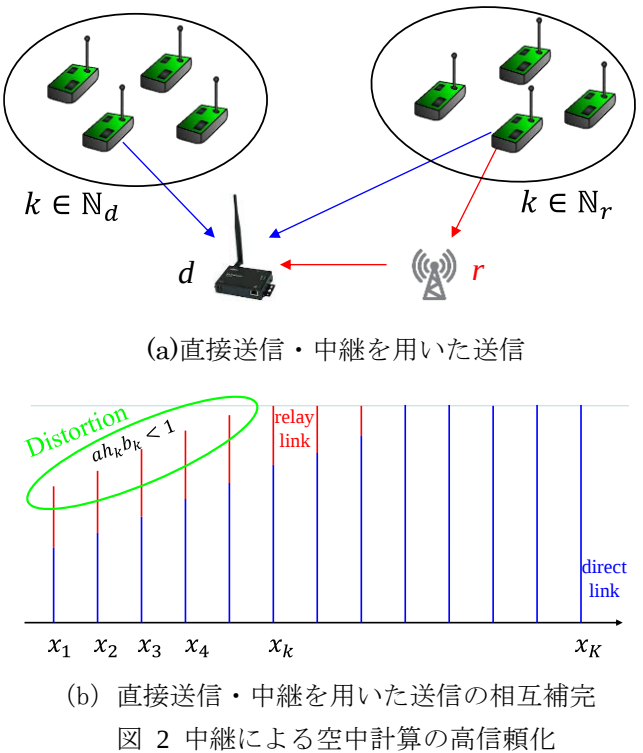


図 2 中継による空中計算の高信頼化

センサーネットワークにおける高信頼・低消費電力の空中計算技術に関する研究

3.2 複数のスロットへの拡張[4]

空中計算では、全てのノードは同時に送信するが、ノードによっては、送信時のリンク品質が低下しうる。これを避けるため、図 3(a)に示すように、空中計算を複数のスロットに拡張する。各ノードは、スロットごとに、自端末のリンク品質を GW が事前に設定した閾値と比較し、閾値以上であればそのスロットで送信し、そうでなければ送信を次のスロットに延期する。全てのスロットではリンク品質が閾値以下の場合、最後のスロットで送信する。GW では、各スロットで受信した信号から合成信号を算出する。各ノードが送信スロットを選択することにより、GW での信号強度をあけて、信号の重みが 1 に達しないことによって生じる計算誤差を小さくするが、スロットごとに発生する熱雑音は、スロット数に比例して増加する。計算誤差の最小化によって、最適な送信制御、受信パラメータ、スロット数を決定する。図 3(b)に 2 スロット場合の一例を示す。ほとんどの場合、スロット選択によってリンク品質は改善される。

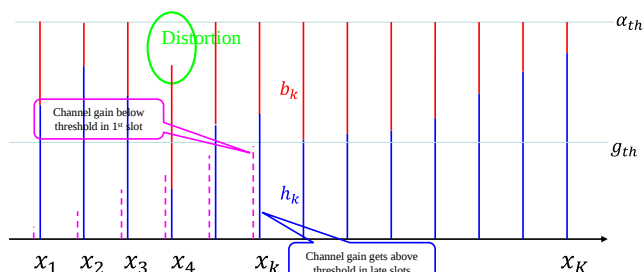
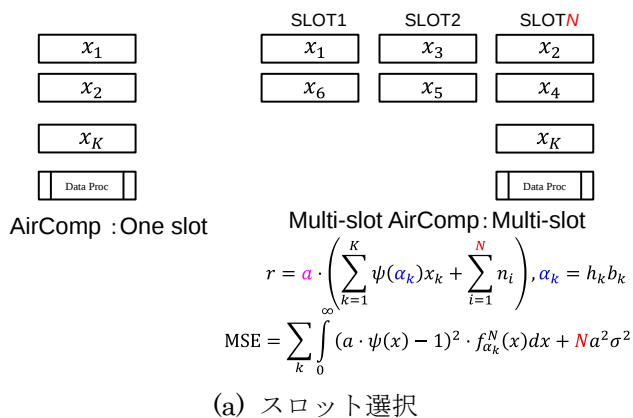


図 3 空中計算の複数のスロットへの拡張および送信スロットの選択による空中計算の高信頼化

空中計算の最適化は、GW が各ノードとの間の瞬時のリンク品質を基に行われるが、リンク品質のリアルタイム収集は通常多くのオーバーヘッドが発生する。本研究では、瞬間のリンク品質ではなく、その分布情報を基に、最適化を行い、それによって、オーバーヘッドをだいぶ低減できる。

3.3 複数のアンテナへの拡張[5]

センサノードはサイズの制限により通常アンテナを一つしか搭載できない。それと比べて、GW は、複数のアンテナを搭載することが可能であり、それによって、空中計算の性能をさらに向上させることができる。

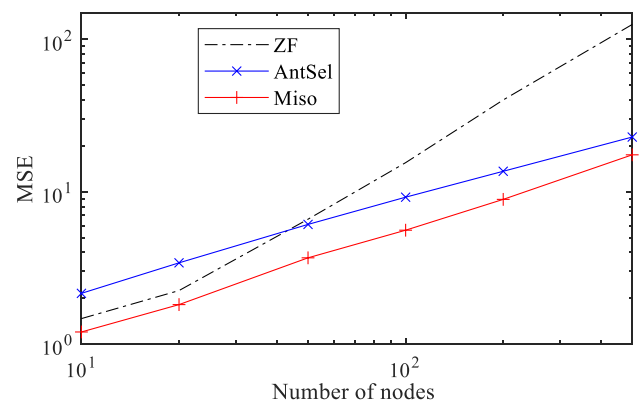
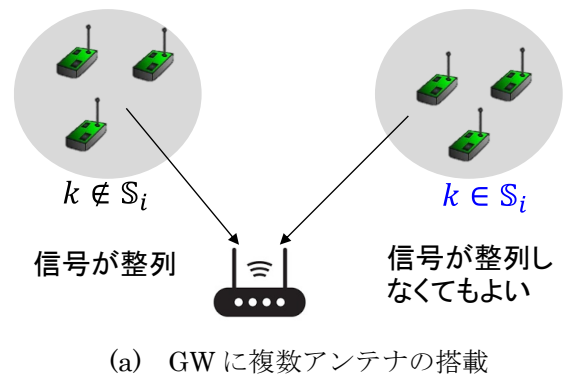


図 4 GW に複数のアンテナの搭載による拡張

単一アンテナの場合、計算誤差の最小化によって、最適な送受信パラメータを算出できるが、複数アンテナを用いる場合、問題が複雑になり、最適な解を求める方法は未だ見つかっていない。そこで、複数アンテナの場合、一般的に、全ての信号の重みを揃えること

センサーネットワークにおける高信頼・低消費電力の空中計算技術に関する研究

を前提として、次善の求解手法を求める[R4]。本研究では、送受信パラメータの最適解を導くために、全ての信号の重みを揃える要求を緩和し、少しの信号歪みを許容し、ノイズを多めに減らすことで、計算誤差のさらなる低減を図る。問題は、全ての信号の重みを揃える要求を緩和する際、どのノードからの信号が整列していなくてもよいかは最初はわからない、ということである。

図 4 に示すように、すべてのノードを二つのグループに分け、一方のノードの信号は必ず整列させる。もう一方のグループのノードからの信号は整列させなくてもよく、このグループは基本的に GW との間のリンク品質が低いノードからなる。ノードのグループ分けとアンテナ制御を同時に最適化する手法を提案・評価した[5]。図 4(b)にノード数の増加に伴う計算誤差の変化を示す。提案方式 (Miso) において、計算誤差が常に最小であることを確認できる。

4. 将来展望

空中計算は、もともと大規模 IoT ネットワークにおけるデータアグリゲーションの効率化のために検討されてきたが、連合機械学習におけるモデルの効率的統合手法としても広く知られている。空中計算の課題として、本研究で取り扱っている信頼性以外に、計算の並行化、連合機械学習との共同最適化などが挙げられる。

空中計算は、一つのタスクの処理の効率化に特化した手法であり、同時に一つのタスクしか実行できない。複数タスクを実行する場合、ノードは繰り返し送信することになるので、計算時間だけでなく消費電力も問題となる。また、センサノードが取得した生データの代わりに、タスクの要求に応じて事前に計算した特徴量を用いて空中計算を行えば、セマンティック通信[R5]も可能であり、性能のさらなる向上が期待できる。

今後は、空中計算の信頼性を損なわないような、複数タスクの並行計算およびセマンティック計算の実現に取り組む。

用語解説

*1 空中計算：各ノードからの信号を物理層で重ね合

わせることで通信と計算を同時に行う技術

*2 信号整列：各ノードの信号が GW のアンテナに到着する際、重み（位相と大きさ）を揃えること

*3 増幅転送：受信した信号を増幅してから転送すること

参考文献

- [1] S. Tang, H. Yin, C. Zhang, and S. Obana, "Reliable over-the-air computation by amplify-and-forward based relay," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53333-53342, Apr. 2021.
- [2] S. Tang, H. Yomo, C. Zhang, and S. Obana, "Node scheduling for AF-based over-the-air computation," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.11, no.9, pp. 1945-1949, Sept. 2022.
- [3] J. Zhou and S. Tang, "Relay selection for over-the-air computation achieving both long lifetime and high reliability," *MDPI Sensors*, 23(8), 3824, Apr. 2023.
- [4] S. Tang, P. Popovski, C. Zhang, and S. Obana, "Multi-slot over-the-air computation in fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vo.22, no.10, pp. 6766-6777, Oct. 2023.
- [5] S. Tang, C. Zhang, J. Li, and S. Obana, "Miso: Misalignment allowed optimization for multi-antenna over-the-air computation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol.11, no.2, pp.2561-2572, Jan. 2024.

関連文献

- [R1] M. Gastpar, "Uncoded transmission is exactly optimal for a simple gaussian sensor network," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 11, pp. 5247-5251, 2008.
- [R2] W. Liu, X. Zang, Y. Li, and B. Vucetic, "Over-the-air computation systems: Optimization, analysis and scaling laws," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no.

センサーネットワークにおける高信頼・低消費電力の空中計算技術に関する研究

8, pp. 5488-5502, Aug. 2020. 769.

- [R3] X. Cao, G. Zhu, J. Xu, and K. Huang, “Optimized power control for over-the-air computation in fading channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 11, pp. 7498-7513, Nov. 2020.
- [R4] L. Chen, X. Qin, and G. Wei, “A uniform-forcing transceiver design for over-the-air function computation,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 6, pp. 942-945, 2018.
- [R5] D. Gunduz, Z. Qin, I. E. Aguerri, H. S. Dhillon, Z. Yang, A. Yener, K. K. Wong, and C.-B. Chae, “Beyond transmitting bits: Context, semantics, and task-oriented communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 1, pp. 5-41, 2023.

この研究は、令和2年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和3～4年度に実施されたものです。