

無線センサネットワークのための 空中計算方式の信頼性に関する検討・評価

湯 素華[†] 小花 貞夫[†]

概要：低消費電力広域無線センサネットワークにおいて、一度のデータ収集では、数多くのセンサノードがそれぞれシンクへ向けてデータを送信するため、送信衝突が頻発する問題や、ノード台数分の時間がかかってリアルタイム性を確保できないという問題が発生する。センサデータの統計値のみが利用されるセンサネットワークに対して、これらの問題を解決するために、空中計算（over-the-air computation）が提案されている。この手法では、従来のノードごとの通信方式の代わりに、各ノードがセンシング情報を振幅変調で電波に乗せて同時に送信し、シンクのアンテナでデータ受信と処理を同時に行う。これにより、非常に高い効率を実現できるが、フェージングなどの影響で信頼性が低下してしまうという課題がある。本稿では、空中計算方式の概要を紹介するとともに、その信頼性向上に関する基本検討と、その評価結果を報告する。

キーワード：空中計算，マルチアクセスチャネル，送信電力制御，マルチスロット，中継

Reliable Over-the-Air Computation for Wireless Sensor Networks

SUHUA TANG[†] SADAO OBANA[†]

1. はじめに

来る超スマート社会では、環境やものを観測・検知するために、膨大な数のセンサノード（以降：ノード）が無線ネットワークを介してゲートウェイであるシンクノード（以降：シンク）に接続され、さらにそこを経由してインターネットに接続される。IoT で用いられるノード数は急速に増加しており、5G の NB-IoT や LoRaWAN を代表とする低消費電力広域無線センサネットワークにおいては将来、1 km²のセルに数万以上のノードの設置が予想される[1]。

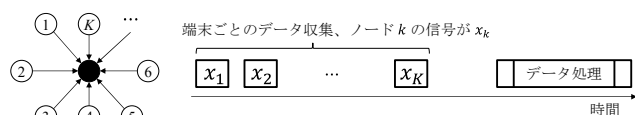


図 1 無線センサネットワークにおけるデータ収集・処理
Figure 1 Data collection and processing in wireless sensor networks.

図 1 に代表的な無線センサネットワークを示す。任意のセンシングタスクを処理できるように、ノードからのデータ収集と後処理は、通常分かれており、どちらもデジタル方式で行われる。データ収集は、主にノードからシンクへのマルチアクセスチャネル上の通信により行われるが、数多くのノードがチャネルを共有するため、ノード数の急増により送信衝突が頻発する恐れがある。その対策としては、キャリアセンスにより衝突率を抑える、衝突しても受信できるようにする、という二つが考えられる。前者の場合

CSMA/CA の利用が一般的である。後者の場合、Coded-ALOHA [2] が提案されており、逐次干渉除去 (SIC) 技術により、重なって受信した衝突信号から各ノードのデータを回復する。

また、データ収集段階で、各ノードから一台ずつデータを収集するには、ノード台数分の時間がかかるため、ノード数が多い場合、リアルタイム性を確保できないという問題が発生する。前述の Coded-ALOHA は衝突への対応が可能だが、通常ノード数以上のスロット数が必要なため、データ収集時間の短縮はできない。

一方、すべてのセンシングタスクには、ノードごとのセンシング値が必要とは限らない。一部分のタスク、例えば、気温、湿度、照度等の計測では、その平均値がわかれば実用には十分である。これらのタスクに対して、データ収集と処理を同時に無線チャネル上のアナログ波形で効率的に行う AirComp 方式が提案され[3]、これにより衝突の問題も同時に解消できるようになった。

AirComp 方式では、時刻・周波数同期のために、各ノードはシンクからの信号に従ってクロックを調整する[4]。また、各ノードとシンク間のリンク品質(チャネルゲイン)に違いが生じると、受信信号に歪みが発生するため、それを一致させる必要がある。これに対しては、送信電力制御である程度対応できる[5][6]が、フェージングや、シンクから遠く離れる端末がある場合、最大電力で送信しても所望のチャネルゲインを達成できないことがある。この信頼性低下は、チャネルゲインの低下によるものである。

[†] 電気通信大学
The University of Electro-Communications

マルチアクセスチャンネル上で、フェージングに対応するためには、マルチユーザダイバーシティがよく使用される。この手法では通常、チャンネルゲインの閾値を設けて、閾値以下の間に送信を行わないようにする[7][8][9]。シンクから遠いノードがある場合には、中継制御が役に立ち、DF (Decode-and-Forward) [10]と AF (Amplify-and-Forward) [11][12]が知られている。しかし、これらは主に1対1通信のために提案されたものであり、AirComp方式にそのまま適用することはできない。

本稿では、前記の AirComp 方式の信頼性低下の問題に対して、まずタイムダイバーシティによるチャンネルゲインの向上について検討する。AirComp 方式ではすべてのノードが同時に送信するので、フェージングによりチャンネルゲインが瞬間的に低下する可能性がある。これに対して、AirComp 方式を（ノード数よりはるかに小さい）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。具体的には、チャンネルゲインの閾値を設け、各ノードはチャンネルゲインが閾値を超える最初のスロット、あるいはチャンネルゲインがずっと閾値以下の場合には最後のスロットで、送信を行う。しかし、シンクから遠いノードがある場合には、決められた複数のスロットの間に、ノードのチャンネルゲインが常に閾値以下となる可能性が高くなり、上記の手法では対応しきれない。そこで、遠いノードの信号を中継してシンクに送信する中継制御についても検討する。また、それぞれの方式に対して、シミュレーションで得られた初期評価結果を報告する。

以降、第2章では空中計算の基本モデル・応用例・課題を述べる。第3章では空中計算のマルチスロットモデルとそのシミュレーション結果、第4章では空中計算の中継モデルとそのシミュレーション結果をそれぞれ説明する。最後に、第5章で本稿をまとめる。

2. 空中計算の基本モデル・応用例・課題

2.1 空中計算の基本モデル

図1における K 個のノードと1個のシンクからなる無線センサネットワークを対象とし、シンクは各ノードからのセンシング信号を基に総和を算出するものとする[5]。シンクはあらかじめビーコン信号を送信し、各ノードはそれを基に、自端末の時刻・周波数を同期して[4]、チャンネル係数（ゲイン）を計測する。

ここでノード k の送信信号を実信号 x_k (x_k が $[-v, v]$ に属し、平均値が0、平均電力が $E(x_k^2) = 1$)、チャンネル係数を $h_k \in \mathbb{C}$ 、送信電力係数を $b_k \in \mathbb{C}$ とする。各ノードが同じスロットで同時に送信すると、シンク側では、信号

$$r = a \cdot \left(\sum_{k=1}^K h_k b_k x_k + n \right) \quad (1)$$

を受信する（図2）。ただし、 n は平均値が0、分散値が σ^2 の熱雑音であり、 a は受信制御用パラメータである。 b_k の調整により、 $h_k b_k$ が正の実数となるため、以降、 h_k 、 b_k 、 a は正の実数とする[5]。

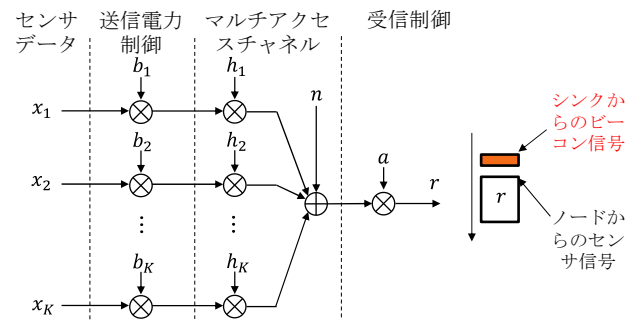


図2 シングルスロット空中計算モデル

Figure 2 Single slot over-the-air computation model.

2.2 空中計算の応用例

式(1)において、 $h_k b_k$ が定数 α と一致するように b_k を調整し、さらに、 a を $1/\alpha$ にすると、各信号の総和 $\sum_{k=1}^K x_k$ を算出できる。

一般的に、 $x_k = \psi(s_k)$ をセンシング信号 s_k に対する予備処理とし、受信信号 $\sum h_k b_k x_k$ に対して後処理 $\varphi(\cdot)$ をすれば、より多くの演算処理が可能となる[13][14][15]。下記にいくつかの例をあげる。

- $\psi(\cdot) = (\cdot)$ と $\varphi(\cdot) = (\cdot)/(K\alpha)$ を併用すれば、計測値の算数平均を算出できる。
- $\psi(\cdot) = (\cdot)^2$ と $\varphi(\cdot) = (\cdot)/(K\alpha)$ を併用すると、計測値の2乗の算数平均を算出でき、さらに、 $E((\cdot)^2) - E^2(\cdot)$ を用いて分散値を算出できる。
- $\psi(\cdot) = \log(\cdot)$ 、 $\varphi(\cdot) = \exp(\cdot)$ を併用すれば、計測値の幾何平均を算出できる。

空中計算はセンサネットワークに限らず、車両の隊列走行[16]や無人機の編隊飛行にも適用できる。各車両が速度・加速度を同時に送信し、ヘッドとなる車両がそれを受信すれば、平均速度などを算出可能で、それを基に車群の制御が行える。

近年、連合学習 (Federated learning) [17]は、データセキュリティやプライバシーを保護できるため、多くの注目を集めている。ノードはデータをクラウドサーバへ送信せず、その代わりに、各ノードが協力して共通のモデルを分散的に作り、ローカルでデータを処理する。具体的には、各ノードが共通のモデルに対して、自端末のデータを用いてそれを更新し、更新モデルをゲートウェイを経由してサーバへ送信する。サーバでは、各ノードからの更新モデルを統合して新しい共通モデルを作成して、すべてのノードに共有し、以降のデータ処理に使用する。ここでサーバをすべてのノードが接続するゲートウェイ (シンク) に設置すれば、更新モデルの収集・統合が無線チャンネル上で、AirComp

方式によって効率的に実現できる[18].

2.3 空中計算の課題

各ノードのチャンネル係数 h_k はそれぞれ異なる。 h_k の違いの影響をなくすため、図3のように $h_k b_k$ が定数 α に一致するよう b_k を調整して、送信電力の制御が行われる(表示をわかりやすくするため、 h_k の昇順でノードを並べ直してある)。横軸はノード(信号)番号、縦軸(対数目盛)は、下がチャンネル係数 h_k 、上が送信電力 b_k であり、 $h_k b_k$ の積が α に揃えばよい。

しかしながら、ノードの送信電力には制限がある。最大送信電力を P' とし、 $b_k^2 = P'/v^2 = P_{max}$ を相対最大送信電力とすると、 h_k がとても小さい場合には、最大送信電力でも $h_k b_k$ が α に達しないため、受信信号に歪みが発生する。このような場合、歪みを抑えるために、受信信号 r と目標信号 $\sum_{k=1}^K x_k$ の間の平均二乗誤差(MSE)

$$MSE = E \left\{ \left(r - \sum_{k=1}^K x_k \right)^2 \right\} = \sum_{k=1}^K |ah_k b_k - 1|^2 + |a|^2 \sigma^2 \quad (2)$$

が最小になるように、送信電力 b_k と受信パラメータ a を決定する。

図3に示すように、番号が i^* 以下のノードは最大電力で送信し、それ以外のノードはチャンネル係数から算出された電力(b_k)を使用する[5]。しかし、番号が i^* 以下のノードはチャンネル係数が小さすぎるため、最大電力で送信しても、その信号がシンクに届く際の振幅が i^* 以上のノードからの信号より小さくなり、信号 r に歪みが発生する。

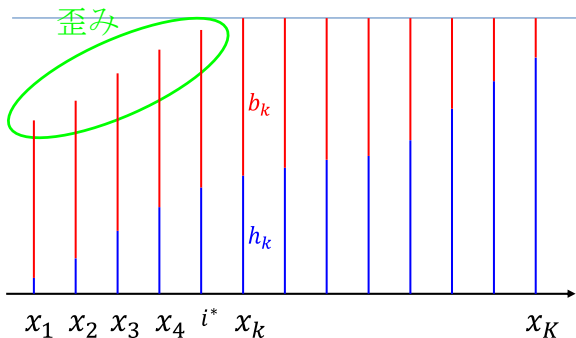


図3 受信信号における歪み

Figure 3 Distortion due to misalignment in signal magnitude.

3. 提案方式1: マルチスロット空中計算

空中計算では、すべてのノードが同じスロットで送信するため、その瞬間のチャンネルゲインで受信信号のMSEが決定される。

提案方式では、フェージング中の端末の送信を回避し、時間帯をずらして、フェージングが解消してから送信を行うポリシーを取る。それを実現するために、(1)複数のスロット(N 個、 N が1以上であるが、ノード数よりはるかに

小さい)、および(2)チャンネルゲインの閾値 g_{th} を新たに設ける。送信スロットの選択により実際の送信時のチャンネルゲインの向上を図る。これは基本モデル(シングルスロット)との大きな違いである。

3.1 マルチスロット空中計算モデル

図4に提案方式のマルチスロット空中計算モデルを示す。チャンネルゲインが閾値 g_{th} 以上になるときのみ送信を行う。具体的には、スロットごとに、シンクノードはビーコン信号を送信する。各ノードはそれを受信すると、チャンネルゲインを検知し、閾値以上かつ、自身が未送信であれば、直ちに送信する。ずっと閾値以下であれば、最後のスロットで、閾値を問わず送信を行う。

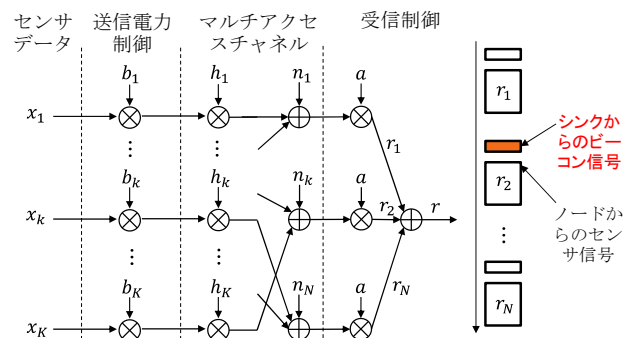


図4 マルチスロット空中計算モデル

Figure 4 Multi-slot over-the-air computation model.

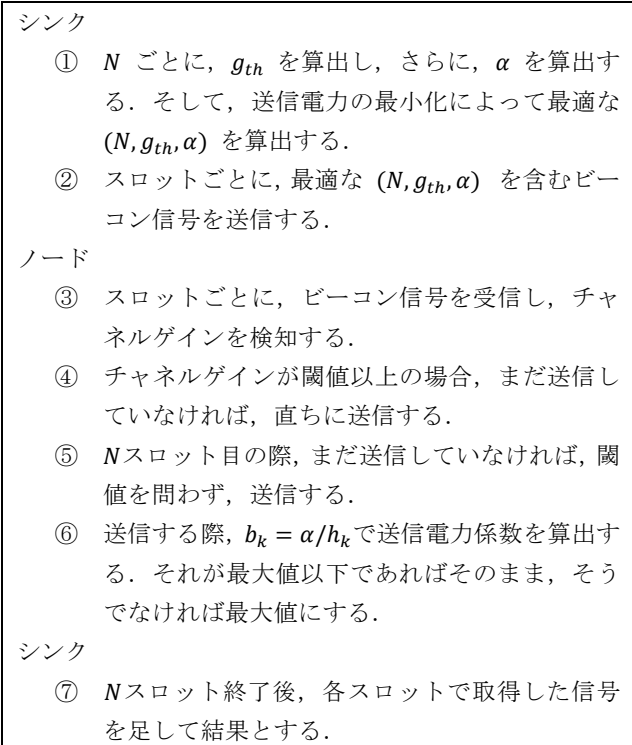


図5 マルチスロット空中計算のフローチャート

Figure 5 Flowchart of multi-slot over-the-air computation.

シンクで受信した信号は下記となる.

$$r = a \cdot \left(\sum_{k=1}^K h_k b_k x_k + \sum_{i=1}^N n_i \right). \quad (3)$$

信号部分は式 (1) と同じで, 熱雑音は N 個のスロット分
に増える. そこで, MSE でも, 熱雑音の電力が N 倍にな
る.

$$MSE = \sum_{k=1}^K |ah_k b_k - 1|^2 + N|a|^2 \sigma^2. \quad (4)$$

提案方式では, シンクとノードが図 5 のフローチャート
に従って動作する. スロット数 N , チャネルゲイン閾値 g_{th} ,
信号振幅の目標値 α の求め方と評価結果は[19]に示されて
いる.

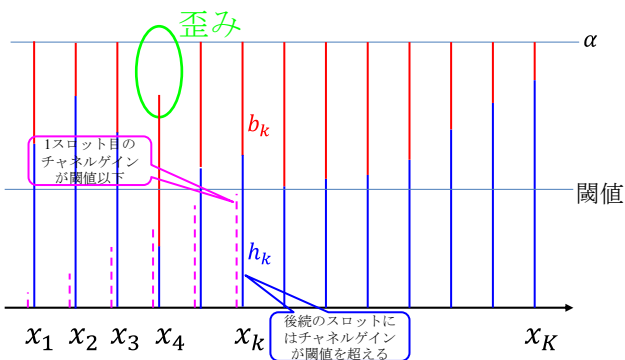


図 6 受信信号における歪みの低減

Figure 6 Reduction of distortion in signal magnitude.

図 6 は, 図 3 に対して, 送信時のチャネルゲインが向上
した際のイメージを示す. 1 スロット目でのチャネルゲイン
は図 3 と同じである. チャネルゲインが閾値以上のノード
は 1 スロット目で送信する. 閾値以下のノードは, 後続
のスロットで送信する. 待機することにより, ほとんどの
場合チャネルゲインが改善され, $h_k b_k$ が所望の α 以下とな
るノード数が低減される. ただし, 後続のスロットでもチャ
ネルゲインが必ず閾値以上になるとは限らない.

表 1 マルチスロット手法評価のシミュレーション設定

Table 1 Simulation setting for multi-slot AirComp.

パラメータ	設定
ノード数	100
平均チャネルゲイン	10
最大送信電力	10
熱雑音電力	1
フェージング	レイリーフェージング

表 1 のパラメータを用いてシミュレーション評価を行
い, 計算結果の MSE と各ノードの平均送信電力の累積分
布をそれぞれ図 7 と図 8 に示す. MS-AirComp 方式は前記
の提案方式である. 両図から, MS-AirComp 方式は AirComp
方式と同程度の送信電力を消費する際, 計算結果の MSE を

削減することを確認できる.

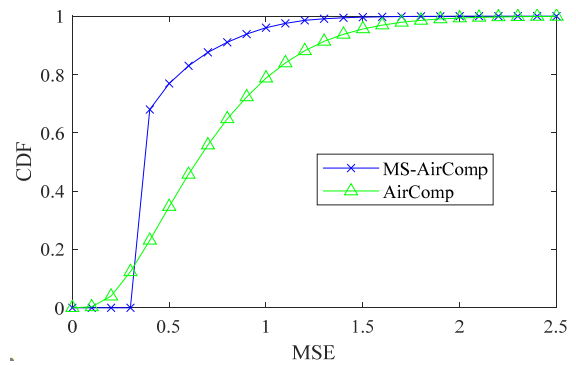


図 7 計算結果の MSE の累積分布

Figure 7 Cumulative distribution of MSE of received signal.

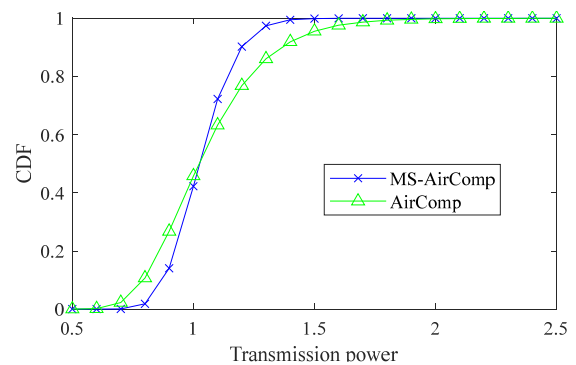


図 8 送信電力の累積分布

Figure 8 Cumulative distribution of transmission power.

4. 提案方式 2: 中継を用いた空中計算

既存の 1 対 1 通信の中継方式は, DF と AF の両方がある
が, 空中計算はアナログ波形で計算を行うため, AF の適用
を検討する.

図 9 に AF に基づく空中計算の中継モデルを示す. ノード
とシンク d のほかに, 専用の中継ノード r を追加する. なお,
 r の送信電力には制限がないものとする. ノードと中継
ノード r ・シンク d の間のチャネルゲインの大きさによって,
ノードを中継ノード r の近隣ノード N_r と, そうでないノード
 \bar{N}_r の, 二つのグループに分ける. N_r におけるノードはシ
ンクから遠いため, 中継ノード r を利用するが, \bar{N}_r におけ
るノードは直接シンクへ送信する.

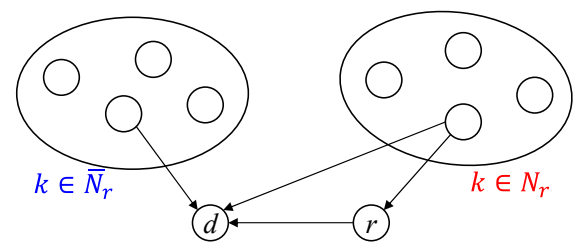


図 9 AF に基づく空中計算の中継モデル

Figure 9 AF based relay for AirComp.

中継通信は二つのスロットに分けられる。二つのスロットでは、チャンネルゲインは変化せず、スロットごとに送信電力の調整が可能であるものとする。

1 スロット目に、 N_r におけるノードは同時に送信し、中継ノード r とシンク d は、それを受信する。

$$s_{r,1} = a_{r,1} \cdot \left(\sum_{k \in N_r} h_{k,r} b_{k,1} x_k + n_{r,1} \right). \quad (5)$$

$$s_{d,1} = a_{d,1} \cdot \left(\sum_{k \in N_r} h_{k,d} b_{k,1} x_k + n_{d,1} \right). \quad (6)$$

ただし、 $h_{k,r}$ と $h_{k,d}$ はそれぞれノード k と $r \cdot d$ 間のチャンネル係数、 $b_{k,1}$ は1スロット目の送信電力係数、 $a_{r,1}$ と $a_{d,1}$ はそれぞれ r と d での受信制御パラメータである。

2スロット目に、 N_r と \bar{N}_r におけるノード、中継ノード r が同時に送信し、シンク d が受信する。ただし、 $b_{k,2}$ は2スロット目の送信電力係数、 $a_{d,2}$ は d での受信制御パラメータである。

$$s_{d,2} = a_{d,2} \cdot (s'_{d,2} + s''_{d,2} + s'''_{d,2} + n_{d,2}), \quad (7)$$

$$s'_{d,2} = \sum_{k \in N_r} h_{k,d} b_{k,2} x_k,$$

$$s''_{d,2} = \sum_{k \in \bar{N}_r} h_{k,d} b_{k,2} x_k,$$

$$s'''_{d,2} = h_{r,d} b_{r,2} s_{r,1}.$$

これにより、基本モデルと同様に計算結果のMSEが定義できる。

この一般化中継モデルはそのままでは解けないため、まずいくつかの特殊ケースに対してパラメータを求める。これらの方式は、 N_r におけるノードの送信方式によって異なる。

- **Relay1.** 1スロット目では、 N_r におけるノードは r へ送信し、 d は受信しない。2スロット目では、 \bar{N}_r におけるノードの送信と共に r が1スロット目で受信した信号を中継する。
- **Relay2.** Relay1と比べて、2スロット目では、 \bar{N}_r におけるノードの送信・ r による中継と共に、 N_r におけるノードは再度送信する。ただし、二つのスロットにおける送信電力の合計に制限をかける。
- **Relay3.** Relay2と比べて、1スロット目では、 d は N_r におけるノードからの信号も受信する。

Relay1は一番簡単な中継方法で、 N_r におけるノードから r へのデータ収集・ \bar{N}_r におけるノードから d へのデータ収集の二つの空中計算となり、それぞれ最適化できる。Relay2とRelay3は、もっと複雑であり、そのヒューリスティック解については[20]で検討した。

表2におけるパラメータと図10に示すネットワークポロジを用いてシミュレーション評価を行った。図では、

\times がノード、 \triangle が中継ノード、 \diamond がシンクである。

表2 中継方式のシミュレーション設定

Table 2 Simulation setting for relay-based method.

パラメータ	設定
ノード数	100
周波数	2.4GHz
最大送信電力	15dBm
熱雑音電力	-90Bm
固定増幅ゲイン	90dB
フェージング	レイリーフェージング

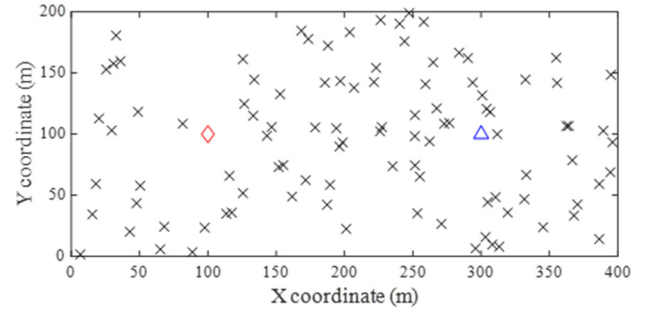


図10 ノード・中継ノード・シンクの配置

Figure 10 Deployment of sensor nodes, relay node, and sink.

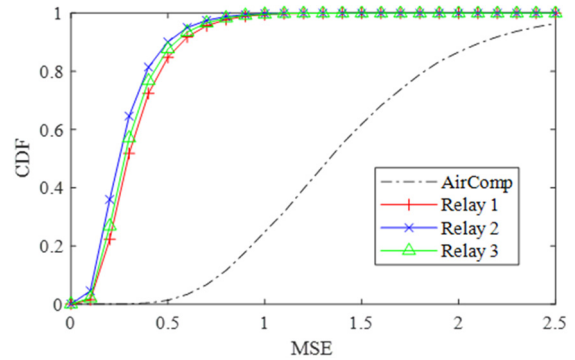


図11 計算結果のMSEの累積分布

Figure 11 Cumulative distribution of MSE of received signal.

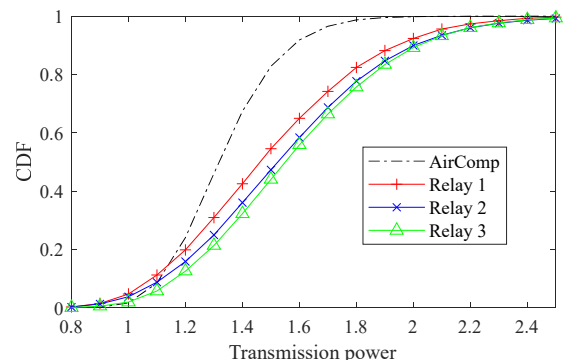


図12 送信電力の累積分布

Figure 12 Cumulative distribution of transmission power.

中継を使用せずに各ノードからシンクへ直接送信するAirComp方式と、中継を用いた方式(Relay1, Relay2, Relay3)における計算結果のMSEと、ノードごとの送信電力の累

積分布をそれぞれ図 11 と図 12 に示す。中継により、計算結果の MSE が大幅に削減されることを確認できる。ただし、それに伴って、中継方式では送信電力も増えてしまう。このことから、計算結果の MSE を過剰に低減することを避けて、送信電力を抑えながら MSE を低減させることが必要であることが分かった。

5. おわりに

無線センサネットワークでは、ノード数の増大により送信衝突の頻発のみならず、収集時間の増加も課題となる。データ収集と処理を一体化する、効率の高い空中計算を導入することでこれらの課題を解決できるが、その信頼性が新たな課題となる。これに対して、本稿では、マルチスロット拡張による選択ダイバーシティと中継制御の二つの側面から空中計算の信頼性の向上について検討した。基本検討の結果では計算結果の歪みを削減できることを示す一方、送信電力と計算結果の誤差との間にトレードオフが存在することが判明した。今後、送信電力を抑えながら計算結果の歪みを削減する方法について検討する。

参考文献

- [1] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2017.
- [2] E. Paolini, C. Stefanovic, G. Liva, and P. Popovski, "Coded random access: Applying codes on graphs to design random access protocols," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 6, pp. 144–150, June 2015.
- [3] J. Xiao, S. Cui, Z. Luo, and A. J. Goldsmith, "Linear coherent decentralized estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 2, pp. 757–770, 2008.
- [4] O. Abari, H. Rahul, D. Katabi, and M. Pant, "AirShare: Distributed coherent transmission made seamless," in *Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'15)*, pp. 1742–1750, 2015.
- [5] W. Liu, X. Zang, Y. Li, and B. Vucetic, "Over-the-air computation systems: Optimization, analysis and scaling laws," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 8, pp. 5488 – 5502, 2020.
- [6] X. Cao, G. Zhu, J. Xu, and K. Huang, "Optimal power control for over-the-air computation in fading channels," *CoRR*, vol. abs/1906.06858, 2019.
- [7] X. Qin and R. Berry, "Distributed approaches for exploiting multiuser diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 392–413, Feb. 2006.
- [8] S. Adireddy and L. Tong, "Exploiting decentralized channel state information for random access," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 537–561, Feb. 2005.
- [9] S. Tang, "Distributed multiuser scheduling for improving throughput of wireless LAN," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 5, pp. 2770–2781, 2014.
- [10] T. Wang, A. Cano, G. B. Giannakis, and J. N. Laneman, "High performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 7, pp. 1427–1438, 2007.
- [11] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, "Improving amplify-and-forward relay networks: Optimal power allocation versus selection," in *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'06)*, pp. 1234–1238, 2006.
- [12] S. Yang and J. Belfiore, "Towards the optimal amplify-and-forward cooperative diversity scheme," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 9, pp. 3114–3126, 2007.
- [13] R. C. Buck, "Approximate complexity and functional representation," *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 70, pp. 280–298, 1979.
- [14] M. Goldenbaum, H. Boche, and S. Stanczak, "Nomographic functions: Efficient computation in clustered gaussian sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 4, pp. 2093–2105, 2015.
- [15] O. Abari, H. Rahul, and D. Katabi, "Over-the-air function computation in sensor networks," *CoRR*, vol. abs/1612.02307, 2016.
- [16] F. Molinari, S. Stanczak, and J. Raisch, "Exploiting the superposition property of wireless communication for average consensus problems in multi-agent systems," in *Proc. European Control Conference (ECC)*, pp. 1766–1772, 2018.
- [17] H. B. McMahan, E. Moore, D. Ramage, and S. Hampson, "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data," in *Proc. Machine Learning Research*, vol. 54, pp. 1273–1282, 2017.
- [18] M. M. Amiri and D. Gunduz, "Federated learning over wireless fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 3546–3557, 2020.
- [19] Suhua Tang, Chao Zhang, and Sadao Obana, "Multi-slot over-the-air computation in fading channels," *arXiv:2010.13559*, <https://arxiv.org/abs/2010.13559>, 2020.
- [20] Suhua Tang, Huarui Yin, and Sadao Obana, "Reliable over-the-air computation by amplify-and-forward based relay," *arXiv:2010.12146*, <http://arxiv.org/abs/2010.12146>, 2020.