

中継制御を用いた高信頼空中計算

周 靖陽 湯 素華

電気通信大学

1.はじめに

一般的に無線センサネットワークでは、シンクノード（以降シンク）はノードごとにデータを収集してから後処理をするため、ノード数が増えるとともに、データ処理時間の多さと送信衝突の頻発が問題となる。必要なデータが統計結果のみであれば、空中計算(AirComp) [1]を用いることでデータ収集と計算を効率的に実現できるが、距離の遠いノードが存在する場合には、計算誤差や送信電力が大きくなるという問題が発生する。

本稿では、中継制御によって空中計算の信頼性を向上するために、計算誤差と送信電力の両方を低減する中継選択手法を検討し、その効果を評価する。

2.先行研究と課題

2.1 空中計算[1]について

K 個のノードと1個のシンクからなるネットワークにおいて、ノード k はシンクからの制御信号を使用して時刻同期し、他ノードと同時にデータをアナログ信号($x_k \in [-v, v], E\{|x_k|^2\} = 1$)で送信する。各信号はシンクで足し合わせる。各ノード間でチャンネルゲイン(h_k)の違いをなくすために、送信電力(b_k)を調整し、すべての信号の振幅($h_k b_k$)を揃える。受信信号(r)と目標結果 $\sum_{k=1}^K x_k$ の平均二乗誤差(MSE = $E\{|r - \sum_{k=1}^K x_k|^2\}$)は下記のように表される。

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

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

ただし、 n は平均値が0、分散値が σ^2 の熱雑音であり、 a は受信パラメータである。MSEの最小化によって a と b_k が決められる。

2.2 中継を用いた空中計算

空中計算では、シンクから遠く離れる端末が最大電力で送信しても、その信号がシンクに到着する際のチャンネルゲイン(h_k)が低すぎるため、式(2)の $a h_k b_k$ が1に達せず、計算誤差が起きる。このため、 h_k の低いノードに対して中継制御を行うことで、計算結果のMSEを削減する[2]。通信は二つのスロットに分かれ、まず遠いノードから中継ノードへ、次に全てのノードと中継ノードからシンクへの通信が行われる。MSEは下記のように表される。

$$\text{MSE} = \text{MSE}_{rd} + \text{MSE}_d, \quad (3)$$

$$\text{MSE}_{rd} = \sum_{k \in N_r} |a_{d,2} h_{k,d} b_{k,2} + a_{r,1} h_{k,r} b_{k,1} - 1|^2 + |a_{r,1}|^2 \sigma^2,$$

$$\text{MSE}_d = \sum_{k \in N_d} |a_{d,2} h_{k,d} b_{k,2} - 1|^2 + |a_{d,2}|^2 \sigma^2.$$

ただし、 N_r は中継ノード r を利用するノードの集合であり、 N_d は直接シンクへ送信するノードの集合である。また、 $a_{r,1}$ と $a_{d,2}$ は中継ノードとシンクでの受信パラメータ、 $b_{k,1}$ と $b_{k,2}$ は送信電力パラメータであり、MSEの最小化によって決められる。

2.4 課題

前記の中継制御では、専用の中継ノードを使用するため、設置コストが高い。また、中継ノードの送信電力に制限がないものとしていたが、多数のノードの信号を同時に中継するには最大値以上の電力が必要となる場合もある。

本研究では、センサノードを中継ノードとし、中継ノードの選択によって計算結果のMSEを削減するとともに、ノード・中継ノードの送信電力を抑えて、ネットワーク寿命の延長を図る。

3.提案方式

3.1 基本方式

基本方式(図1)では、ノードの送信電力・電力残量を考慮して、中継ノードを動的に選択する。

3.1.1 システムモデル

シンクを含めて、各ノードは通信に一つのアンテナを利用する。また、シンクがノードとのチャンネルゲイン、ノード間のチャンネルゲインを取得できるとし、シンクで中継ノード選択を定期的に行う[3]。

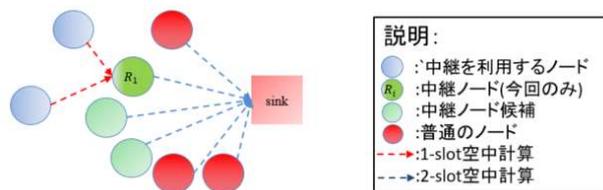


図1 基本方式の概要

先行研究[2]の中継通信方式を利用する。スロット1において、中継を利用する各ノード($k \in N_r$)は、シンクからの同期信号に従って同時に送信し、中継ノードがそれを受信する。スロット2において、全てのノード($k \in N_r \cup N_d$)は中継ノードと共にシンクからの同期信号に従って同時に送信する。

3.1.2 中継選択方式

1) 中継候補の選出。シンクとのチャンネルゲイン($h_{r,d}$)、ほかのノードとのチャンネルゲイン($h_{k,r}$)が高いノード r に対して、自端末信号の送信と他ノード信号の中継をする際、必要な送信電力を下記の式で算出する。

$$P_{r,TX} = \left| \frac{1}{a_{d,2} h_{r,d}} \right|^2 \cdot \left(1 + \sum_{k \in N_r} |a_{r,1} b_{k,r} h_{k,r}|^2 \right). \quad (4)$$

もし $P_{r,TX} \leq P_{max}$ ならば、このノードを中継候補とする。

2) 中継候補毎の信頼性と電池残量の合計評価指標の算出。信頼性は $w_R = -MSE$ で表し、電池残量指標は、

$$w_E = \frac{E_{now}}{E_{max}} \quad (6)$$

で計算する。ただし、 E_{now} は電池残量であり、 E_{max} はその最大値である。合計評価指標は

$$\theta = \alpha \cdot w_R + (1 - \alpha) \cdot w_E \quad (7)$$

から算出される。 α は重みである。

3) 中継ノードの選択。中継候補から、 θ が一番大きいものを中継ノードとして選択し、中継制御を用いた空中計算を行う。

また、中継負荷を分散させるために、上記の中継ノード選択は定期的に行う。

3.2 拡張方式

基本方式では、中継ノードから遠いだけでなく、シンクからも遠いノードが発生した場合、そのノードは信号送信に中継を利用しない可能性が高い。このため、ノードの消費電力が増加し、ネットワークの寿命が短縮されてしまう。

そこで、拡張方式では、評価指標の電池残量指標は中継ノードの電池残量だけでなく、すべてのノードの電池残量を計算し、予想されるネットワークの寿命を指標として、評価値を算出する。

4. シミュレーション評価と考察

4.1 パラメータ設定

MATLAB を使用して評価した。200m×200m の範囲に、シンクを中心に設置し、ノードはランダムに生成した。電波伝搬については、自由空間モデルと2波モデルを基に、各ノードがシンクからの距離に応じてパスロスを算出し、さらにランダムフェージングを生成した。その他のシミュレーション条件を表1に示す。

以上の条件に基づき、基本方式と拡張方式について、1000回のシミュレーションを行った。

表1 シミュレーション条件

	AirComp	基本・提案方式
ノード数	20	
受信消費電力	6~12 mW	
送信最大電力	10 dBm	
アイドル電力	0.16 mW	
周波数	2.4 GHz	
電池容量	10,000J	
通信時間	5 s / min	
アイドル時間	55 s / min	
中継更新間隔	24 hours	

4.2 結果と考察

4.2.1 重み α の影響

重み α の値を 0 から 1 まで調整した際の、MSE とネットワーク寿命の変化を図2に示す。拡張方式は基本方式と比較して、ネットワーク寿命の延長と MSE の低減の両方で効果があることが分かる。

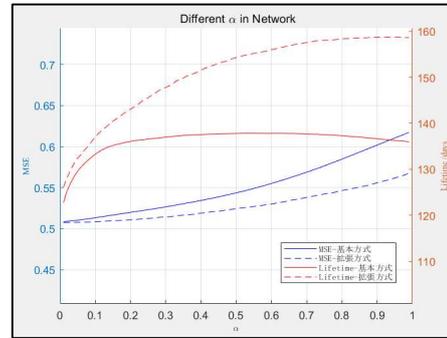


図2 重み α による MSE とネットワーク寿命の変化

4.2.1 MSE と寿命の評価

図3に示すように、基本方式は、空中計算基本モデルより、ネットワークの寿命を 22.3%延長し、MSE を 46%と大幅に低減したことが分かる。また、拡張方式は、基本方式とほぼ同じ MSE を保ちながら、ネットワークの寿命をさらに延長できることを確認できる。

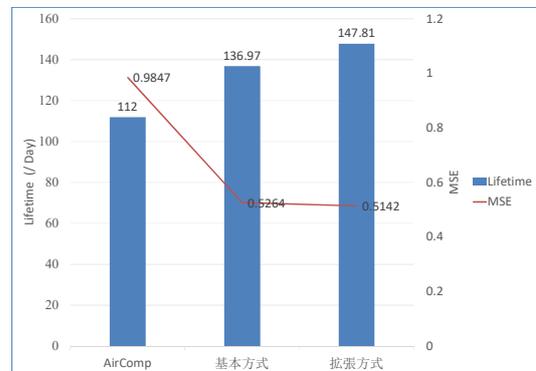


図3 MSE とネットワーク寿命の比較

5. おわり

本稿では、空中計算に対して、計算誤差の削減と省電力化を両立させるために、中継制御を導入し、高信頼・長寿命な中継選択方式を提案し、基本方式と拡張方式の効果を評価した。今後は、方式のさらなる改良やより多くのシナリオで評価を行う。

参考文献

- [1] W. Liu, et al., "Over-the-air computation systems: Optimization, analysis and scaling laws," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 8, pp. 5488-5502, Aug. 2020.
- [2] S. Tang, et al., "Reliable over-the-air computation by amplify-and-forward based relay," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53333-53342, 2021.
- [3] Masanari Iwata, et al., "Energy-efficient data collection method for sensor networks by integrating asymmetric communication and wake-up radio," *MDPI Sensors*, vol. 18, no. 4, 1121, 2018.