

# 無線センサネットワークにおける空中計算のための ウェイクアップ制御と中継制御に関する検討

周 靖陽 湯 素華 小花 貞夫

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(over-the-air computation) [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[1]。

本稿では、中継制御とウェイクアップ制御によって空中計算の問題を改善する手法を検討し、シミュレーションで消費電力と計算誤差が低減できるか検証を行う。

## 2.先行研究と課題

### 2.1 空中計算について

空中計算(AirComp)[1]では、ノード $k$ はシンクからの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( $x_k^2 = 1$ )で送信してシンクのアンテナで足し合わせる。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( $r$ )とその平均二乗誤差(MSE)は下記で表される[1]。

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

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

ただし、 $n$ は平均値が0、分散値が $\sigma^2$ 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( $h_k$ )が低すぎるので、式(2)の $ah_i b_i$ 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]。

### 2.3 Wake-up Radio について

各ノードは、低消費電力のWake-up radio (WuR)を制御装置として備え、通信しない時にはWuR以外の部分をスリープ状態にする。データを収集する時、シンクはノードをスリープ状態から起動させて通信を行うことで、ノードの消費電力を低く抑える[3]。

## 2.4 課題

前記の中継制御では、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膨大な電力が必要となる。

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、中継ノードの消費電力を抑えて、ネットワーク寿命の延長を図る。

## 3.検討方式

各ノードに低消費電力のWuRを搭載する。基本方式では、空中計算におけるチャンネルゲインの低下を改善するために、センサノードによる中継制御を利用し、ノードの送信電力制限・電力残量などを考慮して、中継ノードを動的に選択する。各ノードはウェイクアップ制御により、通信時のみ起動する。

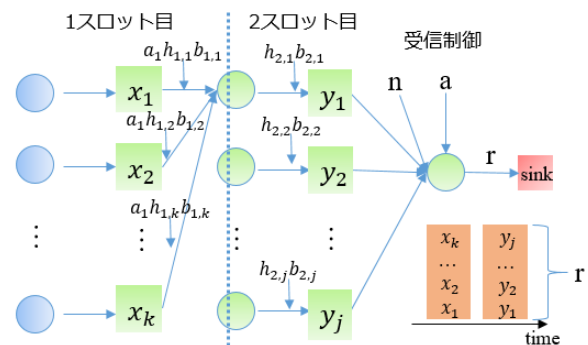


図1 検討方式の概要

また、シンクがすべての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ことを前提とし、それを基に、中継ノードを一つのみ、定期的を選択する。

### 3.1 中継ノードの選択・更新

1) 中継が必要なノードの算出。すべてのノードに対して、前記のAirComp[1]方式を適用し、各ノードの送信電力を算出する。送信電力が最大電力となるノードを中継が必要なノードとする。

2) 中継候補の選出。中継に必要なノードとのチャンネルゲインが高いノードに対して、中継信号を含めた必要な送信電力を算出し、それが最大電力以下なら、中継候補とする。

3) 中継ノードの選択。複数の中継候補から、電力残量の一番多いノードを中継ノードとして選択し、そのノードに通知する。

Wakeup and relay control for over-the-air computation in wireless sensor networks

Jingyang Zhou Suhua Tang Sadao Obana  
The University of Electro-Communications

### 3.2 通信手順

図1に示すように、通信は2スロットに分かれる。スロット1において、シンクは中継を利用するノードと中継ノードを起動させ、各ノードは、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、シンクはほかのノードを起動させて、各ノード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し、シンクが受信する。

### 3.3 基本方式の改良

式(2)に示すように、空中計算における計算誤差は信号部分と熱雑音部分からなる。遠いノードはチャネルゲインが小さいため、信号部分の計算誤差が発生する。中継を使用する際には、遠いノードによる信号部分の計算誤差が小さくなるが、計算誤差を最小化の際、 $a$ を小さくし、熱雑音の部分を減らすことになる。それにより、MSEを少し改善できるが、 $a$ の減少により送信電力( $b_k = 1/(ah_k)$ )が増加してしまう。

したがって、改良方式では、式(1)における受信パラメータ $a$ の調整による計算結果のMSEとネットワーク寿命の変化を調べ、MSEを抑えながら、ネットワーク寿命の延長を図る。

## 4. シミュレーション評価と考察

シミュレーションで、計算結果のMSEとネットワーク寿命を評価指標とし、中継を使用しないAirComp[1]方式、検討方式(基本方式、改良方式)を比較する。

### 4.1 シミュレーションの条件

MATLABを使用して、300m四方で、縦横ともにノード間隔50mのネットワークを構成し、シミュレーションを行った。WuRの消費電力が0.0003mWであり、ノードアイドル時の消費電力は0.05mWである。その他のシミュレーション条件を表1に示す。

表1 シミュレーション条件

|        | AirComp   | 基本・改良方式         |
|--------|-----------|-----------------|
| ノード数   |           | 10              |
| スリープ電力 | 0.0204mW  | 0.0204+0.0003mW |
| 受信消費電力 |           | 6~12mW          |
| 電池容量   |           | 10,000J         |
| 通信時間   |           | 10 s            |
| スリープ時間 | 500s      | 590 s           |
| 間欠動作   | 10s 毎 60s |                 |
| 通信間隔   |           | 10min           |
| 中継更新間隔 |           | 1day            |

### 4.2 結果と考察

図2は、各方式の計算結果のMSEを示す。AirCompのMSEは0.071であるのに対して、基本方式はそれを0.0546まで低減し、22.5%削減できた。

図3は、改良方式において受信パラメータ $a$ を調

整したときのMSEと寿命の変化を示す。図から、 $a = 0.18$ の時、MSEは最小であるが、寿命も一番短いことがわかる。 $a$ が大きくなると共に、ネットワーク寿命が延びるが、MSEも増加する。 $a$ が0.2183を超えると、ネットワーク寿命は最大値のままで、変化しない。これは、中継を利用したノードの電力残量が先に0に達して、それによってネットワーク寿命が決まるためである。 $a = 0.218$ の時、改良方式のMSEは0.066であり、図2におけるAirCompの0.071より低減しつつ、ネットワークの寿命を31%延長していることを確認できる。

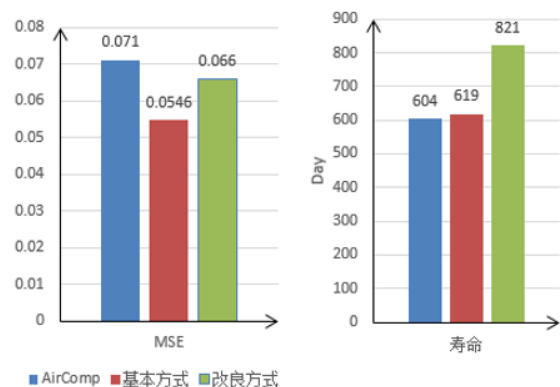


図2 計算結果のMSEと寿命の結果

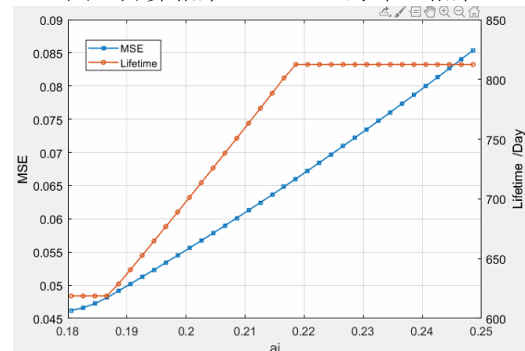


図3 計算結果のMSEとネットワーク寿命

## 5. おわりに

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行うために、ウェイクアップ制御と中継制御を導入し、中継ノードの選択について検討した。また、シミュレーション評価により計算誤差とネットワーク寿命の間にトレードオフが必要であることと、受信パラメータの調整によってその両立を実現できることを示した。今後は、さらに複数の中継ノードの利用を検討・評価する。

## 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] 湯素華, 他, 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, 2020-MBL-97(23), 1-6, 2020.
- [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.