

複数帯域を動的に切り替える無線センサネットワーク方式の提案

平沼 成彬[†] 久保田 稔[‡]

千葉工業大学大学院工学研究科^{†‡}

1. はじめに

日本で現在一般的に使用されている無線センサネットワーク(WSN)は 2.4GHz 帯の周波数を用いるものである。2.4GHz 帯は ISM バンドとして無免許で使用できるため、IEEE802.11(Wi-Fi)や Bluetooth, コードレスホン等の無線システムによる干渉や、電子レンジの放射ノイズなどの影響により通信品質が低下する恐れがある。

2012 年に国内で使用できるようになった 920MHz 帯は 2.4GHz 帯と比較して、通信距離が長くなるメリットがあるが、使用できる帯域が狭いため通信速度は劣り、消費電力が大きくなる。つまり、周囲の環境によって、適切な周波数は異なると考えられる。

本稿では、センサノードにおいて 2.4GHz 帯、920MHz 帯、429MHz 帯の周波数を通信環境の状況に応じて切り替える方式を提案する。これにより、単一の周波数を用いる場合より通信品質の向上や消費電力の削減が期待できる。

2. 関連研究

無線を含む複数のネットワークインターフェースを組み合わせる WSN の性能を向上させる研究[1]では、IEEE802.15.4 と PLC (電力線通信)を組み合わせることで、通信品質を向上させる手法を提案している。

複数の無線周波数帯のみを用いる研究として文献[2]では、IEEE802.15.4 と IEEE802.11b を用いる手法があり、予想される消費電力によって使用するインターフェースを切り替える。文献[3]では、433MHz 帯と 2.4GHz 帯の周波数を用途によって使い分ける手法が提案されている。

複数の無線周波数を切り替える研究[4]では、使用する周波数の選択に機械学習を用いており、必要な CPU の処理能力やメモリ量が大きくなる。低コストが要求され、リソースの限られたセンサノードに使用するの難しいと考えられる。

3. 周波数による伝搬特性の違いと設計方針

提案方式では、すべてのセンサノードは、複数の周波数帯で通信できるものとする。実装にはソフトウェア無線の適用も考えられるが、消費電力の問題から、今回は各ノードが複数の無線モデムを持つものとする。

提案に先立ち、重要な評価項目である消費電力に関する予備実験を行った。実際の無線モデムの消費電力を測定し、送受信 1bit あたりと、1m あたりの消費エネルギーを算出した(表1)。

表1 消費電力と通信距離

モデム種別	周波数 (MHz)	最大通信距離(m)	消費電力	
			(10 ⁻⁶ J/bit)	(10 ⁻⁹ J/bit·m)
A	429	1200	36.4	30.4
B	920	290	4.65	16.0
C	2450	390	2.07	5.31
D	2450	32	0.62	19.4

通信速度が速いほど通信時間が短くなるため、1bit あたりの消費電力で比較すると 2.4GHz 帯が最も消費電力が少ない。また、1m あたりの消費電力は、2.4GHz 帯を基準とすると、920MHz 帯は約 3.6 倍、429MHz 帯は約 5.7 倍になる。

次に 2.4GHz 帯の他の無線システムとの干渉を調査した。IEEE802.11n で通信が行われている環境では、通信の成功率が約 30%まで落ち込んだ。再送による電力消費を考えると、概算では、通信成功率が 40%を下回ると、2.4GHz 帯より 920MHz 帯のほうが消費電力が少なくなる。なお、電子レンジの使用中でも 95%の通信成功率が得られたが、これは発振周波数が不安定なためと推測している。

以上の結果より、提案方式では、消費電力を重視して 2.4GHz 帯での通信を優先して行い、他の周波数帯はバックアップ用とする。本方式のメリットには、通信品質の向上に加え、通信距離が長くなることによる中継ノード数の削減がある。

4. ルーティング方式

提案方式で想定しているセンサノードはバッテリー動作で、観測した値を定期的に基地局へ送

Dynamic Reconfiguration of Communication Scheme in Wireless Sensor Networks

[†]Naruaki HIRANUMA, [‡]Minoru KUBOTA

^{†‡}Graduate School of Engineering, Chiba Institute of Technology

信する。CPU の処理能力やメモリ量に大きな制約があり、計算量の多いアルゴリズムは使用できない。

今回はデータ収集アプリケーションを想定して、ノードが基地局のみと通信するツリー型トポロジによるルーティングアルゴリズムを用いる。Many-to-one ルーティングプロトコル[5]を複数のインターフェース（周波数）に対応し、通信環境の状況に応じて経路を動的に変更するよう改変した。

提案方式では、用途によって周波数の使い分けをせず、どの周波数でも同様に通信を行えるものとするが、送信には同時に一つの周波数のみを使用する。また、片方向リンクは存在しないものとする。

周波数帯毎にリンク間の通信コスト（CC）を事前に設定しておく。例えば、測定した消費電力を元に、2.4GHz 帯は 10、920MHz 帯は 36、429MHz 帯は 57 とする。

ノードから基地局への経路は以下の手順で構成される（図 1）。

- (1) 基地局から定期的にすべての周波数でルート要求パケット（RQP）を送信する。RQP には、送信元ノード（SN）のアドレスと SN から基地局への通信コスト（CCB）が含まれる。
- (2) RQP を受信したノード（DN）は、周波数ごとに以下の式で DN の CCB を計算する。SN の $CCB + CC_{sd} \times CQ_d$ 。 CC_{sd} は SN と DN 間の通信コストを示す。 CQ_d は DN の通信状態を表し、受信信号強度に反比例する。最良の場合は 1 で、受信状態が悪化すると増加する。
- (3) SN のアドレスと(2)で求めた DN の CCB を DN のルーティングテーブル（RtTbl）に記録し、RQP をブロードキャストする。この際 RQP に含まれる CCB は、周波数ごとに求めた DN の CCB の中で最小のものとする。

基地局からノードへの経路は以下の手順で構成される。

- (1) 基地局へのルートが判明したノードは、ルートレコードパケット（RRP）を次ホップに送信する。
- (2) RRP を受信したノードは、パケットに自身のアドレスを追加して、次ノードへ転送する。
- (3) RRP を受信した基地局は、パケットに含まれる送信元ノードと中継ノードを RtTbl に記録する。

パケットを送信・転送する際、RtTbl を参照し、

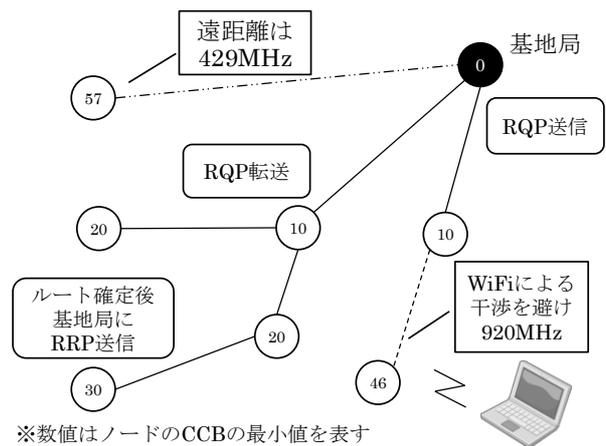


図 1 提案方式におけるルーティング

CCB が最も小さな周波数帯を選択する。送信エラー時には、次に CCB が小さい周波数帯に切り替える。

5. 評価

提案手法を QualNet でシミュレーションを行い、評価する。ライブラリの制限で ZigBee のインターフェースはノードごとに 1 つしか使用できないため、MAC 層以下には IEEE802.11 の IBSS モードを使用し、周波数・出力を変更した複数のインターフェースを用意する。消費電力はインターフェースごとに設定した値から求める。提案したルーティングアルゴリズムはアプリケーション層で実装し、通信品質、消費電力（バッテリー残量）、通信速度、通信距離、遅延時間を評価する。

6. まとめ

本稿では、複数の周波数を使用する WSN の制御とルーティングの手法について提案を行った。今後は、シミュレータによる提案手法の有効性の確認と、コスト等のパラメータの最適な設定手法を検討する。

参考文献

- [1] 遊佐: PLC/RF 相互補完通信における環境変化に追従可能な DODAG ルーティングメトリクスの研究, 情報処理学会論文誌(CDS) vol.1, no.3, pp.77-86, 2013.
- [2] Lymberopoulos D: Towards Energy Efficient Design of Multi-radio Platforms for Wireless Sensor Networks, IPSN '08, pp.257-268, 2008.
- [3] J Ansari: Multi-radio medium access control protocol for wireless sensor networks, International Journal of Sensor Networks, vol.8, no.1, pp.47-61, 2010.
- [4] Gummesson J: An adaptive link layer for heterogeneous multi-radio mobile sensor networks, IEEE Journal on Selected Areas in Commun., vol.28, no.7, pp.1094-1104, 2010.
- [5] ZigBee Alliance: ZigBee Specification, 2008.