

高信頼性・低消費電力ユビキタス協力センサネットワークの研究 (082103003)

Energy-Efficient Ubiquitous Collaborative Sensor Networks with High Reliability

研究代表者

落合 秀樹 横浜国立大学大学院工学研究科

Hideki Ochiai Department of Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University

研究分担者

石井 光治[†] 石橋 功至^{††}

Koji Ishii[†] Koji Ishibashi^{††}

[†]香川大学工学部信頼性情報システム工学科 ^{††}静岡大学工学部電気電子工学科

[†]Reliability-based Information Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kagawa University

^{††}Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Shizuoka University

研究期間 平成 20 年度～平成 22 年度

概要

本研究では、複数のセンサノードが相互に協力することにより通信の信頼性を高める、いわゆる協力通信技術を軸に据えた低消費電力センサネットワークを実現するため、物理層と MAC 層の連携により通信システムとして最適化を試みるクロスレイヤ技術の設計を行った。具体的には、1) センサノードへの実装を見据えた協力通信技術の設計および実験的検討、2) センサネットワークに適したデューティサイクルと変調方式の最適化、を主要な研究テーマとした。

Abstract

This research project focused on a new cross-layer design considering both physical and medium access control (MAC) layers to realize a highly reliable and energy efficient sensor network based on cooperative communications techniques, which dramatically enhance the communication reliability via multiple-sensor cooperation. Major contributions of this project are two-folds: 1) we proposed practical designs of cooperative communications and evaluated them via experiments and 2) we investigated modulation optimization and duty-cycle for sensor networks.

1. まえがき

本年 3 月に発生した東日本大震災により、自然災害の事前予測の重要性が再認識されているが、地震などの自然災害の事前予測には、数十年単位で広範囲にわたる定点観測によって統計的なデータを得る必要があるとされる。このような要求に応えるためには、膨大な観測データを効率よく長期間にわたり取得できる、低消費電力かつ信頼性の高いユビキタスセンサネットワークの実現が不可欠である。このようなセンサネットワークでは、均一にばらまいた大量の安価なセンサノードが設置や接続の容易な無線により自律的にネットワークを形成する機能が要求される。また設置された大量のセンサを回収し、保守することは困難であることから、保守・管理が不要（メンテナンスフリー）であることも重要である。センサネットワークがこれらの要求を満たすためには、少なくともバッテリーの交換なしに数十年のオーダーまでセンサノードの駆動が可能となるよう、ノード間の通信に要求される消費電力を限界まで抑えること（低消費電力）、および長期間安定してネットワークを維持するために、故障や電池切れ等によってノードが突如機能を停止した際にも自律的にネットワークを修復する機能を有すること（高信頼性）が重要である。

本研究の目標は、これらの要求を満たすユビキタス協力センサネットワークの実現に寄与することである。複数のセンサノードが協力して通信を行う協力通信技術は、高信頼・低消費電力ユビキタスセンサネットワークを実現するための鍵であり、近年国際的にも研究開発が活発な分野である。本研究では、この協力通信技術を軸に据えたネットワークを実現するため、パワーアンプに代表されるアナログ回路レベルからフレーム誤り率により評価されるシス

テムレベルに至るまでの広範囲の領域を研究課題の対象とし、送受信端末において高度な信号処理技術を適用するとともに、物理層と MAC (Medium Access Control) 層を連携させることにより通信システムとしての総合的な最適化を試みる、いわゆるクロスレイヤ技術設計を行った。

2. 研究内容及び成果

最初に既存のセンサネットワークの問題点を明確化すべく IEEE802.15.4 準拠のセンサノードである ZigBee 端末を用いた伝送実験を行った。その結果、従来のセンサネットワークにおける協力通信（マルチホップ通信）では、センサの送受信回路の通電時間を短くすることができないため、信頼性の代償として端末（バッテリー）の寿命を大きく低下させることが明らかとなった。本実験より、端末のデューティサイクルをできる限り短くすることが、センサノードのバッテリー寿命を伸ばすためには最も効果的であることがわかった。デューティサイクルを抑えるためには一般に変調方式の多値化により伝送レートの改善をはかることが有効である。しかし変調方式を多値化した場合、1) 物理層における信頼性が低下する、2) 信号のピーク電力（ダイナミックレンジ）が増大する、といった問題が発生する。前者に対しては送信電力の増加による雑音耐性の改善が必要となり、パワーアンプにおける電力消費の増大を招く。また一般に線形パワーアンプは、送信センサノードのアナログ回路において最も電力を消費するデバイスであるが、その電力効率は送信信号のダイナミックレンジに反比例する。このため後者のように送信信号のダイナミックレンジが増加すると、デューティサイクルが下がる一方で、送信中のパワーアンプにおける電力効率が著しく低下してしまう。よって高信頼性と長寿命を同時に達成す

るにはこれらの問題を同時に解決できる新たな手法が必要である。本研究ではこれらの要求を満たす様々な方式を提案した。これらの成果の多くは国際的評価の高い IEEE 論文誌を中心に、フルペーパーとして採択されている。さらに提案方式の一部をソフトウェア無線機に実装し、実環境における実験により提案方式の有効性の確認も行ったが、紙面の都合上、一部の結果の要点のみを示すとどめる。

1) 信頼性の向上に従来の協力通信方式を用いた場合、帯域利用効率が協力端末数に反比例するため、結果としてデューティサイクルの低減が困難となる。われわれは物理層および MAC 層の両者を考慮した動的符号化協力通信方式を提案した。一般に協力端末は宛先端末よりも送信端末の近傍に存在する。このため送信端末の送信符号語の一部を受信することで情報を復号でき、さらに送信端末が符号語の残留部分を送信する間に協力端末が適切な符号語を生成し送信することにより、帯域利用効率を損なうことなく、ダイバーシティ利得を得ることが可能となる。図 1 に符号化率 1/2 のターボ符号を用いた直接通信、従来型協力通信、提案動的符号化協力通信のフレーム誤り率特性をそれぞれ示す。(図中における変数 G は送信・協力端末間における距離利得である。) いずれの方式も帯域利用効率は等しい。図 1 の結果より、協力端末の幾何学的な位置関係に関わらず、提案方式が従来方式に比べて 5dB 以上の高い利得を得ていることが確認できる。

2) 消費電力のさらなる低減のためには協力通信技術に多値変調を組み合わせたことが必要である。従来提案されている多値変調のピーク電力低減手法では電力効率の向上と引き替えに周波数効率の低下を招くものが大半である。われわれは周波数効率を犠牲にすることなくピーク電力を効果的に抑圧し、送信側でのパワーアンプの増幅効率を向上する手法を提案した。この技術によって厳しく帯域制限された PSK や QAM 信号においても定包絡線に近いレベルまでピーク電力を抑圧することができる。図 2 (a) は通常の正方形型の 64QAM 変調信号に対してロールオフ率 $\alpha=0.1$ のルートナイキストフィルタを適用した場合の信号点の軌跡を表しており、同図 (b) は提案トレリスシェイピングによる信号点制御を行った信号軌跡の例を示している。また、図中の緑の点はシェイピングおよびフィルタを通す前の信号点である。図より、提案シェイピングによりピーク電力と平均電力の両者を低減させることが可能となっており、平均電力を低減させているにもかかわらずそれ以上にピーク電力を低減しているため、ピーク対平均電力比の低減も達成できていることを確認している。

3. むすび

本年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、多くの命が失われ、また東日本の通信網は麻痺したが、これはまた、非常事態時の日本の情報通信網が完全でないことをあらためて浮き彫りにした。もし日本各地に災害用のセンサが配置され、十分な災害予測体制やそれらに安定した通信網が確立できていれば、ここまでの被害には至らなかったのではないかと悔やまれる。今回得られた研究成果は、既存のセンサネットワークとは異なる新たな形態であり、高信頼性と低消費電力の観点から、そのような用途に対しても適用できる可能性は高く、実用化できればその波及効果は極めて大きいといえる。特に震災後の省エネルギーへの世論の一層の関心からも、低消費電力性は今後の通信技術に求められる最も重要な要因の一つである。しかしながら一方で、本提案技術は未だ基礎研究段階にあり、これらの要素を確実に実用化するためには、協力センサ間の周波数およびタイミング同期の問題など、克服すべき多くの課題を有することをわれわれは認識している。今回得られた

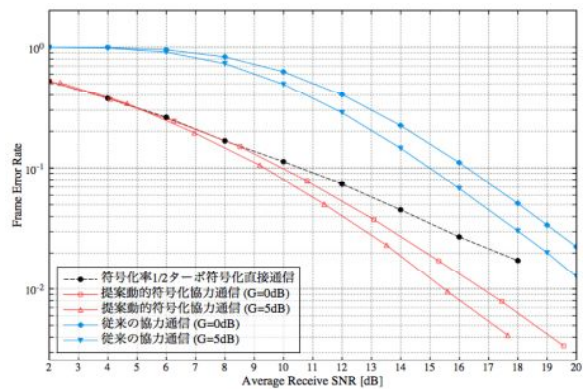
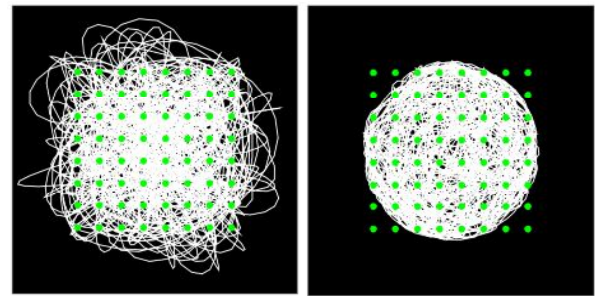


図 1：提案方式のフレーム誤り率特性



(a) シェイピングなし (b) シェイピングあり

図 2：64QAM ベースバンド信号の軌跡 ($\alpha=0.1$)

研究成果を実用化するためには、実装の際に生じる新たな研究課題への産学連携による取り組みや、ユーザ側を含んだ異分野の研究者との共同研究の促進が重要である。

【誌上发表リスト】

- [1] K. Ishibashi, K. Ishii, and H. Ochiai, "Bit-interleaved Coded DPSK with Cyclic Delay Diversity: Design and Analysis," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 8, no. 9, pp. 4762-4772, (2009 年 9 月)
- [2] M. Tanahashi and H. Ochiai, "Turbo Decoding of Concatenated Channel Coding and Trellis Shaping for Peak Power Controlled Single-Carrier Systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 51, no. 1, pp. 9-15, (2010 年 1 月)
- [3] K. Ishibashi, K. Ishii, and H. Ochiai, "Dynamic Coded Cooperation using Multiple Turbo Codes in Wireless Relay Networks," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol.5, no. 1, pp.197-207, (2011 年 2 月)

他論文誌論文計 9 件、国際会議論文 25 件

【受賞リスト】

- [1] 石井光治、無線通信システム研究活動奨励賞、“マルチレベル符号化協力ダイバーシティの実装とその評価”、2010 年 4 月 27 日
- [2] Felipe Costa、IEEE VTS Japan 2010 Student Paper Award, “Energy Optimization for Reliable Point-to-Point Communication in Energy-Constrained Networks,” 2010 年 5 月 18 日
- [3] 西村直記、情報理論とその応用学会 (SITA) 奨励賞、“ブロックレイリーフェーディング環境下における協力マルチホップ伝送に関する一検討”、2010 年 12 月 2 日
他計 8 件

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.ochiailab.dnj.ynu.ac.jp/SCOPE/>