

審査の結果の要旨

氏名 廖 椿 豪

本論文は「A Physical-layer Investigation on Concurrent Transmission for Wireless Networks (同時送信型無線ネットワークの物理層に関する研究)」と題し、マルチホップ無線ネットワークにおいて、複数ノードから同時に同一パケットを送信する同時送信技術の物理層特性について論じたものである。

第1章「序論」では、研究の背景と目的および本論文の構成について述べている。本論文の背景として、IoT時代において急増するバッテリー駆動デバイスを収容するためには、省電力かつ頑健なマルチホップ無線ネットワークが必要となることを示している。同時送信技術は、キャリアセンスが不要となるため干渉回避のための送信待機時間を必要とせず省電力化を実現できる、経路制御も不要となるためトポロジーの変化に対して頑健であるといった特徴を有する。MAC層やネットワーク層での同時送信技術の特性についての検討は多くなされてきたものの、物理層の特性に関しては体系的に明らかになっていない。そこで本論文の目的として、受信性能の観点から同時送信技術の物理層特性を体系化する必要があることを示している。

第2章「関連技術」では、同時送信技術に基づいたマルチホップネットワーク向けプロトコルを調査している。複数の基地局から同一信号を送信する協調通信技術との比較を通して、同時送信技術を用いたマルチホップ無線ネットワーク特有の問題点を述べている。また、同時送信技術の物理層特性に関する既存研究と比較することで、本論文の位置付けを明らかにしている。

第3章「同時送信におけるチャネル特性の分析」では、同時送信における受信性能劣化の諸要因を定量的に分析し、周波数オフセットとそれにより生じるうなり現象が最も重要なファクターであることを明らかにしている。周波数オフセットによる受信性能劣化を定量的に評価するため、うなりの踏切率(Level crossing rate)を定式化したうえで、平均フェージング期間(Averaged fading duration)の理論的な解析を行っている。本研究での理論計算によって、同時送信におけるうなり現象の平均フェージング期間が、周波数オフセットの標準偏差と同時送信を行う送信機の台数に依存していることを明らかにしている。周波数オフセットの標準偏差が大きいほど、もしくは送信機の台数が多いほど、

平均フェージング期間が短くなることを示している。また、パケット誤り率と平均フェージングには強い正の相関関係があることをシミュレーションにより確認している。

第4章「同時送信における受信機性能評価」では、代表的なIoT向け無線通信規格3つを選択し、シミュレーション、エミュレーションおよび実機実験により、同時送信における受信機性能を総合的に評価している。ZigBeeや6LoWPANなどで用いられているIEEE 802.15.4では、DSSSのエラー訂正効果によって、フェージング期間が十分短いというには対応可能であるが、時刻同期の誤差が0.25us以下でなければならないことを明らかにしている。一方、Wi-SUNで用いられているIEEE 802.15.4gでは、IEEE 802.15.4と比較して時刻同期への要求精度は緩いものの、エラー訂正機能を有さないため、うなりへの耐性が十分でなく、同時送信技術の適用が困難であることを示している。あわせて、LPWA(Low Power Wide Area)の代表的な通信規格であるLoRaでは、高次FSKを使用しているため、時間オフセットと周波数オフセットによるエネルギー分散効果が得られ、同時送信におけるパケット衝突に十分耐えられることを示している。

第5章「同時送信を用いた新たな応用」では、同時送信技術をビル間や工場屋内などで利用するにあたって必要となる無線ネットワーク技術を提案している。ビル間やキャンパス内などでの低コストかつ頑健な自営網の実現に向け、同時送信技術を用いたLoRaのマルチホップネットワーク構築を行い、再送時間差を人為的に設定することで受信性能の劣化を防ぐ手法を示している。シミュレーションと大規模実機実験の結果から有効性を確認している。また、工場向け高信頼無線通信システムの実現に向け、分散アンテナシステムを用いた協調送信のオーバーヘッドを低減すべく、アンテナ間の周波数オフセットを乱数化する同時送信型分散アンテナシステムをも示している。シミュレーションにより、アンテナ数を十分に多く設置した場合でも高信頼性を確保できることを示している。

第6章「結論」では、以上の結果を総括し、今後の課題と展望について議論することで、本論文をまとめている。

以上要するに、本論文は同時送信におけるパケット衝突を理論的に定式化したうえで、チャネル特性の分析と受信機性能評価とを行い、同時送信を用いた新たな応用の可能性を示すことで、同時送信技術についての物理層特性を体系化しているものであり、電子情報工学上貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。