

論文審査の要旨及び担当者

報告番号	甲 乙 第 号	氏 名	ラジョリア ニティッシュ
論文審査担当者	主 査	政策・メディア研究科委員	兼環境情報学部教授 三次 仁
	副 査	政策・メディア研究科委員	兼環境情報学部教授 村井 純
		政策・メディア研究科委員	兼環境情報学部教授 中村 修
		政策・メディア研究科委員	兼環境情報学部准教授 バンミーター ー ロドニー
学力確認担当者：			

論文審査の要旨)

ラジョリア ニティッシュ君の学位請求論文は「Multi-Carrier Backscatter Communication System for Concurrent Wireless and Batteryless Sensing」と題し、6章からなる。本研究は LSI チップのレベルまで小型化した無線センサに電波を当てることによって給電し、センサ情報を電波の反射を用いて完全同期で取得する新しい無線多元接続方式 (Multi-Subcarrier Multiple Access=MSMA) の提案と評価に関するものである。従来はセンサ側に配備していた機能をレシーバー側のデジタル信号処理で担うことにより、無線センサの大幅な小型化と無線給電を実現する。この技術は主として土木構造物や機械の非接触故障診断 (Structural Health Monitoring) に用いることを狙っている。本研究の構想は、構造物の維持管理、設計を根本的に変革するものであり、その基本技術を考案・確立したことには大きな技術的・社会的貢献がある。

本論文ではまず第1章において SHM の重要性和対策の緊急性を述べた後に、電池不要・無線センサの実現という研究目的と定量的要求条件を既存研究サーベイから導き出している。主要な要求条件は必要帯域 100Hz の無線センサ数 50 個以上を同期誤差 120 μ 秒以内で同時にデータ取得することである。複数の無線センサがデータを送信する際に、無線通信が混信しないように調停する仕組みは多元接続方式と呼ばれ、同期誤差を減ずるためには通常、周波数分割多元接続(FDMA)あるいは符号分割多元接続(CDMA)が用いられる。しかし、それら既存手法は、無線センサに配備する機能が多く、目的に合致しないことを述べている。

第2章では、研究目的と要求条件を満足する方法として UHF 帯 RFID で用いられるサブキャリア通信方式に注目し、従来は電波干渉のために試みられていなかった複数サブキャリアを同時利用するアイデアを説明している。さらにこのアイデアを実現するための2つの技術課題、高調波による干渉除去法と、周波数利用効率を高めるチャンネル割り当て法、を導き、それぞれの技術課題について、既存研究をサーベイしている。高調波による干渉の除去法については、従来の研究が主としてデジタルシンボルのクラスター分析や、時間プロファイルの観測による分離に基づくものであることから、教師データがない状況や伝搬環境が変化する状況には適用できないと述べている。広帯域のスイッチング増幅器においてデジタル信号処理を用いて高調波を打ち消す研究は行われているが、反射信号特有の問題については触れられていないことも明らかにしている。チャンネル割り当て法については、高調波を含むチャンネル割り当てという問題設定自体が従来研究の前提と異なることを述べている。

第3章では、高調波による干渉除去法を具体的に提案している。反射波を用いた通信を復調する際には、信号の解像度を高めるためにデジタルフィルタを用いてバイアス成分を取り除き、ゼロクロスする位相変調信号に変更することが通例である。しかしこのままでは、ゼロクロスという信号特性から、高調波レプリカを計算することができない。そこで Hilbert 変換を

用いて、ゼロクロス信号から一定振幅を有する解析信号をいったん算出し、解析信号に基づいて高調波レプリカを計算した後に、逆 Hilbert 変換を用い、ゼロクロス信号に射影する方法を提案している。緻密な理論計算により、高調波レプリカの位相遅延と群遅延を適切に扱う方法を導出したことに特徴があり、これによって信号波形レベルでの干渉除去を可能にしている。提案手法を数値シミュレーションおよび有線接続した実験によって検証し、干渉除去法の効果が受信信号の品質(CIR)に依存すること、CIR = 0 dB で 98%の原信号復元率、CIR = 7 dB では 99%の原信号復元率を達成できることを明らかにしている。さらに高調波の信号特性から、干渉が発生しうるチャンネルは限定的であることを示している。50 チャンネルの MSMA システムを構築した場合、最も被干渉を受けるチャンネルでも、干渉するチャンネル数は高々5チャンネルであり、離調周波数のため干渉チャンネル数が増えても信号品質が大幅に劣化することはなく、CIR = 0 dB は大幅に安全側の評価であることも説明している。

第4章では、周波数利用効率を高めるチャンネル割り当て法が提案され、評価されている。本論文中では、チャンネル帯域固定の場合とチャンネル帯域可変の2つの利用環境での検討を順次説明しているが、チャンネル帯域可変で提案している方法がどちらの利用環境でも有効である。MSMA においては与干渉となるチャンネルは限定的な上、高調波次数により与干渉は減ずる。この特徴から、距離が遠い無線センサあるいは、使用帯域が広い無線センサを給電周波数の近くに配置することが周波数利用効率上、有効である。問題は、距離が近く狭帯域の無線センサと、距離が遠く広帯域の無線センサをどういう基準で優先するか、ということにある。すべての順列を計算すると最適チャンネル配置を求められるが、それではチャンネル数が増えると計算時間がかかりすぎる。そこで距離、帯域に関わらず、無線センサが使用周波数帯域の中に与えるエネルギー総和(total contamination power)を計算し、その小さい順に優先してチャンネルを割り当てる方法を提案している。この提案は、モンテカルロシミュレーションによって、複数の割り当てアルゴリズムと比較され、その有効性が示されている。また小規模な問題では総当たり方式によって最適解が求められるので、比較を行い、提案手法は細かい部分で最適解に必ずしも厳密に一致しないものの、周波数利用効率の面では遜色なく、計算時間は最適解が $O(n!)$ である一方、提案手法は $O(n^2)$ と大幅に短縮できることを示している。

チャンネル配置方法の検討にあたり、物理的に無線タグを配置して実験することは甚大な手間がかかり、また電波伝搬などの確率事象のため、再現性も保証できない。そこで、MATLAB で無線センサ群の信号を配置位置、帯域幅などを指定して作成し、それを IQ データとして信号発生器に与えることで、実際の受信機と組み合わせてチャンネル配置方法を評価する MSMA エミュレータも開発している。このエミュレータを使った評価によって、提案する total contamination power を用いた手法が他の手法に比較して、よりよい BER 特性を実現できることも示されている。

第5章では、試作した無線センサを用いた MSMA および市販の有線センサを用いた振動試験機を用いた振動試験を比較し、MSMA による手法の実現性、特に干渉除去の無線環境での効果、について評価している。3つの無線センサを相互干渉するチャンネルに配置して、干渉除去法の効果を有線および無線環境で実測している。現実の屋内伝搬環境では、有線接続しているレベルでの干渉除去効果は得られないが、それでも第2高調波までを除去することによって、原信号が振幅、位相情報を保ったまま、高い精度で再現できることを実証している。

第6章では、SHM を主たる目的として、2つの新しい技術開発要素、高調波の干渉除去法、周波数利用効率を高めるチャンネル割り当て法を具備した MSMA の適用が有効であること、そして第1章で述べた定量的要求条件を、開発した技術が満足していることを述べ、本論文の結論としている。

無線センサからの複数の反射波を空間で合成させ、その相互干渉をレシーバー側のデジタル信号処理で分離する方法は、従来のデジタルシンボルに基づく手法に比し、変復調方式に依存しない特徴があり、SHMに限らず様々な領域に適用が可能である。反射波を利用していることで、同期誤差を実質ゼロにできることは、センサー信号間での時間同期が必要とされるアプリケーションにおいて画期的である。またその干渉除去法を機能させるためのチャネル割り当て方法についても、周波数利用効率が高くさらに、計算時間が大幅に短縮できる実践的な割り当て方法を交換したことはシステム実現に大きく寄与する。またすべての項目に関し、実験評価を行い、有効性を示していることは、論文だけでは表現しづらい、ラジョリア君の計画性、論理性、問題解決能力の証左といえる。

上記の成果と、それらを記述した本論文は、ラジョリア ニティッシュ君が先端的な研究を行うために必要な高度な研究能力、並びにその基礎となる学識、研究成果を社会貢献へ結びつける能力を有することを示したものと見える。よって、本委員会は、本論文の著者は、博士（政策・メディア）の学位を受ける資格のあるものと認める。