

氏名	MOUSUMI HAQUE
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1138 号
学位授与年月日	令和元年 9 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Spectrum Sensing of OFDM Signals in Highly Noisy Environments for Cognitive Radios (コグニティブ無線のための高雑音環境下での OFDM 信号のスペクトルセンシング)
論文審査委員	委員長 教授 島村 徹也 委員 教授 長谷川孝明 委員 准教授 吉川 宣一 委員 准教授 大久保 潤

論文の内容の要旨

The limited radio frequency spectrum is a very valuable resource in wireless communication systems. The excessive use of this spectrum has created a serious problem named spectrum scarcity. During the last several decades, it has been a focal point for research to solve the spectrum scarcity problem. The cognitive radio (CR) is a noble solution to reduce the scarcity of the frequency spectrum for current and next generation wireless communication systems. Spectrum sensing is one of the most important issues in CR systems. However, spectrum sensing is a difficult problem in CR systems especially in highly noisy environments. In modern wireless communication systems, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is widely used for many applications such as Wi-Fi, WiMAX, long term evolution (LTE), digital video broadcasting (DVB), and so on. For this reason, spectrum sensing approaches for OFDM systems are very important for CR systems. In this dissertation, we reviewed some of the problems of spectrum sensing for OFDM based primary user and provided methods for the solutions to those problems associated with the CR systems. Spectrum sensing is an important issue in almost all areas of CR research but spectrum sensing for OFDM signals is a difficult problem especially in noisy environments. The proposed techniques have improved detection performance significantly even in highly noisy conditions.

In the first proposed method, taking into consideration the poor spectrum sensing performance in noisy environments, we have proposed a low-complexity and effective semiblind spectrum-sensing method. In this proposed method, a comb filter and autocorrelator are combined and utilized for sensing the OFDM-transmitted signal. The comb filter is used prior to the autocorrelation calculation to reduce the effect of the significant amount of random data for the multipath fading channel. For an OFDM-transmitted signal, we have considered a first Fourier transform (FFT) with a large size, which is essential for some OFDM based applications. The proposed method is applicable for OFDM signal detection for low signal-to-noise ratio (SNR) cases over additive white Gaussian Noise (AWGN) and multipath Rayleigh fading

channels under different digital modulation schemes. The detection performance is evaluated for different cyclic prefix (CP) lengths of OFDM signals using the proposed sensing method. The OFDM detection capability for different CP lengths of our proposed method increases significantly for low SNR cases. The proposed method is compared with semiblind energy detection, blind entropy detection, and blind unsigned autocorrelation based sensing method for detecting OFDM-transmitted signals over AWGN channel. The proposed approach provides a 22 dB SNR gain compared with the energy detection, an 18 dB SNR gain compared with the entropy detection, and an 8 dB SNR gain compared with the unsigned autocorrelation based blind scheme. In addition, the proposed method improves the SNR of the OFDM signal by 4 dB compared with that for the conventional CP autocorrelation based spectrum-sensing method over multipath Rayleigh fading channel. As a result, the proposed method shows a marked performance improvement relative to these methods.

The second method proposes a new approach of spectrum sensing for OFDM systems for further detection performance improvement in CR systems. This method enhances the detection capability of autocorrelation based spectrum sensing for very low SNR cases. The combination of a comb filter with autocorrelation function is exploited in a parallel form to obtain more accurate detection of the CP OFDM primary user. The proposed method is applicable for various CP lengths of OFDM signals under higher order digital modulations over the multipath fading channel, which is essential for modern broadband wireless communication systems. The proposed spectrum sensing method improves the SNR of the received signals and also improves the sensing performance. This method is compared with the CP autocorrelation based spectrum-sensing method over multipath Rayleigh fading channel. The proposed sensing scheme offers a 6 dB SNR improvement than the CP known autocorrelation based and a 10 dB SNR gain than the CP unknown autocorrelation based spectrum-sensing method in highly noisy environments.

The third method proposes a spectrum-sensing method to obtain the excellent detection performance for OFDM transmitted signal over multipath fading channel. The proposed method utilizes higher order statistics for spectrum sensing. Many OFDM signals cannot be detected by second order statistics for the multipath fading channel case. For this reason, higher order statistics including skewness function and kurtosis function are used for sensing OFDM signals instead of second order statistics. This method improves the detection capability by increasing its computational complexity due to higher order statistics calculation. The use of skewness increments the detection capability than the conventional autocorrelation based spectrum-sensing methods significantly in highly noisy environments. In addition, when the kurtosis function is used in the proposed method, the sensing performance increases markedly in highly noisy environments. This method is compared with the conventional second order autocorrelation based spectrum-sensing method for OFDM signals detection over multipath Rayleigh fading channel. The proposed spectrum-sensing scheme using skewness function offers an 8 dB SNR improvement compared with that of the CP known case, a 12 dB SNR gain compared with that of the CP unknown case, and a 9 dB SNR gain compared with that of the with filter case of the autocorrelation based spectrum-sensing scheme. Furthermore, in the proposed method, when kurtosis function is used for spectrum sensing, it provides a 16 dB SNR improvement relative to that of the CP known case, a 20 dB SNR gain relative to that of the CP unknown case, and a 17 dB SNR gain relative to that of the with filter case of the conventional autocorrelation based spectrum-sensing method.

In modern wireless communication systems, OFDM is extensively used. The proposed methods provide excellent

OFDM detection performance in highly noisy environments. OFDM Detection is possible using three proposed approaches for very low probability of false alarm under higher order digital modulation schemes over multipath fading channel. For this reason, the proposed spectrum-sensing methods in this dissertation can be a suitable candidate of OFDM signals detection in CR for modern and future wireless communication systems.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和元年7月29日に論文発表会を公開で開催し、活発な質疑とともに論文内容の審査を行った。以下に、審査結果の要約を示す。

本論文は、コグニティブ無線通信システムにおいて、使用されている（あるいは使用されていない）周波数帯を検知するために利用するスペクトルセンシング技術に関して、特に雑音量が多い劣悪な環境下において、信号検出アルゴリズムを検討したものである。現行において主流である通信方式が直交周波数分割多重（OFDM）方式であり、将来においても有望視される方式が同方式であることから、対象信号はOFDM信号とみなしている。本論文では、従来ほとんど着目されてこなかった、雑音量が多い高雑音環境下において、特に特性改善を与える信号検出アルゴリズムの導出を図っている。統計量の観点から分類すると、2次統計量に基づく方法では、くし形フィルタを縦続接続する方法と、それをさらに並列処理して利用する方法の2つの方法を検討している。また、2次より高次の統計量に基づく方法では、OFDM信号が有する分布特性に着目し、信号検出方法を検討している。

まず第1章では、無線通信においては周波数資源の枯渇が問題視されている現実から、コグニティブ無線通信システムの有用性が述べられている。また、コグニティブ無線通信システムにおけるスペクトルセンシング技術の重要性が述べられ、本研究では特に、そのスペクトルセンシングをOFDM信号の検出問題として捉えることにより、問題の定式化を行うことを述べている。そして、本論文で提案する3つの手法の概要を述べている。

第2章では、コグニティブ無線の定義、利用方法がまとめられている。また、スペクトルセンシングの原理、これまでの従来技術の分類、その分類ごとの特徴が述べられている。そして、現行におけるスペクトルセンシングの利用例があげられ、今後の発展の展望を述べている。

ここから続く3章で、本論文で提案するスペクトルセンシングの具体的な方法を論じている。

まず第3章では、2次の統計量、具体的には自己相関関数に着目し、従来の自己相関関数を利用するスペクトルセンシング方法を改良する方法を提案している。OFDM信号には、通信路の時変性に対処するために、しばしばサイクリックプレフィックス（CP）と呼ばれる冗長成分が利用されるが、このCP成分がOFDM信号に周期的に組み込まれることにより、OFDM信号の自己相関関数を算出すると、その組み込まれた周期に対するラグ量において、ピーク形成をする性質がある。OFDMの信号検出にはこの性質を積極的に利用する。従来方法では、CPの周期の長さが既知であることを前提としたが、自己相関関数の平均値を算出することで、CP周期の事前情報なしで同等の結果が得られることを示し、また、くし形フィルタをOFDM信号に適用することにより、自己相関関数での信号検出精度が改善されることを明らかにしている。OFDM信号に付加される雑音量を調整し、信号雑音比（SNR）が低下しても、信号検出精度が保持できる性質を実験的に示し、提案する方法の有効性を検証している。

第4章は、第3章で述べた方法をさらに発展している。第3章での方法は、処理対象のOFDM信号に1つのくし形フィルタを利用するが、これを並列型に複数のくし形フィルタを利用する方法に発展することが可能である。各並列処理において、くし形フィルタリングの後に各並列処理毎に自己相関関数の計算を施すが、それらの中から最も信号検出に適した1つのパラメータを見出すことによって、大幅に信号検出の特性改善が得られる。計算機シミュレーション実験において、この事実を明らかにしている。

第5章では、高次統計量が扱われる。3次統計量として歪度、4次統計量として尖度を利用する。OFDM信号は、基本的には送信時系列の逆フーリエ変換から生成されるが、その信号値の確率分布は正規分布にな

らない。この性質を利用し、正規分布から異なる場合に値を有する歪度と尖度を、第3章での方法の自己相関関数の代わりに利用している。OFDM 信号の付加雑音として考慮される雑音が白色雑音であり、その歪度と尖度が0になる性質と合わせて、OFDM 信号の尖度と歪度は、自己相関関数より大きな値を算出し得る。よって、信号検出精度をさらに改善できる可能性がある。この観点から自己相関関数を利用するより、歪度を利用する方が、検出精度が改善でき、歪度を利用するより尖度を利用した方が、さらに検出精度を改善できることを示している。

第6章は、本論文のまとめである。提案するスペクトルセンシング方法の長所・短所を簡潔に整理し、ユーザへの利用方法を示唆している。今後の無線システムの他入力多出力（MIMO）システムへの発展の要求に鑑みて、次世代無線システムにおける提案法の有用性に関しても言及している。

本論文は、以上に述べたように、コグニティブ無線通信システムにおけるスペクトルセンシング問題に対し、従来方式に特性改善を与える手法を提案し、その実験的検証を行っている。特に、高雑音環境下においては、大幅な特性改善が得られている。本論文の結果は、3編のレフリー付学術雑誌に採択され、また国際学会での発表で公表されている。

以上のように、本論文はスペクトルセンシングのための新しい手法の提案と、その有効性を検証した論文であり、博士（工学）の学位にふさわしい内容を持つものと判断し、審査委員会として「合格」の判定を行った。