

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420354

研究課題名(和文)高精度スペクトラム利用率測定によるホワイトスペース推定法の研究

研究課題名(英文) Reserach of white space estimation based on precise spectrum occupancy rate measurement

研究代表者

梅比良 正弘 (Masahiro, Umehira)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：00436239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：コグニティブ無線による周波数利用効率改善効果を明らかにするために必要となる空間的、時間的なスペクトラム利用率を精度よく測定する手法が必要となる。本研究では、受信電力の累積確率分布に基づく雑音信号の時間占有率ならびに平均電力の同時最小二乗推定に基づくスペクトラム占有率測定法を提案した。提案法に基づき、スペクトルアナライザと信号処理用PCを用いたスペクトラム占有率測定装置を開発し、雑音不確実性がある場合でも、AWGN環境では受信信号SNRが2dB以上、フェージング環境では12dB以上であれば、測定誤差2%以下の高精度なスペクトル占有率測定が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to develop precise spectrum occupancy rate (SOR) measurement techniques for estimating available white space. We have proposed an advanced CDF (Cumulative Probability distribution Function) based SOR measurement method by simultaneous estimation of spectrum occupancy rate and average power of Gaussian noise to improve SOR measurement performance in low SNR environments even if noise uncertainty exists. To confirm the validity of the proposed method, we have developed a proto-type SOR measurement system and have evaluated SOR measurement performance in AWGN and fading environments by computer simulations and experiments. The evaluated results show that the proposed method can measure SOR maintaining SOR error less than 2% in AWGN channel for SNR>2dB and in frequency selective fading channel for SNR>12dB even if noise uncertainty exists. Furthermore, it is demonstrated that the proposed method can measure SNR of wireless packet signals.

研究分野：通信ネットワーク工学

キーワード：ホワイトスペース 累積確率分布 最小二乗推定 雑音電力 スペクトル占有率

1. 研究開始当初の背景

周囲の電波利用環境を認識してホワイトスペースを検出し、更なる周波数有効利用を可能とするコグニティブ無線技術が注目されている。しかし、スペクトラム利用状況の測定手法は未確立で、低 SNR でも高精度にスペクトラム占有率を測定する手法を開発し、2次利用可能な周波数を定量的に明らかにすることが求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、コグニティブ無線による周波数利用効率改善効果を明らかにするため、空間的、時間的なスペクトラム利用率（占有率）を精度よく測定する手法、および当該方法を用いたスペクトラム利用率測定装置を開発し、測定結果に基づき、潜在的に利用可能なホワイトスペースの定量的な推定手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)高精度スペクトラム利用率測定手法の開発に関しては、受信信号電力の CDF (Cumulative Distribution Function) を用いたスペクトラム占有率 (SOR: Spectrum Occupancy Rate) 測定法を提案し、シミュレーション環境を構築して、測定性能を評価した。雑音の CDF に対し、一定レベルの閾値だけシフトした CDF と受信信号電力の CDF の交点を求めることで SOR を推定する閾値法を提案し性能評価を行ったところ、受信信号の SNR が 5~6dB 以下になると測定できなくなることが判明し、さらなる測定性能の改善が必要となった。そこで、閾値を設定せず、一定の電力の範囲における雑音電力の CDF と受信信号の CDF の二乗誤差を最小とする SOR を推定する手法を新たに提案し、シミュレーションによる性能評価により、低 SNR での測定性能が大きく改善されることを明らかにした。しかし、実際の測定装置においては雑音の不確定性の影響により測定性能が大きく劣化することがわかった。そこで、雑音電力の CDF と受信信号の CDF の二乗誤差を最小とする雑音信号電力と雑音のみの時間率 (1-SOR) を同時推定する手法を新たに提案し、雑音不確定性があっても、低 SNR まで高精度 SOR 測定ができることを明らかにした。さらに、各種パラメータが測定性能に与える影響を評価し、高精度スペクトラム利用率測定手法を確立した。

(2) スペクトラム利用率測定装置の開発に関しては、(1)で確立した SOR 測定手法に基づき、ポータブルスペクトラムアナライザと信号処理を行う PC を用いた、スペクトラム占有率測定装置を開発し、測定装置の特性評価

を AWGN チャネル、周波数選択性フェージングの環境において実施し、実験により開発装置の測定性能を明らかにした。

(3)のスペクトラム占有率測定装置の開発に時間を要したため、スペクトラム占有率測定実験を実施することができず、周波数利用状況の推定手法、ホワイトスペース推定手法の検討は今後の課題とした。

4. 研究成果

(1)高精度スペクトラム利用率測定手法の開発
スペクトラム利用状況は、図 1 のように周波数 bin 毎の電力密度（電界強度）と占有率 (SOR) で評価する。占有率は時間的な利用率として $T_O/(T_O+T_U)$ で定義される。高精度 SOR 測定法の開発では、提案手法の測定性能をシミュレーションにより評価し、課題を明らかにすると共に、改善策の検討を進めた。

初年度は、実施計画に基づき提案する閾値法を用いた SOR 測定法の性能評価を行った。図 2 に受信電力の CDF による SOR 測定の原理を示す。雑音電力 x [dB] の CDF、 $P_N(x)$ を閾値 x_0 [dB] だけシフトした CDF である $P_N(x-x_0)$ を基準とし、受信電力の CDF、 $P_R(x)$ との交点における確率より SOR を算出する。閾値 x_0 を最適化し $x_0=6$ dB を用いた CDF による閾値法の SNR に対する SOR 測定性能評価結果を図 3 に示す。図のように、SNR が x_0 を下回ると SOR=0 になり、提案手法は低 SNR での測定性能に課題があることがわかった。

次年度以降は提案する SOR 測定法の低 SNR における性能改善に取り組んだ。この問題を解決するため、雑音電力の CDF と受信信号電力の CDF の誤差を最小とする占有率を最小二乗誤差推定 (LMSE) により求める SOR 測定法を提案し測定性能を評価した。図 4 に提案した LMSE 法による SOR 測定の原理を示す。周波数 bin の占有率を R 、信号電力の CDF を $P_S(x)$ 、雑音電力の CDF を $P_N(x)$ とすると、受信電力 x の CDF、 $P_R(x)$ は次式で与えられる。

$$P_R(x) = R \cdot P_S(x) + (1-R) \cdot P_N(x) \quad (1)$$

受信電力が低い場合、雑音の CDF と同じになるので、次式の CDF の平均二乗誤差 $P_{SE}(R)$ を最小とする R として SOR を推定する。

$$P_{SE}(R) = \frac{\sum_{i=N_{\min}}^{N_{\max}} \{P_R(x_i) - (1-R)P_N(x_i)\}^2}{N} \quad (2)$$

CDF の平均二乗誤差 $P_{SE}(R)$ を計算する電力範囲を最適化し、LMSE 法による SOR 測定法の SNR に対する SOR 測定性能の評価結果を閾値法と比較して図 5 に示す。SNR > 2dB で SOR 測定誤差 2% 以下であり、測定誤差が大きくな

るが SNR<0dB でも SOR を測定可能とした。

実際の SOR 測定では、周波数 bin 毎の雑音電力の CDF、 $P_N(x)$ を予め測定し、ガウス分布を仮定して、これを基準として SOR 測定を行う。しかし周波数や経時変化により雑音電力が変動する雑音電力不確定性が存在する。雑音電力不確定性=1dB の場合の SNR に対する SOR 測定誤差の評価結果を図 6 に示す。雑音電力不確定性により高 SNR の場合でも SOR 測定誤差が大きくなることがわかった。

この問題を解決するため、周波数 bin の毎に SOR、 R と雑音電力誤差 Δx の CDF の平均二乗誤差 $P_{SE}(R, \Delta x)$ が最小となる $(R, \Delta x)$ を同時推定する同時最小二乗推定 (SLMSE) 法を提案した。

$$P_{SE}(R, \Delta x) = \frac{\sum_{i=N_{\min}}^{N_{\max}} \{P_R(x_i) - (1-R)P_N(x_i - \Delta x)\}^2}{N} \quad (3)$$

図 8 に、雑音電力不確定性=1dB の場合の、SLMSE 法の SNR に対する SOR 測定誤差の評価結果を示す。SNR>2dB にて推定誤差 2% 以下で SOR 測定が可能であることを示した。

提案手法は雑音電力誤差 Δx を推定するため、受信信号の SNR を推定できる。SLMSE 法の入力 SNR に対する SNR 測定特性評価結果を示す。SNR>0dB で、推定誤差 0.2dB 以下の十分な SNR 測定精度を有することを明らかにした。

(2) スペクトラム利用率測定装置の開発

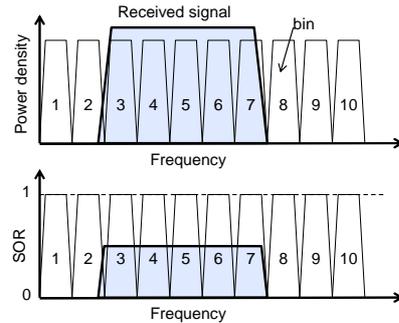
初年度は、研究計画に基づき、閾値法による SOR 測定法に基づく測定装置開発の基礎検討を行った。しかし、(1)で述べたように、提案手法は低 SNR での測定性能に課題があることがわかった。また次年度では CDF の LMSE 法を用いた SOR 測定装置の開発の検討を進めたが、雑音電力不確定性の問題が明らかになったため、最終年度に SLMSE 法に基づく SOR 測定装置を開発し、実験系を構築して測定性能を評価した。

図 10 に開発した SOR 測定装置と性能評価実験系、図 11 に SOR 測定性能評価実験系の写真を示す。SOR 測定装置はスペクトラムアナライザとそのデータ処理・SOR 推定を行う PC から構成される。図 12 に開発した SOR 測定装置の入力 SNR に対する SOR 測定特性の実験結果とシミュレーションの比較を示す。実験結果とシミュレーション結果はよく一致しており、AWGN チャネルでは SNR>2dB、フェージングチャネルでは SNR>12dB で SOR 測定誤差 2% 以下を達成できることを明らかにした。また、無線パケット長、サンプル数と SOR 測定性能の関係を明らかにした。以上

より、高精度 SOR 測定法を確立し、SOR 測定装置の開発・評価を行い、提案手法の実現性、SOR 測定性能を明らかにした。

(3) スペクトル占有率測定実験

SOR 測定法の改良、装置開発に時間を要したため、研究期間内にスペクトル占有率測定実験を実施することはできなかった。周波数利用状況の推定手法、ホワイトスペース推定手法の検討は今後の課題である。



(1) 周波数 bin と SOR

(2) 占有率 (SOR) の定義

図 1 周波数 bin 毎のスペクトルの電力密度 (電界強度) と占有率 (SOR)

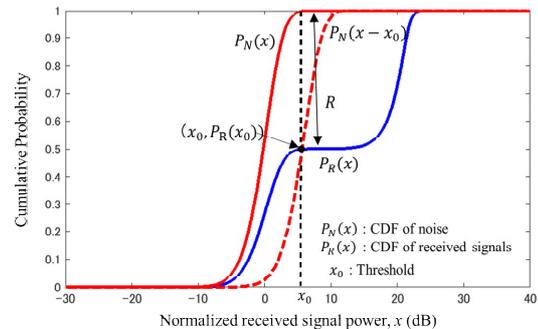


図 2 CDF による閾値法の測定原理

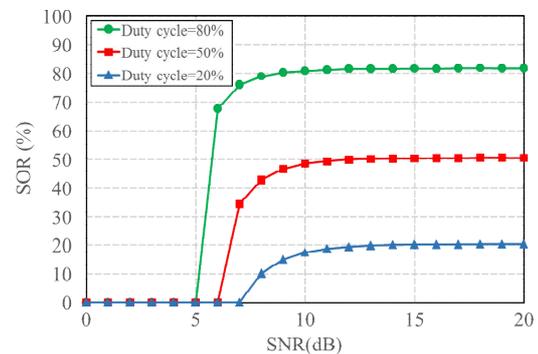


図 3 CDF による閾値法の SNR に対する SOR 測定性能評価結果

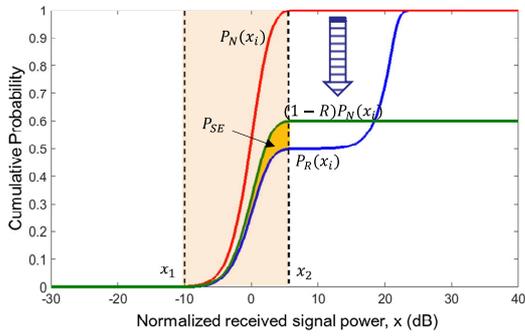


図4 雑音電力 CDF の LMSE による SOR 測定法の原理

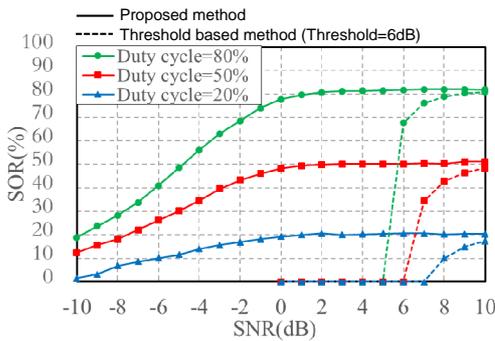


図5 雑音電力 CDF の LMSE による SOR 測定法の SNR に対する SOR 測定性能評価結果

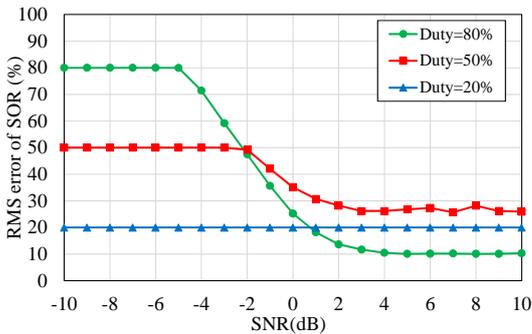


図6 雑音不確定性が 1dB の場合の SNR に対する SOR 測定誤差

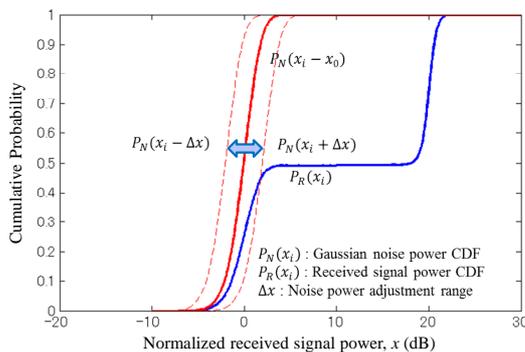


図7 雑音電力と SOR の同時最小二乗推定 (SLMSE)法の原理

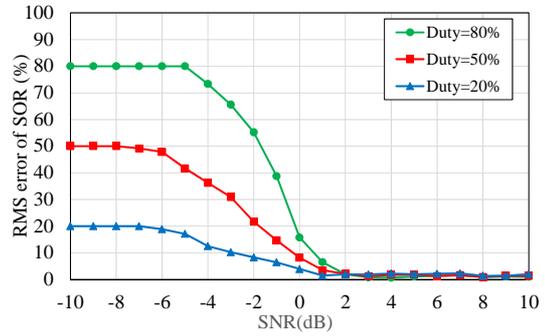


図8 同時最小二乗推定法の SNR に対する SOR 測定誤差 (雑音不確定性=1dB)

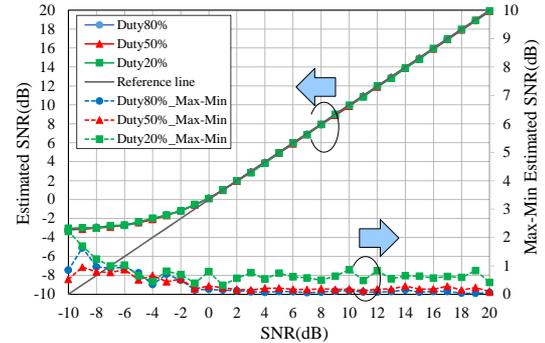


図9 同時最小二乗推定法の入力 SNR に対する SNR 測定特性

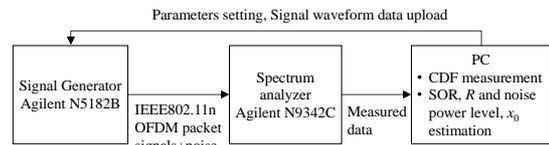


図10 SOR 測定装置と性能評価実験系

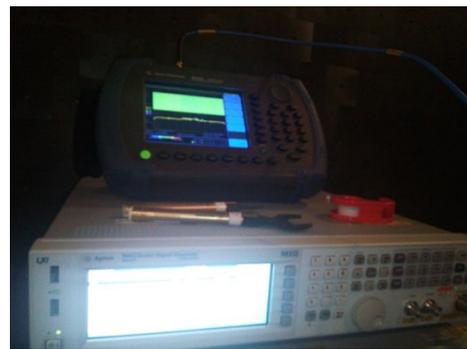
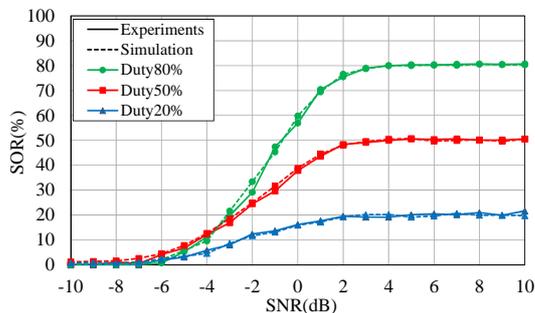


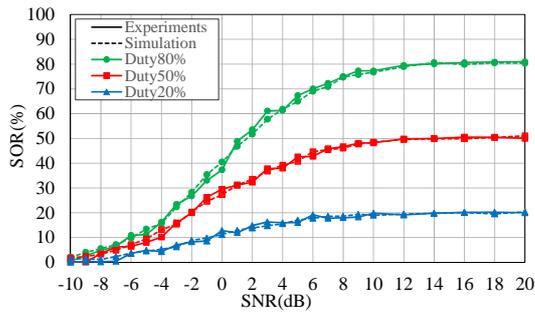
図11 SOR 測定性能評価実験系 (上: スペクトラムアナライザ、下: 信号発生器)

表1 実験の主要パラメータ

	Standard	IEEE802.11n
Wireless packet data	Subcarrier modulation	QPSK
	Sampling frequency	80MHz
	OFDM symbol length	4 μs (320 samples)
	CP length	1/5 OFDM symbol (64 samples)
	Measured bandwidth	80MHz
Spectrum analyzer	Number of measured points in frequency domain	461
	Sweep time	27.98ms
	RBW	1MHz
	VBW	30kHz



(1) AWGN チャネル



(2) 周波数選択性フェージングチャネル

図 12 開発した SOR 測定装置の入力 SNR に対する SOR 測定特性の実験結果とシミュレーションの比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 14 件)

1. Masahiro UMEHIRA, Shota RACHI, Shigeki TAKEDA, "Experimental Evaluation of a Spectrum Occupancy Rate Measurement Method Based on LSE Estimation of Gaussian Noise CDF," accepted for presentation in APCC2016, 25-27 August 2016, Yogyakarta, Indonesia. 査読有
2. Shota RACHI, Masahiro UMEHIRA, Shigeki TAKEDA, "An Advanced CDF Based Spectrum Occupancy Rate Measurement Method by Simultaneous Estimation of Gaussian Noise Power and Time Period," EW (European Wireless) 2016, 18-20 May 2016, Oulu, Finland. 査読有
3. Shota RACHI, Akira SAITO, Masahiro UMEHIRA, Shigeki TAKEDA, "CDF Based Spectrum Occupancy Rate Measurement Using Least Square Estimation of Gaussian Noise Period," 18th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2015), Dec.13-16, 2015, Hyderabad,

India 査読有

4. 良知昌太, 齋藤晟, 梅比良正弘, "スペクトル占有率測定のための確率密度関数を用いた SNR 測定法," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, B-17-12, 2015 年 9 月 8-11 日, 東北大学(宮城).
5. 良知昌太, 齋藤晟, 梅比良正弘, 武田茂樹, "最小二乗法を用いた受信信号電力の CDF に基づく高精度スペクトル占有率測定法," 電子情報通信学会 総合大会, B-17-36, 2015 年 3 月 10-13 日, 立命館大学(滋賀).
6. 良知昌太, 齋藤晟, 梅比良正弘, 武田茂樹, "最小二乗法による雑音電力推定を用いた受信信号電力の CDF に基づくスペクトル占有率測定法の検討," 電子情報通信学会 技術研究報告, SR2014-140, pp.175-17, 2015 年 3 月 6 日, 東京工業大学(東京).
7. 齋藤晟, 良知昌太, 梅比良正弘, 武田茂樹, "最小二乗法を用いた受信信号電力の CDF によるスペクトル占有率測定法," 電子情報通信学会 東京支部 学生会研究発表会(第 20 回), 105, 2015 年 2 月 28 日, 明治大学(東京).
8. 良知昌太, 梅比良正弘, 武田茂樹, "受信信号電力の CDF を用いたスペクトル占有率測定系の構築と性能評価," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, B-17-12, 2014 年 9 月 23-26 日, 徳島大学(徳島).
9. 良知昌太, 梅比良正弘, 武田茂樹, "受信信号電力の CDF を用いたスペクトル占有率測定法の実験による性能評価," 電子情報通信学会 技術研究報告, SR2014-25, pp.31-35, 2014 年 7 月 3 日, 京都テルサ(京都).
10. 姚依林, 櫻井健大, 梅比良正弘, 武田茂樹, "受信信号電力の CDF を用いたスペクトル利用率測定における変調方式の影響," 電子情報通信学会 総合大会, B-17-11, 2014 年 3 月 18-21 日, 新潟大学(新潟).
11. 良知昌太, 梅比良正弘, "受信信号電力の CDF を用いたスペクトル利用率測定法の実験による評価," 電子情報通信学会 東京支部 学生会研究発表会(第 19 回), 71, 2014 年 3 月 1 日, 東海大学 高輪キャンパス(東京).
12. 姚依林, 櫻井健大, 梅比良正弘, 武田茂樹, "受信信号電力の CDF を用いたスペクトル利用率測定法における検出閾値の最適化と特性評価," 電子情報通信学 技術研究報告, SR2013-78, pp.19-24, 2014 年 1 月 23 日, 東北大学(宮城).
13. 姚依林, 櫻井健大, 梅比良正弘, "受信信号電力の CDF を用いたスペクトル利

用率測定法における検出閾値の影響，”
電子情報通信学会 ソサイエティ大会，
B-17-8，2013年9月17-20日，福岡工業
大学（福岡）。

14. 梅比良正弘，“[パネル討論] ホワイトス
ペース利用の夢と現実 ～ 実用化に向
けた課題 ～，”電子情報通信学会技術研
究報告，SR2013-6，pp.29，2013年05月
23日，アステールプラザ（広島）。

6．研究組織

(1)研究代表者

梅比良 正弘（UMEHIRA MASAHIRO）

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：00436239