

Study on Improvement of NC-OFDM Transmission Performance with Reduction of Out-of-Band Emission by a Windowing Method

Daisuke SANEMASU*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received March 10, 2014)

We present a non-contiguous orthogonal frequency division multiplexing (NC-OFDM) scheme as a promising and practical method for achieving spectrally agile wireless data transmission. It is suitable for efficient access to fragmented vacant frequency bands by secondary users (SUs) in a cognitive radio network. Although the NC-OFDM scheme allows efficient communication, there is an inter-user interference problem between primary users (PUs) and SUs. The methods focusing on the reduction of out-of-band (OOB) emissions generated by the use of NC-OFDM transmission have been studied. With the purpose to achieve the required OOB suppression we present a practical approach that can be employed in NC-OFDM, namely, Windowing. However, it has a defect in that the BER (Bit Error Rate) performance is degraded by the Windowing method. In order to improve the BER performance we present quasi maximum likelihood estimator (QMLE), which is a simplified MLE method. It compensates for the performance degradation due to the distortion by Windowing. While MLE requires heavy computational cost and is unrealistic, QMLE can effectively reduce the computational cost. We quantitatively evaluate BER performance improvement of the QMLE method by computer simulation.

Key words : NC-OFDM, cognitive radio, windowing, QMLE

キーワード : NC-OFDM, コグニティブ無線, Windowing, 準最尤推定法

ウィンドウニング法による帯域外電力抑圧を行う NC-OFDM 伝送特性の改善

實升 大輔, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. はじめに

近年の通信システムの発展は著しく、スマートフォンの普及などによって必要となる高速・大容量通信の実現に向けての研究が盛んに行われている。このような通信を実現する場合には広い周波数帯域が必要である。しかしながら周波数資源は有限であ

り、近年では特に周波数資源の枯渇が問題視されているため、この対策として周波数帯域の一層の有効利用が求められている。

この課題に対する抜本的な対策の一つとしてコグニティブ無線が注目されている。コグニティブ無線では端末などの無線装置が空き周波数を能動的

* Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

に検索し使用する。高速・大容量伝送をするためには広帯域チャンネルが必要であり、使用したい周波数帯域に十分な帯域幅が存在しないことがある。その場合、PU(Primary User)が使用していない比較的狭帯域な複数の空き周波数が離散的に存在すると仮定し、SU(Secondary User)がそれらを虫食いの似的に使用することで一つのチャンネルとしてまとめて使用する必要が生じる。この実現技術として、近年、無線 LAN や地上デジタル通信などの多くの通信機器で使用されている OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式に基づく NC-OFDM(Non-Contiguous OFDM)方式が注目されている¹⁻²⁾。NC-OFDM 方式を採用したコグニティブ無線を用いることにより、効率的に周波数帯域を使用した通信が実現可能である。しかし、OFDM 方式は、サブキャリア数が少なくなるにつれ、帯域外電力が大きくなる特徴があり、比較的狭い複数の周波数帯域を利用して信号伝送する NC-OFDM 方式の隣接システムへの干渉は大きくなる。干渉によってビット誤り率(BER: Bit Error Rate)は劣化し、PU と SU は互いの通信伝送に影響を与える。これに対してこの干渉を抑圧することができれば、より効率的な周波数の利用が実現できる。

NC-OFDM 方式を用いた通信における隣接帯域への漏えい電力を抑圧する技法は過去の研究で幾つか発表されており、それぞれに演算コスト、伝送効率、BER などの面における長所と短所が存在する³⁾。本研究ではこれらの内の Windowing 法⁴⁾に焦点を当てる。この Windowing 法は演算コストが少ないという利点があるが、その一方で BER を劣化させてしまうという欠点を持っている。これは Windowing 法適用によって送信信号波形が歪み、その結果としてサブキャリア間干渉が発生するためである。本研究ではこの対策として、波形歪の補償によって BER 特性を改善する最尤推定(MLE: Maximum Likelihood Estimation)法を適用する。しかし、MLE は膨大な演算コストを必要とし実用的ではないため、本研究では、MLE の計算範囲を簡略化した準最尤推定法を採用する⁵⁻⁶⁾。

本研究ではコグニティブ無線において PU が利用

している周波数帯を除く隣接帯域を SU が NC-OFDM 方式により利用する環境を想定し、帯域外電力抑圧法である Windowing 法の適用に起因する SU 信号の BER 劣化問題の対策案として準最尤推定法を取りあげ、その BER 特性改善性能を評価する。

2. NC-OFDM 方式の概要

NC-OFDM方式は、コグニティブ無線において有効な OFDM方式の応用技術である。離散的に存在する、他ユーザが利用していない周波数帯域が比較的狭帯域であっても、サブキャリアごとをブロックごとに分散させて配置することでこれらの周波数帯域をまとめて利用することができ、結果として周波数を有効に利用することができる¹⁻²⁾。

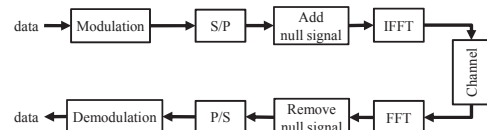


Fig. 1. Transmitter and receiver diagram of NC-OFDM.

S/P: Serial to Parallel Conversion, P/S: Parallel to Serial Conversion
FFT: Fast Fourier Transform, IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

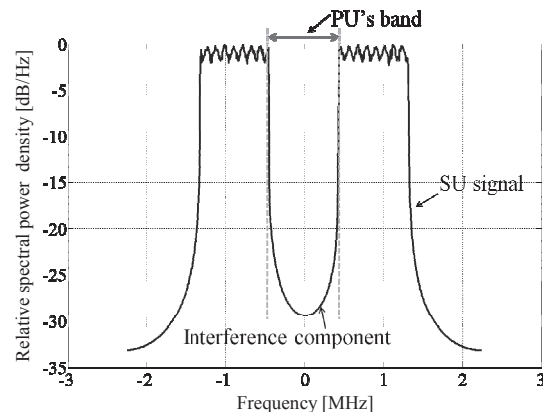


Fig. 2. Spectrum of interference component of SU on PU's band.

Fig. 1 に送受信機のブロック図を示す通り、OFDM 変調におけるサブキャリアマッピング時に PU 帯域に対応するサブキャリアに null 信号をマッピングする。これにより PU が利用している帯域への信号送信を避けると共に、広帯域チャンネルが必要な場合にも帯域を有効に利用して信号を伝送する

ことが可能となる.

Fig. 2にNC-OFDM方式のスペクトルの例を示す. 上記の通り, 図のPU帯域に対応するサブキャリアにはnull信号がマッピングされているが, 漏えい帯域外電力存在することがわかる. これがPUへの干渉となり, PUの伝送特性に影響を与える.

3. Windowing法の概要

3.1 Windowing 法による帯域外電力の抑圧

NC-OFDM方式においてPU帯域などへの信号送出を抑圧する方式としては各種の方法が検討されているが, 本研究では窓関数(Windowing)による方法を取り上げる⁴⁾.

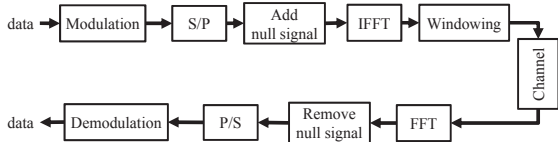


Fig. 3. Transmitter and receiver diagram including Windowing.

Windowing法を含めたNC-OFDMシステムのブロック図をFig. 3に示す.

Fig. 4は時間領域におけるOFDMシンボルとWindowingとの関係を表している. 同図に示すようにSUのOFDMシンボルの両端の β サンプル分を窓関数により変形させ, 帯域外電力を抑圧する. 窓関数がかかるサンプル数 β を変化させることで, 帯域外電力抑圧の強度を調節する. N , N_{CP} はそれぞれFFTサンプル数とCP(Cyclic Prefix)サイズを表す. β , N , N_{CP} の単位はFFTサンプルである.

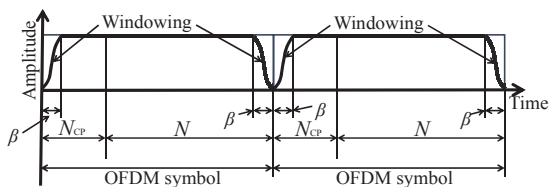


Fig. 4. Windowing shape.

ここで, Windowing法処理前の単一OFDMシンボルのサンプルを時間方向に並べたベクトルを x , x とWindowing w を要素ごとに乗算した結果をベクトル y とし, x , w , y の n 番目のサンプルをそれぞれ x_n ,

w_n , y_n とすると,

$$\begin{cases} x = \{x_n\} \\ w = \{w_n\} \\ y = \{y_n\} \end{cases} \quad 0 \leq n \leq N + N_{CP} - 1 \quad (1)$$

$$\{y_0, \dots, y_n, \dots, y_{N+N_{CP}-1}\} = \{w_0 x_0, \dots, w_n x_n, \dots, w_{N+N_{CP}-1} x_{N+N_{CP}-1}\} \quad (2)$$

となる.

本研究では離散的に周波数帯域を使用するNC-OFDM方式においてPU信号への与干渉が最も低く抑えることができるため適合性が高いと考えられるハニング窓を用いる. ハニング窓において w_n は次式で表せる.

$$w_n = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos\left(\pi \frac{n}{\beta}\right), & (0 \leq n < \beta) \\ 1, & (\beta \leq n < N + N_{CP} - \beta) \\ 0.5 - 0.5 \cos\left(\pi \frac{n - (N + N_{CP})}{\beta}\right), & (N + N_{CP} - \beta \leq n < N + N_{CP}) \end{cases} \quad (3)$$

Windowing法の利点は低い演算複雑性とNC-OFDM方式への適合性にある. 動的に変化する無線環境で利用可能な周波数帯域へのアクセスを試みるコグニティブ無線システムにおいてNC-OFDM方式が使用される場合, 適用される窓関数の長さや形状は動的に変化可能であることも重要である. また, この方法は, SUの送信帯域の周波数が比較的遠いPU伝送に対する与干渉を小さくする場合にも適している.

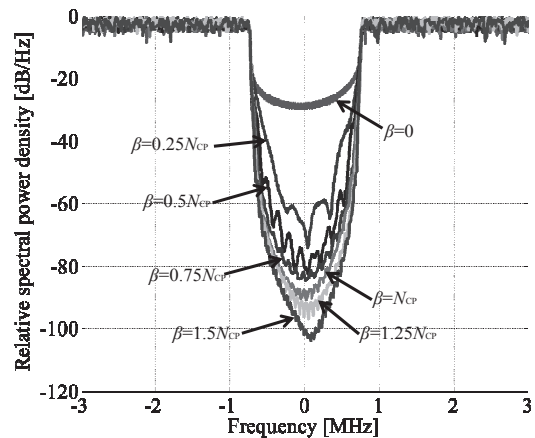


Fig. 5. Spectrum of SU signal with Windowing.

Windowing 法を適用し、 β を変化させた場合のベースバンド帯域における NC-OFDM 信号のスペクトルの例を Fig. 5 に示す。同図より、 β の値が大きくなるに連れて帯域外電力が抑圧されていることがわかる。たとえば Windowing を行わない場合に比べて、 $\beta=0.5N_{CP}$ の場合には 50dB 程度の帯域外電力抑圧が実現できることがわかる。

3.2 Windowing 法適用による伝送特性劣化

Windowing 法を適用することは、信号波形の一部を変形させている。これにより発生する波形歪は、 $\beta \leq 0.5N_{CP}$ では受信局の CP 除去によって発生した波形歪がすべて削除されるために誤りは発生しない。これに対して、 $\beta \geq 0.5N_{CP}$ の場合には波形歪がサブキャリア間干渉を引き起こす。その結果、Fig. 5 に示す通り、 β を増加させることで帯域外電力抑圧効果は大きくなるが、同時に BER 特性の劣化が生じる。加法性白色ガウス雑音(AWGN: Additive White Gaussian Noise)環境下における β を変化させた場合の信号対雑音比(SNR: Signal-to-Noise Ratio)に対する BER 特性を Fig. 6 に示す。

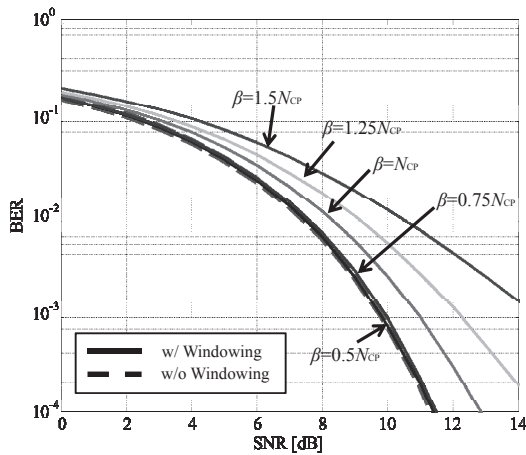


Fig. 6. BER performance with variation of window size.

図より、 $\beta \leq 0.5N_{CP}$ の範囲では BER 特性に変化は見られない。 $\beta=0.75N_{CP}$ の場合には僅かな特性の劣化がみられ、それ以上では BER 特性が大きく劣化していることがわかる。コグニティブ無線では PU への与干渉は完全に削減しなくてはならないため、

β の値をより大きく設定したい。しかし、Fig. 6 に示した通り、 β が大きくなれば SU 信号の波形歪が大きくなり伝搬特性を劣化する。そこで、この波形歪を補償する必要がある。

4. 準最尤推定法による誤り率改善

BER 劣化対策として、送信候補信号と受信信号との間のユークリッド距離による判定を行う MLE 法を採用する。受信信号系列とレプリカ系列のユークリッド距離の 2 乗を全サンプル分足し合わせる。これを全レプリカに対して行い、最も小さい値のレプリカを受信信号とする。最も可能性の高いレプリカを検出する方法は次式で表される。なお、 \hat{s} はレプリカ系列を示す。

$$\hat{s} = \arg \min_{\bar{s}} \|y - \bar{s}\|^2 \quad (4)$$

OFDM 方式に最尤推定法を適用する場合、サブキャリア数を U 、変調多値数 M とすると M^U 個の送信候補信号に対してユークリッド距離比較を行う必要があり、 U および M の値によっては処理量が膨大となり現実的ではない場合がある。これに対し、本研究では、MLE 法を簡略化する方法を考える⁵⁻⁶⁾。受信シンボルを一旦復調し得られたビット列およびその系列から 1 ビットだけ異なる全てのビット系列を作成し、これを再変調することによりレプリカを作成する。これらを候補としてユークリッド距離比較を行う。このような方法では候補数は MU であるため、 M および U が大きな場合には、最尤推定法に比べて大幅な処理時間の短縮を実現することができる。この手法を QMLE 法と呼ぶ。Fig. 7 に QMLE を適用した受信機のブロック図を示す。

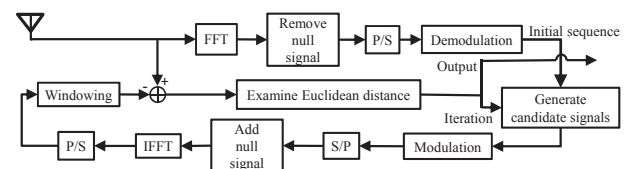


Fig. 7. Receiver model using QMLE.

受信信号はまず Fig. 3 のような従来の方法で復号される。復号された系列は、この系列から 1 ビットだけ異なる MU 個の系列を生成する系列生成器に適

用される。次に、生成された系列はFig. 3と同じ送信機モデルに適用される。その後、送信モデルから出力された系列は受信信号とのユークリッド距離を計算し、最小のユークリッド距離を持つ系列を選択する。選ばれた系列は必ずしもMLE法を用いた場合の結果と等しくはならないため、この系列よりユークリッド距離がより短い系列を得ることも可能である。そのためには、ユークリッド距離比較によって選ばれた系列から再びレプリカを生成し、またこの行程を反復することで演算コストは増加するがBER特性はより改善される。

5. 計算機シミュレーションによる 伝送特性改善の評価

5.1 シミュレーションシステム

Table 1にPUの諸元を、Fig. 8にPUの伝送システムモデルを示す。伝送路はAWGNチャネルとした。また、PU信号には帯域制限フィルタをかける。このフィルタとしては、ロールオフファクタ $\alpha=0.5$ のナイキストフィルタを送信側100%として用いている。

Table 1. System parameters of primary user.

Modulation	QPSK
Bandwidth	1.5MHz
Band pass filter	Nyquist filter
Roll-off factor	0.5

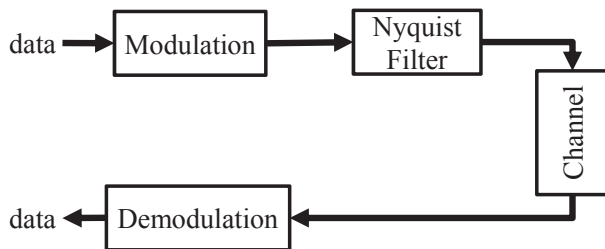


Fig. 8. Transmission model of PU.

次にTable 2にSUの諸元を、Fig. 9にSUの伝送システムモデルを示す。

Table 2. System parameters of secondary user.

Modulation	OFDM, QPSK
Null signal bandwidth	1.5MHz
Symbol rate	15kHz
Number of FFT N	2024 samples
Cyclic prefix N_{CP}	128 samples

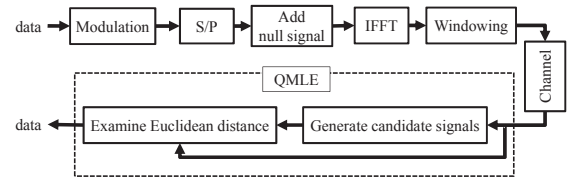


Fig. 9. Transmission model of SU.

本研究では、PU帯域におけるSU信号の影響抑圧を評価対象とする。そのためSUのNC-OFDM信号の帯域幅やFFTサンプル数 N は十分に大きいものとした。また、Fig. 9におけるQMLEの具体的な復号方法はFig. 7と同様のシステムを用いる。Fig. 10にシミュレーションシステムモデルを示す。

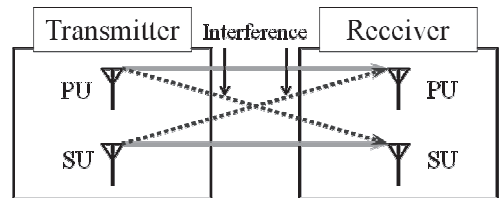


Fig. 10. Simulation system model.

本章では、まずNC-OFDM方式のSUがPUに与える干渉によって発生する影響について、Windowing法をSUに適用した場合のBER特性をシミュレーションにより評価する。次に、第3章で述べたWindowing法適用によるSU信号のBER特性劣化問題に対してQMLEによるBER特性改善を試み、その効果を明らかにする。また、SU信号へのWindowing法適用によるPUからSUへの干渉抑圧効果について検討する。最後に、QMLEと誤り訂正を組み合わせた場合のBER特性改善効果について検討する。

5.2 SU 信号が PU 信号に与える干渉抑圧の評価

Fig. 11 にシミュレーションにおける PU と SU の信号強度設定を示す両信号のスペクトルを示す. PU の電力密度最大値に対する SU の電力密度最大値の比 P は +50dB に設定している.

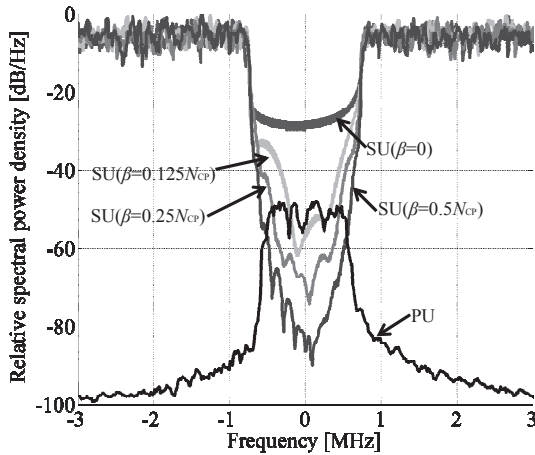


Fig. 11. Spectrum of primary and secondary user.

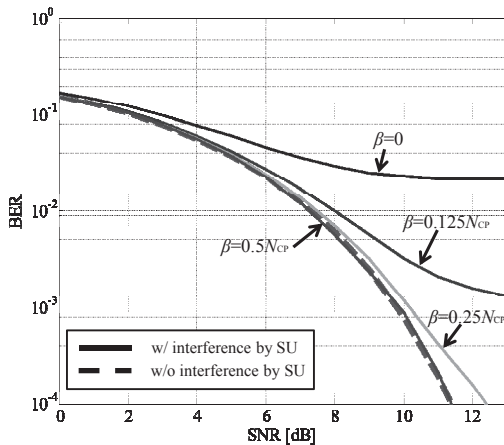


Fig. 12. BER performance of PU with variation of window size.

Fig. 12 に, Fig. 11 と同条件の環境で窓関数のサンプル数 β を 0, $0.125N_{CP}$, $0.25N_{CP}$, $0.5N_{CP}$ に変化させた場合の PU 信号の BER 特性を示す. 図より, Windowing 法を用い, β の値を大きくすることで SU の帯域外電力がより抑圧され, PU への与干渉が削減できていることがわかる.

5.3 SU 信号の誤り率特性改善の評価

QMLE の BER 特性改善効果をシミュレーションにより評価する. Windowing 法を SU 信号に適用し, MLE または QMLE を用いて復号した場合の BER 特性を Fig. 13 に示す.

同図より, MLE および QMLE によって BER 特性が改善していることがわかる. 特に, β が N_{CP} 以下の場合, BER 特性は QPSK の理論特性とほぼ同じ特性となり, Windowing 法適用によって発生した波形歪の影響を除去できている. また, MLE と QMLE の BER 特性に差はなく, Windowing 法の適用に起因する波形歪の補償性能に差はないことがわかる. なお, 第 4 章におけるレプリカ作成, ユークリッド距離比較の反復演算回数については, 1 度の演算で十分であった.

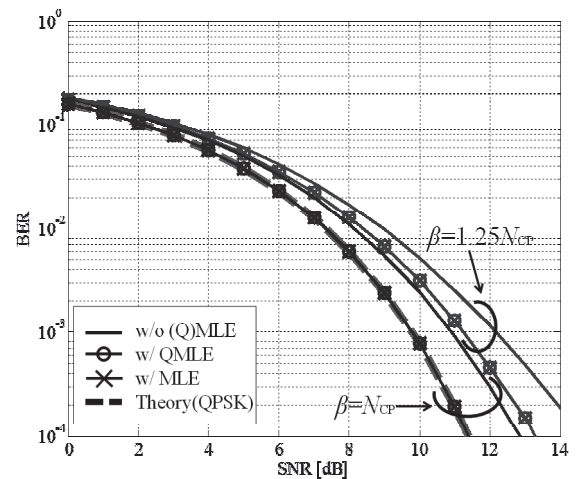


Fig. 13. BER performance using QMLE or MLE.

ここで, PU の干渉による SU の伝送特性への影響について考える. Fig. 14 にここで対象とする PU 信号と SU 信号のスペクトルを示す. P は -5dB とした. Fig. 15 に, Fig. 14 と同条件の環境における SU 信号の BER 特性を示す. 同図より, Windowing 法を適用していない場合と β が $1.25N_{CP}$ の Windowing 法を適用した場合の BER 特性では, 同等または Windowing 法なしを上回ることがわかる. 前述の通り, $\beta > 0.5N_{CP}$ の範囲では Windowing 法を適用する

場合は波形歪が生じ, BER 特性が劣化する. しかし, Fig. 15 の結果から, β が $1.25N_{CP}$ の Windowing 法を適用した場合の BER 特性が劣化していないことは PU から SU への干渉電力が抑圧されていることを示している.

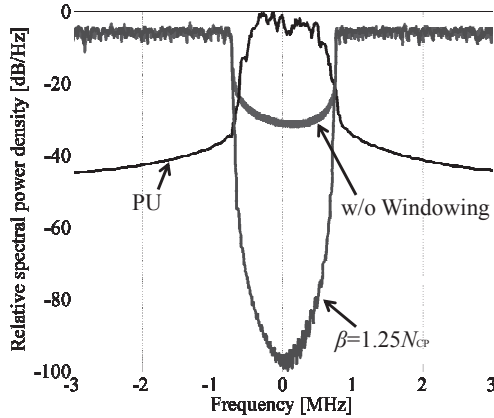


Fig. 14. Spectrum of primary and secondary user.

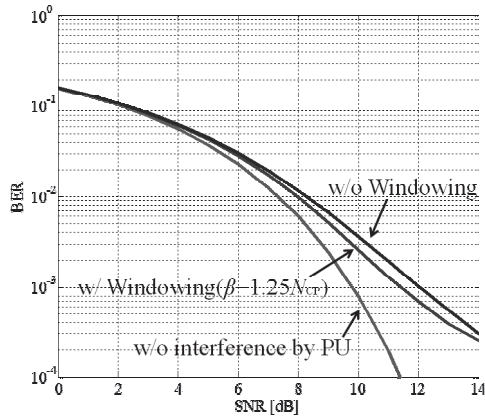


Fig. 15. BER performance of SU.

次に, 誤り訂正(EC: Error Correction)を用いてさらなる伝送特性改善を試みる. 誤り訂正は, 符号化率が $1/2$ の畳み込み符号化, 硬判定ビタビ復号を用いる. β が N_{CP} , $1.25N_{CP}$ の場合の Windowing 法を適用した SU 信号に QMLE と誤り訂正を行った BER 特性を Fig. 16 に示す. 同図より, EC のみの場合と比較して EC と QMLE の両方を使用した場合で BER 特性の改善が見られる. つまり, EC のみの適用では BER 特性改善効果は十分といえず, QMLE と合

わせて使用することでより改善されることがわかる.

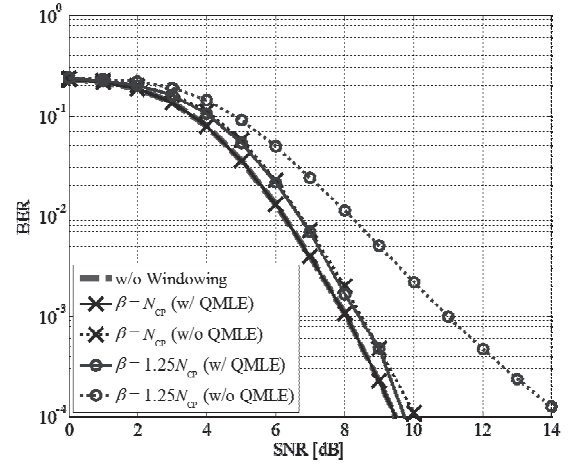


Fig. 16. BER performance using EC and QMLE.

6. まとめ

本研究では, コグニティブ無線においてPUが使用していない空周波数帯域をSUがNC-OFDM方式を用いて通信を行うことを想定し, NC-OFDM信号から隣接するユーザ信号への与干渉の影響を明らかにした上で, その与干渉の原因である帯域外電力を抑圧する方法の性能評価を行った.

SU信号からPU信号へ与える干渉対策に, SU信号の帯域外電力を抑圧するWindowing法を用いることで, 干渉によって劣化したPUのBER特性が改善可能であることを確認した. しかし, SUにWindowing法を適用することで, 窓関数がかかるサンプル数がCPサイズの $1/2$ を超える場合には波形歪が発生し, これによってSU信号のBER特性が劣化することを示した.

この問題に対して, 送信候補信号とユークリッド距離を用いて波形歪を補償するMLEを用いてBER特性の改善を試みた. さらにMLEの計算量を大幅に削減するQMLEの適用を検討し, QMLEによってWindowing法の波形歪によるBER劣化を改善する効果を明らかとした.

また, Windowing法によってPUからSUへの干渉も抑圧されていることを示した. そして, Windowing法によって発生する波形歪に起因するBER特性劣

化問題に対して、誤り訂正のみの適用では改善効果は不十分であるが、QMLEと誤り訂正を合わせて適用することでその特性改善効果は十分なものとなることを示した。

参考文献

- 1) R. Rajbanshi, A. Wyglinski and G. Minden, “An efficient Implementation of NCOFDM Transceivers for Cognitive Radios,” Proceeding of First International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Mykonos Island, Greece, 1–5 (2006).
- 2) 高草木恵二, 長谷川晃朗, 柴田達雄, “広帯域離散 OFDM 技術の研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, **SR2013-16**, 83-89 (2013).
- 3) P. Kryszkiewicz, H. Bogucka and A. Wyglinski, “Protection of Primary Users in Dynamically Varying Radio Environment: Practical Solutions and Challenges,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, **2012** (1), 1-23 (2012).
- 4) T. Weiss, J. Hillenbrand, A. Krohn and F. Jondral, “Mutual Interference in OFDM-based Spectrum Pooling Systems,” IEEE Vehicular Technology Conference, 1873-1877 (2004).
- 5) 松沢博史, 岩井誠人, 笹岡秀一, “ピーク抑圧処理を行った OFDM 方式における誤り率特性改善法,” 電子情報通信学会技術研究報告, **RCS2007-223**, 223-228 (2008).
- 6) M. Okada, H. Nishijima and S. Komaki, “A Maximum Likelihood Decision Based Nonlinear Distortion Compensator for Multi-Carrier Modulated Signals,” IEICE Transactions on Communications, **E81-B** (4), 737-744 (1998).