

# 周波数オフセット補正とシンボル同期を適用した時の 最大比合成による OFDM パイロット信号検出感度評価

7312670 吉武 利紘

## 1. 序論

近年、携帯電話、無線 LAN(Local Area Network)、地上デジタル放送など、多くの無線システムが様々な周波数・変調方式、伝送速度で通信を行っている。特に、これらの無線通信で利用されている周波数帯は、特定の周波数帯に集中している。さらに、通信サービスごとに利用する周波数が規定されているため、サービスとともに通信料が増加するにすぎない、今後新規に利用できる周波数帯域が不足するという周波数資源の枯渇が問題視されている。その解決策として、コグニティブ無線[1]が注目されている。コグニティブ無線とは、端末や基地局などの無線機が周囲の電波状況を監視し、電波環境に応じて、周波数や通信方式などを無線機自らが選択し、通信を行う技術のことである。この技術により、他の無線システムに干渉することなく空いている電波資源（ホワイトスペース）を利用して無線通信を行うことができる。その結果、周波数利用効率を高め、従来よりも高速で安定した無線通信が可能になると期待される。

コグニティブ無線を実現するためには、幾つかの課題が存在する。その中で重要となるのが、セカンダリ・ユーザ（SU）が通信を行う際に、プライマリ・ユーザ（PU）の通信に干渉を与えないことである。そのため、SU は、通信を行おうとする特定の周波数帯における PU の信号を高感度に検出し、その通信状況を正確に判断する必要がある。信号を検出するための方法としては、これまで、エネルギー検出法(energy detection)[2]、周期定常性特徴検出法(cyclostationary feature detection)[3]、および整合フィルタ(matched filter)を用いた方法が報告されている[4]、[5]。中でも整合フィルタを用いた方法は高感度な信号検出が可能であるが、プライマリ・ユーザに干渉を与えずにセカンダリ・ユーザが通信を行うためには、さらなる信号検出感度の向上が望まれる。

コグニティブ無線のダイナミックスペクトラムアクセス方式において、容易度高感度な信号検出が可能な最大比合成による信号検出法が高感度な信号検出であることが報告されている。しかし、この検出法は既知信号を利用するため同期による影響を受け信号検出感度が劣化する。そこで、本稿では IEEE802.11a 規格の既知信号であるパイロット信号を用いて、非同期状態で信号検出感度に与える影響を評価し、同期の必要のない電力検出との信号検出感度の比較を行う。完全に同期がとれた状態と非同期状態を比較し、約 8dB の信号検出感度の劣化を示す。また、同期の必要のない電力検出と比較し、最大比合成による OFDM パイロット信号検出法の非同期状態では、約 9.5dB 信号検出感度が高いことを示す。

## 2. 最大比合成による OFDM パイロット信号検出

### 2.1. 電力検出

従来、コグニティブ無線の信号検出法として電力検出が提案されていた[6]。電力検出では、受信した信号電力を用いることで信号の有無を判定する方式である。受信機への入力信号の状態としては以下の 2 つが想定される。

$H_0$  : 信号が送信されていない状態(PU 存在)

$H_1$  : 信号が送信されている状態(PU 存在していない)

$$H_0 : \mathbf{y}(t) = \mathbf{n}_w(t). \quad (1)$$

$$H_1 : \mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}_w(t). \quad (2)$$

受信信号を  $\mathbf{y}(t)$ 、送信信号を  $\mathbf{x}(t)$ 、雑音を  $\mathbf{n}_w(t)$  とする。電力検出値  $D_E$  は以下の式で表すことができる。

$$D_E = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \mathbf{y}(t) \mathbf{y}^*(t) dt. \quad (3)$$

ここで、 $T_s$  はある定められた観測時間である。この電力検出値は閾値を設定し、信号検出を行う。

### 2.2. 最大比合成による信号検出

本稿で行った OFDM パイロット信号を用いた信号検出法は、IEEE802.11a 規格[7]等のパイロット信号を使用する。

IEEE802.11aにおけるサブキャリアの配置を図1に示す。

最大比合成を用いたOFDMパイロット信号検出[8]では、図1に示した各サブキャリアに挿入されたパイロット信号の最大比合成をとり、4つの結果を総和することで信号の有無を判別する方式である。最大比合成を用いたOFDMパイロット信号検出値 $D_P$ は式(1)、(2)を用いて次式のように表すことができる。

$$D_P = \sum_{n=1}^N y(n) X_P(n)^* \quad (4)$$

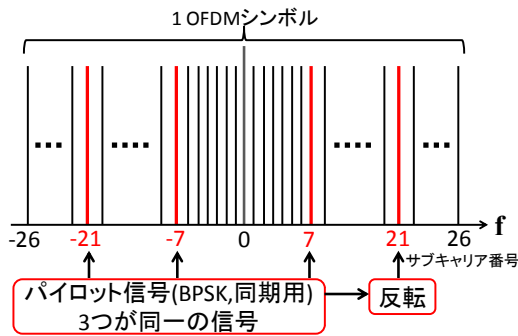


図1 IEEE802.11aにおけるサブキャリア配置

$y(n)$ は受信信号の $n$ 番目のOFDMシンボルである。 $X_P(n)$ は既知であるパイロット信号である。この検出法の特徴としては、PUが存在する場合検出値は増加し、PUが存在しない場合は電力検出と比較すると各シンボル同士が打ち消し合うためあまり増加しない。この違いを用いることで高感度な信号検出を可能にする。

しかし、最大比合成を用いたOFDMパイロット信号検出を行うには、いくつかの条件を満たす必要がある。電力検出では、受信した信号の電力を求めるだけで信号検出が可能であるが、この方式ではパイロット信号の情報を復元しなければならない。そのため、OFDMの受信機で行う処理が必要となる。

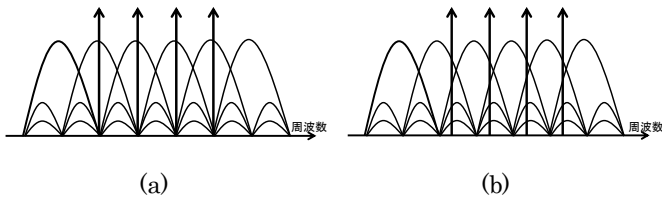


図2 周波数オフセットによる影響

- (a) 周波数オフセットが理想の場合、周波数オフセットを考慮した場合

また、OFDMは図2に示すようにサブキャリア周波数間隔が非常に狭く周波数オフセットの影響を受けやすい。そのため、わずかな周波数オフセットの影響により信号の位相が回転し、誤ったパイロット信号のデータと最大比合成をする可能性がある。次に、シンボル同期による影響を考慮する必要がある。シンボル同期は正確なFFTウィンドウを設定するために行う処理であり、FFTウィンドウがずれることでパイロット信号のデータ位置がずれてしまう。そのため、シンボル同期と周波数オフセット補正を考慮した条件で信号検出感度を評価する必要がある。

### 3. 数値解析評価

#### 3.1. 周波数オフセット補正

IEEE802.11a規格[7]では、周波数オフセット補正に用いるためにショートトレーニングシンボルとロングトレーニングシンボルという2種類のプリアンブルが存在する。本稿では、この2種類のプリアンブルを使用し、周波数オフセット補正を行う[9]。オフセット補正の方法を図3に示す。

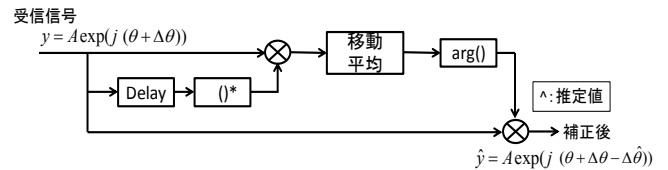


図3 周波数オフセット補正

図3の推定により周波数オフセットはある程度推定できるが、誤差が生じてしまう。その誤差を残留周波数誤差という。SNRによる残留周波数誤差を図4に示す。

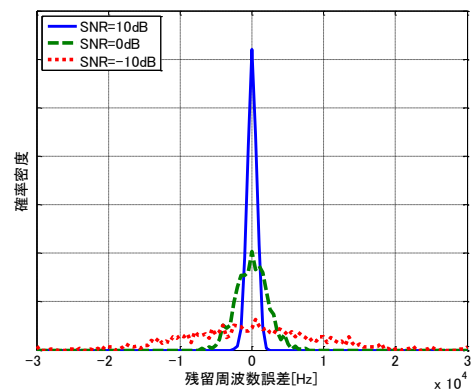


図4 残留周波数の分布

図4より SNR の劣化により残留周波数誤差の影響が大きくなる事が分かる。理論的には、1000Byte のデータ長の時、BPSK 信号が耐えうる残留周波数誤差は最大で 400Hz 程度しか耐えることができない。そのため残留周波数誤差を推定し補正を行う。残留周波数誤差の推定にはパイロット信号を用いて算出した位相差推定値を用いる[10]。パイロット信号の送信信号を  $S(k)$ 、位相補正後の  $n$  番目の OFDM シンボルにおける  $k$  番目のサブキャリアを  $D'(k)$  とおくと、 $n$  番目の OFDM シンボルにおける位相差推定値は

$$D_p = \frac{1}{4} \sum \arg(S(k), D'(k)). \quad (5)$$

と表すことができる。式(5)を用いて残留周波数誤差 1kHz の位相差を推定した効果を 図5 にパケット誤り率(packet error ratio:PER)で示す。図5より位相補正前後で改善し、理論値に近い値になる事が分かる。

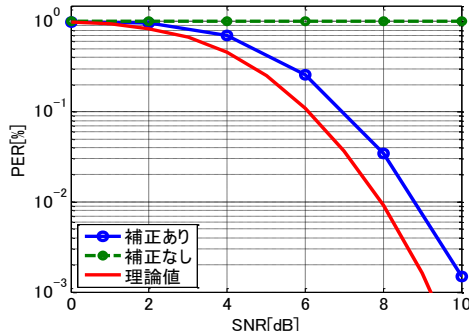


図5 残留周波数オフセット補正の効果 (BPSK 変調, 残留周波数誤差 1kHz)

### 3.2. シンボル同期

次にシンボル同期の方法について述べる。シンボル同期には、ショートトレーニングシンボルを用いてタイミングを検出する。ショートトレーニングシンボルには 10 個の同じデータパターンが送信されている。10 個のショーとトレーニングシンボルを利用して自己相関と相互相関を利用し、同期位置を判定する[11]。シンボル同期の構成図を図6に示す。

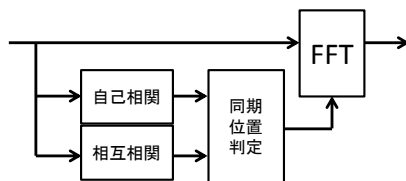


図6 シンボル同期構成図

図6の結果を図7に示す。自己相関と相互相関を掛け合わせることでショートトレーニングシンボルの最後のタイミングで鋭いピークを得ることができる。その結果を用いて周波数オフセット補正等を行う。

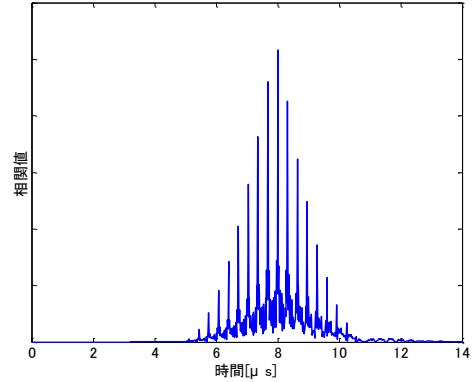


図7 シンボル同期位置判定

### 3.3. 評価方法

本稿では、信号検出確率を以下の2つで評価する。

- 誤警報(FA:false alarm)

PUの信号が存在していない時に信号が存在している誤判断する確率

- 検出見逃し(MD:misdetection)

PUの信号が存在しているときに信号が存在していないと誤判断する確率

FA, MD 率の求め方を以下の式で求める。FA は PU が存在しない場合を想定し、MD は PU が存在する場合を想定する。

$$FA = \frac{\text{閾値を上回る回数}}{\text{試行回数}}. \quad (6)$$

$$MD = \frac{\text{閾値を下回る回数}}{\text{試行回数}}. \quad (7)$$

コグニティブ無線を行う際には、SU が PU に干渉を与えないようにしなければならない。そのため、MD 率は常に低い値でなければならない。そこで、本稿では MD 率を 10% となる最大比合成値を閾値とし、FA 率の変化を調査することで信号検出感度を評価する。

## 4. 数値解析結果

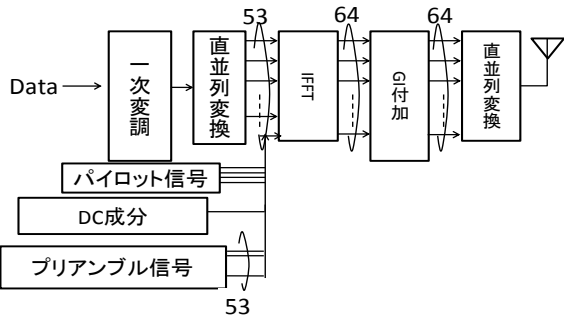
### 4.1. シミュレーション諸元

本稿で行ったシミュレーション諸元を表 1 に示す。また、送受信機の構成図を図 8 に示す。本稿では、周波数オフセット補償による誤差を CFO 誤差、シンボル同期による誤差を SS 誤差とする。CFO 誤差と SS 誤差がない状態を同期誤差なしとする。また本稿で行うシミュレーションでは、ベースバンド系で評価を行う。また、IEEE802.11a 規格[7]に準ずる。

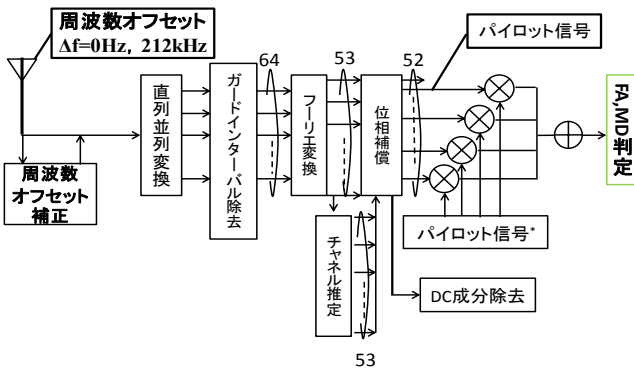
SNR は送信電力に対する雑音電力を算出している。

表 1 シミュレーション諸元

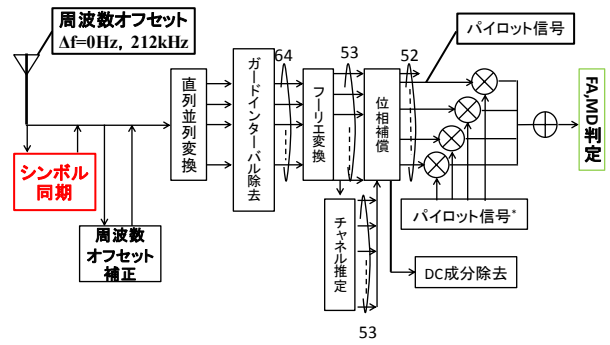
サンプリングレート	20 MHz	
1次変調	BPSK	
2次変調	OFDM	
サブキャリア数	Data: 48	
	Pilot signal: 4	
データ数	1000 Byte	
ガードインターバル長	16 samples	
プリアンブル	ショートトレーニングシンボル	161 samples
	ロングトレーニングシンボル	161 samples
周波数オフセット	0Hz, 212kHz(最大)	



(a)



(b)



(c)

図 8 シミュレーション回路図

(a)送信機構成図, (b)受信機構成図(CFO 誤差あり, SS 誤差なし),

(c)受信機構成図(CFO 誤差あり, SS 誤差あり)

### 4.2. CFO 誤差による影響

4.2 では図 8(b)に示す受信機を用い、SS 誤差なしの条件でシミュレーションを行う。

初めに、周波数オフセットを挿入した場合について評価を行う。周波数オフセットは最小値である 0Hz と IEEE802.11a 規格で設定された最大値である 212kHz でシミュレーションを行う。PER を図 9、図 10 では電力検出と最大比合成を用いた検出法の FA 率を比較する。本稿では、FA 率 10%における SNR により信号検出感度を評価する。

3.1 より残留周波数誤差は SNR の劣化により増大するため、図 9 に示すように周波数オフセット値によらず PER は等しく変化する。

図 10(b)より、CFO 誤差ありの場合に周波数オフセット 0Hz, 212kHz において FA 率の変動にあまり変化は見られない。これは、残留周波数誤差が SNR により決まるものであるため、周波数オフセット値は FA 率に影響を与えないと言える。また、CFO 誤差を考慮することにより、同期誤差なしと比較し約 6dB の信号検出感度の劣化がみられる。しかし、同期の必要がない電力検出との比較では約 11.5dB 高感度な信号検出が可能であることを示せた。

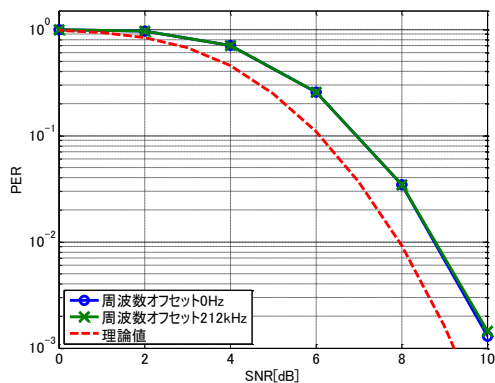
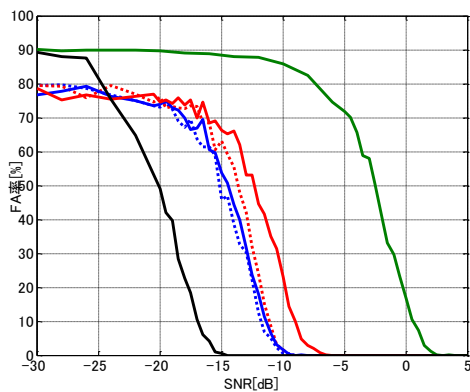
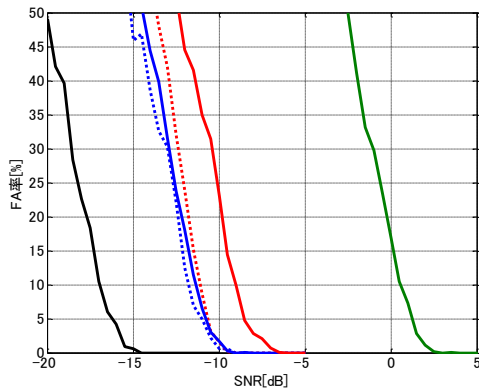


図9 SNR 対 PER

(周波数オフセット 0Hz, 212kHz 挿入)



(a)



(b)

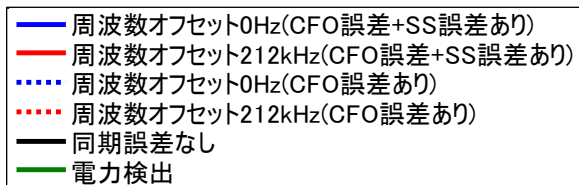


図10 SNR 対 FA 率

(a)各条件による FA 率比較, (b)(a)の拡大図

図 10(b)より, 周波数オフセット補正を考慮した場合に周波数オフセット 0Hz, 212kHz において FA 率の変動にあまり変化は見られない. これは, 残留周波数誤差が SNR により決まるものであるため, 周波数オフセット値は FA 率に影響を与えないと言える. また, 周波数オフセット補正を考慮することにより, 完全同期状態と比較し約 6dB の信号検出感度の劣化がみられる. しかし, 同期の必要がない電力検出との比較では約 11.5dB 高感度な信号検出が可能であることを示せた.

### 4.3. SS 誤差による影響

4.2 で行った CFO 誤差を考慮したうえで, SS 誤差の影響評価するために図 8(c)の受信機を用いてシミュレーションを行う. 4.2.に示す図 10 に結果を示している.

まず, SS 誤差がある状態における周波数オフセット値の影響について述べる. 周波数オフセット 0Hz では信号の位相が回転していない状態でシンボル同期を行うのであまり劣化は見られない. しかし, 周波数オフセット 212kHz を挿入すると, FA 率が大きく劣化していることが分かる. これはシンボル同期を行う際に位相回転の影響により, ショートトレーニングシンボルの相関がとれないことにより劣化である.

次に SS 誤差がない状態から SS 誤差ありの状態にすることによる劣化量である. 図 10(b)より, 約 2dB 信号検出感度が劣化していることが分かる. そして, 同期誤差なしの状態と比較すると約 8dB の劣化となる. CFO 誤差と SS 誤差ありの状態において, 同期の必要のない電力検出と比較すると最小で約 9.5dB 高感度な信号検出が可能であることが分かる.

この結果より, 同期誤差がない状態と比較すると大きな劣化が生じてしまうが, 同期の必要のない電力検出に比べ CFO 誤差と SS 誤差を考慮した場合の方が高感度な信号検出が可能であることを示せた.

## 5. 結論

本稿では、コグニティブ無線における信号検出感度についての検討を行った、周波数オフセット補正とシンボル同期を適用した時の OFDM パイロット信号を用いた信号検出感度を、計算機シミュレーションにより評価した。

その結果、周波数オフセット、残留周波数誤差、シンボル同期が信号検出感度に与える影響を評価し、同期の不要な電力検出より高感度な信号検出を得ることが出来た。

現状では、フェージング環境などを考慮せずに同期による影響を評価したため、今後はフェージング環境下における信号検出感度を評価する必要がある。

## 文 献

- [1] J.Mitola III and G.Q.Maguire Jr., "Cognitive radio : making software radios more personal," IEEE Personal Commun., vol.6, no.4, pp.13-18, 1999.
- [2] D. Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios", 38th Annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 2004.
- [3] W. A. Gardner, C. M. Spooner, "Signal interception: performance advantages of cyclic-feature detectors", IEEE Trans. on Communications, vol.40. January 1992.
- [4] T.Yucek and H.Arslan,"A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [5] D.Cabric and S.M. Mishra and R.W.Brodersen, "Physical layer design issues unique to cognitive radio systems" Proc.PIMRC 2005, vol.2, pp.759-763, Sep.2005.
- [6] H.Urkovitz,"Energy Detection of Unknown Deterministic Signal" Proc. IEEE, vol.55, pp.523-531, April 1967.
- [7] IEEE Std 802.11a-1999.
- [8] D.Cabric, A.Tkachenko, and R.Brodersen,"Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection," in Proc. Military Commun. Conf.(MILCOM), 2006,pp. 1-7.
- [9] P.Moose,"A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," IEEE Trans. Commun., vol. 42, pp.2908-2914, Oct. 1994.
- [10] K.Akita and R.Sakata and K.Sato,"A phase compensation scheme using feedback control for IEEE802.11a receiver".IEEE Vehicular Technology Conference, 2004-Fall, Volume 7,26-29 Sept. 2004 Page(s):4789-4793 Vol.7.
- [11] 旦代智哉, 佐藤一美, 行方稔, "IEEE802.11a 時間同期方式の検討", 信学総大, B-5-253, Mar. 2002.

## 本研究に対する学会発表など

### (A) 査読付き論文

なし

### (B) 査読付き小論文

Toshihiro Yoshitake, Yohtaro Umeda, "Degradation in Spectrum Sensing with Phase-aligned Vector Summation Due to Carrier-frequency-offset Correction", Triangle Symposium on Advanced ICT 2012, SJ15-WN2, Sep. 2012.

### (C) 査読なし論文

吉武 利紘, 榎田 洋太郎 小澤 佑介, "周波数オフセット補正とシンボル同期を御適用した時の最大比合成による OFDM パイロット信号検出感度評価", ワイドバンドシステム研究会(WBS)信学技報, Mar. 2014(発表予定)

### (D) 学会大会等の口頭発表

吉武 利紘, 榎田 洋太郎, "同位相ベクトル合成を用いた信号検出法の検討", The 8<sup>th</sup> IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, Poster Session C-56, Nov. 2011.

吉武 利紘, 榎田 洋太郎, "同位相ベクトル合成を用いた信号検出法の検討", 電子情報通信学会 東京支部 学生会 研究発表会, B-17-193, Mar. 2012.