

ホワイトスペース活用のための干渉リスクに基づく周波数利用技術の基礎研究

代表研究者 佐々木 重 信 新潟大学工学部 教授

1. まえがき

無線通信システムの需要は年々増加している。しかし、ほとんどの周波数帯は割り当てが決まっており、新たな需要に対して割り当てる周波数が極めて少なく、深刻な周波数不足を引き起こしている。一方で、実際の周波数利用状況をみると、周波数が「時間的」「地理的」な観点でみると100%利用されているわけではなく[1]、このような地理的、時間的に利用されていない「ホワイトスペース (White space : WS)」が多く存在すると考えられている。

近年のソフトウェア無線技術、コグニティブ無線技術[2][3]の進歩に伴い、これらのホワイトスペースを有効利用するための議論が活発になっている。このホワイトスペースを、免許を受けて運用する既存局（以下、単に既存局あるいは既存システムと呼ぶ）に有害な干渉 (harmful interference) を極力与えずに利用するための方法（周波数共用）について、技術面、規制面等での検討が進められている[4][5]。特に、現在地上波テレビジョン放送に割り当てられている周波数帯におけるホワイトスペースはTVホワイトスペース (TV white space: TVWS) と呼ばれ、注目されている。

WSの利用ではもともと既存システムに割り当てられている周波数を2次利用するため、通常の周波数利用と異なるいくつかの制約条件がある。例えばWSとして利用する周波数帯に隣接する帯域に既存システムが存在することがあり、隣接帯域への干渉をより抑える必要があること、利用する周波数帯域の状況を定期的にモニタし、既存システムの存在を検出したら速やかに運用する周波数を変更する必要があること、等である。

本研究では、既存システムへの干渉のリスクを低減し、WSの有効利用を図るための基本的手法に関する検討を行った。主に検討した項目は次のとおりである。

- ① 既存信号を検出するためのスペクトルセンシング法の検討を行った。特にTVWSを対象としたTV信号の特徴検出に関する研究を進めた。
- ② WS利用における隣接周波数帯域への干渉に関する検討を行った。最近の無線システムで多く採用されているOFDM（直交周波数分割多重）信号を前提とし、変調パラメータ、パイロットキャリアの配置などによる隣接帯域への干渉の影響の違いを明らかにした。
- ③ WS利用における隣接帯域への干渉低減を目的とした変復調技術の検討を行った。OFDM（直交周波数分割多重）変調の利用を前提とした1次変調、符号化技術の検討を進めた。
- ④ WS利用において、スペクトルセンシングなどによる周波数利用状況の定期的なモニタを可能にするため、セル内すべての無線機器が電波を出さないQuiet Period (QP) の導入法を検討した。特に本研究では、非同期のアクセス制御を行うIEEE802.11無線LANをターゲットとしたQPの導入法を検討し、性能評価を行った。

以下の節では、成果を公表した②、④について、具体的な検討内容と成果を述べる。

2. WSを利用した小電力無線通信における隣接チャネル干渉の影響について

WSを利用した小電力の無線通信システムを運用する際に最も問題となるケースの一つは、既存無線システムが利用している周波数に隣接する周波数で運用する場合である。この際には隣接する既存無線局から干渉を受けるリスク（被干渉）と、既存無線局に干渉を与えるリスク（与干渉）がある（図1）。与干渉の場合は、小電力無線通信局（LPC局）の送信電波が近隣の既存局の受信局に干渉を与える場合である。このとき、遠方からの既存局の信号に対し、干渉信号は相対的に大きなものになってしまうので、チャネルが異なってもスペクトルの広がりによって、干渉となる。逆に被干渉の場合、LPC局が近隣の放送側送信局の干渉を受ける可能性がある。

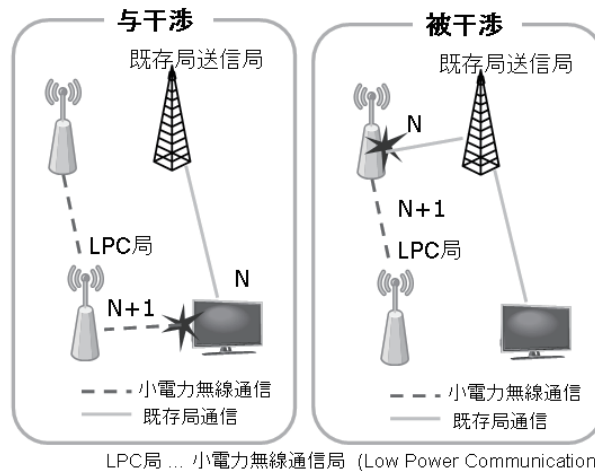


図1 ホワイトスペース利用における干渉問題

本研究では、WS を利用する小電力広域無線伝送システムについて隣接チャネル干渉の影響がある状態での誤り率特性について検討する。我々はこれまでに、OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)を用いた共同利用型の小電力ブロードバンド無線伝送システムに関する検討を進めてきた[6][7]。ここでは、屋外での運用において、ある程度小さな送信電力で広いカバー範囲(100mから1km程度、伝送速度と送信電力に依存)をもつデータ通信ネットワークの可能性を論じた。本研究ではこの研究をベースに、もとのWSで運用するOFDMを用いた小電力広域無線伝送システムの隣接チャネル干渉の評価とその軽減法について、主にOFDM変調のパラメータに焦点を当てて検討する。

2-1 ホワイトスペース利用と隣接チャネル干渉

WSを二次利用する小電力無線通信局(LPC局)は、例えば図1で示すように、チャンネルN(Ch N)を使用している既存システムの隣接チャンネルであるチャンネル(N+1)(Ch(N+1))を小さな送信電力で利用する可能性がある。既存局は比較的大電力で利用されるため、Ch Nで運用している場合、相互干渉を避けるためにもCh(N+1)を利用するケースは極めて少ないと考えられる。そのため、LPC局はCh Nをセンシングし、Ch Nが既存システムにより使用されていれば、Ch(N+1)を利用できる可能性がある。この時、LPCシステムと既存システムとの間で以下に示す干渉のリスクが問題となる。

- ① 既存システムのサービスエリア内でLPCシステムが受ける干渉(被干渉)
- ② 既存システムのサービスエリアの境界付近でLPCシステムにより既存システムの受信機が受ける干渉(与干渉)

電波利用の面からは②の与干渉の方が問題となる。例えば、LPC局がCh(N+1)を送信電力0.01Wで利用する場合を考える。この場合、隣接チャンネルであるCh Nではあらかじめスペクトルマスクの定め、それに応じて帯域外の放射を減衰させる必要がある。ここでは、搬送波周波数に対してLPC局がある周波数チャンネルCh(N+1)を利用した場合、それに隣接するCh Nでの各距離の放射電力スペクトル密度を、隣接チャンネルにおける減衰量を30dB、55dBとした場合についてそれぞれ表1、表2に示す。なお、1チャンネル当たりの帯域幅は5MHzと仮定し、減衰は自由空間伝搬損失の式に従うものとした。表に示す各放射電力がLPC局から既存局への与干渉となる。また、この時、逆に既存局Nchの信号は(N+1)chを使用しているLPC局の通信に干渉を与える(図1被干渉)。

UHF、VHF帯域は無線LANなどが利用する2.4GHz帯に比べ電波の減衰が小さく、小さな送信電力でも広い範囲をカバーできる。送信電力をある程度低くすることで機器の低コスト化や免許不要ベースでの運用が期待できる。しかし表1、表2より、隣接チャンネルで運用される既存システムへの干渉を抑えるためにはより厳しいスペクトルマスクが要求されることがわかる。

表1 LPC局の隣接チャンネル干渉(30dB減衰)

距離 [km]	干渉電力密度[dBm/MHz]		
	200MHz	600MHz	2.4GHz
0.1	-152	-161	-173
0.5	-166	-175	-187
1	-172	-181	-193
5	-186	-195	-207
10	-192	-201	-213

表2 LPC局の隣接チャンネル干渉(55dB減衰)

距離 [km]	干渉電力密度[dBm/MHz]		
	200MHz	600MHz	2.4GHz
0.1	-127	-136	-148
0.5	-141	-150	-162
1	-147	-156	-168
5	-161	-170	-182
10	-167	-176	-188

2-2 OFDMを用いた小電力無線通信システムにおける隣接チャンネル干渉

前節で論じたように、WSを利用した小電力無線伝送では、隣接チャンネルへの干渉を極力少なくするために、より厳しいスペクトルマスクが必要となることがわかる。本研究では図2に示すOFDM(直交周波数分割多重)変調によるシステムを考え、隣接チャンネルからの干渉の影響を考察する。想定したシステムパラメータを表3にまたバンドプランを図3に示す。周波数帯としては174-216MHz(7-13ch)[7]を想定し、1チャンネルの帯域幅を5MHzとした。マルチパス通信路モデルとしては中程度の距離の屋外無線伝送を想定したIEEE802.22 channel model A[8]を用いた。

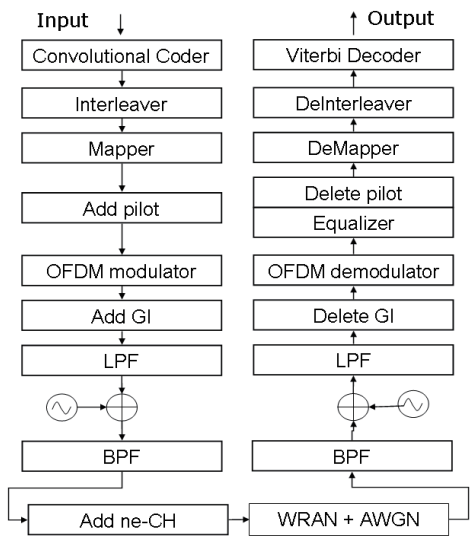


図2 システムモデル

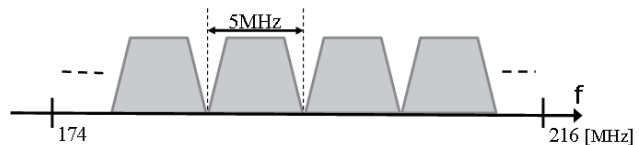


図3 バンドプラン

表3 システムパラメータ

パラメータ	値
帯域	174-216MHz
CH 帯域幅	5MHz
誤り訂正	畳み込み符号
一次変調	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
二次変調	OFDM
変調速度	3.57M baud
送信電力	1W, 0.1W, 0.01W

ここでは隣接チャンネルの干渉を軽減するために、次のOFDMの技術的要素について検討した。

(1) サブキャリア構造

本研究で想定したOFDM信号のサブキャリアの配置(周波数軸上)を図4に示す。既知信号である pilot

carrier は data carrier 間に均等に配置し、受信時に同期、推定のために使用される（本研究では同期は完璧に取れるものとして、推定にのみ使用する）。guard carrier（電力ゼロ）は CH の両端に複数本配置され、隣接チャネル干渉を軽減するために挿入される。

(2) パイロット配置

高い伝送速度を確保するためには、data carrier を多くし、pilot carrier は極力少ないことが望ましい。スカッタードパイロット(Scattered Pilot) シンボル配置 (SP) はパイロットシンボル配置方法の一つであり、図 5 に示すようにパイロットシンボルを送信データシンボルに分散して配置することにより、伝送効率を損なうことなく効率的に等価を行うことを目的としている。受信側では、複数シンボルに分散配置されている pilot carrier をまとめ、一つのパイロット系列として、等化に用いる（時間方向の補間）。

また、時間軸上全てのパイロットパターンが同じものをここではコンティニユアス (Continuous Pilot) パイロットシンボル配置 (CP) と表現する。

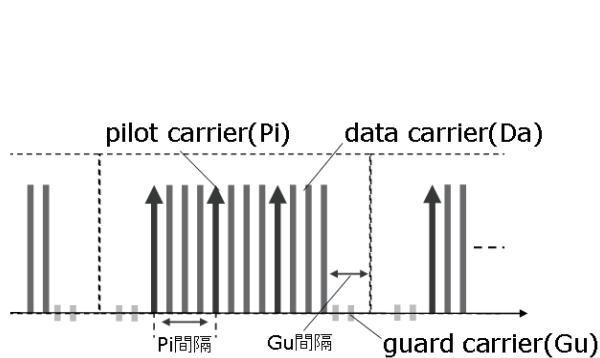


図 4 OFDM サブキャリア構造

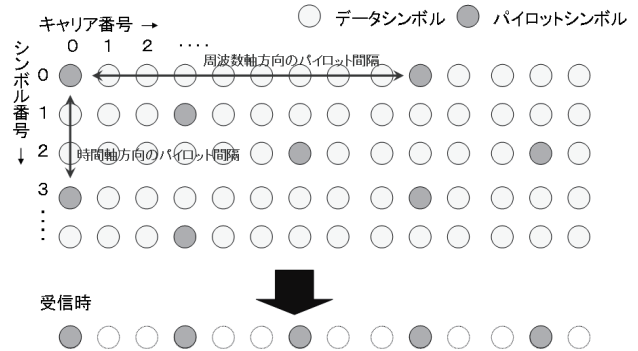


図 5 スカッタードパイロット配置

2-3 伝送特性の評価と考察

表 4 シミュレーション諸元 1

パラメータ	値
帯域	5 MHz
GI 長	1/8 (Cyclic Prefix)
誤り訂正符号	畳み込み符号 ($r = 1/2, k = 7, puncturing$)
復号方法	Viterbi algorithm (軟判定)
中心周波数	180 MHz
LPF, BPF	Root Raised Cosine ($\alpha = 0.5$)
FFT	512, 1024, 2048
サブキャリア	(Dc, Pc, Gc) = (12, 1, 3)
通信路	IEEE802.22 Channel model A +AWGN

* (Dc, Pc, Gc) … (data carrier, pilot carrier, guard carrier) の割合

表 5 シミュレーション諸元 2

一次変調				
Mode	変調	Eb/No[dB]	符号化率	速度(Mbps)
1	QPSK	13	1/2	3.28
2	16QAM	25	3/4	9.84
3	64QAM	35	3/4	14.76

シミュレーションにより伝送特性の評価を行う。図 6 のように測定信号の両端の CH に隣接チャネル干渉として、測定信号と同じ伝送方式 (OFDM 信号) の干渉信号を挿入するモデルを考える。

シミュレーション諸元を表 4, 5 に示す。ここで D/U 比を測定信号と干渉信号のレベル比として、以下の式

で定義する.

$$D/U = \frac{std[Desired\ symbol]}{std[Undesired\ symbol]}$$

AWGN については, 表 5 にあるように各一次変調方式で干渉信号がない状態で BER=10⁻⁵ を満たす E_b/N₀ (ビットエネルギー対雑音電力密度比) を設定する.

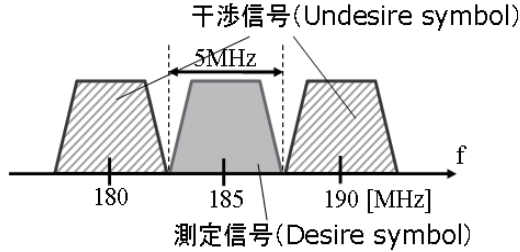


図 6 シミュレーションで想定したバンドプラン

(1) FFT 点数の影響

図 7 に示すように OFDM の場合, FFT 点数を上げることでスペクトルの広がりを抑えることができる. 表 6 に各 FFT 点数における隣接チャンネルでの減衰量をシミュレーション上で測定したものをまとめる. 表に示すように 512 点と 2048 点では, 隣接 CH の中心周波数での減衰量が約 7 dB 異なる.

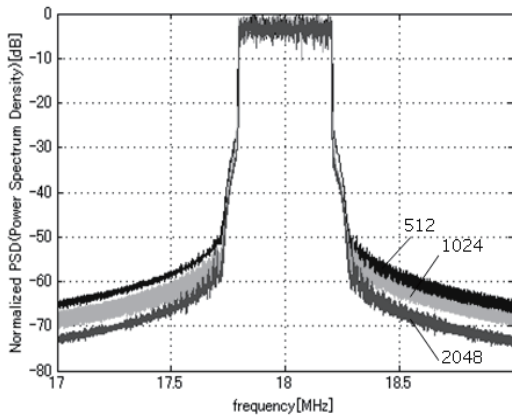


図 7 FFT 点数とスペクトル

表 6 FFT サイズと隣接チャンネルにおける減衰量

FFT size	減衰量 [dB]
512	59.0
1024	62.2
2048	66.3

* 減衰量は隣接 c h の中心周波数で測定

横軸に D/U 比をとり, 各一次変調方式における誤り率について, FFT 点数 512,1024,2048 の場合の誤り率を評価する. 干渉, 測定信号両方の FFT 点数を変えている. 測定信号の誤り率の結果を図 8 に示す. 各変調方式で FFT 点数を上げることで誤り率の改善が見られる. 例えば, 2048 点は 1024 点に比べ, 約 4dB の改善が見られる.

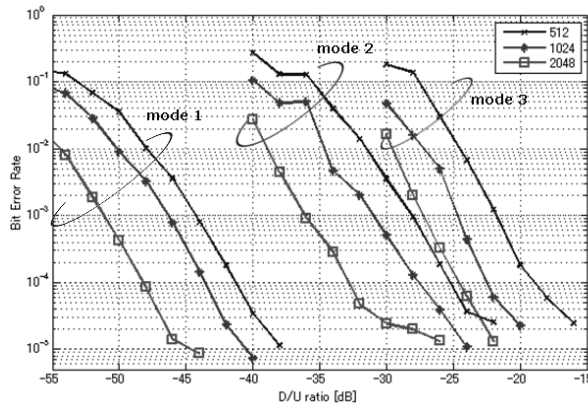


図 8 FFT 点数による比較 (被干渉, mode 1-3)

(2) キャリア構造の影響

キャリア構造の配分が特性に与える影響について検討する。まず、CHの両端に配置する guard carrier の割合を変えた場合における比較を行う。FFT 点数 1024, mode3 において、表 7 に示すキャリア構造における誤り率特性を図 9 に示す。図 9(a)では被干渉として、測定信号の構造を変えた場合、図 9(b)では与干渉として、干渉信号の構造を変えた場合の測定信号の誤り率である。結果から明らかなように guard carrier の割合を増やすことで被干渉、与干渉のどちらにおいても誤り率の改善が見られる。これは外側のキャリアが内側のキャリアに比べ、干渉の影響を受けやすいことを指している。

しかし、表 7 から明らかなように単純に data carrier を減らし、guard carrier を増やすことは実効データ速度を下げることになる。そのため、guard carrier と pilot carrier の割合を変え、速度を下げることなく特性を改善することを次に検討する。

表 7 シミュレーション諸元 3

	速度 [Mbps]	(Dc, Pc, Gc)	guard carrier 間隔 [KHz]
Case-1	15.0	(768, 64, 192)	468.8
Case-2	14.1	(720, 60, 244)	595.7
Case-3	13.1	(672, 56, 276)	722.6
Case-4	12.2	(624, 52, 348)	849.6

* guard carrier 間隔は、CHの境界と最端の data carrier の周波数軸上での間隔を指す(図 4)。

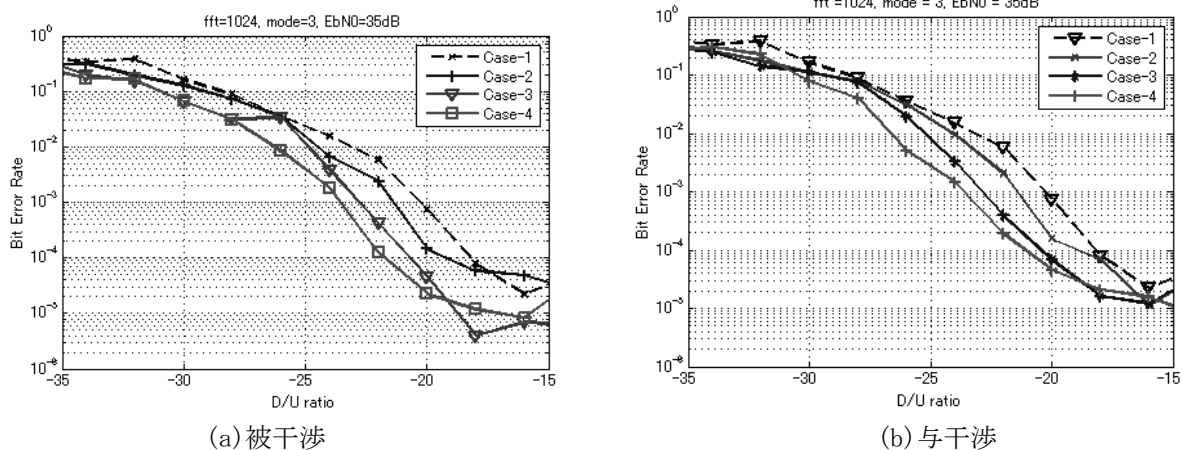


図 9 guard carrier による誤り率特性の比較 (FFT 点数 1024, mode3, 64QAM, $E_b/N_0 = 35\text{dB}$)

表 8 に示すように同一速度で pilot carrier と guard carrier のキャリア配分を変えた場合における誤り率を図 10 に示す。ここでは、2-2(2)節で述べた SP 配置を用い、1 シンボル当りの pilot carrier を減らし、guard carrier を増やすようにする。

表 8 シミュレーション諸元 4

Case	速度 [Mbps]	(Dc, Pc, Gc)	Pc 配置	Pc 間隔 [KHz]	Gc 間隔 [KHz]
Case-5	14.1	(720, 120, 184)	CP	29.3	449.2
Case-6	14.1	(720, 60, 244)	CP	58.6	595.7
Case-7	14.1	(720, 60, 244)	SP (2sym)	58.6 (29.3)	595.7
Case-8	14.1	(720, 30, 274)	SP (2sym)	117.2 (58.6)	668.9

* CP...Continuous Pilot 配置

* SP...Scattered Pilot 配置, () はまとめるシンボル数を示し, Pc 間隔の () は等化時の Pc 間隔を示す。

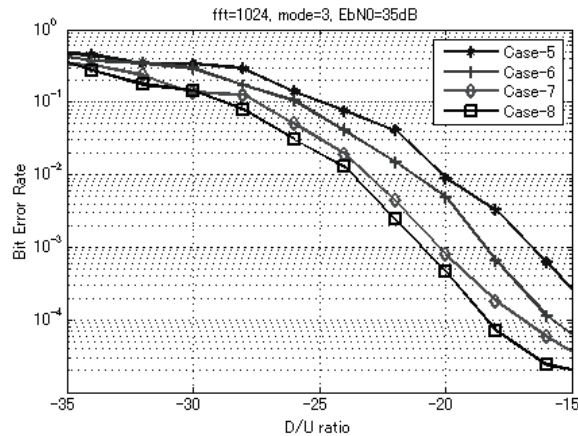


図 10 キャリア構造による誤り率特性の比較
(被干渉, FFT 点数 1024, mode3, 64QAM, $E_b/N_0 = 35\text{dB}$)

Case-5 と Case-6 を比較すると, pilot carrier を増やした Case-5 よりも guard carrier を増やした Case-6 の方がより良い誤り率特性が得られる. Case-7 では, SP 配置を用い, pilot carrier, guard carrier 両方を増やし (Case-5 と-6 の組み合わせ), さらに誤り率を改善できる. また, Case-8 のように, guard carrier を優先して増やした方が良い誤り率特性を示しているので, guard carrier を増やすことが誤り率の改善に繋がるといえる.

3. IEEE802.11 無線 LAN における WS 利用のためのアクセス制御

WS においてはスペクトルセンシングや周波数利用データベースの参照などの手段により選択した周波数で運用する際, その状況を定期的にモニタする必要がある. 例えば米国における TVWS の規制においては, 運用するチャンネルの空き状況を定期的にチェックすることが必要とされている. その際データを送受信しては正確にモニタすることができない.

TVWS を利用する無線システムの一つとして標準化が進められている IEEE802.22 地域無線ネットワーク (WRAN) [10][11]では, セル内の基地局とユーザ用通信設備が電波を出さない Quiet Period (QP) の導入が検討されている. IEEE802.22 では基地局とユーザ用通信設備が同期して動作する集中制御が基本であり, QP の導入は比較的容易である. 一方, 無線 LAN の標準である IEEE802.11[12][13]では, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) による非同期分散制御を基本としているため, QP 導入には工夫を要する. また QP を導入したとしても, システムの全体のスループットの低下やシステムの遅延が懸念される. 一方で 802.11 はすでに無線 LAN の標準方式として広く利用されており, 現行規格からの変更が少ないことが望ましい.

本節では, 無線 LAN がホワイトスペースを利用する際に運用するチャンネルの空き状況を間欠的にセンシングするための QP を導入したアクセス制御法の検討について述べる. 我々は既にこのような課題に対し, IEEE802.11 無線 LAN のオプションである集中制御 (PCF) 期間における QP 導入についての検討 [14]を行ってきた. これを踏まえ, [14]では考慮していなかった隠れ端末問題や伝送誤りによる影響を考慮した性能評価を行った.

3-1 IEEE802.11 無線 LAN におけるアクセス制御

QP 導入の方法について説明するに当たって, まずは無線 LAN のアクセス制御方式の概要について述べる. 無線通信においては, 通信路誤りによってデータが正しく送信されない可能性があるが, 802.11 では, データが壊れた場合はデータの送信元が再送することで, 誤りを回復させる. 受信側は誤りなくデータフレームを受信した場合, 図 11 に示すように受信側は送信元に対し確認応答 (ACK: Acknowledgment) フレームを返す. 送信元は, 受信側からこの ACK フレームが返ってこない場合データが失われたと判断し, 再送しなければならない.

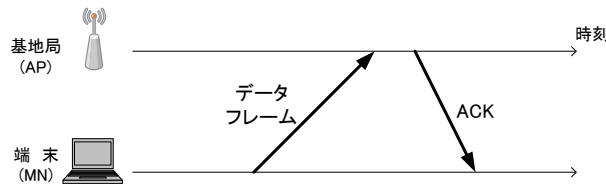


図 11 802.11 におけるデータ伝送の基本動作

802.11 におけるアクセス制御は、大きく分けて 2 種類ある。ひとつは、DCF (Distributed Coordination Function, 分散制御) と呼ばれ、もう一つは、PCF (Point Coordination Function, 集中制御) と呼ばれるものである。802.11 においては DCF を必須としており、PCF をオプションとして用意している。以降で、この DCF と PCF について説明する。

(1) DCF (分散制御)

DCF はデータの衝突を前提とした制御であるが、データ衝突の確率を低減させるため、CSMA/CA (carrier sense multiple access/collision avoidance) による制御を基本としている。CSMA/CA に基づく制御方式は自律分散型の制御であるため、そのままでは全端末が同期して Quiet Period を挿入するのは困難である。

(2) PCF (集中制御)

PCF は、ポーリングを用いた集中制御による制御方式である。これは先述した DCF とは異なり、ポイントコーディネータ (PCF の制御をつかさどる無線局、通常は基地局) により許可された端末のみがデータを送信できる方式である。そのため、ポイントコーディネータにより全端末を制御することが容易である。したがって、一般に衝突も発生せず、全端末に対し Quiet Period を導入することは DCF より容易である。

(3) Quiet Period の導入[13]

前述したように、DCF による制御期間 (CP) で Quiet Period を導入するのは困難であるが、PCF による制御期間 (CFP) では比較的容易である。PCF を用いる際は、DCF と交互に用いる。PCF による制御期間を CFP (Contention Free Period) と呼び、DCF による制御期間を CP (Contention Period) という。一般的に、CP と CFP は図 12 に示すように周期的に繰り返される。

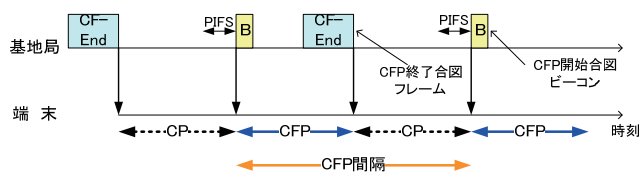


図 12 DCF と PCF の共存

CFP 開始目標時刻になると、ポイントコーディネータは「これから PCF による制御が始まる」という情報を含むビーコンを各端末に送信する。しかしこのビーコンよりも優先して送るべきフレームがある場合 (データフレームに対する ACK や、RTS に対する CTS など) がある場合や、DCF によるデータ送信が CFP 開始目標時刻よりも延長して行われた場合、CFP が短縮される。

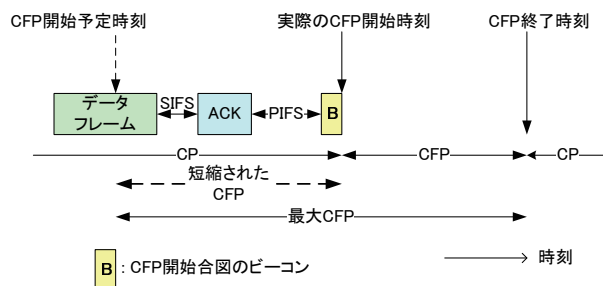


図 13 CFP の短縮

文献[14]では、CFP においてネットワークに存在しない端末に対し送信許可を与え、ほかの端末のデータ

送信を停止させることにより QP を挿入する手法を提案した. その具体的な通信手順は以下のとおりである :

1. CFP の冒頭で, ネットワーク内に存在しない端末に対し送信許可を与える
 - 送信が許可された端末はネットワーク上に存在しないため, データ通信は行われず Quiet Period が開始される
2. 所望の Quiet Period を確保し終えたら, PCF による通常のデータ通信を開始する (すなわち, ネットワーク上に実在する端末に対し, 送信許可を与える)
3. CFP が終了し, CP に移行する

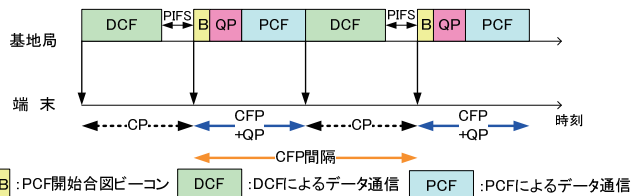


図 14 Quiet Period の導入方法

本方法による Quiet Period の導入には, 以下のような特徴がある :

- 現行の無線 LAN 規格 (IEEE802.11) と, ある程度互換性を持たせることができる
- Quiet Period を CFP 開始直後に設けることで, 確実に Quiet Period を確保できる
- Quiet Period 終了後, 残りの CFP 期間で通常のデータ通信を行うことにより, Quiet Period 導入による損失を補うことができる

3-2 隠れ端末と伝送誤りの問題

ランダムアクセスを行う無線 LAN において, 隠れ端末の存在と伝送誤りはその性能に大きな影響を及ぼす. 本節では, 前節で述べた文献[14]に基づく Quiet Period を導入した無線 LAN における隠れ端末と伝送誤りの問題について述べる.

(1) 隠れ端末の問題

CSMA/CA において問題となるのが, 隠れ端末の存在である. 隠れ端末とは, 端末の通信距離や遮蔽物の存在などにより, 互いに信号が届かずキャリアセンスできない端末のことである. キャリアセンスができなければ, 本当はビジー状態であってもアイドル状態と判断してデータを送信してしまい, 受信側で衝突してしまう. ゆえに, 隠れ端末が存在すると, スループット低下や応答遅延が生じやすくなる.

先述したとおり, キャリアセンスだけでは隠れ端末によるデータ衝突の可能性が高まる. そこで, その可能性を低減させる手段として, データ送信前に RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send) 信号をやりとりする方法がある. 具体的な通信手順は以下のとおりである :

- ① データを送信したい端末は, 基地局に RTS を送信する.
 - 基地局以外の端末は, RTS に記載されている期間だけデータ送信を延期する
- ② 基地局は RTS を送信した端末に対し, CTS を送信する.
 - 基地局以外の端末は, CTS に記載されている期間だけデータ送信を延期する
- ③ データを送信したい端末は, CTS を受信した後データを送信する.

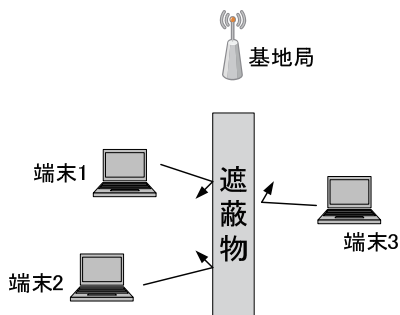


図 15 隠れ端末

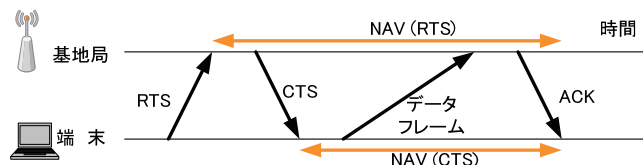


図 16 RTS/CTS 使用時の通信手順

(2) 伝送誤りにより生じる問題

伝送誤りが発生すると, まず通常のデータ通信が失敗するので, スループット低下や応答遅延が発生する.

加えて、もし CFP 開始のビーコンが誤っていた場合、図 17 に示すように Quiet Period 開始時刻が開始目標時刻よりも遅延する可能性がある。その様子は次のとおりである。

- ① ビーコンを正しく受信できないので、端末は CFP に移行したことを認知できず、CP 状態を維持
- ② ポイントコーディネータは、正しく CFP に移行できていない端末があることを認識できないので、通常通り端末に通信許可を与えるフレーム (CF-Poll) を送信
- ③ CFP に移行していない端末が CF-Poll フレームを受信すると、通常の ACK フレームを返信する
- ④ CFP での確認応答フレームは CF-ACK であるので、通常の ACK とは異なる
- ⑤ ポイントコーディネータが通常の ACK を受信することにより、CFP に正しく移行できていない端末が存在することを検知する。
- ⑥ このような場合、ポイントコーディネータは全端末に CF-End (CFP を終了する信号) を送信した後、再び CFP を開始するビーコンを送信する

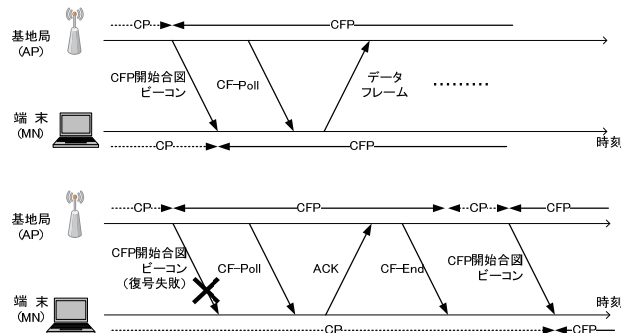


図 17 CFP 開始直後の通信手順

3-3 シミュレーションによる評価・考察

上記の方法で Quiet Period を導入した無線 LAN に対して隠れ端末や伝送誤りの存在が及ぼす影響について、スループット特性・応答遅延特性および、実際に確保できた Quiet Period 挿入間隔の特性の面からシミュレーションによる評価を行った。ここでは図 18 のように、端末 1・2・3 と端末 4・5 の間に距離があり、カバーエリアから外れている状況を想定する。すなわち (端末 1・2・3) ⇔ (端末 4・5) の通信はできない。しかし、全端末は基地局をカバーしており、(全端末) ⇔ (基地局) の通信は可能である。また、端末 1・2・3 相互間、端末 4・5 相互間の通信も可能である。また今回のシミュレーションでは、Quiet Period の期間を 10ms に固定し、その QP を 300ms 間隔で挿入することを基準とした (図 19)。表 9 に主なシミュレーション諸元を示す。これ以外の値はすべて本稿では現行の無線 LAN 規格の一つである IEEE 802.11a に準拠して各種パラメータを設定した。

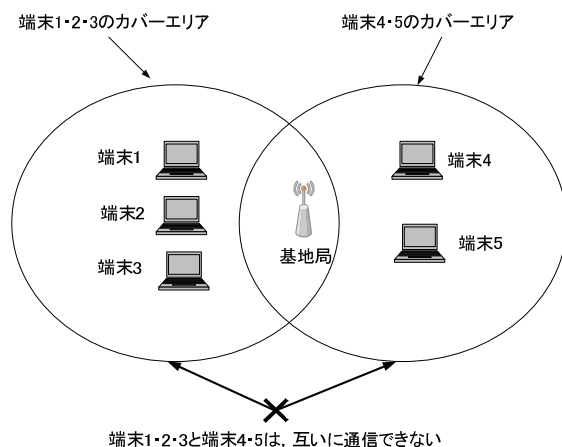


図 18 隠れ端末モデル

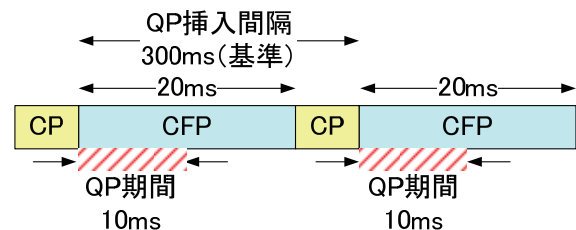


図 19 CP・CFP と QP のタイムチャート

表 9 シミュレーション諸元

無線 LAN システムモデル	IEEE802.11a
データフレームサイズ	1500Octets
伝 送 速 度	54 Mbps (データフレーム) 24 Mbps (データフレーム以外)
RTS/CTS フレーム	データフレーム送信前に付加
伝 播 遅 延	なし
伝送誤り発生時の シンボル誤り率 (SER)	10^{-5} (54Mbps 伝送時) 10^{-20} (24Mbps 伝送時) 注 ¹
チャンネル数	1
ビーコンフレーム長	14 Octets
ビーコン間隔	100 ms
QP の目標挿入間隔	300 ms
QP 期間	10 ms
端 末 数	5
再送回数上限	10 回
データ発生過程	端末側：ポアソン過程 基地局：なし注 ²
ネットワークモード	インフラストラクチャモード
観 測 時 間	60 sec

(注 1) 伝送速度により、異なる通信方式・符号化率が定められている。54Mbps で伝送時の SER が 10^{-5} であるとき、同じ送信電力で 24Mbps 伝送を行うと SER は約 10^{-20} となる。

(注 2) データは発生しないが、ACK、ビーコンなどは発生する。

(1) スループット特性

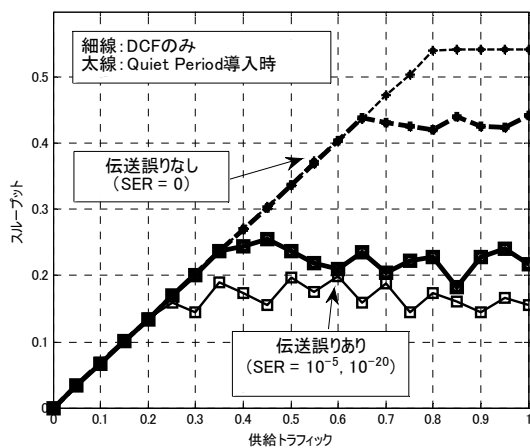


図 20 隠れ端末があるときのスループット特性

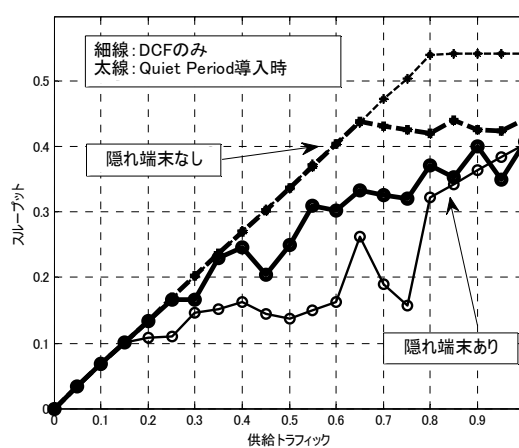


図 21 伝送誤り存在時のスループット特性

図 20 に、前節で述べたシナリオで隠れ端末の存在を考慮した場合のスループット特性を示す。供給トラフィック及びスループットは最大通信速度 54Mbps で正規化してある。隠れ端末の影響により、QP の有無にかかわらずスループットの低下がみられる。QP を導入すると隠れ端末が存在しない状況ではスループットが低下するが、隠れ端末が存在する状況では逆にスループットの上昇がみられる。これは、QP を挿入するために導入した PCF 区間におけるデータ送信は隠れ端末の影響を受けないため、その分がスループットの上昇に寄与しているものと考えられる。

図 21 に、伝送誤りを考慮した場合のスループット特性を示す。図 20 の場合と同様、供給トラフィックおよびスループットはともに 54Mbps で正規化してある。伝送誤りがある場合、QP の有無にかかわらずスループット

プットが低下している。これより、比較的小さな伝送誤りでも、スループット特性に大きく影響することがわかる。一方でQPを導入した場合、伝送誤りが存在する状況下でもDCFのみの場合に比べてわずかではあるがスループットが増加していることがわかる。

(2) 応答時間特性

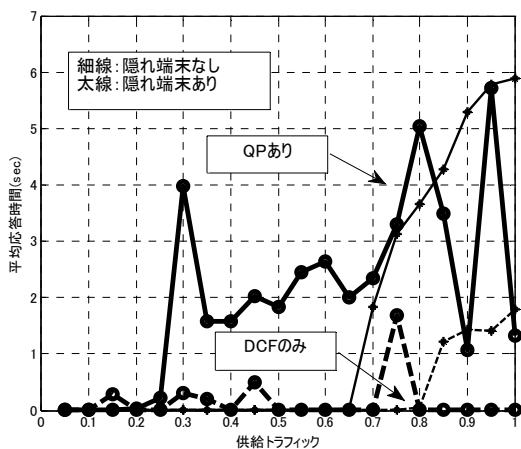


図 22 隠れ端末存在時の応答時間特性

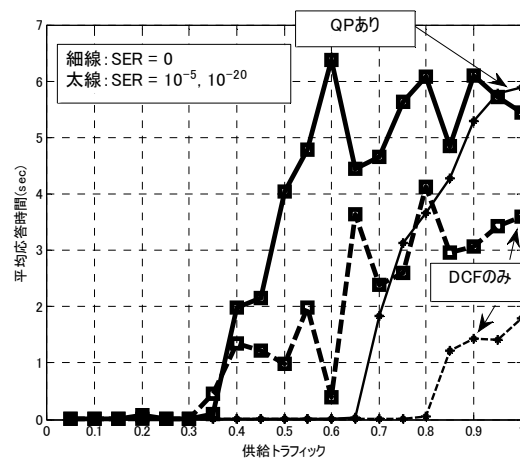


図 23 伝送誤り存在時の応答時間特性

図 22 に、隠れ端末が存在するときの応答時間特性、図 23 に伝送誤りがあるときの応答時間特性をそれぞれ示す。これらより、以下のことが分かる：

- 隠れ端末・伝送誤りの有無にかかわらず、QPを導入すると応答時間が上昇する傾向がみられる。
- QPの有無にかかわらず、伝送誤りを考慮すると応答時間が上昇する傾向がある。隠れ端末を考慮しても上昇するが、伝送誤り存在時ほどの上昇ではない。

文献[14]によれば、QPの導入によりスループット特性の低下及び応答遅延特性の上昇が見られるが、PCFによるデータ送信期間を十分に取ることである程度改善されることがわかっている。そのためQPとPCF区間の配分についての検討を今後進める必要がある。

(3) Quiet Period 間隔

Quiet Periodの用途は帯域の定期的なモニタリングである。このモニタリングを安定して行うためには、Quiet Periodが一定間隔で定期的挿入されることが求められる。しかし本稿で前提としている無線LANのシナリオでは、伝送誤りの存在によりQuiet Periodの間隔が一定とならない恐れがある。特に前述したように伝送誤りによるQP開始時刻の遅れは、QP挿入間隔のバラツキにつながり、運用チャンネルのモニタリングに影響することが懸念される。

ある供給トラフィックを想定した場合のQP挿入間隔をシミュレーションにより評価した。図 24 に、供給トラフィック 0.2 及び 0.5 の場合におけるQP挿入間隔の累積分布を示す。図より、隠れ端末・伝送誤りの有無にかかわらず、トラフィックが増大によりQP挿入間隔が基準となる値に収まる確率が低下する傾向がみられる。また、QP挿入間隔が基準値に収まる確率が最も高いのが、「隠れ端末+伝送誤り」が存在する場合であり、最も低いのが「隠れ端末なし+伝送誤りなし」であることがわかる。これらのことから、QP挿入間隔のずれが生じる原因は、ビーコン誤りによるものでなく、DCFによるデータ送信が延長しているためと考えられる。

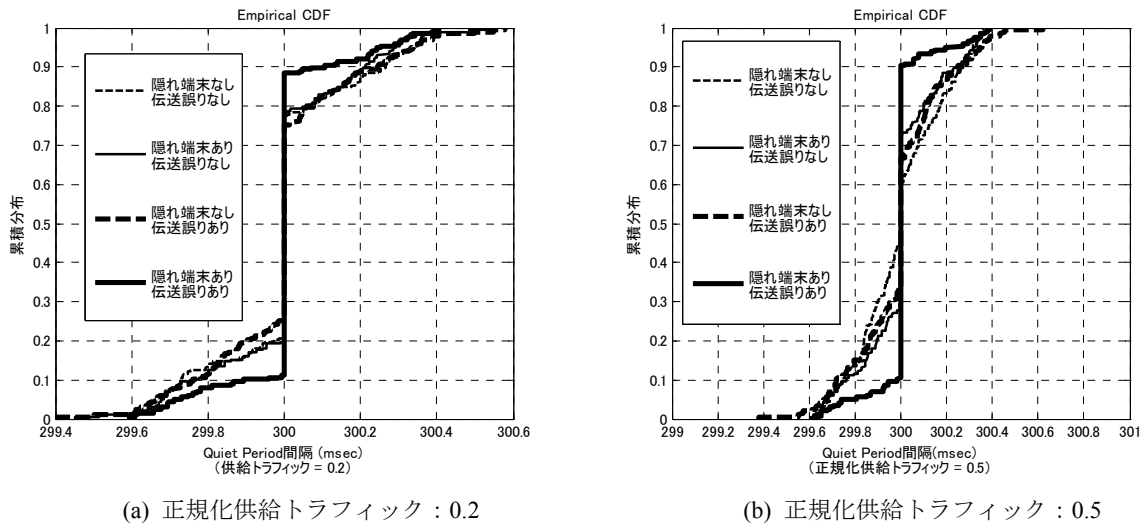


図 24 QP 挿入間隔の累積分布

4. まとめ

本研究では、既存システムへの干渉のリスクを低減し、WS の有効利用を図るための基本的手法に関する検討を行った。主な成果は次のとおりである。

- WS での利用を想定した小電力無線データ伝送における隣接チャネル干渉の影響について検討を行った。FFT 点数は点数を上げることにより、隣接チャネルの影響が低減することが分かった。また OFDM キャリア構造については、guard carrier を増やすことで改善し、スキッタードパイロットサブキャリア配置を用いることで伝送速度を下げることなく、隣接チャネルの影響を軽減できることがわかった。
- 無線 LAN の WS における利用を想定し、運用中の周波数を定期的モニタするための Quiet Period (QP) の導入法を示し、QP を導入した無線 LAN における隠れ端末・伝送誤りの影響を評価した。隠れ端末・伝送誤りの存在する条件下で QP を導入するとスループットが上昇するが、応答遅延の増加が大きいことが分かった。また、伝送誤りにより QP 間隔のばらつきも生じることが見いだされたが、DCF によるデータ送信期間の延長が原因となっている可能性が考えられ、今後検討を進める必要があることも分かった。今後、伝搬遅延の考慮や、様々な伝送誤り率を考慮した場合の性能評価を進めていく予定である。

【参考文献】

- [1] Federal Communications Commission, Spectrum Policy Task Force Report, ET-Docket No. 02-135, Nov. 2002.
- [2] J. Mitola III, G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," IEEE Personal Commun., pp. 13-18, Aug. 1999.
- [3] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 23, No. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [4] Federal Communications Commission, Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, Final Rule, Feb. 2009.
- [5] Industry Canada, Interim Technical Guidelines for Remote Rural Broadband Systems (RRBS) Operating in the Band 512-698 MHz (TV Channels 21 to 51), Mar. 2007/
- [6] 佐々木重信, 児玉研二, "小電力広域ブロードバンド無線通信システムに関する一検討," 信学技報, SR2009-59, Jan. 2010.
- [7] 大野智博, 佐々木重信, "小電力広域無線データ伝送における符号化変調の適用に関する一検討," RCS2010-134, Oct. 2010.
- [8] 児玉研二, 佐々木重信, "ホワイトスペースを用いた小電力無線データ伝送における隣接チャネル干渉の影響について," 信学技報, SR2010-96, Mar. 2011.
- [9] IEEE802.22 WG: <http://ieee802.org/22/index.html>
- [10] IEEE802.22 Working Group of the LAN/MAN Standards Committee, IEEE802.22-2011: Standard

ard for Wireless Regional Area Networks Part22 Cognitive Wireless RAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications : Policies and procedures for operation in the TV bands, July 2011

- [11]C. Stevenson, G. Chouinard, Z. Lei, W. Hu, S. J. Shellhammer, W. Caldwell, "IEEE802.22: The First cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard," IEEE Commun, Mag., vol. 47, No. 1, pp. 130-138, Jan. 2009.
- [12]IEEE802.11 WG: <http://ieee802.org/11/index.html>
- [13]IEEE 802.11TM-2007 Standard, IEEE, Jun. 2007.
- [14]齋藤・西田・津田・佐々木, "ホワイトスペース利用型無線 LAN における Quiet Period の導入に関する一検討," 信学技報 SR2009-103, 2010 年 3 月.
- [15]結城真澄, 佐々木重信, "隠れ端末と伝送誤りを考慮したホワイトスペース利用型無線 LAN の性能評価," 信学技報 WBS2011-15, 2011 年 7 月.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
小電力広域無線データ伝送における符号化変調の適用に関する一検討	電子情報通信学会無線通信システム研究会	2010 年 10 月
ホワイトスペースを用いた小電力無線データ伝送における隣接チャネル干渉の影響について	電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会	2011 年 3 月
隠れ端末と伝送誤りを考慮したホワイトスペース利用型無線 LAN の性能評価	電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会	2011 年 7 月