

ソフトウェア無線を用いた OFDM 協調通信方式の 基礎性能評価

向井 洋介^{1,a)} 内藤 克浩² 森 香津夫¹ 小林 英雄¹

概要: 本研究では, 提案してきた OFDM 協調通信方式の基礎的な通信性能をソフトウェア無線機器である USRP を用いて評価する. 提案方式では, OFDM の特徴である, ガードインターバル内のマルチパス信号を受信機が高精度に復調可能である点に着目してきた. 提案方式では, OFDM シンボルは受信機にてガードインターバル長内に到着する必要があるため, 異なる端末から送信される同一 OFDM シンボルの送信タイミングを自律的に制御する. 著者らは, シミュレーションによる評価により, 提案方式を採用することにより経路ダイバシチ効果が得られることから, パケット配信率の改善が見込めることを明らかにした. また, 同一 OFDM シンボルを同時に送信することにより, パケット配信遅延も削減可能であることが判明した. 一方, 実機を用いての提案方式の性能は未評価であった. 本研究では, ソフトウェア無線機器である USRP を利用することにより, 提案方式の実機上での性能を評価する. 実験結果より, 提案方式は IEEE 802.11a 標準を想定した場合にも, 通信性能を改善可能であることを示す.

キーワード: マルチホップネットワーク, 協調通信, OFDM, ソフトウェア無線, GNU Radio, USRP B200

Fundamental evaluation of the OFDM cooperative communication with software defined radio

YOSUKE MUKAI^{1,a)} KATSUHIRO NAITO² KAZUO MORI¹ HIDEO KOBAYASHI¹

Abstract: This paper evaluates fundamental communication performance of the proposed OFDM cooperative communication with software defined radio equipment USRP. The proposed scheme has focused the OFDM characteristics where an OFDM receiver can demodulate various multi-path signals within a guard interbal period. Nodes in the proposed scheme should control transmission timing autonomously to transmit same OFDM symbols from different nodes at same instance because each symbol should arrive within a guard interbal period at a receiver. We could find that the the proposed scheme can improve a packet delivery ratio by route diversity effect and packet delivery delay by simultaneous transmission in several simulation conditions. However, performance with actual devies has not been evaluated. This paper employs USRP which is one of the well-known software defined radio equipments to evaluate communication performance of the proposed scheme. The experimental results show that the proposed scheme also works well on IEEE 802.11a standard and can improve communication performance.

Keywords: Multi-hop network, Cooperative communication, OFDM, Software defined radio, USRP B200

1. はじめに

近年, 複数の無線端末がパケット中継を行い, ネットワークを構築するマルチホップネットワークに関する研究が

注目されている [1], [2]. マルチホップネットワークには様々なプロトコルが存在し, 中でも端末発見などにはフラッディングと呼ばれるデータ配信方式が利用されている. フラッディング方式は制御が簡易である一方, 全ての端末が同一の情報をネットワーク全体に再転送することから, パケット衝突や無線資源が過剰に消費されるという問題が発生する [3]. このような問題を解決する手法の一

¹ 三重大学大学院 工学研究科 三重県津市栗真町屋町 1577

² 愛知工業大学 情報科学部情報科学科 愛知県豊田市八草町八千草 1247

a) mukai@com.elec.mie-u.ac.jp

つとして、著者らは多くの無線通信機器で利用されている Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 方式の特徴に着目した OFDM 協調通信方式を提案してきた [4]. OFDM 方式では、マルチパス環境における遅延波の影響を低減させるために、データ信号の先頭部にガードインターバル (GI) と呼ばれるデータ信号の一部を加えて送信を行う。OFDM 受信機は、直接波と遅延波の到来時間差が GI 長内であれば受信信号は同一周波数成分であるため、高精度に復調が可能である。提案した OFDM 協調通信方式では、中継端末が自律的に送信タイミングを同期し、ほぼ同時に同一 OFDM シンボルの中継動作を行うことにより、各中継端末から送信された OFDM シンボルの到来時間差を GI 長内に制御する。結果として、同時に中継処理を行うことにより、利用通信資源の削減だけでなく、受信電力の増加と経路ダイバシチ効果によりパケット誤り率も改善されることが判明している。一方で、これらの評価は Qualnet や Matlab を使ったシミュレーションが主であり、実環境における提案方式の影響については未評価であった [4], [5].

OFDM 協調通信方式では、異なる中継端末間で送信タイミングを同期する必要があるため、実装では MAC 層の一部の変更が必要となる。そこで、本稿では MAC 層を自由に変更可能なソフトウェア無線機器 ある USRP を利用して、基本的な OFDM 協調通信モデルを構築する。実験結果より提案方式は実環境においても有効に動作することを示す。

2. OFDM 協調通信方式

2.1 OFDM 協調通信の概要

マルチホップネットワークが構築可能な規格である IEEE802.11a などには OFDM 変調方式が採用されている [6]. OFDM 変調方式は遅延波の影響を低減するために、データの先頭に GI を付加することで、マルチパスフェージングに対し高い耐性を有する。マルチホップネットワークにおける協調通信モデルを図 1 に示す。まず、送信元端末 S は中継端末 R にデータ信号をブロードキャストする。パケットを受け取った中継端末は受信パケットに応じた乱数を生成することにより、すべての中継端末が同一のバックオフ値を選択し、同時に同一データ信号を宛先端末 D に送信する。端末 D において、中継端末から送信されるデータ信号は同一であり、異なる通信路を通過してきたマルチパスと見なせる。OFDM 変調方式ではマルチパス信号が GI 内であれば受信側で高精度に復調できるため、中継端末が送信したデータ信号の到来時間差が GI 内であれば高精度に復調できる。提案方式を用いることにより、同一データを同時送信するため無線資源の消費を抑えるだけでなく、受信利得の増幅に伴う通信性能の向上にも繋がる。

2.2 OFDM 協調通信の自律同期制御

OFDM 協調通信には中継端末の自律的な送信タイミン

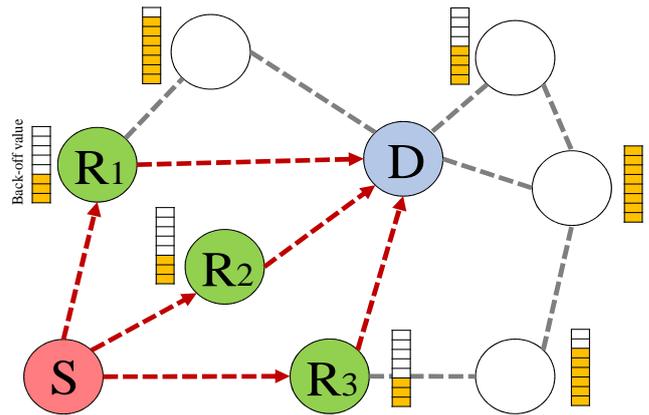


図 1 マルチホップネットワークにおける OFDM 協調通信モデル

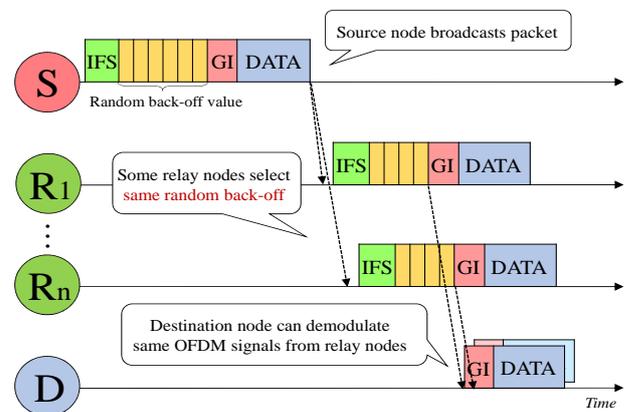


図 2 OFDM 協調通信のアクセス制御

グ同期法が必要である。図 2 は提案方式のアクセス制御メカニズムである。このメカニズムは Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) をベースとし、一部機能を拡張することにより、近傍端末の送信タイミング同期を実現する。送信元端末 S が、中継端末 R1, ..., Rn へパケットを送信する。各中継端末は送信タイミング制御において CSMA/CA で用いられているバックオフ値を初期化する。初期化には、受信したパケットに含まれる送信元アドレス、ホップ数、シーケンス番号など、パケット毎に一意となる情報が使われる。中継端末は予め共有していた乱数表を用いることで、パケットの情報に応じた乱数を選択し、同一バックオフ値を得る。そのため、各中継端末は OFDM 信号の送信タイミングを自律的に同期することができる。中継端末 R1, ..., Rn からの OFDM 信号がすべて GI 期間内に宛先端末 D に届けば、送信された OFDM 信号を正しく復調することが可能となる。

提案システムの自律的な送信タイミングの同期処理は、

CSMA/CA 処理の一部を拡張したものである。そのため、近隣で別端末が送信している場合においても、各中継端末が近隣端末の信号を受信できる場合には、パケットの送信タイミングを同期して遅延することになる。また、異なるパケットを受信した場合には、異なるバックオフ値を選択することから、分散制御による衝突回避も可能である。提案方式のアクセス制御メカニズムを以下に示す。

【アクセス制御メカニズム】

1. 近傍端末がパケットを受信したとき、各端末はアクセス制御を開始する。
2. 各端末はパケットの再送信を避けるため、自己の送信記録を確認する。受信パケットが既に転送していた場合には、パケットを破棄する。
3. CSMA/CA におけるバックオフ値を設定するために、Network Allocation Vector (NAV) を初期化する。NAV の初期化には最小コンテンツウィンドウが使われる。
4. バックオフ値の初期化として、送信元アドレス、ホップ数、パケットシーケンス番号を用いて乱数を取得する。同じパケットを受け取った端末のみ、同じランダムな値を得ることができる。その後、各中継端末は得られた同一ランダム値を、CSMA/CA 処理のバックオフ期間として設定する。
5. 各端末は近傍端末のチャンネルを観測しつづけ、通信が行われていないか確認する。もし、チャンネルが空き状態であればバックオフ期間をチェックする。
6. バックオフ期間が 0 でなければその値を減らしていく。バックオフ期間の値が 0 となったとき OFDM 信号を送信する。

3. ソフトウェア無線

2章で述べた通り、OFDM 協調通信方式を実現には MAC 層の一部を拡張する必要がある。一般的に、MAC 層は無線機器のハードウェアに組み込まれており、専用の開発環境がない場合には、拡張することが困難である。そこで、本研究ではハードウェア処理をソフトウェア処理として扱うことが可能なソフトウェア無線技術を利用する。無線機の主流の構成であるハードウェア無線機では、MAC 層で受信したパケットをフレームに分割するフレーミングまでをハードウェア処理するのが一般的である。それに対し、ソフトウェア無線機では、AD 変換後または DA 変換前のデジタル信号を全てソフトウェアで処理する。現在、ソフトウェア無線に関するツールが複数提供されているが、本稿では GNU Radio と USRP を用いたソフトウェア無線環境を構築する。

3.1 GNU Radio

GNU Radio は 2001 年に Eric Blossom が始めたオープンソースのソフトウェア無線ツールキットである [7]。GNU

表 1 USRP B200 仕様

ADC/DAC Sample Rate (max)	61.44 [MS/s]
ADC/DAC Resolution	12 [bits]
Host Sample Rate (16b)	61.44 [MS/s]
Frequency Accuracy	± 64 [ppm]
DC Input	6 [V]
Power Output	> 10 [dBm]
Receive Noise Figure	< 8 [dBm]

Radio は既存のソフトウェア無線技術と比較し、スクリプト言語である Python を用いており、実装が容易で柔軟性が高い特徴を持つ。スクリプト言語は処理が遅く、デジタル信号処理には不向きであるが、コンパイラ言語である C++ で記述されたライブラリを用いることにより、高速な処理を実現している。C++ で記述された信号処理ブロックは、それぞれ入力と出力のインタフェースを持ち、SWIG と呼ばれるラップを使って Python から呼び出すことが可能である。GNU Radio は USRP と呼ばれる無線フロントエンドとセットで用いられる。電波を送受信する場合、USRP が AD または DA 変換を行い、GNU Radio は複数の信号処理ブロックをつなげることにより、デジタル信号を処理する。

3.2 USRP B200

Universal Software Radio Peripheral (USRP) は Ettus Research 社が開発しているソフトウェア無線用のフロントエンドである [8]。USRP は、ドータボードとメインボードから構成される。ドータボードは、受信信号を中間周波数に変換し、またはメインボードから受け取った送信信号を送信周波数に変換する。メインボードでは、ドータボードからの入力信号を AD 変換し、任意の通信レートに調整する。現在、USRP は X シリーズ、Network シリーズ、Embedded シリーズが存在するが、本稿では USRP Bus シリーズである B200 を用いる。表 1 に USRP B200 の仕様を示す。USRP B200 は、低コストの実験のために開発されたソフトウェア無線プラットフォームであり、70 [MHz] から 6 [GHz] の周波数範囲を連続的に利用可能なフロントエンドを持つ。PC と USRP B200 は高速データ転送を行うために USB 3.0 で接続されており、最大サンプリングレート 56 [MHz] まで利用可能である [9]。図 3 に示すように、GNU Radio と USRP B200 のセットを 1 つの無線機として扱う。

4. 実験結果と考察

4.1 ソフトウェア無線を用いた OFDM 協調通信方式の基礎評価モデル

今回の実験では、マルチホップネットワークにおける OFDM 協調通信の評価の前段階として、USRP B200 を 2 台使い、擬似的な協調通信モデルを構築する。実験環境を図 4 に示す。各 USRP は PC と USB3.0 で接続されており、それぞれ送信機、受信機の役割を果たす。USRP B200 のク

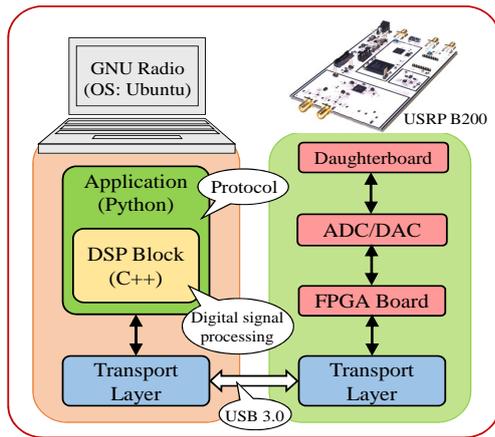


図 3 GNU Radio と USRP B200 によるソフトウェア無線機構成

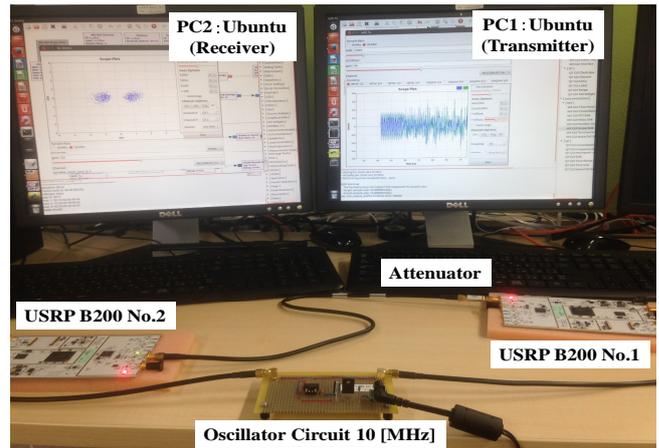


図 4 実験環境

ロック周波数を安定化させるために発振回路を作成し、外部から 10[MHz] の信号を入力する。特性評価モデルを図 5 に示す。送受信機の信号処理については、GNU Radio 向けに開発された“IEEE802.11a/g/p Receiver”をベースとし、IEEE802.11a に準拠する [10]。実環境においてマルチパスの遅延波数や遅延時間を調整することは非常に困難である。そこで、送信信号を生成した後、任意のチャンネルモデルを通過後の信号に処理し、この信号を有線ケーブルで受信機に送信することにより、擬似的なマルチパス環境を作る。また、OFDM 協調通信方式では、複数の送信端末を想定する必要があり、各送信端末と受信端末間のチャンネル状況も異なる。そこで、各チャンネルを通過した信号に遅延させ足し合わせることで、受信側で複数の中継端末から同一 OFDM 信号を擬似的に受け取る環境を作成した。

表 2 に今回の実験諸元を示す。中心周波数は 5.2[GHz]、サンプリングレート 20[Mbps] とした。OFDM 変調の FFT ポイント、サブキャリア数、GI 長の各値は IEEE802.11a 規格に従う。チャンネルモデルは静止環境におけるレイリーフェージングを想定し、電力は指数減衰、1 つの送信信号に対するマルチパス数は 8 とした。無線機器である USRP B200 を直接有線で接続すると送信電力が大きすぎるため、-30[dB] の減衰器を利用した。測定では、送信側から 100[byte] の UDP パケットを 100[ms] 間隔で 10000 回送信する。図 5 上の送信側 UDP パケット生成ブロックから受信側 UDP パケット復調ブロックまでのパケット受信率を Packet Delivery Rate (PDR) とする。

4.2 OFDM 協調通信による合成信号の受信率特性

OFDM 協調通信の動作を確認するために、PDR 特性を測定した。Delay を固定し、一波目の OFDM 信号の到来から Delay サンプル後に同一 OFDM 信号が到来するモデルである。送信電力は 34 から 56[dB] まで 1[dB] 刻みで PDR

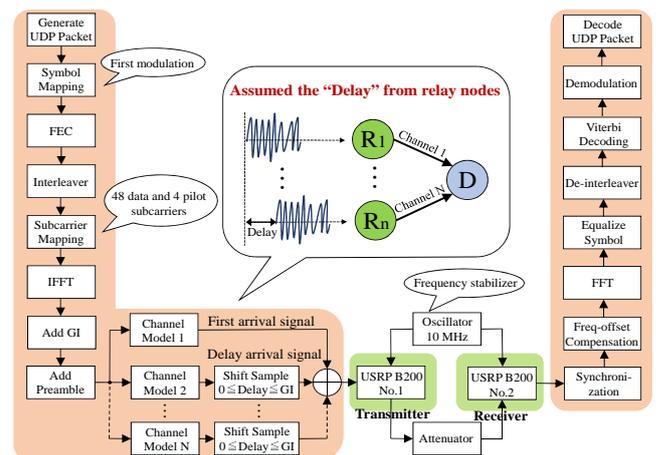


図 5 OFDM 協調通信特性評価実験モデル

を測定する。既存方式と提案方式を比較するため、受信電力は 50[dB] で固定とした。また、協調通信をしない場合とで、送信電力比がそれぞれ 2:1 となるように合成信号の振幅を調整した。

結果を図 6 に示す。OFDM 協調通信方式の場合にはしない場合と比べ、約 2.7[dB] 特性が改善されている。これは、雑音電力に対する受信電力が増加し、パケット誤り率が低減したためであると考えられる。一方で、Delay=8 の時は PDR が 75 % 程度で頭打ちとなっている。これは、フェージングの遅延波を含む第 2 波の信号が GI 長を超え、シンボル間干渉 (Inter-Symbol Interference) を起こしたためであるといえる。図 7 に ISI が生じた際の受信スキャターを示す。フェージングを含む Delay < GI であれば、BPSK の -1, +1 がきれいに分かれているが、Delay ≥ GI では、シンボル

表 2 実験諸元

PC Specification	
OS	Ubuntu 12.04 LTS
Processor	Intel Core i5-4440
Clock	3.10 [GHz]
Memory	3.8 [GiB]
Transmitter	
Device	USRP B200 No.1
Standard	IEEE802.11a
Center Frequency	5.20 [GHz]
Sample Rate	20 [Mbps]
Transmit Gain	34-56 [dB]
Modulation	BPSK (R=1/2)
Number of FFT points	64
Number of Subcarriers	52 (48 data, 4 pilots)
GI Length	16 Samples (8 [μ s])
Packet Format	UDP (100 [bytes])
Transmit Period	100 [ms]
Number of Transmit Packets	10000
Delay	0-15 samples (0-0.75 [μ s])
Receiver	
Device	USRP B200 No.2
Standard	IEEE802.11a
Center Frequency	5.20 [GHz]
Sample Rate	20 [Mbps]
Receive Gain	50 [dB] (Fixed)
Channel model	
Fading Model	Rayleigh Fading
Number of Multi-path	8
Delay Time of Each Path	4.0 [μ s]
FdTs	0 (No Doppler)
Connction	
Wired with Attenuator	-30 [dB]

間干渉により復調データに誤りが生じていることが確認できる。また、全ての結果において、53[dB] 付近から PDR 特性が少し悪くなっている。これは、受信機側のゲインを固定にしたため、送信電力の増加に伴い、受信側増幅器による非線形歪み特性が生じたためであり、提案方式による影響ではない。つまり、中継端末からのフェージングの遅延を含む信号到来遅延差が GI 長内であれば提案方式は実環境においても有効に動作することを示している。

4.3 実験結果とシミュレーションの比較

実験結果が妥当であるかを確認するために、シミュレーションと比較する。シミュレーション結果は Matlab を用いて、実験諸元と同様のパラメータで Bit Error Rate (BER) 特性を求めた。実験結果として得られた PDR を BER に換算するために式を用いた。

$$BER = 1 - (1 - PER)^{\frac{1}{Packetlength}} \quad (1)$$

信号雑音比 (Signal to Noise Ratio) は、受信側 USRP B200 上で一定時間信号のサンプルを取り、受信信号および雑音信号の平均振幅値から求めた。結果を図 8 に示す。グラフ

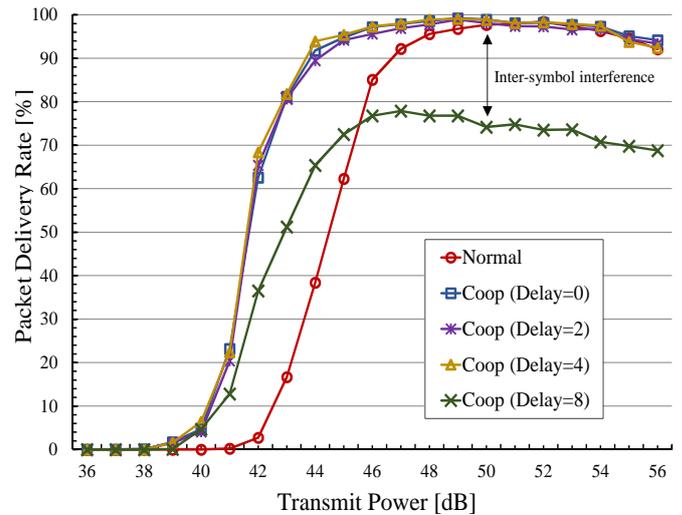


図 6 Delay を変化した際の送信電力対 PDR 特性

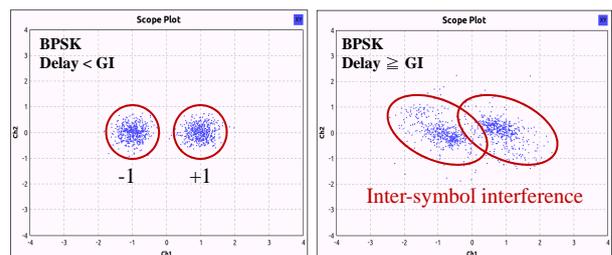


図 7 Delay を変化した際の受信側信号復調スキャター

より、シミュレーション値と実験値が約 1.5[dB] 程ずれているが、大よそ平行に沿っていることが分かる。このことより、OFDM 協調通信モデルによる PDR 特性の評価は妥当であると言える。一般的に、雑音比が大きくなり誤り率が高くなると BER は 0.5 に収束するが、SNR が 5, 6[dB] での “Normal” の実験値は 1 となっており、シミュレーション結果と大幅に異なる。これは、雑音によりプリアンブルによる同期処理が失敗し、パケット自体が破棄されてしまったためだと考えられる。シミュレーションでは同期処理が完全な状況を想定しており、実験値と異なる結果となった。

4.4 OFDM 協調通信方式の特性評価

先述の実験では Delay を固定値とし、中継端末が 2 台であると仮定したが、実際の OFDM 協調通信方式では中継端末が複数存在し、OFDM 信号の到来時間差もまちまちである。そこで、端末数を増加させ、各 OFDM 信号の遅延がランダムであるモデルの特性を評価する。端末数は 1, 2, 5 台とし、各信号の最大遅延サンプルを D_{max} とする。端末数

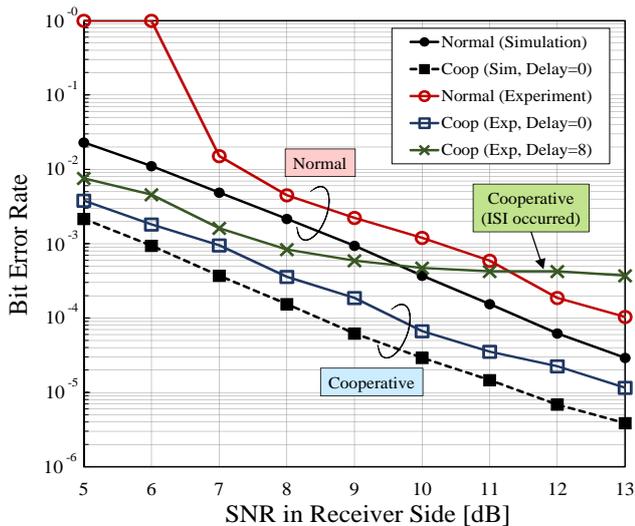


図 8 OFDM 協調通信方式の受信 SNR 対 BER 特性における実験結果とシミュレーションの比較

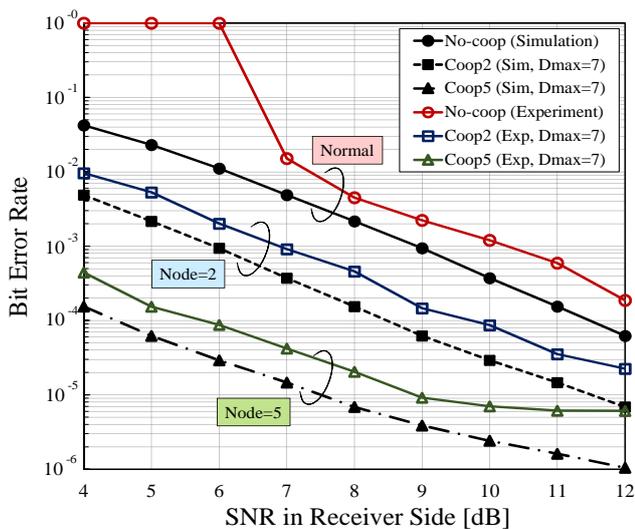


図 9 Delay をランダムに与えた際の受信 SNR 対 BER 特性における実験結果とシミュレーションの比較

5, $D_{max}=7$ は 5 台の中継端末から信号が送られ、各信号の遅延が 0 から 7 サンプルであることを意味する。ランダム遅延はパケットを 1 つ送信するごとに変化する。SNR 対 BER 特性を求め、実験値とシミュレーション値を比較した。

結果を図 9 に示す。協調端末数が増加するに伴い、BER 特性が改善されていることが分かる。実験値とシミュレーション値は約 1.5[dB] の差が出ているが、おおよそ平行となっており、実験値が妥当であると言える。協調端末数

が 5 の時、SNR が 10[dB] 付近からフロアが出ている。今回は SNR を一定にするために、Automatic Gain Control (AGC) を利用しない状況で実験を行った。そのため、到来信号の振幅が大きくなり、受信側でアンプの非線形歪みが生じたためだと考えられる。以上より、端末数が増加しても、各信号の到来時間差が GI 長内であれば、実環境においても受信機は復調可能であり、通信性能の向上が見込めることを示した。

5. まとめ

本稿では、GNU Radio と USRP B200 を用いて、OFDM 協調通信方式のモデルを構築し、実環境での特性評価を行った。結果より、提案方式では端末からの到来時間差が全て GI 長内であれば高精度に復調することができ、通信性能を改善出来ることを示した。今後の課題として、USRP を複数台用いて、より実環境に則したモデルでの評価が必要である。

謝辞 本研究の一部は農林水産省 革新的技術創造促進事業 (異分野融合共同研究)、科研費 (26330103) の助成を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] K. Zeng, Z. Yang and W. Lou, "Location-Aided Opportunistic Forwarding in Multi-rate and Multi-hop Wireless Network," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 6, pp. 3032-3040, July 2009.
- [2] M. Naghshvar, T. Javidi, "Opportunistic Routing with Congestion Diversity in Wireless Multi-hop Networks," in Proc. of the IEEE Conference INFOCOM 2010, November 2010.
- [3] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," Wireless Networks, Vol. 8, pp. 153-167, 2002.
- [4] K. Naito, T. Hagino, K. Mori, and H. Kobayashi, "OFDM cooperative flooding mechanisms for Multi-hop networks," in Proc. of the 9th International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA 2012), July 2012.
- [5] Y. Mukai, K. Naito, K. Mori, H. Kobayashi, "Characterization of the OFDM cooperative communication on the assumption IEEE802.11a," in Proc. of the Seventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2014), Jan 2014.
- [6] IEEE Std.802.11a, "High-speed Physical Layer in the 5GHz Band," 1999.
- [7] E. Blossom, "GNU Radio: Tools for Exploring the Radio Frequency Spectrum," Linux Journal, Vol. 2004, No. 122, June 2004.
- [8] Ettus Research LLC, <http://www.ettus.com/>
- [9] Ettus Research, USRP B200/B210 Bus Series, https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf.
- [10] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer and F. Dressler, "An IEEE 802.11a/g/p OFDM Receiver for GNU Radio," Proceedings of ACM SIGCOMM 2013, 2nd ACM SIGCOMM Workshop of Software Radio Implementation Forum (SRIF 2013), pp. 9-16, August 2013.