情報処理学会論文誌 Vol.54 No.8 2025–2035 (Aug. 2013)

推薦論文

GNU Radioを用いた無線アドホックネットワークにおけるデータ配信手法評価のための省スペース実験環境の構築

金原 辰典[1,†1,a)] 石原 進[1,b)]

受付日 2012年11月30日, 採録日 2013年5月18日

概要：無線ネットワークを対象としたプロトコルの評価ではシミュレーションを用いることが一般的であるが，シミュレーションと実環境の双方で評価を行うことは重要である．本論文では，無線通信環境が劣悪な環境で効果を発揮するプロトコルの実環境評価を低コストで行うことを目的とし，方法の1つとして，GNU Radio と GNU Radio の専用端末 USRP2 を用いて狭いスペースでパケットレベルでのロス率を変更可能な実環境評価が行えるテストベッドを提案する．本テストベッドでは，USRP2 の送信出力を変更するために GNU Radio 内のデジタル増幅器の増幅率を調整することによって USRP2 の無線通信半径を5 m 程度まで制限し，5 m × 5 m の限られたスペースに，エンド間の通信経路にマルチホップによる転送が存在するようなネットワークを構築できる．同テストベッドを用いて期待どおりの実験が行えるかを確認するために，構築したネットワークを用いて，パケットレベルでの Random Network Coding を用いた情報配信手法の実験を行った．同様の環境を想定したパケットレベルのシミュレーションの結果との照合により，実験で得られたパケットロス率に近いパラメータを用いたシミュレーションによって実験と同様の結果を得られることを確認し，提案したテストベッドの利用可能性を示した．

キーワード：無線アドホックネットワーク，GNU Radio，USRP2，RNC，テストベッド，実環境評価

Using GNU Radio for Narrow Space Experiments on Data Distribution in Wireless Ad-hoc Networks

Tatsunori Kimpara[1,†1,a)] Susumu Ishihara[1,b)]

Received: November 30, 2012, Accepted: May 18, 2013

Abstract: To evaluate the performance of protocols on wireless ad-hoc networks, approaches both by simulation and experiment in a real environment are important. In this paper, we propose to use a software-defined radio platform GNU Radio and its dedicated device USRP2s to built a flexible and narrow space wireless network testbed for evaluating protocols designed for use in lossy wireless networks. Our testbed can control USRP2's wireless communication range less than 5 m by adjusting the gain of the digital amplifier in GNU Radio and the analog amplifiers in USRP2 and enables to deploy a multi-hop network in a 5 m × 5 m square. To confirm that the proposed testbed can be used for evaluating packet loss-resistant protocols, we conducted experiments of a data dissemination protocol leveraging random network coding using the testbed. The measurement results were almost the same as the simulation results obtained by a packet-level simulator with the similar values of link packet loss ratio observed in the testbed and showed the potential of the testbed for the use of evaluation of data dissemination protocols for wireless ad hoc networks.

Keywords: wireless ad-hoc networks, GNU Radio, USRP2, RNC, testbed, experiment in real environment

[1] 静岡大学大学院工学研究科
Graduate school of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432–8561, Japan
[†1] 現在，ソフトバンクモバイル株式会社
Presently with SoftBank Mobile Corp.
[a)] para@ishilab.net
[b)] ishihara@sys.eng.shizuoka.ac.jp

本論文の内容は 2011 年 11 月のモバイルコンピューティングとユビキタス通信研究発表会にて報告され，同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である．

© 2013 Information Processing Society of Japan

1. はじめに

無線アドホックネットワークでは，従来の中央制御型のネットワークと異なり，各端末が自律的に動作する分散制御によりインフラに依存しなくてもネットワークが構築できる．無線アドホックネットワークは，軍事用途のほか，センサネットワークへの応用技術や車車間ネットワーク等，民生向けの利用方法が提案されている．そのため，サービス実用化のために無線アドホックネットワーク特有の問題を解決するためのプロトコルの研究が活発に行われている．それらの無線アドホックネットワーク向けのプロトコルの評価は，シミュレーションで行われることが多い．その理由としては，i) 実環境でのプロトコル評価は，金銭的，時間的コストが大きくなるが，シミュレーションではそれらのコストを抑えてプロトコルの評価が行える，ii) 既存のネットワークシミュレータ（[1], [2], [3], [4]）を利用すれば，各層のプロトコルは標準で用意されているため，自身の評価したいプロトコルを実装すれば容易にシミュレーションを実施できる，iii) 現実的に実現困難な条件でも手法の評価が行える，ためである．しかしながら，フェージング，シャドウィング等の実空間における電波伝搬の詳細なモデル化，それにともなうプロトコル動作の再現は容易ではない．また，シミュレータ上で実装したプロトコルと，実環境への実装では必ずしも同じではないため，実機への実装により新たな問題が浮上する可能性がある．したがって，プロトコルの改良，商品化には，実環境による性能評価が欠かせない．

実環境での性能評価を効率的に行うため，多くの無線アドホックネットワークのためのテストベッド構築事例が発表されている（[5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]）．これらのテストベッドは，評価対象となるネットワーク（無線メッシュネットワーク，センサネットワーク，車車間アドホックネットワーク等）に適した形で設計されている．また，1〜数室以上の実験スペースを貸し切って装置を据え置くものが多く，移動端末の移動精度の調整，無線端末の電波強度の調整，実験施設の維持等，多くの労力と金銭的コストがかかる．そこで，筆者らは，エンド間通信において 2〜3 ホップ程度のマルチホップによるデータ転送が行われる小規模な無線マルチホップネットワークを，人的労力，金銭的コストを抑え，できるだけ小さなスペースで行えるテストベッドを提案する．

テストベッドを用いて無線アドホックネットワーク用のプロトコルを評価する際，通信環境等の条件を変化させ，評価対象となるプロトコルごとに適した環境で評価する必要がある．筆者らは，車車間ネットワークにおいて，端末密度が疎で端末間の通信機会が限られている，あるいは端末密度が密で衝突が頻発する等，通信環境が劣悪な環境下でデータを確実に配信するためのプロトコル（以下，耐障害性データ配信プロトコル）の開発を行っている．そのようなプロトコルは，その性質のために，通信状態が良好な環境での評価とともに，そのプロトコルの利点が顕著になる無線通信環境が劣悪な環境での評価が必要である．コストを抑え，小さなスペースでこのような環境でプロトコルの評価を行うためのテストベッドを構築するには，無線通信デバイスの選択が重要である．

無線通信半径が大きい既成デバイスを用いて無線マルチホップを想定した実験を行うと，広い実験スペースが必要となり，同時に実験に必要な人的，時間的コストおよび金銭的コストが増加する．そのため，減衰器を用いる等の手段で送信電波の出力を抑えて無線通信半径を制御する，あるいは無線通信半径の短いデバイスを用いることで各種コストを抑える必要がある．また，通信条件の調整を容易とするために，通信方式，プロトコルを柔軟に設定できることが望ましい．そこで筆者らは，PC ベースのソフトウェア無線開発プラットフォームである GNU Radio [15] を用いてテストベッドを構築した．

ソフトウェア無線（Software-Defined Radio：SDR）は，ハードウェア上で行われていた信号処理をソフトウェアで変更可能とし，ハードウェアに変更を加えることなく無線通信制御方式を切替え可能とする技術である．SDR を用いると，一般的に普及している無線通信端末では変更できない MAC 層や物理層等の改変が同一ハードウェア上で可能である．具体的には，変調方式，シンボルレート，送受信ゲイン，フレームフォーマット，誤り訂正方式，MAC プロトコル等，の変更が可能である．筆者らは，GNU Radio を用いて，通信方式および各種パラメータの調整により，マルチホップ無線通信プロトコルの評価のためにパケットレベルでロス率を変更可能なテストベッドを 5 m × 5 m 程度の小スペース内に構築した．また，パケットロス率が高い環境で通信信頼性を向上させることが可能である Random Network Coding（RNC）[16] を用いたデータ配信プロトコルの性能評価を，テストベッドと簡易的なシミュレータにより行い，両者の結果の照合により，テストベッドによる実験結果の妥当性，ならびに本テストベッドの利用可能性を確認した．

以下 2 章ではアドホックネットワーク関連のテストベッドについて示す．3 章は本論文での GNU Radio を用いたテストベッド構築方針について示す．4 章ではテストベッドの構築と，テストベッドと簡易シミュレーションによる RNC の評価結果について述べ，5 章にて本論文をまとめる．

2. 関連研究

無線メッシュネットワークのプロトコル評価のためのテストベッド構築事例として，UCSB メッシュテストベッド [5]，WING/WORLD [7]，MIT'S Roofnet [8] があげら

© 2013 Information Processing Society of Japan

れる．UCSB メッシュテストベッド [5] は，5 つの教室に合計 30 の端末を配置しており，IEEE802.11a/b/g の通信規格を採用している．このテストベッドは WHYNET（Wireless HYbrid NETwork testbed）プロジェクト [6] と呼ばれる MIMO，MANET，SDR 等の次世代無線技術の開発を想定した大規模ネットワークテストベッドの一部である．WING/WORLD は IEEE802.11 ベースの無線メッシュネットワーク向けのテストベッドである [7]．このテストベッドでは，合計 23 台の端末を 750 m 離れた 2 つの建物内に配置しており，IEEE802.11a/b/g のネットワークカードだけでなく，ソフトウェア無線機 WARP [17] も利用している．MIT's Roofnet [8] では通信規格は IEEE802.11b のみ利用可能だが，およそ 60 km^2 の範囲内に端末が 50 台配置されており，大規模な実験が可能である．

無線センサネットワークのためのテストベッドとして，MoteLab [9]，Kansei [10]，Mobile Emulab [11] がある．MoteLab [9] では 1 室内に 24 の MicaZ mote のセンサノードを配置している．このテストベッドでは Web ブラウザを介して各ノードの設定，センサノードのプログラムの書き換え，ログデータの取得が可能である．Kansei [10] も有名な無線センサネットワーク向けのテストベッドである．Kansei は，96 個のノードが 1 室内に約 14 m × 15 m の範囲で配置されている Stationary Array と，室外の Portable Array が利用可能である．Stationary Array のノードは XSM（Extreme Scale Mote）が用いられている．参加ノードのすべてが制御用の有線で接続されているが，無線通信は IEEE802.11b で行われる．Portable Array のノードも同様に XSM が用いられ，各端末は IEEE802.15.4 で通信を行う．Mobile Emulab [11] は移動無線センサネットワーク向けのテストベッドである．Acroname の移動ロボットには Mica2 mote が搭載されており，IEEE802.11b と 802.15.4 の規格に準拠した無線通信が可能である．このテストベッドは 60 m^2 ほどの大きさの 1 室に配置されている．天井に設置されたカメラで移動ノードを撮影し，IEEE802.11b による通信を用いて移動制御信号を送信している．また，端末間の通信には IEEE802.15.4 を用いている．

VANET 向けのテストベッド構築例としては UCLA の C-VET [12]，Petz らのテストベッド [13] があげられる．C-VET [12] は大学の敷地内の建物に配置された固定端末 6 台と，複数台の車両に搭載された車載端末から構築される．車載端末では IEEE802.11a/b/g/n と，802.11p の通信規格が利用可能である．また，路側機も配置されている．Petz らはミニチュアカーを用いテストベッドを構築している [13]．移動ノードには Segway RMP シリーズを用いており，通信端末として IEEE802.11b/g の通信カードを搭載している．

その他，ORBIT [14] という，400 台の端末が 1 室内に配置されているテストベッドが有名である．各端末は IEEE802.11b/g/b，ZigBee，Bluetooth を用いた通信が可能であり，端末の一部には GNU Radio が用いられている．しかしながら，1 室内に多くの端末が配置されているため，お互いの端末間の干渉を抑えるために無線通信半径の調整等定期的な細かなメンテナンスが必要である．

3. テストベッド設計

3.1 テストベッド構築の目的と設計

本研究の目的は，狭いスペース内に無線マルチホップネットワーク用のテストベッドを低コスト，低労力で作ることである．具体的には，15 m × 15 m 程度のスペースに，2〜3 ホップのマルチホップによるデータ転送経路が存在する無線マルチホップネットワークを構築することを目指す．特に，無線通信の状態が劣悪な環境で効果を発揮するプロトコルを評価することに重点を置き，小スペースであっても通信条件が劣悪な状態を含めることができるようにする．

目標とするテストベッドを構築するには，無線通信デバイスの選択が重要となる．無線通信半径の大きい無線通信デバイスを選択すると，教室や体育館，中庭といった限られた空間で実験環境を構築することは困難であり，より広い実験スペースが必要となってしまう．無線通信半径を小さくするには，減衰器を用いて送信電波の出力を抑える，あるいは最大無線通信出力が小さなデバイスを選択する必要がある．また，無線通信出力が小さいだけでなく，各種信号処理の条件を柔軟に決定できるデバイスを選択したほうがテストベッドの拡張や調整の際に便利である．そこで筆者らは，一般的に普及している Wi-Fi 等の無線通信デバイスではなく，ソフトウェア無線開発ツールキットである GNU Radio を用いてテストベッドを構築した．

3.2 GNU Radio と USRP

GNU Radio は近年注目されている PC ベースのソフトウェア無線開発プラットフォームである [15]．従来のソフトウェア無線機の多くは，MAC 層，物理層の処理を FPGA の構成データとすることでソフトウェア無線を実現していた．FPGA ベースのソフトウェア無線機は比較的高価であり，回路構成データの作成にはハードウェア記述言語の修得が必要である．一方 GNU Radio では，低価格の専用端末上で AD/DA 変換，周波数変換等の限られたアナログ処理を行い，残りのデジタル信号処理を PC 上で行う．PC 上では，C++で記述された各種基本的な信号処理や，高速処理を必要とする処理がモジュールとして用意されており，それらをオブジェクト指向のスクリプト言語 Python あるいは GUI を用いてつなぎ合わせることで無線送受信機を作成可能である．

GNU Radio の専用端末 Universal Software Radio Peripheral（USRP）として，ハードウェアの処理性能が異な

© 2013 Information Processing Society of Japan

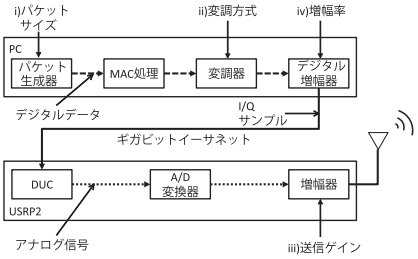


図 1 GNU Radio と USRP2 における基本的なパケット送信フロー
Fig. 1 Basic packet transmission flow with GNU Radio and USRP2.

る複数種類の端末が提供されている．USRP によって PC との接続方法が異なり，USB2.0 またはギガビットイーサネットで接続可能であり，PC と USRP 間で複素信号（I/Q データ）がやりとりされる．これらは，装着するドータボードを変更することにより様々な周波数帯域（50 M〜5.85 GHz）に対応可能である．今回筆者らは，USRP の 1 つである USRP2 と，ドータボードに 2.4〜2.5 GHz と 4.9〜5.85 GHz に対応した XCVR2450 を利用した．

図 1 に GNU Radio と USRP2 を用いた基本的なパケット送信フローを示す．PC 上のソフトウェアでは，送信データをパケット化し，プログラムとして記述された MAC の処理に従って，パケットの送信処理を行う．送信パケットは，バイトストリームとして変調器に入力され，複素信号が出力される．その後，複素信号はデジタル増幅器により増幅された後，ギガビットイーサネットを介して USRP2 へと送られる．USRP2 では PC から送られてきた I/Q データ（各 16 ビット）を受け取り，FPGA 上の DUC（デジタルアップコンバータ）による処理で 100 M サンプル/s の信号に補間する．そして，補間された信号をドーダボード上で D/A 変換し，アナログ回路の増幅器で処理した後，アンテナから無線信号を出力する．

3.3 GNU Radio を用いた無線通信半径調整方法の検討

狭いスペースで，マルチホップ無線通信を行うには，無線通信出力を調整し，できるだけ通信半径を短くする必要がある．特に，15 m × 15 m 程度の領域で 2 ないし 3 ホップの転送経路を構築するには，無線通信半径を 3〜5 m 程度まで制限する必要がある．以下 GNU Radio を用いて無線通信半径を調整する方法に関して検討する．

GNU Radio 等のソフトウェア無線機では多くの無線信号処理をソフトウェア上で変更できる．そのため，Wi-Fi や ZigBee の既成ハードウェア無線機よりも通信出力の設定を柔軟に変更可能である．したがって，減衰器等のハードウェアの追加なしにソフトウェア上での変更のみで，無線通信出力を数 m 程度まで制限することが可能である．図 1 に示すようなパケット送信フローにおいて無線通信半径に影響を与えるパラメータで GNU Radio 上で変更可能なものは，i) パケットサイズ，ii) 変調方式，iii) アナログ回路での送信ゲイン，iv) デジタルアンプでの増幅率（以下増幅率）がある．受信側の変更パラメータとしては，v) アナログ回路での受信ゲインがある．

i) パケットサイズを変更する場合を考える．送信パケットサイズを大きくすることで，パケットレベルでのロス率が増え通信可能距離が小さくなる．しかしながら，利用するアプリケーションによってパケットサイズは異なる．そのため，通信可能距離を変更するためにだけパケットサイズを変更すると，アプリケーションの仕様にも影響を及ぼすため不適切である．

次に，ii) 変調方式の変更を考える．ASK，16 QAM や 64 QAM 等のノイズによる影響を受けやすい変調方式を用いれば通信可能距離を小さくすることは可能である．しかしながら，変調方式はビットレートとノイズ耐性双方に影響を与える．また，送受信端末双方で変調方式を統一しなければ通信が行えないため，細かく通信可能距離を変更することができない．

続いて，iii) アナログ回路での送信ゲイン変更を考える．送信ゲインは，USRP2 上でのアナログ信号増幅器の増幅率である．USRP2 では送信ゲインを 0〜30 dB の範囲内で任意に変更することが可能である．しかしながら，送信ゲインを下げすぎた場合 S/N 比が悪化し，ノイズへの耐性が低くなってしまう．

iv) デジタル増幅器の増幅率の変更を考える．これは，PC から USRP2 に送信される前のデジタル信号増幅器の増幅率である．増幅率を低く設定することで，送信される電力が小さくなるが，小さくしすぎることで受信側の S/N 比が悪化してしまい，ノイズへの耐性が低くなる．

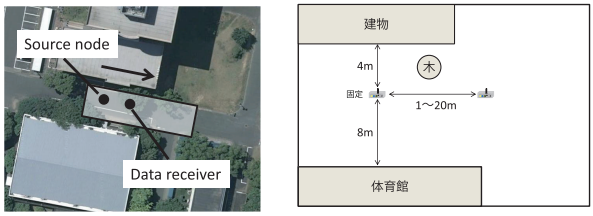
最後に v) 受信ゲインの変更を考える．受信ゲインは，送信ゲインと同様に USRP2 上のアナログ信号増幅器の増幅率である．受信ゲインを小さく設定することで，データの受信成功に必要な受信電力が高くなるため，通信可能距離が小さくなる．USRP2 では受信ゲインを 0〜91 dB の範囲内で任意に変更可能である．しかしながら，受信ゲインの値が極端に大きい，または小さいと，S/N 比が悪化しノイズの影響が増加するため，その設定には注意が必要となる．

以上のパラメータ群より，筆者らは無線通信可能距離を柔軟に調整できることが期待される iii)，iv)，v) の値を変更し，無線通信可能距離を調整することにした．

3.4 無線通信可能距離の測定

限られた実験スペースで無線通信実験を行うための基礎実験として，前節で示した送受信ゲイン，増幅率の値を変更しながら無線通信可能な距離を測定した．通信端末として USRP2 を 2 台使用し，大学内の敷地内の屋外と教室で測定した．屋外，屋内とも，反射波による影響を抑えるため，端末を建物の壁から距離を置いて配置した（**図 2**,

© 2013 Information Processing Society of Japan



(a) 屋外実験風景　(b) 端末の配置

図 2　測定実験における屋外の端末配置図

Fig. 2　Layout of devices in outdoor measurement experiments.

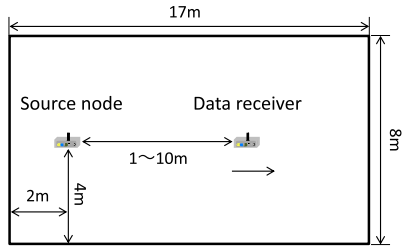
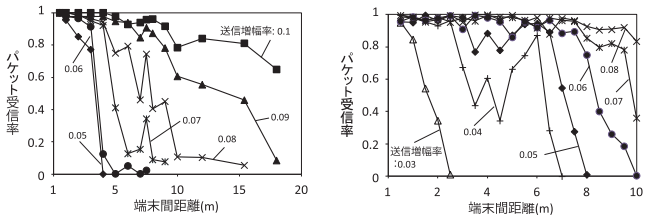


図 3　測定実験における屋内の端末配置図

Fig. 3　Layout of devices in indoor measurement experiments.



(a) 屋外測定結果　(b) 屋内測定結果

図 4　各端末間距離における受信率

Fig. 4　Packet reception ratio vs. distance between devices.

図 3)．ドータボードは周波数 2.4〜2.5 GHz および 4.9〜5.85 GHz 送受信用の XCVR2450 を用い，アンテナは利得 3 dBi の無指向性ラバーダックアンテナを用いた．USRP2 の一方を送信側の端末とし，位置を固定させ，一方を受信側の端末として，受信側の端末を移動させて端末間の距離を変えながら，各距離で 3,000 個のパケットを送信し，パケットの受信率を測定した．

受信率を測定するため，GNU Radio に標準で用意されているパケット送受信プログラム benchmark_rx と benchmark_tx を用いた．これらのプログラムは，MAC 層での処理はなく，パケット生成・送信，パケット受信の動作を繰り返す単純なプログラムであり，CRC32 により受信時のエラー検出が可能となっている．また，オプションとしてビットレート，パケットサイズ，変調方式，送受信ゲイン等の各値を設定することができる．パケットサイズ 1,500 bytes，中心周波数 5.11 GHz，ビットレート 500 Kbps とし，通信の信頼性を高めるために変調方式に DBPSK を用いた．なお，USRP2 を連続稼動していると，中心周波数が数 kHz 単位でずれることがあり，受信率が大きく低下してしまうため，定期的に中心周波数の調整を手動で行った．

まず初めに，アナログ増幅器の送受信ゲインの値を変更することで，通信可能距離を数 m まで小さくできるかを確認するために測定を行った．0〜1 の範囲で変更可能な増幅率を 0.25 に固定し，受信ゲインを 0〜91 dB，送信ゲインを 0〜5 dB で 1 dB ずつ変更し測定した．この結果，受信ゲインが 30 dB と 31 dB，60 dB と 61 dB で大きく受信率が変化した．また，受信ゲインが 30 dB 以下では送信ゲインと端末間距離にかかわらずパケットが受信できなかった．受信ゲインが 31〜60 dB では端末位置を固定させていても，パケットの受信が安定しなかった．一方，受信ゲインが 61 dB 以上，特に 70 dB から 85 dB 付近では安定したパケット受信ができた．また，送信ゲインを 0 dB とし，受信ゲインをパケットが受信可能な最も小さな 31 dB に設定し，端末間距離を変化させて実験を行ったところ，距離 0〜15 m の範囲では約半数以上のパケットを受信できた．つまり，増幅率の値を 0.25 とした場合，無線通信可能な距離を 15 m 以下にすることができなかった．

次に，増幅率を変化させながら測定を行った．増幅率を 0.03〜0.1 の範囲で 0.01 間隔で変化させ，受信ゲインをパケット受信が安定する 75 dB とし，送信ゲインを 0.01 dB に固定した．結果を**図 4** に示す．図 4 (a) は屋外での測定結果である．端末間距離 5〜10 m 付近に注目すると，増幅率 0.08 以下では受信率の減少が大きい．7 m 付近のように局地的に受信率が向上する場所があるが，これはマルチパスフェージングによる影響だと考えられる．増幅率 0.06 に注目すると，端末間距離 5 m ではパケット受信率が 0 となっているが，端末間距離 4 m ではパケット受信率は 0.2，3 m では 0.8 となっている．つまり，無線通信可能な距離を 5 m 程度まで小さくするには，増幅率を 0.06〜0.08 程度に設定すればよいことが分かる．

図 4 (b) に屋内でのパケット受信率を示す．屋内では，端末を壁近くに配置した場合，数 cm ごとにパケットの受信が不可能になる場所が存在して通信が安定しなかったため，図 3 (b) のように端末を教室の中央付近に設置して測定を行った．図 4 (b) を見ると，各増幅率の値において，屋外に比べパケットを受信可能な距離が伸びているのが分かる．また，端末間距離 4〜6 m 付近で，増幅率が 0.04〜0.06 の場合急激に受信率が変化している．これらは，壁や障害物による反射波の影響だと考えられる．増幅率を 0.03 に注目すると，端末間距離 3 m 以上ではパケットを受信できていない．そのため，5 m 程度でパケットを受信できるようにする，すなわち，無線通信可能な距離を 5 m 程度にするには増幅率を 0.04〜0.06 にする必要がある．

4. マルチホップ無線通信プロトコルの実験

提案したテストベッドを用いて耐障害性データ配信プロトコルの実環境評価を狭いスペースで行えるかを確認する

© 2013 Information Processing Society of Japan

ため，パケットロスが発生しやすい環境で高いデータ配信率が期待される Random Network Coding（RNC）について，テストベッドと簡易的なシミュレーションを用いて性能評価を行った．

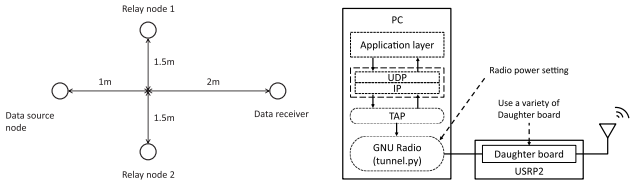
4.1 RNC を用いた情報配信

RNC [16] は，中継端末が受信した複数のパケットに対してそれぞれランダムな係数を選択し，それらを有限体上で線形結合をとって Network Coding（NC）[18] を行う手法であり，多くの利用例が提案されている [19], [20]．RNC では，中継端末は自身が保持している N 個のパケット $X = (x_1, x_2, \cdots, x_N)$ に対して，それぞれの係数となる符号化ベクトル $C = (c_1, c_2, \cdots, c_N)$，$c_i \in GF(2^m)$ を生成し，$GF(2^m)$ 上での線形演算を行い 1 つの符号化パケット $P_{out} = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_Nx_N$ を生成，送信する．受信端末では，符号化ベクトルが線形独立となる符号化パケットを少なくとも N 個保持していれば，元のデータ P を復号できる．1 度のブロードキャストで多数の端末に符号化パケットを送信でき，多くの符号化パケットをネットワークに配布できる場合，RNC ではパケットロスが発生しても他の符号化パケットの受信により欠落したパケットを補完できるという利点がある．

4.2 実験用 RNC データ配信システム

テストベッドを用いた評価対象の耐障害性データ配信プロトコルとして，データ送受信端末間に位置する中継端末がデータの要求・応答パケットを又聞き（overhear）し，RNC を用いてデータパケットを構成してブロードキャストするシステムを実装した．また，RNC を用いない場合との比較のため，中継端末が RNC を用いずにデータパケットを構成して中継するシステムも実装した．

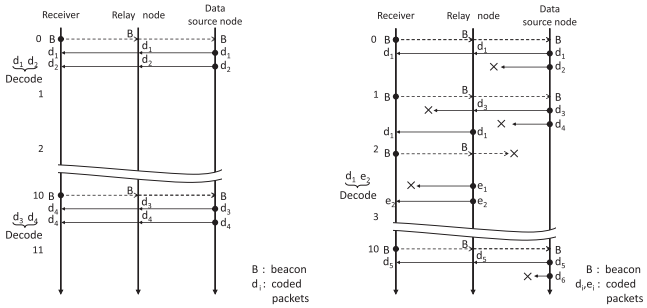
このシステムでは，中継端末は受信したデータを保持しておき，他端末からビーコンを受信した際に保持しているデータを送信する．最大 2 ホップの通信を想定し，データ生成端末，中継端末，受信端末の動作が異なる 3 種類の端末を用意した（**図 5** (a)）．各端末の動作は以下のとおりである．データ生成端末は寿命 10 秒の 2,000 bytes のデータを 10 秒ごとに生成する．また，ビーコンを受信すると，その時点での最新データを 1,000 bytes の 2 つのパケットに分割し，それらを RNC により符号化し，符号化された 2 つのパケットを送信する．中継端末は，データ生成端末の送信データを受信，保持する．中継端末は，ビーコンを受信すると，1 つの符号化パケットを保持していたら保持している 1 つの符号化パケットを送信し，2 つ以上の符号化パケットを保持していたら，保持パケット 2 つを選択して再び RNC で符号化し，生成された 2 つの符号化パケットを送信する．受信端末はビーコンを 1 秒ごとに送信し，2,000 bytes の元のデータを復号できるとビーコン送信を止める．次にデータ生成端末がデータを生成するタイミングになるとビーコン送信を再開する．受信端末は 1 つのデータに対し最大 10 回のビーコン送信しかできない．なお，符号化パケットには係数 C_1，C_2 のための計 2 bytes のデータが付加されている．また，符号化処理では 1 byte 単位で演算を行う．



(a) 端末の配置　(b) システム構成

図 5 実験環境

Fig. 5 Experiment environment.



(a) 通信エラーがない場合　(b) 通信エラーが発生した一例

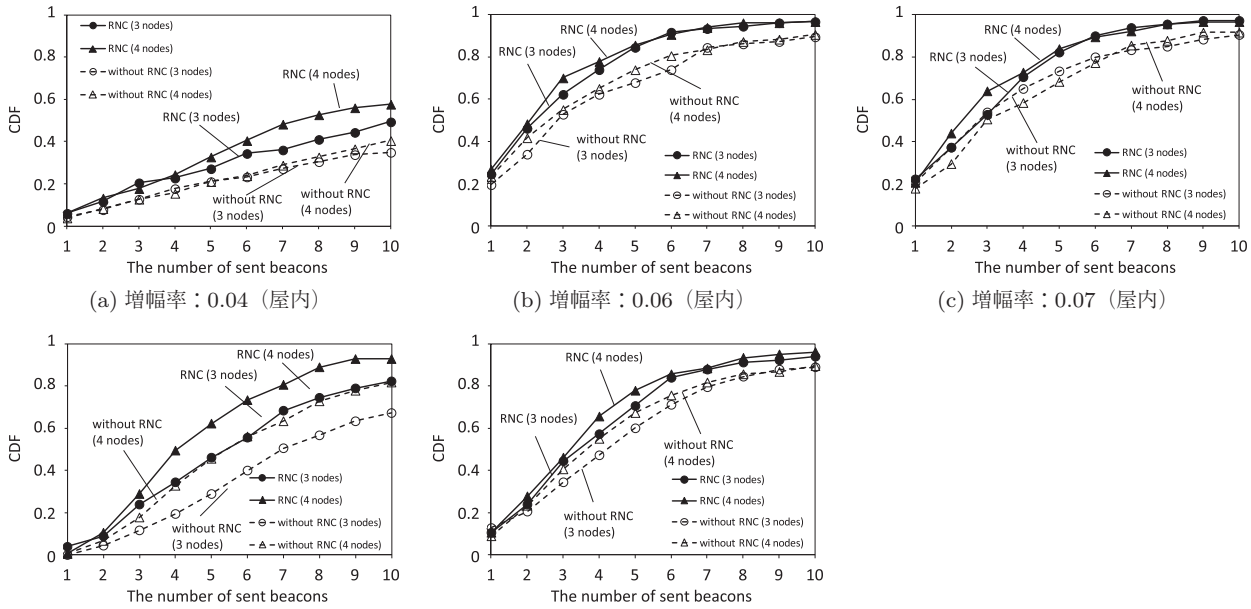
図 6 実験タイムチャート

Fig. 6 Timechart of experiments.

図 6 に実験のタイムチャートを示す．動作が開始されると，データ生成端末はデータを生成し，受信端末はビーコン送信を開始する．図 6 (a) は RNC を用いた場合に通信エラーが起きなかった場合の例である．受信端末が動作開始 0 秒（以下単純に 0 秒と表記）で送信したビーコンに対して，データ生成端末が元のデータを x_1，y_1 と分割し，それを元に生成した符号化パケット d_1，d_2 を送信する．生成端末はこれらを受信し，元のデータを復号し，ビーコン送信を停止する．そして，次にデータ生成端末がデータを生成するタイミングである 10 秒になった時点でビーコン送信を再開する．

図 6 (b) は RNC を用いた場合に通信エラーが発生する場合の例を示す．受信端末が 0 秒に送信したビーコンに対して，データ生成端末が送信した符号化パケット d_2 がどの端末にも届かないとする．受信端末は元のデータを復号できず，1 秒にもう 1 度ビーコンを送信する．1 秒の時点では中継端末とデータ生成端末の両方がデータを保持しているため，両端末はデータを送信する．受信端末は元のデータを復号できず，2 秒に再びビーコンを送信する．その際，中継端末のみビーコンを受信すると，中継端末では新たに符号化パケット e_1，e_2 を生成し，ランダム時間待ちそれを送信する．受信端末では e_2 を受信し，d_1，e_1 より元の

© 2013 Information Processing Society of Japan



(a) 増幅率：0.04（屋内） (b) 増幅率：0.06（屋内） (c) 増幅率：0.07（屋内）

(d) 増幅率：0.07（屋外） (e) 増幅率：0.08（屋外）

図 7 データ受信に必要なビーコン数の分布

Fig. 7 Distribution of the number of beacons needed for receiving data.

データを復号し，ビーコン送信を 10 秒まで停止する．

RNC が用いられない場合は，分割されたパケット（x_1, y_1 等）がそのまま送信される．各端末の動作は前述した RNC を用いた場合と同様であり，受信端末は x，y の 2 種類のパケットを受信すると元のデータを得ることができる．

以上の動作では，10 秒を 1 セットとし，受信端末がデータの復号を成功するまでのビーコン送信回数を計測した．

4.3 テストベッドの構成

測定実験で得られた通信可能距離と増幅率を基に，図 5 (a) のように，データ生成端末から受信端末への 1 ホップのデータ転送，データ生成端末から中継端末，中継端末から受信端末へと 2 ホップによるデータ転送が混在するトポロジとなるよう端末を配置した．屋外では，図 3 (a) の四角内に，屋内では図 3 (b) の中央付近に端末を配置した．各端末には基礎実験と同じドータボードとアンテナを利用した．パラメータは基礎実験と同じ中心周波数 5.11 GHz，ビットレート 500 Kbps，送信ゲイン 0.01 dB，受信ゲイン 75 dB とし，増幅率を屋内では 0.04〜0.07，屋外では 0.06〜0.07 とした．変調方式は DBPSK を用いた．パケットはヘッダ等を含め，1,075 bytes のデータパケットと，75 bytes のビーコンの 2 種類を用いた．データパケット内には，RNC で用いた係数 C が記述されている．RNC を用いない場合は $C = 0$ としている．また，実験に先立って各端末間で時刻の同期を行っている．測定は，中継端末として中継端末 1 のみが動作する全 3 台のネットワーク，中継端末 1 と 2 両方が動作する全 4 台のネットワークそれぞれについて，RNC あり・なしの計 4 パターンを各 180 セット試行した．

図 5 (b) に実験システムのソフトウェア構成を示す．本実験では無線通信を USRP2 を介して行うために TAP を用いた．TAP とは，OS 上のイーサネットデバイスをエミュレートし，データリンク層の動作をユーザプログラムで行うことを可能とする仕組みである．UDP/IP でブロードキャストされたデータは TAP により tunnel.py という GNU Radio のプログラムに渡され，USRP2 から無線信号として送信される．tunnel.py では，前述した benchmark_tx とは異なり，CSMA に基づく MAC 処理を行ったうえでパケット送信が可能である．このプログラムを用いることにより，アプリケーション層で実装した一般的な通信プログラムを用いて GNU Radio と USRP2 による通信が可能となる．

4.4 実験結果

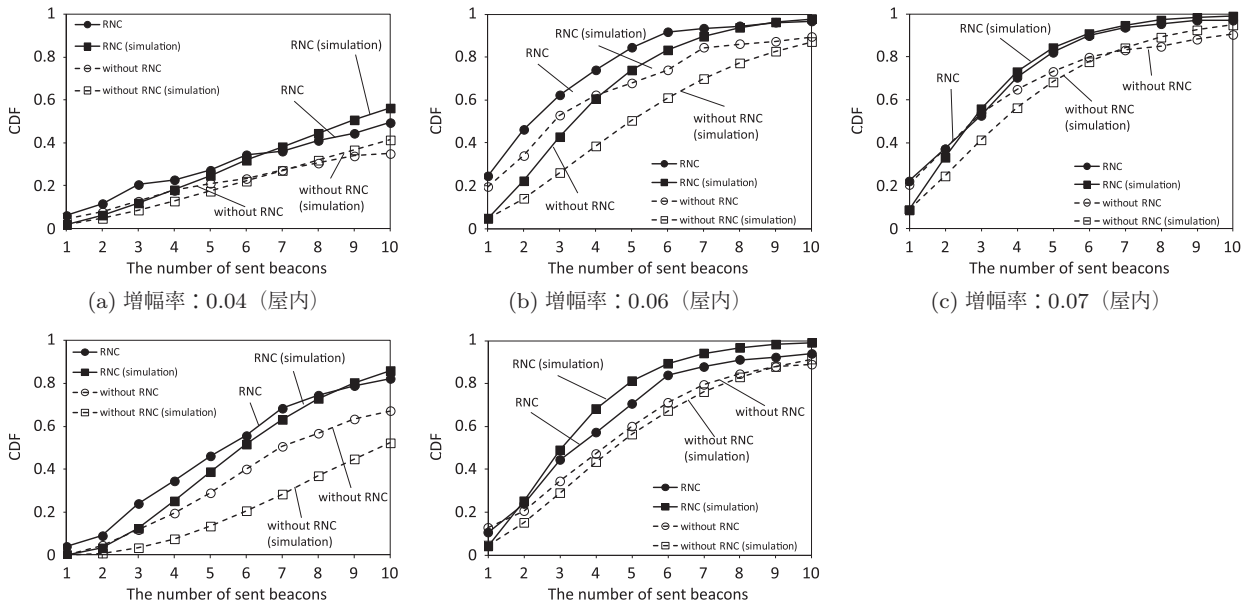
図 7 (a)〜(c) に屋内，(d)，(e) に屋外での実験結果を示す．これらのグラフは，各条件で 180 セットの試行においてデータ受信までに必要としたビーコン送信回数の累積度数分布を示している．ビーコン送信回数 10 回での縦軸の値が最終的なデータ受信率を表している．また，各実験における受信端末と他端末間でのビーコンとデータパケットのロス率を**表 1** に示す．表 1 中の値は，RNC の有無にかかわらず同一の増幅率が利用されたセットにおいて，各端末間での送受信されたパケットから求めたものである．端末間のパケットロス率は約 10〜90%であった．一般的な無線通信では，パケットロスの発生率は数%未満の条件で利用することが普通である[*1]．したがって，提案したテスト

[*1] たとえば無線環境でのパケットロス耐性をうたった TCP-Westwood の評価においても評価対象のリンクパケットロス率は 5%未満である [21].

© 2013 Information Processing Society of Japan

表 1 実験で計測された各端末間におけるパケットロス率
Table 1 Packet loss ratio observed at each wireless links.

		ビーコン			データパケット				
	増幅率	受信–送信	受信–中継 1	受信–中継 2	受信–送信	受信–中継 1	受信–中継 2	送信–中継 1	送信–中継 2
屋内	0.04	57.9%	93.4%	82.9%	78.3%	91.3%	74.1%	64%	73.2%
	0.06	50.2%	36.1%	59.7%	69.0%	68.8%	77.4%	51%	49.2%
	0.07	31.7%	23.2%	20.6%	64.3%	66.7%	84.9%	31.8%	28%
屋外	0.07	48.5%	14.5%	11.5%	92.3%	73.1%	71.7%	51.4%	50%
	0.08	45.4%	15.5%	10.1%	71.5%	69.2%	72.2%	48.7%	51.8%



(a) 増幅率：0.04（屋内） (b) 増幅率：0.06（屋内） (c) 増幅率：0.07（屋内）

(d) 増幅率：0.07（屋外） (e) 増幅率：0.08（屋外）

図 8 シミュレーション結果と実験結果の比較
Fig. 8 Comparison between simulation and experiment results.

ベッドを用いることで，実際の無線ネットワークシステムに対して劣悪な環境を模擬できている．

図 7 において，RNC を用いた場合と用いない場合を比較すると，すべての場合で RNC を用いることでデータ受信率が向上している．また，ビーコン送信回数 10 回目の数値を比較すると，より増幅率が小さいとき（屋内では増幅率が 0.04 の場合，屋外では増幅率が 0.07 の場合）が最も RNC の有無による受信率の差が大きい．表 1 よりこれらの増幅率では屋内屋外それぞれで，他の場合よりパケットロス率が高い．このことより，パケットロス率が高い状態であるほど RNC の効果が高いことが分かる．

4.5 簡易シミュレーション結果と実験結果との比較

テストベッドを用いた実験結果の妥当性を検証するために，実験と同様のデータ配信シナリオでパケットレベルのロス率を考慮した簡易的なシミュレーションを行った．本シミュレーションは，各端末間でのパケットロス率を設定し，それに基づいて受信成功を判定し，受信端末におけるパケット受信成功数を求めるものである．そのため，MAC 層や物理層における処理に関しては考慮していない．

図 8 に中継端末が 1 台のみの場合におけるシミュレーション結果を示す．シミュレーションは，表 1 のパケットロス率を利用し，10,000 セット行った．図 8 より，実験結果とシミュレーション結果に差があることが分かる．特に，屋内の増幅率 0.06（図 8 (b)）と屋外の増幅率 0.07（図 8 (d)）の場合に差が大きいことが分かる．次に，より詳しくシミュレーション結果と実験結果の差を調べるために，受信端末がデータを受信するために送信したビーコン送信回数の分布に対して Smoothed-Difference（S-D）の値 D を求めた．具体的には，受信端末がビーコン送信回数 k 回で受信できた試行の割合について，実験で得たものを E_k，シミュレーションで得たものを S_k とし，$D = \sum_{k=1}^{10} |E_k - S_k|$ $(0 \leq D \leq 10)$ を計算した．D の値を**表 2** に示す．表 2 より，屋内の増幅率が 0.06 では D が約 0.6 で最も大きいことが分かる．

シミュレーションと実験結果の相違の原因について考える．シミュレーションでは，ランダムなパケットロスのみの発生を想定している．一方，テストベッドにおける実験では，通信環境がつねに安定しているとは限らないため，パケットロスの発生頻度に時間軸上でばらつきがあると考

© 2013 Information Processing Society of Japan

えられる．この違いが，シミュレーションと実験結果の相違の原因の 1 つと考えられる．しかしながら，シミュレーションで表 1 と異なるパケットロス率を与えたとき，そのシミュレーション結果と実験結果の差が小さく，さらに，与えたパケットロス率と表 1 の差が小さいならば，我々のテストベッドで得られた結果には妥当性があると考えられる．そこで，各端末間のパケットロス率を総当たり的に変更したうえでシミュレーションを行い，D および各パケットロス率の差が小さくなるような組合せを求めた．

D を探索するための各端末間のパケットロス率の変化範囲を，実験で得たパケットロス率に対して ±15%とし，その範囲内で 1%ずつ変化させながら D を測定した．同時に，パケットロス率の類似性を調べるため，端末間のパケットロス率に対して S-D の値 δ を計算した．具体的には，**表 3** に示すように，実測値のパケットロス率を R_j，シミュレーションでの値を O_j とし，$\delta = \sum_{j=1}^{5} |R_j - O_j|$ $(0 \leq \delta \leq 0.75)$ を計算した．また，総当たり的に D を探索していく際，中継端末台数が 2 台の場合，探索範囲が中継端末台数 1 台のときに比べ大幅に増えるので，ここでは中継端末台数が 1 台の場合のみについて探索した．**図 9** (f) は，各増幅率におけるパケットロスの組合せで得られた δ と D の組みを，D が小さいほうから 200 個プロットしたものである．図 9 (a)〜(e) は，各増幅率ごとに図 9 (f) のプロット中で最も原点に近いときのパケットロス率の組を用いてシミュレーションを行った結果である．表 3 にそのときのパケットロス率を示す．

図 9 (a)〜(e) に注目すると，屋外（図 9 (d)〜(e)）では，屋内（図 9 (a)〜(c)）よりも，シミュレーションと実験結果の差が小さいことが分かる．D の値（表 2）を比べてみると，屋外の方が屋内の結果に比べ D の値が小さくなっている．図 9 (f) を見ると，δ の値にばらつきはあるものの，屋外では δ の値が最小のとき，屋内の場合よりも δ が小さく，屋内環境の方が屋外よりも実験に適していることが分かる．また，屋内の増幅率 0.07 の場合に注目すると，δ の最小値は 0.3 で，各端末間のロス率がシミュレーションと実験で 6%程度ずつずれている．通信環境が悪い状態のネットワークでのパケットロス率の数%程度の差は，パケットロス率がほとんど 0%であるような良好な通信条件の場合と比べると，影響は小さいと考える．屋内で増幅率 0.07 の場合では，各端末間のパケットロス率のずれは平均 6%程度，屋外の増幅率 0.07 では平均 4%程度である．これらのずれの値は，各端末間におけるパケットロス率に対して相対的に小さい値にとどまっている．したがって，テストベッドでの測定結果は妥当なものといえる．このことより，通信条件が劣悪な無線アドホックネットワークにおけるデータ配信手法の定性的評価に対する本テストベッドの利用可能性が示された．

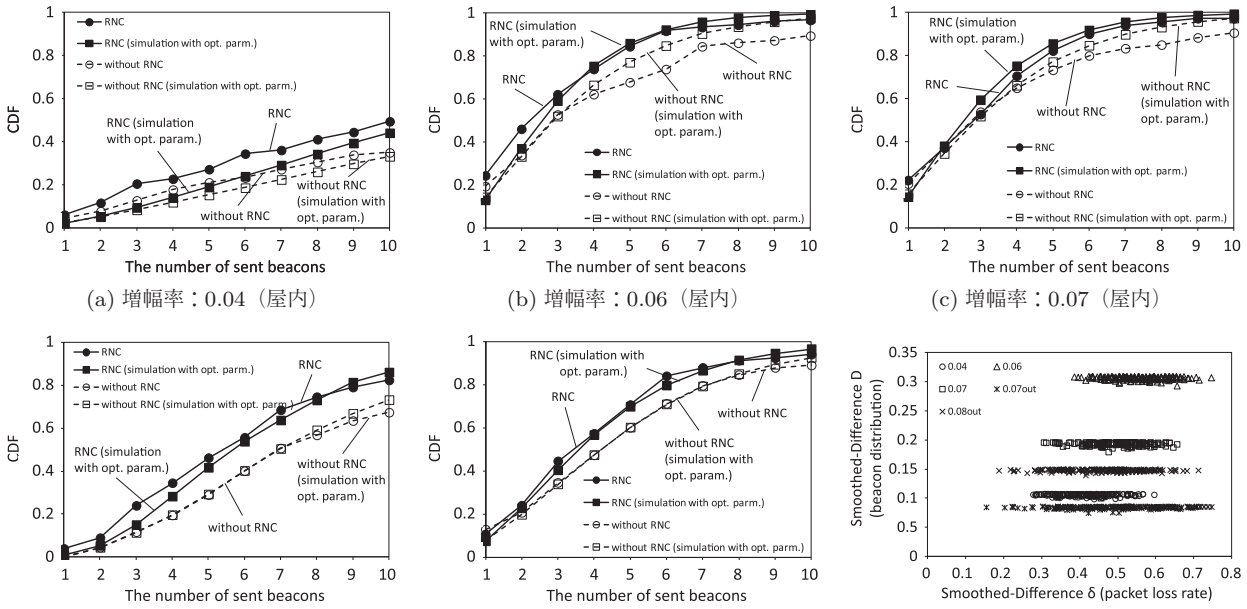
表 2 ビーコン送信回数の分布に対しての S-D
Table 2 S-D of the distribution of the number of beacon transmissions.

		実験と同じパケットロスを用いた場合		パケットロスを変更したシミュレーションの場合	
	増幅率	RNC あり	RNC なし	RNC あり	RNC なし
屋内	0.04	0.242	0.162	0.216	0.101
	0.06	0.491	0.546	0.286	0.293
	0.07	0.343	0.297	0.287	0.189
屋外	0.07	0.294	0.295	0.272	0.085
	0.08	0.324	0.192	0.222	0.144

表 3 シミュレーションで用いたパケットロス率と実験時におけるパケットロス率の差
Table 3 Difference of packet loss ratio between simulation and experiments.

		ビーコン								
		受信–送信			受信–中継 1					
	増幅率	実測値 (R_1)	最適値 (O_1)	差	実測値 (R_2)	最適値 (O_2)	差			
屋内	0.04	57.9%	73.0%	+15.1%	93.4%	99.0%	+5.6%			
	0.06	50.2%	35.0%	−15.2%	36.1%	35.0%	−1.1%			
	0.07	31.7%	40.0%	+8.3%	23.2%	27.0%	+3.8%			
屋外	0.07	48.5%	48.0%	−0.5%	24.5%	24.0%	−0.5%			
	0.08	45.4%	51.0%	+5.6%	15.5%	21.0%	+5.5%			
		データパケット								
		受信–送信			受信–中継 1			送信–中継 1		
	増幅率	実測値 (R_3)	最適値 (O_3)	差	実測値 (R_4)	最適値 (O_4)	差	実測値 (R_5)	最適値 (O_5)	差
屋内	0.04	78.3%	72.0%	−6.3%	91.3%	98.0%	+6.7%	64.0%	63.0%	−1.0%
	0.06	69.0%	55.0%	−14.0%	68.8%	80.0%	+11.2%	51.0%	47.0%	−4.0%
	0.07	64.3%	51.0%	−13.3%	84.9%	82.0%	−2.9%	31.8%	39.0%	+7.2%
屋外	0.07	98.9%	89.0%	−9.9%	73.1%	69.0%	−4.1%	51.4%	51.0%	−0.4%
	0.08	71.5%	61.0%	−10.5%	69.2%	68.0%	−1.2%	48.7%	52.0%	+3.3%

© 2013 Information Processing Society of Japan



(a) 増幅率：0.04（屋内） (b) 増幅率：0.06（屋内） (c) 増幅率：0.07（屋内）

(d) 増幅率：0.07（屋外） (e) 増幅率：0.08（屋外） (f) 様々なパケットロスにおける $\delta - D$ の分布

図 9 パケットロス率を変更して行ったシミュレーション結果と $\delta - D$ の分布図

Fig. 9 Simulation results with modified packet loss ratio and the distribution of $\delta - D$.

5. まとめ

本論文では，無線通信環境が劣悪な環境で効果を発揮する無線アドホックネットワークプロトコルを実環境において低コストで評価するために，PC ベースのソフトウェア無線開発プラットフォーム GNU Radio と専用端末 USRP2 を用いて狭いスペースでパケットレベルでのロス率を変更可能な実環境評価が行えるテストベッドを提案し，耐障害性データ配信プロトコルを対象とした屋内外での実験により，そのテストベッドの利用可能性を示した．テストベッドの構築にあたっては，デジタル増幅器の増幅率，およびアナログ増幅器の送受信ゲインと無線通信可能距離の関係の測定結果を基に端末配置とパラメータ設定を決めた．耐障害性データ配信プロトコルはパケットレベルで動作する RNC を用いたデータ配信手法を用いたものである．本テストベッドでの実験と簡易シミュレーション結果の照合により，テストベッドでの測定結果の妥当性を確認し，通信条件が劣悪な無線アドホックネットワークにおけるデータ配信手法の定性的評価に対する本テストベッドの利用可能性を示した．

広範囲に広がるアドホック無線ネットワークを狭いスペースで評価する場合，元の端末配置をそのまま縮小した配置で実験ができることが理想である．本論文で示すことができたのは，提案テストベッドでパケットロス率に着目して無線アドホックネットワークの実機実験スペースを小さくすることができる可能性であり，上記のような理想的な縮小型の実験の実現性を明らかにするものではない．こうした実験の実現性を検証するには，広範囲のネットワークでの実験結果との照合が必要である．しかしながら，電波信号の減衰，伝搬特性を考慮すると単純な配置の縮小で元の配置と同等の特性を再現する環境の構築は容易ではないと考えられる．特に，端末の移動がともなう場合には，理想とする信号到達範囲に合わせるように動的に電波出力の調整を行う等の工夫が必要と考えられる．

本論文で示したテストベッドは，MAC 層以下の動作を簡略化している．ビットレベルおよびシンボルレベルの誤りに対する対策を持つプロトコルの評価，MAC 層以下のプロトコルの評価に関しては，より詳細な通信条件の確認が必要である．実機を用いた実験では，衝突によるパケットロスやキャプチャ効果の影響が評価に含められることが期待できるが，スペースを縮小した環境でのこれらの影響の検証は重要である．本テストベッドでは電波出力を小さくしているために，干渉や外来ノイズによるリンク品質の低下を招きやすいので，特に同時通信端末数が多い場合の動作に関して検証が必要である．

謝辞 本研究は，科研費基盤研究（B）「リアルタイム画像カーナビのための効率的車々間データ配信技術（課題番号 23300024）」の助成によるものである．また，USRP2 による実験は，静岡大学情報通信研究グループの協力によるものである．ここに記して謝意を示す．

参考文献

[1] QualNet, available from ⟨http://www4.kke.co.jp/network/qualnet/⟩ (accessed 2012-02-08).
[2] ns-2, available from ⟨http://www.isi.edu/nsnam/ns/⟩ (accessed 2012-02-08).

© 2013 Information Processing Society of Japan

[3] SWANS, available from ⟨http://jist.ece.cornell.edu/⟩ (accessed 2012-02-08).
[4] Scenargie, available from ⟨http://www.spacetime-eng.com/jp/index.html⟩ (accessed 2012-02-08).
[5] UCSB meshNet: available from ⟨http://moment.cs.ucsb.edu/meshnet/⟩ (accessed 2012-09-04).
[6] Zhou, J., Ji, Z., Varshney, M., Xu, Z., Yang, Y., Marina, M. and Bagrodia, R.: WHYNET: A hybrid testbed for large-scale, heterogeneous and adaptive wireless networks, *Proc. 1st International Workshop on Wireless Network Testbeds*, pp.111–112 (2006).
[7] Granelli, F., Riggio, R., Rasheed, T. and Miorandi, D.: WING/WORLD: An open experimental toolkit for the design and deployment of IEEE 802.11-based wireless mesh networks testbeds, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol.2010, pp.1–18 (2010).
[8] Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., De Couto, D.S.J. and Morris, R.: MIT roofnet implementation, available from ⟨http://pdos.lcs.mit.edu/roofnet/design/⟩ (accessed 2012-02-08).
[9] Werner-Allen, G., Swieskowski, P. and Welsh, M.: Motelab: A wireless sensor network testbed, *Proc. 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, p.68 (2005).
[10] Ertin, E., Arora, A., Ramnath, R., Naik, V., Bapat, S., Kulathumani, V., Sridharan, M., Zhang, H., Cao, H. and Nesterenko, M.: Kansei: A testbed for sensing at scale, *Proc. 5th Conf. Information Processing in Sensor Networks*, pp.399–406 (2006).
[11] Johnson, D., Stack, T., Fish, R., Flickinger, D.M., Stoller, L., Ricci, R. and Lepreau, J.: Mobile Emulab: A robotic wireless and sensor network testbed, *Proc. IEEE INFOCOM 2006* (2006).
[12] Cesana, M., Fratta, L., Gerla, M., Giordano, E. and Pau, G.: C-VET the UCLA campus vehicular testbed: Integration of VANET and Mesh Networks, *Proc. 2010 European Wireless Conference*, pp.689–695 (2010).
[13] Petz, A., Fok, C.L. and Julien, C.: Experiences using a miniature vehicular network testbed, *Proc. 9th ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking*, pp.21–26 (2012).
[14] Raychaudhuri, D., Seskar, I., Ott, M., Ganu, S., Ramachandran, K., Kremo, H., Siracusa, R., Liu, H. and Singh, M.: Overview of the ORBIT radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Vol.3, pp.1664–1669 (2005).
[15] GNU Radio, available from ⟨http://gnuradio.org/redmine/⟩ (accessed 2012-02-08).
[16] Ho, T., Medard, M., Koetter, R., Karger, D.R., Effros, M., Shi, J. and Leong, B.: A random linear network coding approach to multicast, *IEEE Jounal on Selected Areas in Communications*, Vol.22, pp.107–120 (2004).
[17] Rice University Wireless Open Access Research Platform (WARP), available from ⟨http://warp.rice.edu/⟩ (accessed 2012-02-08).
[18] Ahlswede, R., Cai, N., Li, S.Y.R. and Yeung, R.W.: Network information flow, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.46, No.4, pp.1204–1216 (2000).
[19] Katti, S., Katabi, D., Balakrishnan, H. and Medard, M.: Symbol-level network coding for wireless mesh networks, *Proc. ACM SIGCOMM'08*, pp.401–412 (2008).
[20] Kusumine, N. and Ishihara, S.: R2D2V: RNC based Regional Data Distribution on VANETs, *Proc. IEEE Vehicular Network Conference*, pp.271–278 (2010).
[21] Casetti, C., Gerla, M., Mascolo, S., Sanadidi, M.Y. and Wang, R: TCP Westwood: End-to-End Congestion Control for Wired/Wireless Networks, *Wireless Networks*, Vol.8, pp.467–479 (2002).

推薦文

本論文では，柔軟な通信状態設定が可能な無線アドホックネットワークの実験環境を，省スペースかつ低コストで実現する新たな構築手法を提案している．ソフトウェア無線開発ツールキット GNU Radio を用いる独創的なアプローチに基づく構築手法について，屋内外で構築した実験システムで基礎実験を行い，GNURadio パラメータの設定方法等，実験環境の構築に必要な知見を抽出している．また，同実験システム上で Opportunistic 型のデータ配信に Random Network Coding を組み合わせた手法をシミュレーションし，その有効性を示している点も評価できる．以上の理由により，本論文を推薦論文に推薦する．

（モバイルコンピューティングとユビキタス通信
研究会主査　竹下　敦）



金原 辰典　（学生会員）

平成 22 年静岡大学工学部システム工学科卒業．平成 24 年同大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程修了．同年ソフトバンクモバイル株式会社入社．モバイルアドホックネットワークの分野に興味を持つ．



石原 進　（正会員）

平成 6 年名古屋大学工学部電気工学科卒業．平成 11 年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了．平成 10 年日本学術振興会特別研究員．平成 11 年静岡大学情報学部助手．平成 13 年同大学工学部助教授．現在，静岡大学大学院工学研究科准教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング，モバイルアドホックネットワーク，センサネットワークに関する研究に従事．IEEE，ACM，電子情報通信学会各会員．

© 2013 Information Processing Society of Japan